



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ



ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ
ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ**

ΕΜΒΑΘΥΝΣΗ « ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ »

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**« Εκτίμηση Υδατικού Ισοζυγίου και Προσομοίωση Υπόγειου
Παράκτιου Υδροφορέα Προσχωματικής Λεκάνης Ζεφυριάς
στη Νήσο Μήλο »**



Εκπόνηση: Θεοδορακόπουλος Παναγιώτης
Επιβλέπων Καθηγητής: Μαντόγλου Αριστοτέλης

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2009

**ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΥΠΟΓΕΙΟΥ
ΠΑΡΑΚΤΙΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΠΡΟΣΧΩΜΑΤΙΚΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΖΕΦΥΡΙΑΣ ΣΤΗ
ΝΗΣΟ ΜΗΛΟ**

Πρόλογος

Το θέμα της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας διατυπώθηκε από τον Καθηγητή κ^ο Αριστοτέλη Μαντόγλου και εκπονήθηκε υπό την επίβλεψή του, στα πλαίσια της εμβάθυνσης της Διαχείριση Υδατικών Πόρων του Τομέα Έργων Υποδομής και Αγροτικής Ανάπτυξης της Σχολής Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Θα ήθελα να του εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες για την αμέριστη συμπαράσταση, τη διαρκή καθοδήγηση και στήριξη στα επιμέρους στάδια της εργασίας, ώστε να παρουσιαστεί άρτια, ολοκληρωμένη και γεμάτη χρήσιμα συμπεράσματα για τη βιωσιμότητα του φυσικού συστήματος που εξετάστηκε.

Δράττοντας της ευκαιρίας, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στο Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών και στους ανθρώπους που εργάζονται εκεί για τη βιβλιογραφική και τεχνική υποστήριξη, αλλά κυριότερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Υδρογεωλόγο Γιαννουλόπουλο Παναγιώτη, ο οποίος συνέβαλε πάρα πολύ στην εκπόνηση της εργασίας με τη συνεχή καθοδήγηση, τις συμβουλές και τη βιβλιογραφική υποστήριξη που παρείχε. Στον Επίκουρο Καθηγητή κ^ο Ναλπάντη Ιωάννη για τις χρήσιμες συμβουλές και την καθοδήγησή του για την εφαρμογή των μεθόδων Penmann και Penmann – Monteith. Επίσης στους Υποψήφιους Διδάκτορες Κοψιαύτη Γιώργο και Χριστέλλη Βασίλη για την υπομονή και τη διάθεση που επέδειξαν, το χρόνο που αφιέρωσαν καθώς και τη σημαντική βοήθεια που προσέφεραν μέσω των γνώσεων και των συμβουλών τους στα διάφορα λογισμικά προγράμματα και τις υδρολογικές έννοιες, δίνοντας μου τη δυνατότητα κατανόησης και αφομοίωσής τους. Στον Υποψήφιο Διδάκτορα Γιώργο Κουράκο για την παραχώρηση του προγράμματος Water Balance που ο ίδιος δημιούργησε σε περιβάλλον MatLab, τις συμβουλές του στα στάδια προσομοίωσης του υδροφορέα και γενικότερα την ηθική στήριξη που παρείχε σε όλη τη φάση της εκπόνησης της εργασίας. Στον Υποψήφιο Διδάκτορα Τίγκα Δημήτρη για τις συμβουλές του στην εφαρμογή της μεθόδου Penmann Στην κ^α Κούζα Μαρία για τη σημαντική βοήθεια που παρείχε στη συλλογή των απαραίτητων μετεωρολογικών στοιχείων από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία. Στους υπεύθυνους λογισμικού της ερευνητικής ομάδας 'ITIA' του

Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., Δρ. Διπλωματούχο Μηχανικό Πληροφορικής Καραβοκυρό Γεώργιο και Αγρονόμο Τοπογράφο Μηχανικό κ^ο Κοζάνη Στέφανο για την παραχώρηση της τελευταίας έκδοσης του λογισμικού “Υδρογνώμων” και το άμεσο ενδιαφέρον που έδειξαν για την εξυπηρέτησή μου. Στους Διπλωματούχους Ε.Μ.Π. και φίλους, Κουσταλούπη Σπύρο και Νικολή Ρεβέκκα για τη συμπαράσταση και την υποστήριξη στα πρώτα στάδια της Διπλωματικής Εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους Βασίλη, Χρήστο και Κώστα, για την ηθική υποστήριξη και την έμπρακτη βοήθεια όπου αυτή χρειάστηκε για την εκπόνηση της εργασίας, αλλά κυρίως γιατί μετά από τόσα χρόνια κοινής πορείας, και παρόμοιων εμπειριών εξακολουθούν να είναι δίπλα μου, ο κάθε ένας με το δικό του τρόπο.

Κλείνοντας, θα ήθελα ιδιαίτερα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Ηλία και Αφροδίτη και τον αδελφό μου Χρήστο, για την ηθική συμπαράσταση καθ’ όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας, και τη Βάσω για την απεριόριστη στήριξη και υπομονή που έδειξε όλο αυτόν τον καιρό και μέσα από τον πολυετή κύκλο σπουδών μου, που κλείνει αισίως με την παρουσίαση της παρούσας εργασίας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1	Γενικές Αρχές Διαχείρισης Υδατικών Πόρων	1
1.2	Υπόγεια Νερά και Υδροφορείς	3
1.3	Περιοχή Μελέτης	3
1.4	Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας.....	4
1.5	Φάσεις της Διπλωματικής Εργασίας.....	4
1.5.1	Καθορισμός του αντικειμένου	4
1.5.2	Συλλογή στοιχείων	5
1.5.3	Επεξεργασία στοιχείων	5
1.5.4	Αξιολόγηση αποτελεσμάτων – Συμπεράσματα – Προτάσεις	5
2.	ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΝΗΣΟΥ ΜΗΛΟΥ	7
2.1	Γεωγραφία της Νήσου	7
2.2	Ιστορικά Στοιχεία	8
2.3	Αρχαιολογικά Ευρήματα.....	11
2.3.1	Αφροδίτη της Μήλου	11
2.3.2	Οι κατακόμβες της Μήλου.....	12
2.4	Διοικητική Διαίρεση	13
2.5	Ανθρωπογενή Στοιχεία.....	15
2.5.1	Πληθυσμιακά στοιχεία	15
2.5.2	Παραγωγικοί τομείς	18
2.6	Κλίμα – Έδαφος	20
2.7	Ορυκτός Πλούτος.....	22
3.	ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΚΑΙ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΝΗΣΟΥ ΜΗΛΟΥ.....	24
3.1	Γενικά.....	24
3.2	Γεωλογικές Συνθήκες.....	27
3.2.1	Τεταρτογενές.....	27
3.2.2	Νεογενές.....	28
3.2.3.1	Ανώτερο Πλειόκαινο.....	28
3.2.3.2	Ανώτερο Μειόκαινο – Κατώτερο Πλειόκαινο.....	29
3.2.3	Μεσοζωικό	29
3.3	Υδρολιθοστρωματογραφία.....	29
3.3.1	Υδροπερατοί έως ημιπερατοί σχηματισμοί.....	29
3.3.2	Πρακτικά αδιαπέρατοι σχηματισμοί	30
3.4	Τεκτονική	31
3.5	Υδροφόροι Σχηματισμοί της Νήσου Μήλου	32
4.	ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΙΑ ΤΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ.....	35
4.1	Γενικές Αρχές – Ορισμός Υδροφορέα.....	35
4.2	Πιεζομετρία Υδροφορέα	36
4.3	Πιεζομετρικοί Χάρτες	37
4.4	Πλευρική Οριοθέτηση Υδροφορέα.....	38
4.4.1	Βάσει φυσικών ορίων.....	39
4.4.2	Βάσει υδραυλικών ορίων	39
4.5	Κατακόρυφη Οριοθέτηση Υδροφορέα	40
4.6	Πιεζομετρία του Υδροφορέα στην Περιοχή Μελέτης	41
5.	ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ	47
5.1	Γενικά.....	47
5.2	Βασικές Συνιστώσες Υδατικού Ισοζυγίου	49

5.2.1	Βροχόπτωση.....	50
5.2.2	Εξατμισοδιαπνοή.....	52
5.2.3	Μέθοδοι εκτίμησης της εξατμισοδιαπνοής.....	53
5.2.3.1	Γενικά.....	53
5.2.3.2	Μέθοδοι συνδυασμού.....	54
5.2.3.3	Εμπειρικές μέθοδοι.....	58
5.2.4	Απορροή.....	61
5.2.5	Διήθηση - Κατεΐσδυση.....	62
5.2.6	Μέθοδοι προσδιορισμού της κατεΐσδυσης.....	64
5.2.6.1	Η μέθοδος Thornthwaite – Mather.....	65
5.2.7	Υπολογισμός δυνητικής εξατμισοδιαπνοής στον υδροφορέα της Μήλου με χρήση εμπειρικών μεθόδων.....	67
5.2.8	Υπολογισμός δυνητικής εξατμισοδιαπνοής στον υδροφορέα της Μήλου με χρήση μεθόδων συνδυασμού.....	87
5.2.9	Σύγκριση αποτελεσμάτων υπολογισμού δυνητικής εξατμισοδιαπνοής	97
5.2.10	Υπολογισμός κατεΐσδυσης.....	99
6.	ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ	107
6.1	Γενικά.....	107
6.2	Το μοντέλο CLASS.....	107
6.2.1	Γενικά.....	107
5.2.2	Το εργαλείο CLASS Unsaturated Moisture Movement Model U3M-1D	108
6.3	Εφαρμογή του CLASS U3M-1D.....	110
6.3.1	Στάδια της εφαρμογής.....	110
6.3.2	Καθορισμός παραμέτρων.....	111
6.3.2.1	Παράμετροι για τη διάκριση του εδαφικού προφίλ.....	111
6.3.2.2	Κλιματικά δεδομένα και δεδομένα εδαφικής χρήσης.....	113
6.3.2.3	Υδραυλικές ιδιότητες εδάφους.....	115
6.3.2.4	Παράμετροι συνδεδεμένοι με το χρονικό βήμα.....	117
6.3.2.5	Παράμετροι συνδεδεμένοι με την κατανομή του ριζοστρώματος και την εδαφική εξάτμιση.....	118
6.3.3	Εκτέλεση προγράμματος – Αποτελέσματα.....	119
6.4	Συμπεράσματα.....	129
7.	ΠΑΡΑΚΤΙΟΙ ΥΔΡΟΦΟΡΕΙΣ	132
7.1	Γενικά.....	132
7.2	Υφαλμύρωση Παράκτιων Υδροφορέων.....	133
7.2.1	Γενικά.....	133
7.2.2	Αίτια της υφαλμύρωσης.....	135
7.2.3	Επιπτώσεις της υφαλμύρωσης.....	136
7.3	Τρόποι προσομοίωσης διεπιφάνειας αλμυρού – γλυκού νερού.....	137
7.3.1	Η προσέγγιση Ghyben – Herzberg.....	139
7.3.2	Ανάλυση κατά Strack.....	141
7.3.3	Το μοντέλο Mantoglou et al (2004).....	144
8.	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	149
8.1	Γενικά.....	149
8.2	Ο Κώδικας Modflow.....	149
8.3	Εφαρμογή Μοντέλου Mantoglou et al (2004) στον Παράκτιο Υδροφορέα της Νήσου Μήλου.....	155

8.3.1	Γενικά.....	155
8.3.2	Οριοθέτηση υδροφορέα	155
8.3.3	Προσδιορισμός της γεωμετρίας του μοντέλου.....	155
8.3.4	Οριακές συνθήκες (Boundary Conditions)	162
8.3.5	Εισαγωγή παραμέτρων.....	165
8.3.6	Αρχικές συνθήκες (Initial conditions).....	168
8.3.7	Εκτέλεση (Run).....	169
8.3.8	Εξαγόμενα προσομοίωσης	169
8.3.9	Εισαγωγή φρεάτων άντλησης	172
8.4	Εκτίμηση Αναγκών σε Νερό.....	182
9.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	187
9.1	Συνοπτικά.....	187
9.2	Συμπεράσματα	189
9.2.1	Συμπεράσματα από την πιεζομετρία του υδροφορέα	189
9.2.2	Συμπεράσματα από την εκτίμηση του υδατικού ισοζυγίου	189
9.2.3	Συμπεράσματα από την προσομοίωση του υδροφόρου σχηματισμού 192	
9.3	Προτάσεις – Μέτρα Προστασίας.....	194
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ		199
Π.1	Υπολογισμός Δυνητικής Εξατμισοδιαπνοής με τη Μέθοδο Penmann	199
Π.2	Υπολογισμός Δυνητικής Εξατμισοδιαπνοής με τη Μέθοδο Penmann – Monteith	204
Π.3	Εργαστηριακοί Τρόποι Υπολογισμού Υδραυλικής Αγωγιμότητας	207
Βιβλιογραφία.....		209
Διαδικτυακές Πηγές		213

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1:	Πληθυσμός ν. Μήλου ανά Δ.Δ. (Ε.Σ.Υ.Ε. 2001)	14
Πίνακας 2.2:	Μόνιμος πληθυσμός, δήμοι, κοινότητες, δημοτικά και κοινοτικά διαμερίσματα και οικισμοί Ν. Θήρας (ΕΣΥΕ, 2001).....	16
Πίνακας 2.3:	Οικονομικά ενεργός και μη ενεργός πληθυσμός ν. Μήλου ανά ηλικία	19
Πίνακας 4.1:	Θέση, χρήση και μέση στάθμη φρεάτων και γεωτρήσεων στον υδροφορέα.....	41
Πίνακας 4.2:	Μέσο υδραυλικό φορτίο γεωτρήσεων και φρεάτων	43
Πίνακας 5.1:	Σχηματική απεικόνιση υδατικού ισοζυγίου.....	49
Πίνακας 5.2:	Μηνιαίες τιμές βροχόπτωσης για τα έτη 1955 – 2004 σε mm για τη νήσο Μήλο (Στοιχεία Ε.Μ.Υ.)	71
Πίνακας 5.3:	Μέση μηνιαία βροχόπτωση για τα έτη 1955 – 2004 σε mm για τη νήσο Μήλο (Στοιχεία Ε.Μ.Υ.)	72
Πίνακας 5.4:	Ετήσιες τιμές βροχόπτωσης σε mm για τη νήσο Μήλο (Στοιχεία Ε.Μ.Υ.).....	74
Πίνακας 5.5:	Μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες της νήσου Μήλου για τα έτη 1955 – 2003 σε °C (Στοιχεία Ε.Μ.Υ.).....	74
Πίνακας 5.6:	Μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες (°C) της νήσου Μήλου για τα έτη 1955 – 2003 (Στοιχεία Ε.Μ.Υ.).....	77

Πίνακας 5.7: Μέση ετήσια θερμοκρασία (°C) για την περίοδο 1955 – 2003 (Στοιχεία E.M.Y.).....	78
Πίνακας 5.8: Μέση μηνιαία εξατμισοδιαπνοή σε mm νήσου Μήλου για τα έτη 1955 – 2003 κατά Thornthwaite	81
Πίνακας 5.9: Μέση ετήσια εξατμισοδιαπνοή (mm) νήσου Μήλου κατά Thornthwaite	83
Πίνακας 5.10: Μέση μηνιαία εξατμισοδιαπνοή σε mm νήσου Μήλου για τα έτη 1955 – 2003 κατά Hargreaves.....	85
Πίνακας 5.11: Μέση ετήσια εξατμισοδιαπνοή (mm) νήσου Μήλου κατά Hargreaves	87
Πίνακας 5.12: Μέση μηνιαία τιμή δυνητικής εξατμισοδιαπνοής κατά Penmann	90
Πίνακας 5.13: Μηνιαίες τιμές δυνητικής εξατμισοδιαπνοής για τα έτη 1973 – 2003 κατά Penmann	91
Πίνακας 5.14: Ετήσια και μέση υπερετήσια τιμή δυνητικής εξατμισοδιαπνοής κατά Penmann.....	92
Πίνακας 5.15: Μέση μηνιαία δυνητική εξατμισοδιαπνοή (mm) κατά Penmann - Monteith.....	94
Πίνακας 5.16: Μηνιαίες τιμές δυνητικής εξατμισοδιαπνοής κατά Penmann - Monteith	95
Πίνακας 5.17: Ετήσια και μέση υπερετήσια τιμή δυνητικής εξατμισοδιαπνοής κατά Penmann - Monteith	97
Πίνακας 5.18: Συγκριτικός πίνακας ετήσιας και μέσης υπερετήσιας δυνητικής εξατμισοδιαπνοής.....	98
Πίνακας 5.19: Δεδομένα εισαγωγής για τον υπολογισμό του υδατικού ισοζυγίου ..	101
Πίνακας 5.20: Εξαγόμενες τιμές παραμέτρων για τον υπολογισμό του υδατικού ισοζυγίου	102
Πίνακας 5.21: Δεδομένα εισαγωγής για τον υπολογισμό του υδατικού ισοζυγίου ..	103
Πίνακας 5.22: Εξαγόμενες τιμές παραμέτρων για τον υπολογισμό του υδατικού ισοζυγίου	103
Πίνακας 6.1: Ετήσια κατείδυση για τύπο εδάφους sandy loam σε (mm)	
Πίνακας 6.2: Ετήσια κατείδυση για τύπο εδάφους sandy clay loam σε (mm)	125
Πίνακας 6.3: Μέση ετήσια πραγματική εξατμισοδιαπνοή τύπο εδάφους Sandy Clay Loam (mm)	
Πίνακας 6.4: Μέση ετήσια πραγματική εξατμισοδιαπνοή για τύπο εδάφους Sandy Loam (mm).....	128
Πίνακας 6.5: Μέση ετήσια πραγματική εξατμισοδιαπνοή για τύπο εδάφους Silty Clay Loam (mm)	
Πίνακας 6.6: Μέση ετήσια πραγματική εξατμισοδιαπνοή για τύπο εδάφους Silty Loam (mm).....	129
Πίνακας 9.1: Ετήσιες ανάγκες σε νερό ανά κατηγορία για τη νήσο Μήλο (Στοιχεία από μελέτη Κ/Ξ Υδατοσυστημάτων Αιγαίου – Ι.Γ.Μ.Ε.)	182
Πίνακας 9.2: Διαθέσιμα δεδομένα απολήψεων έργων υδροδότησης, κατανάλωσης ύδρευσης και μεταφερόμενων ποσοτήτων (Στοιχεία από μελέτη Κ/Ξ Υδατοσυστημάτων Αιγαίου – Ι.Γ.Μ.Ε.)	183
Πίνακας 9.3: Μεταφερόμενες ποσότητες ύδατος σε m ³ στη νήσο Μήλο για τα έτη 2001 – 2005 (Στοιχεία από μελέτη Κ/Ξ Υδατοσυστημάτων Αιγαίου – Ι.Γ.Μ.Ε.) ...	184
Πίνακας Π.1: Υπολογισμός δυνητικής εξατμισοδιαπνοής με τη μέθοδο Penmann για το μήνα Οκτώβριο του έτους 1973	203

Πίνακας Π.2: Υπολογισμός δυνητικής εξατμισοδιαπνοής με τη μέθοδο Penmann – Monteith για το μήνα Οκτώβριο του έτους 1973.....	206
Πίνακας 3: Χαρακτηρισμός τιμών υδραυλικής αγωγιμότητας (Terzaghi & Peck - 1967).....	208

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1: Περιοχή μελέτης (Ανάγλυφος χάρτης – Πηγή Google Maps)	4
Εικόνα 2.1: Η νήσος Μήλος όπως φαίνεται από δορυφόρο	8
Εικόνα 2.2: Η Αφροδίτη της Μήλου.....	6
Εικόνα 2.3: Διοικητική διαίρεση νήσου Μήλου	9
Εικόνα 2.4: Ηφαιστειακός σχηματισμός στην παραλία του Σαρακίνικου.....	21
Εικόνα 3.1: Γεωλογικός χάρτης νήσου Μήλου (Στοιχεία Ι.Γ.Μ.Ε.).....	31
Εικόνα 3.2: Όρια υπόγειου και παράκτιου υδροφορέα προσχωματικής λεκάνης Ζεφυρίας στη νήσο Μήλο (Στοιχεία Ι.Γ.Μ.Ε.)	33
Εικόνα 4.1: Κατανομή γεωτρήσεων στον υπόγειο υδροφορέα της προσχωματικής λεκάνης Ζεφυρίας στη ν. Μήλο	42
Εικόνα 4.2: Ισοσταθμικές καμπύλες υπόγειου υδροφορέα προσχωματικής λεκάνης Ζεφυρίας.....	44
Εικόνα 5.1: Ο υδρολογικός κύκλος.....	47
Εικόνα 5.2: Σχηματική αναπαράσταση συνιστωσών υδατικού ισοζυγίου με τη μέθοδο Thornthwaite – Mather με δεδομένα δυνητικής εξατμισοδιαπνοής κατά Thornthwaite	101
Εικόνα 5.3: Σχηματική αναπαράσταση συνιστωσών υδατικού ισοζυγίου με τη μέθοδο Thornthwaite – Mather με δεδομένα δυνητικής εξατμισοδιαπνοής κατά Hargreaves	104
Εικόνα 6.1: Διακριτοποίηση εδαφικών στρώσεων του υδροφορέα.....	112
Εικόνα 6.2: Αποτελέσματα διακριτοποίησης εδαφικών στρώσεων υδροφορέα.....	112
Εικόνα 6.3: Σχηματική αναπαράσταση της διακριτοποίησης των εδαφικών στρώσεων του υδροφορέα	113
Εικόνα 6.4: Ορισμός παραμέτρων κλίματος και εδαφικής χρήσης – Μέσος μηνιαίος δείκτης επιφάνειας φυλλώματος	114
Εικόνα 6.5: Καθορισμός υδραυλικών ιδιοτήτων του εδάφους.....	116
Εικόνα 6.6: Καθορισμός παραμέτρων χρονικού βήματος	117
Εικόνα 6.7: Κατανομή ριζοστρώματος και πυκνότητας ριζών.....	118
Εικόνα 6.8: Εδαφική εξάτμιση κατ’ αντιστοιχία με τις εδαφικές στρώσεις.....	119
Εικόνα 6.9: Χρονική μεταβολή της εδαφικής υγρασίας (σε mm) για το πρώτο εδαφικό επίπεδο	120
Εικόνα 6.10: Διάγραμμα δυνητικής διαπνοής (Etu) σε mm	121
Εικόνα 6.11: Διάγραμμα δυνητικής εξάτμισης (Etg) σε mm.....	121
Εικόνα 6.12: Περίσσεια εδαφικής υγρασίας (σε mm) ανά εδαφική στρώση	122
Εικόνα 7.1: Υφαλμύρωση παράκτιου υδροφορέα	134
Εικόνα 7.2: Ζώνη διεπιφάνειες αλμυρού – γλυκού νερού σε (α) ελεύθερο και (β) υπό πίεση υδροφόρο στρώμα	138
Εικόνα 7.3: Προσέγγιση Ghyben – Herzberg	139
Εικόνα 7.4: Ζώνες φρεάτιου υδροφορέα, όπως αυτές χωρίζονται από τη διεπιφάνεια αλμυρού και γλυκού νερού.	141

Εικόνα 7.5: Φάσεις της διεπιφάνειας γλυκού – αλμυρού νερού σε υδροφορέα	143
Εικόνα 8.1: Διακριτοποίηση υποθετικού υδροφορέα (McDonald & Harbaugh, 1988, “A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground Water Flow Model”, USGS)	151
Εικόνα 8.2: Κόμβοι σε σχηματισμό στο κέντρο του κελιού (McDonald & Harbaugh, 1988, “A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground Water Flow Model”, USGS)	152
Εικόνα 8.3: Κόμβοι σε σχηματισμό με κέντρο το σημείο (McDonald & Harbaugh, 1988, “A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground Water Flow Model”, USGS)	153
Εικόνα 8.4: Ορισμός διαστάσεων κανάβου (Mesh Grid)	157
Εικόνα 8.5: Σύστημα και ορισμός συντεταγμένων του κανάβου	158
Εικόνα 8.6: Εισαγωγή περιγράμματος υδροφορέα στο περιβάλλον του PMWINPro	159
Εικόνα 8.7: Προσδιορισμός τύπου υδροφορέα.....	160
Εικόνα 8.8: Ορισμός τιμής οροφής του υδροφορέα σε όλα τα κελιά	161
Εικόνα 8.9: Ορισμός τιμής βάσης του υδροφορέα σε όλα τα κελιά	162
Εικόνα 8.10: Οριακές συνθήκες υδροφορέα. Με μπλε απεικονίζονται τα κελιά σταθερού	164
Εικόνα 8.11: Ορισμός χρονικού βήματος σε συνθήκες μόνιμης ροής.....	165
Εικόνα 8.12: Ορισμός τιμής της οριζόντιας υδραυλικής αγωγιμότητας.....	166
Εικόνα 8.13: Ορισμός τιμής για το ενεργό πορώδες.....	167
Εικόνα 8.14: Εισαγωγή τροφοδοσίας υδροφορέα.....	168
Εικόνα 8.15: Ορισμός της τιμής του δυναμικού	168
Εικόνα 8.16: Θέση αλάτινης σφήνας σε κατάσταση ισορροπίας στον υδροφορέα..	171
Εικόνα 8.17: Ισοδυναμικές καμπύλες μετά την προσομοίωση χωρίς δεδομένα αντλήσεων	172
Εικόνα 8.18: Εισαγωγή παροχών άντλησης.....	173
Εικόνα 8.19: Ισοδυναμικές καμπύλες μετά την προσομοίωση με παροχές αντλήσεων	174
Εικόνα 8.20: Θέση αλάτινης σφήνας μετά την προσομοίωση με παροχές αντλήσεων	175
Εικόνα 8.21: Τρισδιάστατη απεικόνιση τιμών υδραυλικού φορτίου h_f σε όλη την έκταση του υδροφορέα μελέτης (Σενάριο 1).....	175
Εικόνα 8.22: Δισδιάστατη απεικόνιση τιμών υδραυλικού φορτίου h_f σε όλη την έκταση του υδροφορέα μελέτης (Σενάριο 1)	175
Εικόνα 8.23: Ισοδυναμικές γραμμές για τιμή κατείσδυσης $0,0002\text{m}^3/\text{day}$ και παροχής άντλησης $55\text{m}^3/\text{day}$ για κάθε φρεάτιο άντλησης	178
Εικόνα 8.24: Θέση αλάτινης σφήνας για τιμή κατείσδυσης $0,0002\text{m}^3/\text{day}$ και παροχής άντλησης $55\text{m}^3/\text{day}$ για κάθε φρεάτιο άντλησης	179
Εικόνα 8.25: Τρισδιάστατη απεικόνιση τιμών υδραυλικού φορτίου h_f σε όλη την έκταση του υδροφορέα μελέτης (Σενάριο 2).....	178
Εικόνα 8.26: Δισδιάστατη απεικόνιση τιμών υδραυλικού φορτίου h_f σε όλη την έκταση του υδροφορέα μελέτης (Σενάριο 2)	178
Εικόνα 8.27: Μετακίνηση αλάτινης σφήνας στον υδροφορέα για ποσοστά άντλησης 40 και 60% της ετήσιας κατείσδυσης	185

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1.1: Σύσταση πληθυσμού ν. Μήλου ανά φύλο (Ε.Σ.Υ.Ε. 2001).....	17
Διάγραμμα 1.2: Σύσταση πληθυσμού ν. Μήλου ανά ηλικία (Ε.Σ.Υ.Ε. 2001).....	17
Διάγραμμα 5.1: Μέση μηνιαία βροχόπτωση (mm) – Γραφική αναπαράσταση	72
Διάγραμμα 5.2: Μέση μηνιαία θερμοκρασία (°C) – Γραφική αναπαράσταση.....	75
Διάγραμμα 5.3: Γραφική απεικόνιση της εξατμισοδιαπνοής κατά Thornthwaite	79
Διάγραμμα 5.4: Γραφική απεικόνιση της εξατμισοδιαπνοής κατά Thornthwaite	83
Διάγραμμα 5.5: Μέσες ετήσιες τιμές σχετικής υγρασίας νήσου Μήλου για τα έτη 1973 – 2003 (Στοιχεία Ε.Μ.Υ.).....	88
Διάγραμμα 5.6: Μέση μηνιαία ταχύτητα ανέμου νήσου Μήλου για τα έτη 1973 – 2003 (Στοιχεία Ε.Μ.Υ.).....	88
Διάγραμμα 5.7: Αθροιστική κατείδυση για εδαφικό τύπο Sandy Clay Loam.....	123
Διάγραμμα 5.8: Αθροιστική κατείδυση για εδαφικό τύπο Sandy Loam	123
Διάγραμμα 5.9: Αθροιστική κατείδυση για εδαφικό τύπο Silty Clay Loam	124
Διάγραμμα 5.10: Αθροιστική κατείδυση για εδαφικό τύπο Silty Loam.....	124

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 5.1: Τα στάδια συγκράτησης του νερού από το έδαφος: κορεσμός, υδατοϊκανότητα και σημείο μάρανσης (Dept of Agriculture Bulletin 462, 1960)	66
--	----

Περίληψη

Ο παράκτιος υδροφορέας της προσχωματικής λεκάνης Ζεφυρίας στη νήσο Μήλο, με έκταση 7,8 km² αποτελεί την κύρια πηγή για την κάλυψη των υδατικών αναγκών της περιοχής. Λόγω των ολοένα αυξανόμενων υδατικών απαιτήσεων του νησιού, εξ' αιτίας της τουριστικής ανάπτυξης που παρατηρείται τα τελευταία χρόνια, κρίνεται αναγκαία η μελέτη του σημαντικού αυτού υπόγειου υδροφόρου συστήματος. Συγκεκριμένα γίνεται μια εκτίμηση του υδατικού ισοζυγίου της συγκεκριμένης περιοχής και προσομοίωση της ροής του υπόγειου νερού, προκειμένου να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για την υπάρχουσα κατάσταση και να προταθούν μέτρα για την εξασφάλιση της βιωσιμότητας των υδάτινων συστημάτων γενικά αλλά και βελτίωση της επιβαρυμένης εικόνας που παρουσιάζει ο παράκτιος υδροφορέας.

Αρχικά εξετάζεται το γεωλογικό και υδρογεωλογικό πλαίσιο του νησιού που παρουσιάζει μια σύνθετη εικόνα και ερευνώνται οι διάφορες υδροφορίες που παρουσιάζονται στα εδάφη του. Στην περιοχή που βρίσκεται ο παράκτιος υδροφορέας που εξετάζεται, υπάρχει ομοιομορφία αφού αποτελείται στο σύνολο της από παράκτιες και αλλουβιακές αποθέσεις και γίνεται μια πρώτη εκτίμηση της υδραυλικής αγωγιμότητας του εδάφους.

Προσδιορίζονται οι συνιστώσες του υδατικού ισοζυγίου για το χρονικό διάστημα 1974 – 2003, με την εμπειρική μέθοδο των Thornthwaite – Mather, και με τη χρήση του υπολογιστικού μοντέλου CLASS. Υπάρχει ωστόσο μια αβεβαιότητα που οφείλεται στο γεγονός ότι δεν ήταν δυνατό να διαθέτουμε στα πλαίσια αυτής της εργασίας πιο ακριβή στοιχεία για την εξάτμιση και τη διαπνοή (από εξατμισίμετρα), μετρήσεις για την επιφανειακή απορροή (την οποία και θεωρήσαμε ίση με το 10 % της βροχόπτωσης) και απουσία άλλων επιμέρους συνιστωσών όπως επιστρεφόμενες αρδευτικές ροές, διηθήσεις χειμαρρικών υδάτων, απώλειες αρδευτικών δικτύων και εκροή του νερού προς τη θάλασσα.

Ακολούθως, εφαρμόσθηκε με τον καλύτερο τρόπο και αναλόγως των διαθέσιμων στοιχείων για τη συγκεκριμένη περιοχή, ένα απλό μοντέλο προσομοίωσης της ροής του παράκτιου υδροφορέα (Mantoglou et al (2004)). Το μοντέλο εφαρμόζεται σε παράκτιους φρεάτιους υδροφορείς σε συνθήκες μόνιμης ροής και βασίζεται στη θεώρηση απότομης και ακίνητης διεπιφάνειας αλμυρού – γλυκού νερού, στην προσέγγιση Ghyben – Herzberg, στην παραδοχή οριζόντιας ροής και στην ανάλυση κατά Strack. Η προσομοίωση γίνεται με την εφαρμογή του κώδικα Modflow και το αποτέλεσμα είναι ο υπολογισμός του δυναμικού ϕ αφού προηγουμένως εκτελεστεί πλήθος δοκιμών trial & error για ακριβέστερο προσδιορισμό της υδραυλικής αγωγιμότητας και εισαγωγή των φρεάτων άντλησης όπου υπάρχουν στοιχεία. Το γραφικό περιβάλλον επικοινωνίας είναι το PMWINpro και σε περιβάλλον MATLAB υπολογίζονται τα υδραυλικά φορτία hf και το βάθος της διεπιφάνειας κάτω από το επίπεδο της θάλασσας.

Καταλήγοντας δίνονται μερικές προτάσεις για κατασκευή ενός ακριβέστερου μοντέλου προσομοίωσης και κάποιες γενικές αλλά και ειδικότερες επισημάνσεις, για τη σταδιακή επαναφορά του υδροφορέα που εξετάστηκε αλλά και τη συνδιαχείριση των επιφανειακών και υπογείων υδάτων για την προστασία των υδατικών πόρων γενικά, την άνοδο της στάθμης των υδροφόρων και τη σταδιακή αποκατάσταση της υφαλμύρισης. Αυτό αποκτά ιδιαίτερη σημασία, ιδιαίτερα στα νησιά που ανήκουν στις ελλειμματικές περιοχές υδατικών αποθεμάτων.

Abstract

The coastal aquifer of the sedimentary basin of Zefyria on Milos' island, covering an area of 7.8 km², is the main source of water supply in the area. On account of the increasingly water needs, due to the consecutive tourist development of the island during the last years, the study of this important underground of water wagon system becomes necessary. Specifically an estimate of the water balance of the particular region and a simulation of flow of underground water are made so that useful conclusions are inferred on the existing situation and measures for the guarantee of viability of aquatic systems generally are proposed and also the improvement of the overloaded picture that the coastal aquifer presents.

Initially the geological and hydro geological frame of island that presents a complex picture is examined and the various aquifers that are developed in its grounds are investigated. Uniformity exists in the region where the coastal aquifer which is examined, is found since this region is constituted in its entirety by coastal and alluvial depositions and a first estimate of the hydraulic conductivity of the ground is made.

The components of the water balance are determined for time interval 1974 - 2003, with the various empiric Thornthwaite – Mather method and the CLASS modelling framework for physically based distributed eco hydrological modelling as well. However there is an uncertainty due to the fact that it was not possible to dispose in the frames of this work more precise elements for the evaporation and transpiration (from evaporimeters), measurements for the surface flow (which also we considered equal with the 10% of rainfall) and absence of other individual components as returned irrigatory flows, filtering of streams water, losses of irrigatory networks and outflow of water to the sea.

Thereafter, the methodology that was followed is shown, with the best way possible and proportionally the available elements for the particular region so that, a simple model of simulation of flow of coastal aquifer is composed and applied. The model of coastal aquifer was based on the approximation of

Mantoglou et al (2004) model, which is applicable on coastal unconfined aquifers, at steady – state conditions. Based on the stationary abrupt fresh – saltwater interface approximation, on the Ghyben – Herzberg approximation and therefore on horizontal flow approximation and on Strack solution. The simulation is made with the application of the Modflow code and the result is the calculation of potential ϕ after previously trial and error tests are executed for more precise determination of hydraulic conductivity and import of pumping wells where elements exist. The graphic environment of communication is PMWINpro and in environment MATLAB the hydraulic heads 'hf' and the depth of the interface under the level of sea are calculated.

Concluding a few proposals for manufacturing a more precise model of simulation are given and also some general and some more specific pointings out are made, for the progressive reintroduction of the aquifer that was examined and the simultaneous management of the surface and underground waters for the protection of water resources in general, the rise of level water wagon and the progressive re-establishment of salinity. This acquires special importance, particularly for the islands that belong in regions with deficit water surplus.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1
ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικές Αρχές Διαχείρισης Υδατικών Πόρων

Διαχείριση Υδατικών πόρων (Δ.Υ.Π.) νοείται μια δυναμική διαδικασία που αποβλέπει στην πληρέστερη δυνατή κάλυψη των σημερινών και μελλοντικών αναγκών, για κάθε χρήση με βάση ένα συνετό προγραμματισμό που στηρίζεται σε αντικειμενικά κριτήρια και διαδικασίες. Η Δ.Υ.Π. μπορεί να χρησιμεύσει αφενός στην προετοιμασία σχεδίων σε εθνικό και περιφερειακό επίπεδο, που να εξασφαλίζουν τη συνετή χρήση του νερού σήμερα αλλά και στο μέλλον, και έχει την ευθύνη της εφαρμογής των σχεδίων με διοικητικά μέτρα και κανονισμούς, καθώς και με τον συντονισμό της κατασκευής υδραυλικών έργων. (Τσακίρης 1995)

Είναι προφανές ότι η Δ.Υ.Π. είναι μια συνεχής διαδικασία με χρονικό ορίζοντα πολύ μεγαλύτερο από τη μελέτη, την κατασκευή και τη διάρκεια (ορίζοντα) ζωής ενός υδραυλικού έργου. Συνήθως, επίσης, η Δ.Υ.Π. αναφέρεται σε έκταση που καλύπτει περισσότερα του ενός υδραυλικά έργα.. Επομένως, παρά το γεγονός ότι χρονικά προηγήθηκαν τα διάφορα υδραυλικά έργα, η Δ.Υ.Π. υπερέχει και στο χώρο των υδραυλικών έργων και επομένως είναι ιεραρχικά υψηλότερα. Σε πολλές περιπτώσεις και περιοχές του κόσμου δεν γίνεται διαχείριση υδατικών πόρων ή γίνεται υποτυπώδης διαχείριση. Συνήθως δεν εφαρμόζεται η Δ.Υ.Π. όπου υπάρχει χαμηλή επικινδυνότητα στην έλλειψη νερού και στη ρύπανση των υδατικών πόρων. Αντίθετα ,όσο η πίεση για απαιτήσεις μεγαλώνουν και η χρήση του νερού δημιουργεί και άλλα προβλήματα, η Δ.Υ.Π. αποκτά περιεχόμενο και συγκεντρώνει την προσοχή του μεγάλου κοινού. (Τσακίρης 1995)

Οι βασικοί κανόνες διαχείρισης των υδατικών πόρων στηρίζονται στη συνετή χρήση του νερού τώρα και στο μέλλον, με αρχές δικαίου και στόχο την διατήρηση των πόρων.

Εντελώς επιγραμματικά οι βασικοί κανόνες διαχείρισης είναι:

- Ισομερής κατανομή μεταξύ των χρηστών με βάση αντικειμενικά κριτήρια
- Οικονομική βελτιστοποίηση της χρήσης του νερού τώρα και στο μέλλον
- Αποφυγή βλαβών και άλλων αρνητικών συνεπειών(όπως καταστροφή πόρων και περιβάλλοντος)
- Βιωσιμότητα της ανάπτυξης (long-term sustainability of the development). (Τσακίρης 1995)

Η αξιοποίηση των υδατικών πόρων μιας περιοχής προϋποθέτει τη γνώση της ποσότητας του νερού που είναι διαθέσιμη για διάφορες χρήσεις στη συγκεκριμένη περιοχή. Αυτή ακριβώς η ποσότητα αποτελεί το σύνολο των διαθέσιμων υδατικών πόρων. Για να εκτιμηθούν ποσοτικά οι διαθέσιμοι υδατικοί πόροι απαιτείται να προσδιορίζονται τα μεγέθη που εκφράζουν του διαθέσιμους υδατικούς πόρους και την αβεβαιότητα τους μέσα σε έναν χρονικό και χωρικό ορίζοντα. (Ναλμπάντης και Τσακίρης 2006).

Η διαχείριση υδατικών πόρων αναδεικνύεται σε θέμα σημαντικό για την Ελλάδα ,διότι σχετίζεται άμεσα με :

- τον βέλτιστο τρόπο κάλυψης της συνεχώς αυξανόμενης ζήτησης νερού και
- την εξασφάλιση οικολογικής ισορροπίας στο υδατικό και φυσικό περιβάλλον.

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

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

Είναι λοιπόν απαραίτητο να υπάρχει ένα ολοκληρωμένο σχέδιο αξιοποίησης υδατικών πόρων για κάθε νησί όπου θα λαμβάνονται υπόψη οι ανάγκες που

πρέπει να καλυφθούν και ταυτόχρονα θα εξασφαλίζεται η ανανέωση των αποθεμάτων και η προστασία του περιβάλλοντος.

1.2 Υπόγεια Νερά και Υδροφορείς

Οι υπόγειοι υδροφορείς αποτελούν το σημαντικότερο εκμεταλλεύσιμο υδάτινο πόρο αφού ο όγκος των υπογείων νερών αντιστοιχεί στο 98% του συνολικού εκμεταλλεύσιμου υδάτινου όγκου και για το λόγο χρήζουν ευαίσθητης και ιδιαίτερης διαχείρισης για την ποιοτική αλλά και ποσοτική προστασία τους.

Το υπόγειο νερό κινείται μέσα στα διάκενα εδαφών ή πετρωμάτων που χαρακτηρίζονται ως υδατοπερατά. Οι όγκοι των γεωλογικών σχηματισμών στους οποίους μπορεί να κινηθεί το υπόγειο νερό, ονομάζονται υδροφορείς ή υδροφόρα στρώματα (Λατινόπουλος 1995). Η κίνηση αυτή του νερού μπορεί να γίνει είτε κατακόρυφα στην ακόρεστη ζώνη του υδροφορέα, είτε οριζόντια στην κορεσμένη ζώνη. Τα περισσότερα προβλήματα ωστόσο που αφορούν στη διαχείριση των υπόγειων υδατικών πόρων, αναφέρονται στους υδάτινους όγκους που κινούνται στη ζώνη κορεσμού και τα σχετικά φαινόμενα που παρατηρούνται στη ζώνη αυτή.

1.3 Περιοχή Μελέτης

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αποτελεί ένας αντίστοιχος υπόγειος, παράκτιος και φρεάτιος υδροφορέας που βρίσκεται στην προσχωματική λεκάνη Ζεφυρίας, στη νήσο Μήλο, και εκτείνεται σε μια περιοχή περίπου 7,8 km² στο ανατολικό τμήμα του νησιού.



Εικόνα 1.1: Περιοχή μελέτης (Ανάγλυφος χάρτης – Πηγή Google Maps)

1.4 Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι ο υπολογισμός των υδρολογικών και περιβαλλοντικών παραμέτρων για την εκτίμηση του υδατικού ισοζυγίου του υπόγειου υδροφορέα, καθώς και ο καθορισμός των υδρολογικών παραμέτρων για την προσομοίωση του υδροφορέα με κατάλληλα μοντέλα προσομοίωσης.

1.5 Φάσεις της Διπλωματικής Εργασίας

1.5.1 Καθορισμός του αντικειμένου

Η πρώτη φάση περιλαμβάνει τον καθορισμό του αντικειμένου και του σκοπού της εργασίας με σαφήνεια έτσι ώστε να είναι κατανοητά τα στοιχεία που είναι αναγκαία για την εξέλιξή της.

1.5.2 Συλλογή στοιχείων

Στη φάση αυτή πραγματοποιείται η συλλογή των στοιχείων εκείνων, που είναι απαραίτητα για την εκτίμηση και τον υπολογισμό των παραμέτρων εκείνων που αποτελούν τα κριτήρια αξιολόγησης των υδατικών πόρων της περιοχής μελέτης. Τα στοιχεία αυτά είναι τα στοιχεία αφορούν μετεωρολογικά στοιχεία που παραχωρήθηκαν από την Ε.Μ.Υ. για την εκπόνηση της εργασίας, στατιστικά στοιχεία που συλλέχθηκαν από την Ε.Σ.Υ.Ε. και το Υπουργείο Γεωργίας και υδρολογικά και γεωλογικά στοιχεία που παραχωρήθηκαν από τον συνεργάτη του ΓΠΑ Δρ. Υδρογεωλόγο Παναγιώτη Γιαννουλόπουλο. Επίσης αρκετά στοιχεία, καθώς και αντίστοιχη βιβλιογραφία συλλέχθηκαν από την κεντρική βιβλιοθήκη του Ε.Μ.Π. καθώς και από διαδικτυακούς τόπους.

1.5.3 Επεξεργασία στοιχείων

Για τον προσδιορισμό των συνιστωσών και την εκτίμηση του υδατικού ισοζυγίου χρησιμοποιήθηκαν μετεωρολογικά και υδρολογικά στοιχεία τα οποία επεξεργάστηκαν διάφορα λογισμικά, όπως ο “Υδρογνώμων” (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 Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο), το πρόγραμμα CLASS (Catchment scale multiple-Landuse Atmosphere Soil water and Solute transport model), καθώς και το πρόγραμμα WATER BALANCE, το οποίο λειτουργεί σε περιβάλλον MatLab. Επίσης για τον υπολογισμό του πιεζομετρικού φορτίου χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Surfer 8, ενώ η προσομοίωση του υδροφορέα έγινε με τη βοήθεια του κώδικα Modflow, χρησιμοποιώντας το πακέτο λογισμικού PMWINpro.

1.5.4 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων – Συμπεράσματα – Προτάσεις

Στο στάδιο της αξιολόγησης των στοιχείων γίνεται προσπάθεια αποτίμησης των εκτιμήσεων και υπολογισμών που προκύπτουν από το στάδιο της επεξεργασίας των στοιχείων και αφορούν την περιοχή μελέτης. Στη φάση

αυτή γίνεται προσπάθεια εξαγωγής συμπερασμάτων για την κατάσταση και συμπεριφορά του υδροφορέα στο χρονικό διάστημα που εξετάζεται και προτείνονται κάποιες εναλλακτικές λύσεις με σκοπό να γίνει πλήρως εκμεταλλεύσιμος αποφεύγοντας την ποσοτική και ποιοτική κυρίως υποβάθμιση των υδάτων του.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2
ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΝΗΣΟΥ ΜΗΛΟΥ

2. ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΝΗΣΟΥ ΜΗΛΟΥ

2.1 Γεωγραφία της Νήσου

Η νήσος Μήλος βρίσκεται στο νοτιοδυτικότερο άκρο του συμπλέγματος των Κυκλάδων, 120 χλμ ανατολικά των ακτών της Λακωνίας, με έκταση 150,6 τ. χλμ. Και με πληθυσμό 4736 κατοίκων σύμφωνα με την απογραφή της Ε.Σ.Υ.Ε για το έτος 2001. Η Μήλος είναι ένα νησί με ισχυρό διαμελισμό, έχει σχήμα πετάλου, στο εσωτερικό του οποίου σχηματίζεται ο βαθύς όρμος της Λήμνου, όπου βρίσκεται το επίνειο της πρωτεύουσας, Αδάμας.

Το έδαφος της νήσου είναι γενικά λοφώδες και η ψηλότερη κορυφή είναι αυτή του Προφήτη Ηλία που βρίσκεται στο δυτικό τμήμα, και έχει υψόμετρο 751 μ. Στη Μήλο υπάγονται οι νησίδες Ακράθιο, οι Ανάνες, η Αντίμηλος (Ερημόμηλος), οι Ακραδιές, το Παξιμάδι, το Πηλονήσι (Πολύαιγος) και το Πρασονήσι, ενώ το κοντινότερο νησί των κυκλάδων είναι η Κίμωλος η οποία βρίσκεται μόλις 1,6 χλμ βορειοανατολικά του νησιού.

Η Αντίμηλος, που ονομάζεται και Ερημόμηλος από τους κατοίκους της Μήλου, είναι ένα μικρό απόκρυμνο και ακατοίκητο νησί με θαμνώδη βλάστηση δυτικά της Μήλου, στο Μυρτώο πέλαγος, έκτασης μόλις 8 τετρ. χλμ.

Η Πολύαιγος βρίσκεται 6,2 χλμ ανατολικά της Μήλου έχει έκταση 17,2 τετρ. χλμ και είναι ακατοίκητη, αλλά χρησιμοποιείται ως βοσκότοπος λόγω της θαμνώδους βλάστησής της. Από το 1898 υπάρχει στο νησί φάρος στο ακρωτήριο Μάσκουλα, σε ύψος 138μ στην ανατολική πλευρά του νησιού. Η Ελλάδα έχει περιλάβει την Πολύαιγο στο πρόγραμμα Natura 2000 της Ευρωπαϊκής Ένωσης, θεωρώντας την σημαντικό βιότοπο. Στο νησί γεννά τα μικρά της η μεσογειακή φώκια Monachus-Monachus.



Εικόνα 2.1: Η νήσος Μήλος όπως φαίνεται από δορυφόρο

2.2 Ιστορικά Στοιχεία

Η Μήλος στη δωρική διάλεκτο ονομαζόταν Μάλος. Με το ίδιο όνομα στα ιστορικά χρόνια αναφέρεται και το νησί και η πόλη. Μεταγενέστερες παραδόσεις αποδίδουν το όνομα στο σχήμα του νησιού. Στα νομίσματα της πόλης απεικονίζεται το μήλο που αποτελεί το σήμα κατατεθέν του νησιού στα ιστορικά χρόνια.

Τα ηφαιστειογενή εδάφη της Μήλου, που οφείλονται στην ύπαρξη ενεργού σε πανάρχαιους χρόνους ηφαιστείου, είναι πλούσια σε ορυκτά, που αποτέλεσαν την κυριότερη πηγή πλούτου για το νησί από πολύ παλιά εποχή έως σήμερα. Σπουδαιότατο ρόλο στην ανάπτυξη της Μήλου απο τους νεολιθικούς ακόμα χρόνους, έπαιξε το εμπόριο του οψιδιανού, σιλπνού και σκληρού μαύρου λίθου,

που μόνο στη Μήλο από ολόκληρη τη Μεσόγειο βρίσκεται σε αφθονία, και χρησίμευε κυρίως στην κατασκευή εργαλείων και όπλων. Άλλα ορυκτά χρησιμοποιήθηκαν στην ιατρική, τη ζωγραφική ή ακόμα και για την λείανση των δερμάτων (ελαφρόπετρα).

Κατά την παράδοση, πρώτοι κάτοικοι της νήσου ήταν οι Φοίνικες, με την επιρροή των οποίων η Μήλος αρχίζει να διαδραματίζει σπουδαίο ρόλο μέσα στον κυκλαδίτικο πολιτισμό, απο την τρίτη κι όλες χιλιετηρίδα. Η μινωϊκή θαλασσοκρατία επιδρά ισχυρά στον πολιτισμό της, με αποτέλεσμα η Μήλος να αποτελεί πραγματική κρητική εγκατάσταση. Αργότερα, τη μινωϊκή επίδραση διαδέχεται η μυκηναϊκή. Το σημαντικότερο κέντρο σε όλους αυτούς τους αιώνες βρίσκεται στη βόρεια ακτή, στη Φυλακωπή.

Περί το 1200 π.Χ. Δωριείς εγκαθίστανται στην περιοχή και ιδρύουν αποικία, με αποτέλεσμα το κέντρο να μεταφέρεται στο εσωτερικό του μεγάλου και ασφαλισμένου κόλπου. Η νέα πόλη, όπως δείχνουν σήμερα τα ευρήματα, γρήγορα παρουσίασε σημαντική ανάπτυξη. Παρά τη δωρική καταγωγή των κατοίκων, στην τέχνη παρατηρείται έντονη ιωνική επίδραση, ιδιαίτερα στη μεγάλη σειρά των λεγόμενων «μηλιακών αγγείων», τα περισσότερα απο τα οποία βρέθηκαν στον ομαδικό τάφο της κάθαρσης της Δήλου και αποτελούν μια απο τις σπουδαιότερες συλλογές του μουσείου της Μυκόνου. Για το υψηλό επίπεδο της τέχνης της Μήλου μιλούν τα λίγα αλλά εξαιρετικά έργα που διασώθηκαν στις μέρες μας, όπως ο κούρος στο Εθνικό Αρχαιολογικό Μουσείο, που χρονολογείται τον 6^ο π.Χ. αιώνα, και ο ανάγλυφος δίσκος με την κεφαλή της Αφροδίτης, περί των 5^ο π.Χ. αιώνα.

Πολύ λίγα γνωρίζουμε απο τις αρχαίες πηγές για τη Μήλο πριν απο τον 5^ο π.Χ. αιώνα. Οι κατοικοί της είναι απο τους λίγους που αρνήθηκαν «γη και ύδωρ» στους Πέρσες, ενώ στη ναυμαχία της Σαλαμίνας αγωνίζονται στο πλευρό των άλλων Ελλήνων. Η δημιουργία της συμμαχίας της Δήλου, καθώς και η αύξηση της αθηναϊκής δύναμης είχαν σοβαρές επιπτώσεις στη Μήλο. Το καλοκαίρι του 426

π.Χ. αθηναϊκή δύναμη εκστρατεύει για πρώτη φορά εναντίον της, με αποτέλεσμα την επιβολή φόρου ίσο με 15 τάλαντα, ποσό που μόνο τα πιο πλούσια νησιά των κυκλάδων πληρώνουν στην Αθήνα ως φόρο υποτέλειας. Δέκα χρόνια αργότερα, η συμπάθειά της προς τους Λακεδαιμόνιους τη φέρνει πάλι αντιμέτωπη με την Αθήνα. Στον νησί εγκαθίστανται 500 Αθηναίοι κληρούχοι, που εξορίζουν τους άρχοντες του νησιού, μετά την ήττα της Αθήνας ωστόσο, οι Λακεδαιμόνιοι επαναφέρουν στο νησί όσους είχαν επιζήσει της καταστροφής.

Στους μετέπειτα αιώνες, η Μήλος ακολουθεί κοινή πορεία με τα υπόλοιπα νησιά των κυκλάδων. Έως το 311 π.Χ. ανήκει στην Μακεδονία και στη συνέχεια περνάει στα χέρια της Αιγύπτου, όπου βρίσκει πρόσφορο έδαφος για μια νέα περίοδο ακμής. Το εμπόριο των ορυκτών βοήθησε εκ νέου στην οικονομική ανάπτυξη του νησιού και στην άνθηση των τεχνών, πάντα υπό την ελευθερία και την ασφάλεια των θαλασσών που προσέφερε ο πανίσχυρος για την εποχή στόλος των Πτολεμαίων. Το περίφημο άγαλμα της «Αφροδίτης της Μήλου» που βρίσκεται στο μουσείο του Λούβρου και ο επιβλητικός Ποσειδώνας που βρίσκεται στο Εθνικό Μουσείο, αποτελούν αντιπροσωπευτικά δείγματα της νέας ακμής.

Πολύ γρήγορα διαδόθηκε στη Μήλο και ο χριστιανισμός, ίσως εξαιτίας των πολλών Ιουδαίων που είχαν συγκεντρωθεί στο νησί λόγω της ανάπτυξης του εμπορίου. Στα πρώιμα βυζαντινά χρόνια η Μήλος ανήκει αρχικά στην «επαρχία των νήσων» και κατόπιν μετά το 565 μ.Χ. Στο «Θέμα του Αιγαίου» που είχε πρωτεύουσα τη Σάμο. Οι καταστροφές και οι ερημώσεις που ακολούθησαν στους χρόνους μετά τον Ιουστινιανό, με τις επιδρομές των σλαβικών φύλων, των πειρατών και των Αράβων είχαν αρνητικές επιδράσεις στη Μήλο. Μετά την πτώση της Βυζαντινής αυτοκρατορίας, το νησί υποτάσσεται στους Βενετούς, ωστόσο η περίοδος της παρακμής συνεχίζεται από τους συνεχείς πολέμους μεταξύ των Βενετών και των Τούρκων.

Μετά την κατάκτησή της από τους Τούρκους, το κέντρο της ζωής του νησιού μεταφέρεται στο βάθος του κόλπου στη Ζεφυριά. Η ηρεμία ωστόσο δεν κρατάει

πολύ, αφού με την εξασθένηση της οθωμανικής αυτοκρατορίας, το νησί γίνεται στόχος πειρατών, που καταλαμβάνουν το καταλαμβάνουν και χρησιμοποιούν το ασφαλισμένο λιμάνι του, ως ορμητήριό τους. Μέχρι το τέλος του 17^{ου} αιώνα, οι κάτοικοι της Μήλου παίρνουν πολλές φορές μέρος σε πειρατείες εις βάρος του τουρκικού στόλου, λαμβάνοντας μερίδιο από τα λάφυρα.

Μετά την επανάσταση του 1821, η Μήλος αποκτά την ελευθερία της, και μαζί με τις υπόλοιπες κυκλάδες αποτέλεσαν ιδιαίτερο νομό του νεοσύστατου ελληνικού κράτους, μέχρι τις μέρες μας, με πρωτεύουσα τη Σύρο.

2.3 Αρχαιολογικά Ευρήματα

2.3.1 Αφροδίτη της Μήλου



Εικόνα 2.2: Η Αφροδίτη της Μήλου

Η Αφροδίτη της Μήλου είναι ένα πολύ γνωστό μαρμάρινο άγαλμα, το οποίο βρέθηκε το 1820 σε μία αγροτική περιοχή του νησιού από έναν αγρότη με το όνομα Γεώργιος Κεντρωτάς. Ο ίδιος βέβαια δεν ήξερε την μεγάλη αρχαιολογική του αξία, αποφάσισε όμως να το περιφράξει σε ένα χώρο του κτήματός του. Πολύ γρήγορα όμως το ανακάλυψαν κάποιοι Γάλλοι αρχαιολόγοι και εξαγόρασαν με 400 γρόσσια το άγαλμα, μεταφέροντάς το στο Μουσείο του Λούβρου, όπου βρίσκεται μέχρι σήμερα. Στο μουσείο της Μήλου σήμερα υπάρχει ένα πιστό αντίγραφο, που το έφεραν οι Γάλλοι υπεύθυνοι του Μουσείου του Λούβρου. Το συγκεκριμένο άγαλμα παριστάνει την Αφροδίτη ημίγυμνη, που μάλλον όπως φαίνεται από τη στάση της, ετοιμάζεται να κάνει το μπάνιο της. Αξίζει να σημειωθεί ότι όταν βρέθηκε το άγαλμα,

υπήρχαν και τα χέρια τα οποία σήμερα δεν υπάρχουν, ενώ έχουν ειπωθεί δύο εκδοχές για το πώς έσπασαν: η μία είναι ότι έσπασαν κατά την μεταφορά του αγάλματος στο Λούβρο, και η άλλη κατά τη διάρκεια μιας διαμάχης μεταξύ των Γάλλων αρχαιολόγων και των ντόπιων κατοίκων της Μήλου, όταν όπως φαίνεται κάποιος έριξε κατά λάθος το άγαλμα με αποτέλεσμα να σπάσουν τα χέρια και να χαθούν. Η Αφροδίτη της Μήλου θεωρείται ένα καταπληκτικό έργο της ελληνιστικής τέχνης, συνδυάζοντας αρμονικά τη γυναικεία ομορφιά και θηλυκότητα, χρονολογείται γύρω στον 1ο αιώνα π.Χ. και ο κατασκευαστής του είναι άγνωστος. Θεωρείται ακόμα ως σήμα κατατεθέν της Μήλου ή προσδιοριστικό στοιχείο του τουρισμού της Μήλου.

2.3.2 Οι κατακόμβες της Μήλου

Οι κατακόμβες είναι σκαμμένες σε ηφαιστειακό τάφο και αποτελούν ένα από τα αξιοθέατα του νησιού. Οι κατακόμβες ανακαλύφθηκαν από αρχαιοκάπηλους και έγιναν γνωστές μετά τη σύλησή τους, το 1840. Είναι τρεις και μαζί με πέντε διαδρόμους και ένα νεκρικό θάλαμο αποτελούν ένα δαιδαλώδες σύστημα συνολικού σημερινού μήκους 185 μέτρων. Είχαν εισόδους στο εξωτερικό περιβάλλον, αλλά σήμερα λειτουργεί μόνο μία, αυτή της δεύτερης κατακόμβης ή των «Πρεσβυτέρων», απ' όπου μπορεί να εισέλθει ο επισκέπτης.

Στο εσωτερικό των κατακομβών, δεξιά και αριστερά επάνω στους τοίχους, υπάρχουν τα «αρκοσόλια» (σκαμμένες ασπίδες) όπου μέσα σ' αυτά, καθώς και στο πάτωμα, ανοίγονταν οι τάφοι. Αρκοσόλια σήμερα σώζονται 126 (Πετροχείλου, 1972) και υπολογίζεται ότι έχουν ταφεί μερικές χιλιάδες νεκρών. Σε κάθε τάφο υπήρχε λυχνάρι, ενώ σήμερα έχουν τοποθετηθεί ηλεκτρικοί λαμπτήρες που φωτίζουν το χώρο διακριτικά και δημιουργούν την ατμόσφαιρα εκείνων των χρόνων.

Στους τάφους των πιο διακεκριμένων προσώπων ζωγράφιζαν χριστιανικά σύμβολα ή χάραζαν επιγραφές. Τέτοια είδαν και μελέτησαν οι Ross (1843) και

Σωτηρίου (1927), αλλά με την πάροδο των χρόνων τα περισσότερα καταστράφηκαν.

Μια τέτοια επιγραφή μπορεί να δει ο σημερινός επισκέπτης στη δεύτερη κατακόμβη, στο 6ο αρκοσόλιο δεξιά. Είναι η επιγραφή των «Πρεσβυτέρων», απ' όπου και το όνομά της. Ακόμα στην ίδια κατακόμβη, στη μέση περίπου, υπάρχει ένας τάφος σκαμμένος στο βράχο υπό μορφή σαρκοφάγου. Πιστεύεται ότι είχε ταφεί σ' αυτόν ένας από τους πρώτους μάρτυρες της χριστιανοσύνης και ακόμα ότι οι πρώτοι χριστιανοί τον χρησιμοποιούσαν ως Αγία Τράπεζα στις λειτουργίες τους.

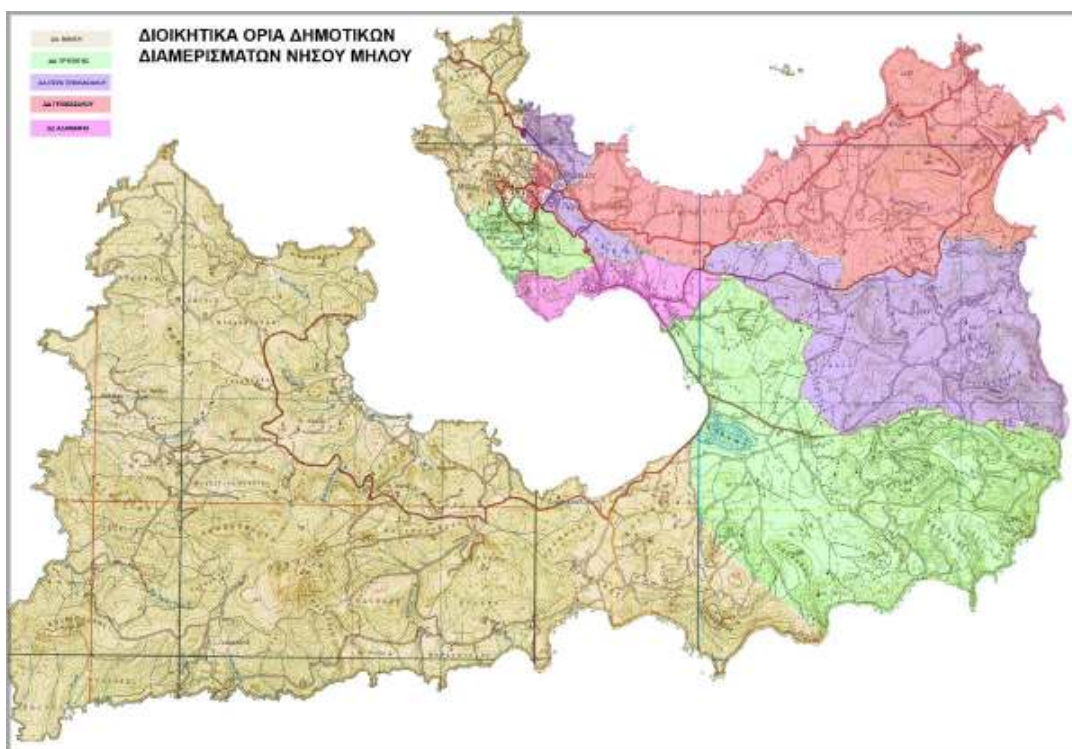
Η δραστηριότητα των πρώτων χριστιανών στις κατακόμβες σταματά λίγο μετά τη θεσμοθέτηση της ανεξιθρησκίας (διάταγμα Μεδιολάνων), ή μέχρι να καταστραφεί και να εγκαταλειφθεί η αρχαία πόλη του Κλήματος από σεισμούς τον 5ο ή 6ο αιώνα μ.Χ.

2.4 Διοικητική Διάρθρωση

Η Μήλος διοικητικά ανήκει στο νομό Κυκλάδων, του οποίου αποτελεί επαρχία μαζί με τη Σίφνο, τη Σίκινο, την Κίμωλο και τη Φολέγανδρο. Πρωτεύουσα του νησιού και της επαρχίας είναι η κωμόπολη Μήλος, που βρίσκεται σε υψόμετρο 200μ και αριθμεί 877 κάτοικους. Η κωμόπολη είναι έδρα ομώνυμης κοινότητας στην οποία υπάγονται και χωριά κυριότερα των οποίων είναι τα Παλάκι Χάλακα, Φυροπόταμος και Φουρκοβούνι καθώς και ο οικισμός Ακράθι που βρίσκεται στο ομώνυμο μικρό νησί. Η Μήλος γενικά χωρίζεται σε πέντε Δημοτικά Διαμερίσματα, της Μήλου, του Αδάμαντος, Τριοβασάλου και Πέραν Τριοβασάλου και της Τρυπητής.

ΔΗΜΟΣ ΜΗΛΟΥ	
Δ.Δ.	Πληθυσμός
Μήλου	919
Αδάμαντα	1391
Πέραν Τριοβασάλου	644
Τριοβασάλου	1029
Τρυπητής	788

Πίνακας 2.1: Πληθυσμός ν. Μήλου ανά Δ.Δ. (Ε.Σ.Υ.Ε. 2001)



Εικόνα 2.3: Διοικητική διαίρεση νήσου Μήλου

2.5 Ανθρωπογενή Στοιχεία

2.5.1 Πληθυσμιακά στοιχεία

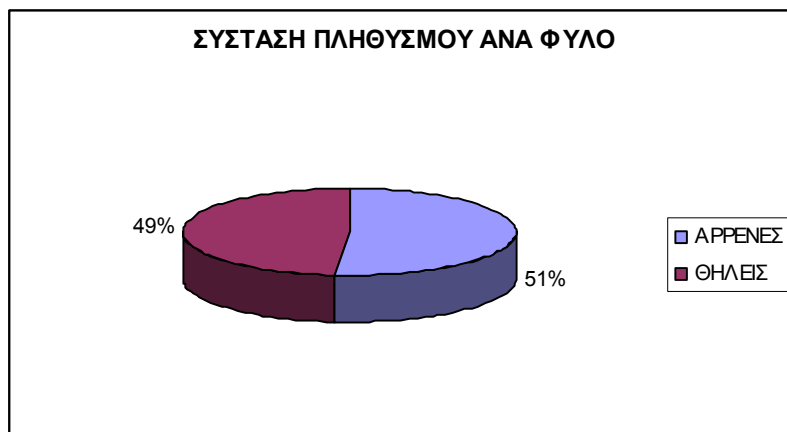
Σύμφωνα με την απογραφή του 2001, ο μόνιμος πληθυσμός του συνόλου της Νήσου ανέρχεται σε 4771 κατοίκους. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα στοιχεία της απογραφής ανά δημοτικό και κοινοτικό διαμέρισμα, κοινότητα και οικισμό.

	ΔΗΜΟΣ ΜΗΛΟΥ	4.736
	Δ.Δ.Μήλου	919
01	Μήλος,η	792
02	Ακράθιον,το (νησίς)	0
03	Ανάρες, οι (νησίς)	0
04	Αντίμηλος,η (νησίς)	0
05	Αρετή,η	0
06	Αρκάδιο, το (νησίς)	0
07	Εμπουρειός,ο (Εμπορειός,ο)	52
08	Ξυλοκερατιά,η	6
09	Παξιμάδι, το (νησίς)	0
10	Πηλονήσιο, το (νησίς)	0
11	Πρασονήσι,το (νησίς)	0
12	Ραλάκιον Χάλακος,το	11
13	Φουρκοβούνι,το	2
14	Φυροπόταμος,ο	12
15	Ψαθάδικα,τα	44
	Δ.Δ.Αδάμαντος	1.391
01	Αδάμας,ο	1.391
	Δ.Δ.Πέραν Τριοβασάλου	644
01	Πέραν Τριοβασάλος,ο	583
02	Κατσαρώνας,ο	37
03	Κόμια,τα	24

	Δ.Δ.Τριοβασάλου	1.029
01	Τριοβασάλος,ο	705
02	Άγιοι Ανάργυροι,οι	4
03	Άγιος Γεράσιμος,ο	17
04	Απολλώνια,τα	257
05	Βούδια,τα	2
06	Γλαρονήσια,τα	0
07	Μανδράκια,τα	2
08	Μύτικας, ο	20
09	Πάχαινα,η	18
10	Φυλακωπή,η	4
	Δ.Δ.Τρυπητής	788
01	Τρυπητή,η	485
02	Ζεφυρία,η	224
03	Θειωρυχείο,το (τ.Θειωρυχεία Μήλου,τα)	0
04	Κάναβα,η	65
05	Κλήμα,το	12
06	Σχινωπή,η	2

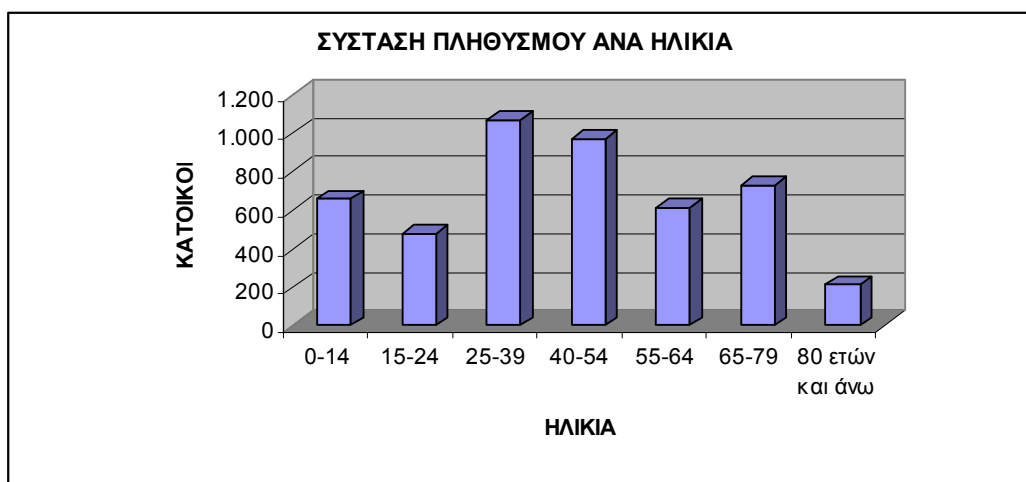
Πίνακας 2.2: Μόνιμος πληθυσμός, δήμοι, κοινότητες, δημοτικά και κοινοτικά διαμερίσματα και οικισμοί Ν. Θήρας (ΕΣΥΕ, 2001)

Σύμφωνα πάντα με τα στοιχεία της Ε.Σ.Υ.Ε. για το 2001, παρατηρείται μια ισοκατανομή ανά φύλο στη σύσταση του πληθυσμού όπως φαίνεται και από το γράφημα που ακολουθεί:



Διάγραμμα 1.1: Σύσταση πληθυσμού ν. Μήλου ανά φύλο (Ε.Σ.Υ.Ε. 2001)

Επίσης παρατηρούμε πως η πλειοψηφία του πληθυσμού ανήκει στη μέση ηλικία, ενώ μικρή πληθυσμιακή συγκέντρωση παρουσιάζουν οι μικρότερες ηλικίες, στοιχείο αρκετά ανησυχητικό όσο αφορά τη γήρανση του πληθυσμού.



Διάγραμμα 1.2: Σύσταση πληθυσμού ν. Μήλου ανά ηλικία (Ε.Σ.Υ.Ε. 2001)

2.5.2 Παραγωγικοί τομείς

Η πλειοψηφία του πληθυσμού της Μήλου ασχολείται με τον τουρισμό και το εμπόριο αφού λόγω της εδαφικής μορφολογίας του νησιού, η ενασχόληση με τη γεωργία καθίσταται δύσκολη. Το ανησυχητικό δεδομένο για τους μόνιμους κατοίκους ωστόσο είναι η αύξηση του οικονομικά ανενεργού πληθυσμού, το ποσοστό του οποίου πλέον υπερτερεί σε σχέση με αυτό του οικονομικά ενεργού σύμφωνα με τα τελευταία στοιχεία της απογραφής του 2001. Ωστόσο η ανεργία παρά το γεγονός ότι έχει αυξηθεί λίγο σε σχέση με την απογραφή του 1991, παραμένει ακόμα σε χαμηλότερα επίπεδα από αυτά που αντιστοιχούν στο μέσο όρο του ελλαδικού χώρου.

Γεωγραφικά διαμερίσματα, νομοί, δήμοι / κοινότητες, δημοτικά / κοινοτικά διαμερίσματα, φύλο, ομάδες ηλικιών	Αστικά (ΑΣ) και αγροτικά (ΑΓ) Δ.Δ ή Κ.Δ	Πεδινά (Π), ημιορεινά (Η) και ορεινά (Ο) Δ.Δ ή Κ.Δ	Οικονομικώς ενεργοί				Οικονομικώς μη ενεργοί
			Σύνολο	Απασχολούμενοι	Ανεργοί		
					Σύνολο	Από αυτούς "νέοι"	
ΔΗΜΟΣ ΜΗΛΟΥ			1.846	1.711	135	48	2.460
10-14			1	1	0	0	227
15-19			30	22	8	6	166
20-24			220	181	39	25	64
25-29			280	256	24	10	88
30-34			289	260	29	6	89
35-39			230	223	7	0	95
40-44			215	209	6	0	111
45-49			187	179	8	0	95
50-54			191	182	9	1	170
55-59			123	119	4	0	204
60-64			52	51	1	0	234
65-69			22	22	0	0	269

70-74			5	5	0	0	258
75+			1	1	0	0	390

Πίνακας 2.3: Οικονομικά ενεργός και μη ενεργός πληθυσμός ν. Μήλου ανά ηλικία

Όπως προαναφέρθηκε η μορφολογία του εδάφους της Μήλου, δεν αφήνει πολλά περιθώρια στους κατοίκους να ασχοληθούν με τη γεωργία, κάτι που φαίνεται και από τις μόνιμες καλλιεργήσιμες εκτάσεις, οι οποίες αντιστοιχούν σε ποσοστό μικρότερο του 1% της αντίστοιχης έκτασης του νησιού. Έτσι από 167700 στρέμματα της συνολικής έκτασης του νησιού τα 26800 αντιστοιχούν σε αρόσιμη γη και τα μόλις τα 1300 σε μόνιμες καλλιέργειες. Εξάλλου οι μικρές ποσότητες χερσαίων υδάτων καθιστούν ανέφικτη την περεταίρω ενασχόληση με τη γεωργία.

Ωστόσο τα κηπευτικά και τα φρούτα καλλιεργούνται σε άνυδρα εδάφη και χωρίς λιπάσματα. Το καλοκαίρι δε, από τη ντόπια παραγωγή τροφοδοτούνται και τα γειτονικά νησιά Σίφνος και Κίμωλος. Τα κυριότερα γεωργικά προϊόντα που κύρια καλλιεργούνται είναι ντομάτες, πεπόνια, καρπούζια, ελιές (λάδι), πορτοκάλια, μανταρίνια, σταφύλια από όπου βγαίνει το περίφημο μηλίτικο κρασί κ.ά. Οι καλλιέργειες των σκόρδων, του σιταριού και του κριθαριού σιγά - σιγά εγκαταλείπονται, ενώ οργανωμένες γεωργικές καλλιέργειες υπό μορφή θερμοκηπίων αναπτύσσονται τα τελευταία χρόνια.

Η κτηνοτροφία δεν είναι ιδιαίτερα ανεπτυγμένη, μερικοί όμως ασχολούνται μ' αυτήν έχοντας κυρίως αιγοπρόβατα ελεύθερης βοσκής. Το κρέας τους είναι νοστιμότατο, όπως επίσης και τα τυροκομικά προϊόντα που παράγονται.

Ο αλιευτικός στόλος του νησιού είναι αρκετά μεγάλος, για να καλύψει τις ανάγκες του την περίοδο του χειμώνα με φρέσκα ψάρια και αστακούς, αποδεικνύεται όμως μικρός κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, που οι επισκέπτες και οι τουρίστες κατακλύζουν το νησί.

Το μεγαλύτερο ποσοστό των κατοίκων του νησιού, εκμεταλλεύεται το γεγονός ότι η Μήλος είναι ένας από τους δημοφιλέστερους καλοκαιρινούς προορισμούς και

ως εκ τούτου ασχολείται με τον τριτογενή παραγωγικό τομέα, αξιοποιώντας τα πολλά τουριστικά καταλύματα, καθώς επίσης και με τον τομέα του εμπορίου (λιανικό εμπόριο, εστιατόρια, ενοικιάσεις αυτοκινήτων κ.α.). Σύμφωνα με την Ε.Σ.Υ.Ε. στη Μήλο απαριθμούνται 9192 ξενοδοχειακές εγκαταστάσεις και τουριστικά καταλύματα, εκ των οποίων τα 8983 μόνο στο Δημοτικό Διαμέρισμα Αδάμαντα, αριθμός εξαιρετικά μεγάλος, αφού υπερβαίνει κατά πολύ ακόμα και αυτόν των μόνιμων κατοίκων του νησιού.

Ο μεγαλύτερος αριθμός των επιχειρήσεων στεγάζονται στα Δημοτικά Διαμερίσματα Μήλου και Αδάμαντα, ασχολούνται κυρίως με τον τουρισμό και αφορούν ξενοδοχειακές εγκαταστάσεις, εστιατόρια, λιανικό εμπόριο και εκμίσθωση οχημάτων και μηχανημάτων. Για τη ακρίβεια αριθμούνται 27 τέτοιες επιχειρήσεις στο Δ.Δ. Μήλου και 636 στο αντίστοιχο του Αδάμαντα, με συνολικό ετήσιο τζίρο που ξεπερνά τα 60 εκατομμύρια ευρώ.

2.6 Κλίμα – Έδαφος

Το κλίμα της Μήλου είναι ήπιο μεσογειακό και τις περισσότερες μέρες του χρόνου επικρατεί ηλιοφάνεια. Πιο συγκεκριμένα το κλίμα είναι αρκετά στεγνό αλλά και δροσερό, καθώς όπως και στα υπόλοιπα νησιά των Κυκλάδων, έχει αρκετά μελτέμια (βόρειοι περιοδικοί άνεμοι), τα οποία πνέουν σχεδόν καθημερινά από τα μέσα Ιουλίου μέχρι και τα μέσα Αυγούστου. Ο χειμώνας είναι γενικά ήπιος αλλά με αρκετές έντονες βροχοπτώσεις.

Η Μήλος ξεχωρίζει τόσο για το ηφαιστειογενές έδαφος της όσο και για το πλούσιο σε ορυκτά και κοιτάσματα υπέδαφος. Η γεωλογική της σύσταση αποτελείται σχεδόν αποκλειστικά από ηφαιστειογενή πετρώματα εξαιτίας της δράσης των ηφαιστειών. Αυτά έδρασαν κατά την διάρκεια των τελευταίων 3.000.000 χρόνων και σήμερα θεωρούνται σβησμένα. Αποτέλεσμα αυτής της δράσης είναι η ύπαρξη ποικίλων και ωραιότατων γεωμορφολογικών σχημάτων, καθώς και το πλήθος των παραλιών με τις λευκόχρυσες αμμουδιές. Από τις πιο

γνωστές παραλίες της Μήλου είναι το Σαρακίνικο, το οποίο χαρακτηρίζεται από τους Μήλιους ως “σεληνιακό τοπίο”, που αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα της ηφαιστειακής δράσης στο νησί.



Εικόνα 2.4: Ηφαιστειακός σχηματισμός στην παραλία του Σαρακίνικου

Εξ' αιτίας της ηφαιστειακής δράσης στη Μήλο θα συναντήσουμε διάφορες θερμές πηγές, κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας, μερικές από τις οποίες είναι ιαματικές. Οι πηγές αυτές όμως δυστυχώς δεν έχουν αξιοποιηθεί κατάλληλα. Τα λουτρά αυτά του νησιού είναι γνωστά από την αρχαιότητα και ο Ιπποκράτης τα αναφέρει στο Ε' Βιβλίο του «Περί επιδημιών».

Όλες αυτές οι πηγές θεωρούνται κατάλληλες για ρευματοειδής αρθρίτιδες, παθήσεις των περιφερειακών νεύρων, γυναικολογικές, δερματικές και άλλες. Σύμφωνα με μελέτες έχει παρατηρηθεί, ότι στις περιοχές εκείνες υπάρχουν και υψηλές θερμοκρασίες στο έδαφος. Όλες αυτές λοιπόν οι υψηλές θερμοκρασίες σε συνδυασμό με το πέρασμα εκατομμυρίων χρόνων έχουν αλλοιώσει το έδαφος, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται και τα διάφορα ορυκτά και πετρώματα.

2.7 Ορυκτός Πλούτος

Η Μήλος, ξερή και άγονη γενικά, έχει υπέδαφος με αξιόλογο ορυκτό πλούτο. Είναι ηφαιστειογενές νησί, με όχι πολύ παλιά ηφαιστειότητα, που εκδηλώνεται με ατμίδες και θερμές ιαματικές πηγές. Στον Αδάμαντα και στην Αλυκή υπάρχουν χλωριονατριούχες πηγές. Οι ατμίδες που εμφανίζονται σε αρκετά σημεία του νησιού, δίνουν θείο. Τα ηφαιστειακά πετρώματα της Μήλου είναι κατάλληλα συνήθως για δομικά υλικά όπως η ελαφρόπετρα και η ζαχαρόπετρα. Υπάρχουν ακόμα ορυχεία οψιδιανού (μαύρου υελώδους), που στην αρχαιότητα τον χρησιμοποιούσαν για την κατασκευή όπλων και εργαλείων, πηλού και επίσης ορυχεία από τα οποία βγαίνουν οι μυλόπετρες.

Η έντονη υδροθερμική δραστηριότητα δημιούργησε μια μεγάλη ποικιλία χρήσιμων ορυκτών όπως ο μπετονίτης, ο βαρύτης, καολίνη, αλουμίτης, πυριτικό, θειάφι, μαγγάνιο, ανυδρίτης-γύψος, ασήμι και χρυσός. Στη Μήλο υπάρχει ακόμα και γαληνίτης μαζί με άλλα μικτά θειούχα μεταλλικά ορυκτά. Η εξόρυξη ωστόσο των περισσότερων από αυτών ορυκτών έχει σταματήσει από τα μέσα περίπου του 20^{ου} αιώνα.

Ακόμα έχει αποδειχθεί από διάφορους επιστήμονες ότι υπάρχει ατμός σε μεγάλο βάθος (1100 μέτρα περίπου). Η πλούσιες γεωθερμικές πηγές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, θέρμανσης χώρων ή και άλλων παραγωγικών δραστηριοτήτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3
ΓΕΩΛΟΓΙΑ - ΥΔΡΟΛΙΘΟΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑ

3. ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΚΑΙ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΝΗΣΟΥ ΜΗΛΟΥ

3.1 Γενικά

Η Μήλος είναι σχεδόν εξ' ολοκλήρου ένα ηφαιστειακό νησί. Από άποψη τεκτονικής γεωλογίας στον ελλαδικό χώρο, η Μήλος ανήκει στην πελαγονική, ή υποπελαγονική ζώνη. Σύμφωνα με τη θεωρία των λιθοσφαιρικών πλακών, η Μήλος βρίσκεται πάνω στην ευρασιατική πλάκα και απέχει περίπου 220 χιλιόμετρα από το σημερινό όριο της σύγκρουσης και καταβύθισης της αφρικανικής πλάκας κάτω από αυτήν, με ταχύτητα 2,5 εκατοστά το χρόνο και με γωνία 35° περίπου. Το νησί βρίσκεται ακόμα και σήμερα σε φάση καταβύθισης, δηλαδή υφίσταται τα αποτελέσματα μιας αργής καθοδικής κίνησης, ιδιαίτερα στο νότιο τμήμα του.

Από ραδιοχρονολογήσεις που έχουν γίνει, βγαίνει το συμπέρασμα ότι η ηφαιστειότητα στο νότιο Αιγαίο άρχισε πριν από 2 - 3 εκατομμύρια χρόνια περίπου. Στη Μήλο σταματά οριστικά πριν από 90.000 χρόνια και θεωρείται σχετικά πρόσφατη. Η ηφαιστειότητα αυτή εξελίχθηκε και στη στεριά και στη θάλασσα, και αυτό αποδεικνύεται από τα πολλά μικρά και μεγάλα απολιθώματα θαλασσίων οργανισμών που συναντάμε σε ηφαιστειακά υλικά (τοφφίτες).

Εκτός από τα ηφαιστειογενή πετρώματα, όμως, συναντάμε και ιζηματογενή (νότια Μήλος - Προβατάς) και μεταμορφωμένα. Έχουν μάλιστα χρονολογηθεί με διάφορους τρόπους και τα μεν ιζηματογενή είναι περίπου της τάξεως των 14 εκ. ετών, τα δε μεταμορφωμένα της τάξεως των 33 και 64 εκ. ετών.

Αξίζει όμως να αναφερθούμε ειδικότερα σε μερικούς γεωλογικούς και γεωμορφολογικούς σχηματισμούς, πριν φτάσουμε στα αποτελέσματα της ηφαιστειότητας στο νησί και κυρίως στα δύο μεγάλα και σβησμένα ηφαίστεια του νησιού. Το ηφαίστειο της Φυριπλάκας, που έχει ένα εντυπωσιακό κρατήρα με

διάμετρο 1700 μέτρα και ύψος 220 μέτρα περίπου· διατηρείται πολύ καλά και βρίσκεται στο κεντρικό και νότιο τμήμα του νησιού. Επίσης το ηφαιστειο του Τράχηλα, στο Β.-Β.Δ. τμήμα του νησιού, του οποίου διατηρείται μόνο ένα μικρό τμήμα.

Ένας άλλος γεωμορφολογικός σχηματισμός είναι αυτός των ηφαιστειακών δόμων. Οι ψηλοί λόφοι με τις απότομες πλαγιές έχουν δημιουργηθεί από ένα σκληρό ηφαιστειακό υλικό τον ανδεσίτη. Οι δόμοι αυτοί προέρχονται από το μάγμα που ανέβηκε προς τα πάνω από το εσωτερικό της γης και πάγωσε, πριν προλάβει να χυθεί, λόγω έλλειψης αερίων. Τέτοιος δόμος είναι το Κάστρο στην πρωτεύουσα του νησιού, την Πλάκα, το βουνό Προφήτης Ηλίας κ.ά.

Χαρακτηριστικός γεωλογικός σχηματισμός, άξιος θαυμασμού, είναι τα μικρά νησάκια Γλαρονήσια στο βόρειο τμήμα του νησιού, καθώς και μια περιοχή πηγαίνοντας προς τα Πολλώνια. Αυτός ο σχηματισμός (ανδεσιτικό πέτρωμα) είναι όρθιες πενταγωνικές ή εξαγωνικές κολόνες, με διαγώνιους 20-30 εκατοστά και έχουν εντυπωσιακή εμφάνιση.

Η περιοχή του Σαρακίνικου, στο βόρειο τμήμα του νησιού, είναι ένας λευκός ηφαιστειακός σχηματισμός με συνεχείς εναλλαγές ηφαιστειακών υλικών, που εναποτέθηκαν σε θαλάσσιο και χερσαίο περιβάλλον. Εδώ συναντάμε άφθονα απολιθώματα.

Η Μήλος, όπως ήδη έχουμε αναφέρει, βρίσκεται στο ηφαιστειακό τόξο του νοτίου Αιγαίου. Μπορεί βέβαια τα ηφαιστειά της να είναι σβησμένα τη σημερινή εποχή, λαμβάνουν όμως χώρα διάφορες άλλες εκδηλώσεις που μας δείχνουν ότι, ακόμα και σήμερα, υπάρχει επικοινωνία ανάμεσα στην επιφάνεια του νησιού και του εσωτερικού της γης. Είναι εκδηλώσεις που συμβαίνουν σε όλα τα ηφαιστειακά τόξα πρόσφατης ή παλαιότερης ηφαιστειότητας. Στη Μήλο συναντάμε ατμίδες (πηγές αερίων) κυρίως στην Α. και Ν.Α. περιοχή του νησιού. Είναι περιοχές από τις οποίες, λόγω της τεκτονικής τους κατασκευής, διαφεύγουν αέρια

προερχόμενα από το εσωτερικό της γης (ατμοί, διοξείδιο του άνθρακα, υδρόθειο κ.α.). Στις περιοχές αυτές μερικές φορές είναι χαρακτηριστικό το κίτρινο χρώμα του θείου και η μυρωδιά του, ενώ η θερμοκρασία του εδάφους είναι πολύ υψηλή (Αγ. Κυριακή 102° C, Πυρωμένες 100° C, Παλιοχώρι 101° C, Βουνάλια 54° C, Καστανάς 86° C, Αδάμαντας 100° C). Ατμίδες υπάρχουν και σε υποθαλάσσιες περιοχές, όπου και πάλι το κίτρινο χρώμα του θείου είναι χαρακτηριστικό, τα δε αέρια, υπό μορφή φουσαλίδων, βγαίνουν στην επιφάνεια του νερού. Τέτοιες περιοχές είναι η Αγ. Κυριακή, το Παλιοχώρι, η Κάναβα, το Ριβάρι.

Εκτός από τις ατμίδες έχουμε και θερμές πηγές. Τις βρίσκουμε σε διάφορα σημεία του νησιού, κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας, μερικές από τις οποίες είναι και ιαματικές, χωρίς όμως να έχουν αξιοποιηθεί κατάλληλα. Τέτοιες πηγές συναντάμε: στον Αδάμαντα (μέσα σ' ένα σπήλαιο όπου έχουν κατασκευαστεί και χώροι για μπάνιο) με θερμοκρασία 33,3° C, στις Αλυκές με 22° C, στην Κάναβα με 50° C, στο Παλιοχώρι με 50° C, στα Μαντράκια με 54° C, στον Αδάμαντα στην περιοχή Χάρου με 42° C, στον Προβατά, Τρία Πηγάδια και αλλού.

Όλες αυτές λοιπόν οι επιφανειακές εκδηλώσεις υψηλής θερμοκρασίας, στο πέρασμα των εκατομμυρίων ετών, έχουν δράσει έτσι, ώστε αφ' ενός μεν να αλλοιωθεί το έδαφος και να μας δώσει διάφορα εκμεταλλεύσιμα ορυκτά και πετρώματα, αφ' ετέρου να γίνει μία παραπέρα μελέτη των επιστημόνων για το αν υπάρχει γεωθερμικό πεδίο και πώς μπορεί να γίνει εκμεταλλεύσιμο.

Πράγματι οι επιστήμονες του ΙΓΜΕ και της ΔΕΗ, μετά από μακροχρόνιες έρευνες και γεωτρήσεις μέσου και μεγάλου βάθους, απέδειξαν την ύπαρξη αυτού του πεδίου, δηλαδή την ύπαρξη ατμού σε μεγάλο βάθος (1100 μέτρα περίπου), όπου με τη λύση διαφόρων τεχνικών προβλημάτων, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή άλλων παραγωγικών δραστηριοτήτων. (www.milos-island.gr/geology/geology.gr)

3.2 Γεωλογικές Συνθήκες

Στην ευρύτερη περιοχή της νήσου Μήλου συναντώνται οι ακόλουθοι λιθολογικοί σχηματισμοί που ταξινομούνται ανάλογα με τη γεωλογική περίοδο στην οποία εμφανίζονται.

3.2.1 Τεταρτογενές

Οι κυριότεροι ιζηματογενείς σχηματισμοί, σύμφωνα με αδημοσίευτα στοιχεία του Ι.Γ.Μ.Ε. που καταγράφηκαν το έτος 2009 υπό την εποπτεία του Δρ. Υδρογεωλόγου Παναγιώτη Γιαννουλόπουλου, που απαντούν στη νήσο Μήλο είναι οι παρακάτω.

- *Αλουβιακές αποθέσεις (al)*
- *Παράκτιες αποθέσεις (H.cd)*, όπως κροκαλολατύπες, άμμοι, ιλύς και άργιλοι, με πάχος μέχρι 100m στην περιοχή της Ζεφυρίας.
- *Πλευρικά κορήματα και κώνοι κορημάτων (Q.cs,sc)*
- *Παλαιότερες ποταμοχειμάρριες αποθέσεις (Q.t)*, από κροκάλες και λατύπες, ελαφρά συνδεδεμένες.

Οι υπόλοιποι σχηματισμοί του Τεταρτογενούς είναι ηφαιστειακής προέλευσης όπως:

- *Πορώδεις τόφφοι (Q.tv)*, στρωμένοι και συνεκτικοί
- *Λαχάρ Φυρίπλακας (Q.lh₂, lh₁, lh)*, συνιστώμενο από ρυολιθικά – περλιθικά υλικά, που αποτελείται από εκτεταμένες αποθέσεις ασύνδετων ετερογενών κροκαλολατύπων μεταμορφωμένων, ηφαιστειακών και ασβεστολιθικών πετρωμάτων.
- *Ρυολιθικές, δακτιτικές, ροδοακτιτικές και ανδρακτιτικές λάβες (Q.p₂, Q.α.δα1, Q.p,ρ.δα)*, οι οποίες αποτελούνται από δόμους και αλληπάλληλα ρεύματα

με τις λάβες αυτές να εμφανίζονται κατά τόπους υδροθερμικά εξαλλοιωμένες (Q.la),

- *Λεπτά στρώματα από πυροκλαστικά υλικά (Q.tf₂)*
- *Πυροκλαστικοί κώνοι και αποθέσεις (Q.p1, Q.br₁, Q.br₂)*, οι οποίοι συνίστανται από στρώματα, σε συνεχείς εναλλαγές τέφρας, άμμου, κίσηρης και λάβας ποικίλης σύστασης.
- *Ρυολιθικοί ιγνιμβρίτες (q.ig)*, μερικώς εξαλλοιωμένοι στη ΒΔ Μήλο, που παρεμβάλλονται σε ρεύματα λάβας, πάχους μέχρι 5m.

3.2.2 Νεογενές

3.2.3.1 Ανώτερο Πλειόκαινο

Οι σχηματισμοί που κυριαρχούν σε αυτή τη γεωλογική περίοδο είναι ηφαιστειακής προέλευσης όπως:

- *Ιγνιμβρίτες (Ne.ig)*, στα ΝΔ της Μήλου, καλά συγκολλημένους, εξαλλοιωμένους και αποτελούμενους από θραύσματα ύαλου, κίσηρης και ξενολίθων, οι οποίοι μεταβαίνουν προς τα πάνω σε τόφφους, το πάχος των οποίων δεν ξεπερνά τα 100m.
- *Παλαιοί τόφφίτες (Ne.tf)*, θαλάσσιας προέλευσης, λευκοί έως υποκίτρινοι, αποτελούμενοι από ηφαιστειακά υλικά και οι οποίοι εναλλάσσονται με παλαιούς τόφφους (*Ne.tf*), χερσαίας απόθεσης, λευκούς έως στακτόμαυρους και γενικά όξινης σύστασης. Ενίοτε, οι τόφφοι (*t*), παρουσιάζονται πολύ εξαλλοιωμένοι, λόγω υδροθερμικής δράσης.
- *Αποθέσεις ρευμάτων κίσηρης (Ne.ki)*
- *Ηφαιστίτες (vol)*, υδροθερμικά πολύ εξαλλοιωμένοι.

3.2.3.2 Ανώτερο Μειόκαινο – Κατώτερο Πλειόκαινο

- *Επικλυσιγενή κροκαλοπαγή*, στα οποία παρεμβάλλονται στρώματα άμμου και ερυθρής αργίλου
- *Ασβεστόλιθοι (Ms-Pli)*, οι οποίοι εμφανίζονται λεπτο-μεσοστρωματώδεις, λίγο ή καθόλου μαργαϊκοί, μερικές φορές στιφροί και με σπάνια στρώματα ερυθρής αργίλου.

3.2.3 Μεσοζωικό

Στη Μήλο απαντά το *κρυσταλλικό υπόβαθρο (Mz.sch)*, σε περιορισμένη έκταση στα ΝΑ του νησιού και συνιστάται από ένα σύστημα πρασινοσχιστόλιθων από φυλλίτες, μεταβασάλτες, σπανιότερα μάρμαρα έως και φλέβες χαλαζία, ενώ εμφανίζονται και *μεταμορφωμένα πετρώματα υψηλής πίεσης (κυρίως γλαυκοφανιτικοί σχιστόλιθοι)*.

3.3 Υδρολιθοστρωματογραφία

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, σε ότι αφορά τα υδρολιθολογικά τους χαρακτηριστικά, ταξινομούνται στις ακόλουθες κατηγορίες: (α) υδροπερατοί έως ημιπερατοί και (β) πρακτικά αδιαπέρατοι, βάσει αδημοσίευτων στοιχείων που συνέλεξε το Ι.Γ.Μ.Ε. με την εποπτεία του Δρ. Υδρογεωλόγου Παναγιώτη Γιαννουλόπουλου.

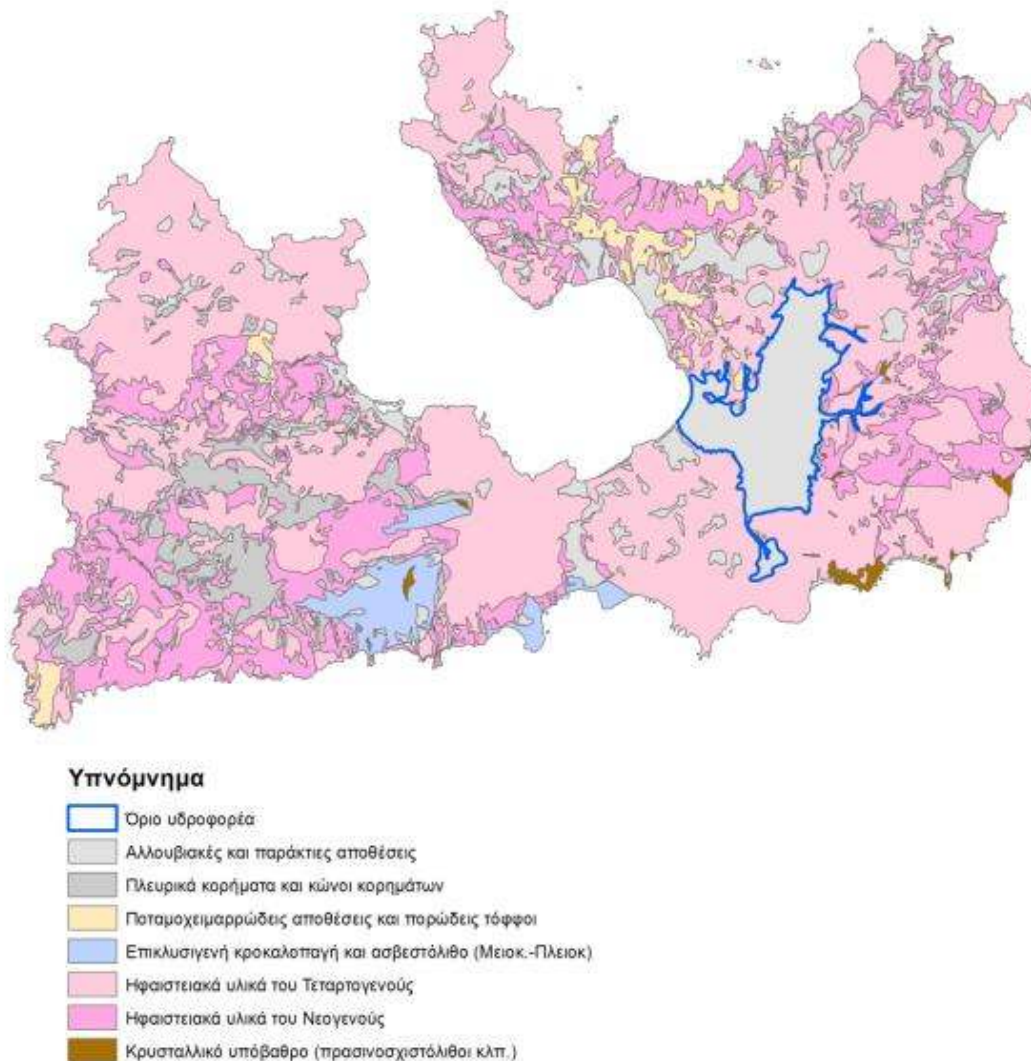
3.3.1 Υδροπερατοί έως ημιπερατοί σχηματισμοί

Πρόκειται για τα κροκαλοπαγή, τις αλλουβιακές και παράκτιες αποθέσεις, με πάχος μέχρι 100m στην περιοχή της Ζεφυρίας. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα πλευρικά κορήματα και οι κώνοι κορημάτων, καθώς και παλαιότερες

ποταμοχειμάρριες αποθέσεις, στα οποία παρεμβάλλονται στρώματα άμμου και ερυθρής αργίλου και απαντούν στις απολήξεις των κοιλάδων, όπως είναι οι όρμοι της Φυλακωπής, της Πάχαινας, του Αδάμαντα, του Προβατά κ.α. Οι υδροφόροι ορίζοντες αναπτύσσονται εντός των προσχωματικών αποθεμάτων και των ηφαιστειακών αναβλημάτων και προέρχονται από αποσάθρωση ηφαιστειακών τόφφων, οι οποίοι καλύπτουν το μεγαλύτερο μέρος του νησιού. Ανάλογα με την περιεκτικότητά τους σε άργιλο παρουσιάζουν διακύμανση στην υδροπερατότητά τους, γεγονός που τα καθιστά ενίοτε ημιπερατά, ενώ η υδροδυναμικότητα των σχηματισμών αυτών έγκειται στην έκταση, το πάχος και την κοκκομετρική τους σύνθεση.

3.3.2 Πρακτικά αδιαπέρατοι σχηματισμοί

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι λάβες (ρυσολιθικές, δακιτικές, ανδεσιτικές), οι τόφφοι, οι ιγνιμβρίτες, οι ηφαιστίτες και το κρυσταλλικό υπόβαθρο, δηλαδή οι σχιστόλιθοι, οι φυλλίτες και οι μεταβασάλτες. Όπου κατά θέσεις εμφανίζονται έντονα αποσαθρωμένοι, ρηγματωμένοι (συστήματα διακλάσεων και ασυνεχειών) και πολυπτυχωμένοι, διαμορφώνεται υδροφορία τοπικής σημασίας και μέτριας υδροδυναμικότητας.



Εικόνα 3.1: Γεωλογικός χάρτης νήσου Μήλου (Στοιχεία Ι.Γ.Μ.Ε.)

3.4 Τεκτονική

Ένα από τα σπουδαιότερα συστήματα ρηγμάτων αποτελεί αυτό με διεύθυνση ΔΒΔ – ΑΝΑ, είναι παράλληλο προς το ηφαιστειακό τόξο και θεωρείται υπεύθυνο για τη δημιουργία της τεκτονικής ρηξιγενών τεμάχων, που σχηματίζει ένα σύνολο κεράτων και βυθισμάτων του υποβάθρου. Μια άλλη τεκτονική διεύθυνση που επηρεάζει παρόμοια συστήματα ανυψώσεων – καταβυθίσεων, είναι η με

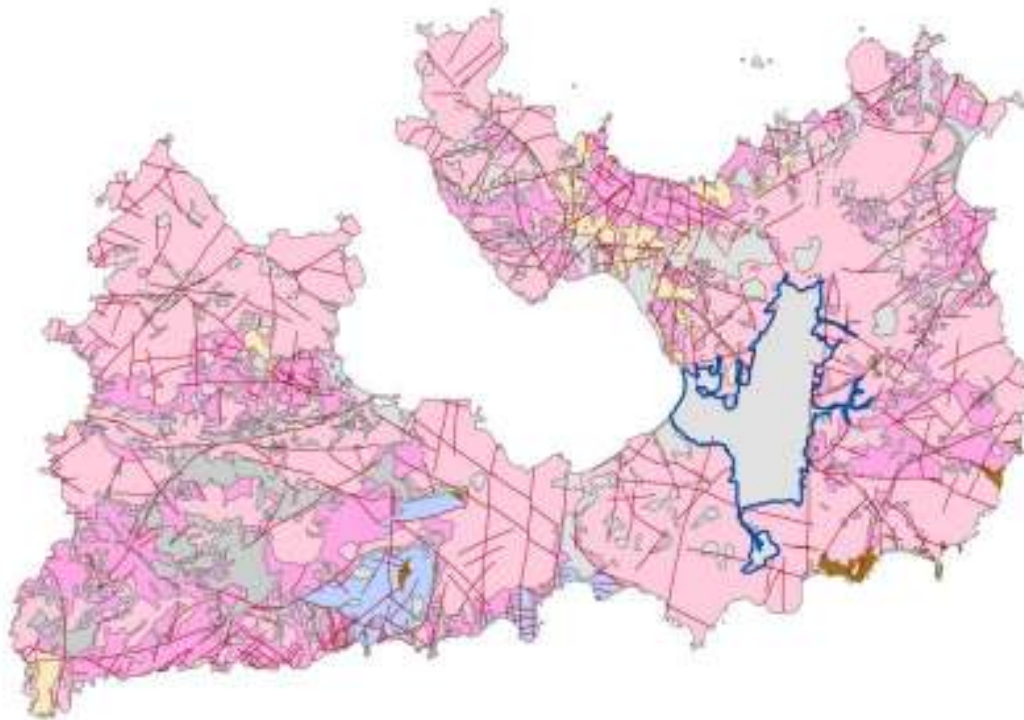
διεύθυνση από Ανατολή προς Δύση, και έχει διαμορφωθεί κατά την περίοδο της ηφαιστειακής δραστηριότητας. Σημαντικό επίσης σύστημα ρηγμάτων και διαρρήξεων αποτελεί αυτό με διεύθυνση από Βορρά προς Νότο, το οποίο είναι ευδιάκριτο επιφανειακά και επέτρεψε την έξοδο των μαγμάτων και εν συνεχεία τη δημιουργία του μεγαλύτερου μέρους της ηφαιστειακής δραστηριότητας. Φανερά παραδείγματα του γεγονότος αυτού είναι η ευθυγράμμιση πολλών δομών και σημείων εξόδου λάβας.

Το σύστημα των ρηγμάτων με διεύθυνση από βορρά προς νότο, σχημάτισε τα δύο τεκτονικά βυθίσματα του νησιού. Το μεγαλύτερο από αυτά βρίσκεται στην πεδιάδα της Ζεφυρίας, και έχει διαρρήξει μόνο το ηφαιστειακό κάλυμμα και όχι το υπόβαθρο, που αποτελεί τεκτονική ανύψωση. Το μικρότερο τεκτονικό βύθισμα οποίο σχημάτισε τον ισθμό Προβατά – Χιβαδολίμνης. Αντίθετα, τα τεκτονικά κέρατα είναι περισσότερο πολυάριθμα και δημιουργήθηκαν από ρήγματα με κυριότερη διεύθυνση από Ανατολή προς Δύση. (Ι.Γ.Μ.Ε. – αδημοσίευτα στοιχεία).

3.5 Υδροφόροι Σχηματισμοί της Νήσου Μήλου

Η παρουσία υδροφόρων οριζόντων στη Μήλο επηρεάζεται από το γεωθερμικό πεδίο και ειδικότερα από την παρουσία διαλυμάτων υψηλών θερμοκρασιών. Σημαντική υδροφορία αναπτύσσεται κατά μήκος των ρηξιγενών ζωνών, όπου δε γίνεται μόνο η κυκλοφορία των μετεωρικών νερών που κατεισδύουν, αλλά και των γεωθερμικών ρευστών υψηλών θερμοκρασιών (απαντούν πολυάριθμες πηγές με θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 35 – 45 °C).

Στη Μήλο βάσει των παραπάνω διαμορφώνονται έξι υδρογεωλογικές ενότητες, οι οποίες εξυπηρετούν τις ανάγκες της. Αυτές καλύπτονται κυρίως από τις υδρογεωλογικές ενότητες Αδάμαντα, Απολλωνίας και Ζεφυρίου, ενώ ελάχιστη είναι η συνεισφορά των υδρογεωλογικών λεκανών Χονδροβουνίου και Δυτικής Μήλου.



Εικόνα 3.2: Όρια υπόγειου και παράκτιου υδροφορέα προσχωματικής λεκάνης Ζεφυρίας στη νήσο Μήλο (Στοιχεία Ι.Γ.Μ.Ε.)

Ο υδροφορέας ο οποίος εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από αλλουβιακές και παράκτιες αποθέσεις και βρίσκεται στην προσχωματική λεκάνη Ζεφυρίας, ανατολικά της νήσου. Τα όρια του υδροφορέα παρουσιάζονται στον παραπάνω χάρτη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4
ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΙΑ ΤΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ

4. ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΙΑ ΤΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ

4.1 Γενικές Αρχές – Ορισμός Υδροφορέα

Υδροφορέας ή υδροφόρος καλείται ο γεωλογικός σχηματισμός ο οποίος αφενός περιέχει νερό και αφετέρου επιτρέπει την κίνηση σημαντικών ποσοτήτων νερού εντός αυτού κάτω από φυσικές συνθήκες περιβάλλοντος (Bear, 1979). Ο υδροφορέας έχει αυξημένη ικανότητα αποθήκευσης και μεταβίβασης νερού για την τροφοδοσία γεωτρήσεων και φρεάτων. Γενικά υπάρχουν διάφοροι τύποι υδροφορέα ανάλογα με τη γεωλογική δομή και τις υδραυλικές συνθήκες που ισχύουν. Με βάση αυτά τα στοιχεία οι τύποι υδροφορέα είναι οι παρακάτω:

- *Περιορισμένος ή υπό πίεση (confined)* αν περιορίζεται από πάνω και από κάτω από αδιαπέρατους γεωλογικούς σχηματισμούς. Χαρακτηριστικό του υπό πίεση υδροφορέα είναι ότι αν γίνει μια γεώτρηση μέσα σε αυτόν, η στάθμη του νερού στη γεώτρηση θα ανέβει ψηλότερα από το πάνω αδιαπέρατο όριο και ίσως φτάσει στην επιφάνεια του εδάφους. Η στάθμη του νερού δείχνει το *πιεζομετρικό φορτίο* σε αυτό το σημείο. Κατά συνέπεια πιεζομετρική επιφάνεια είναι η ιδεατή εκείνη επιφάνεια που θα ορίζονταν από τις στάθμες γεωτρήσεων παρατήρησης, που θα γίνονταν σε διάφορα σημεία, κατά την οριζόντια έκταση του συγκεκριμένου υδροφορέα. Ένας περιορισμένος υδροφορέας λέγεται *αρτεσιανός* όταν η στάθμη της πιεζομετρικής του επιφάνειας βρίσκεται ψηλότερα από τη στάθμη του εδάφους.
- *Ελεύθερος ή φρεάτιος (unconfined)* αν ενώ το κάτω όριο συμπίπτει με ένα αδιαπέρατο στρώμα, το πάνω όριο παρουσιάζει ελεύθερη επιφάνεια. Η ελεύθερη επιφάνεια εμφανίζει μεταβαλλόμενη μορφή και κλίση, ανάλογα με τις συνθήκες στις περιοχές τροφοδοσίας και στράγγισης, τις αντλήσεις από γεωτρήσεις και την υδραυλική αγωγιμότητα.

- *Υδροφορείς με διαρροή (leaky aquifers)*, αν τα στρώματα που οριοθετούν έναν υδροφορέα είναι ημιπερατά και πρόκειται για μεγάλης έκτασης υδροφόρους τότε η ποσότητα του νερού που εισέρχεται ή εξέρχεται είναι σημαντική.

Ο υδροφορέας που εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική εργασία έχει τα χαρακτηριστικά ενός φρεάτιου προσχωματικού υδροφορέα, με επιπλέον χαρακτηριστικό ότι είναι παράκτιος. Το τελευταίο χαρακτηριστικό είναι και το σημαντικότερο, αφού τέτοιοι υδροφορείς αντιμετωπίζουν προβλήματα ποιοτικής υποβάθμισης των υδάτων τους λόγω υπεράντλησης και κατ' επέκταση της εισχώρησης του θαλασσινού νερού στον υδροφόρο.

4.2 Πιεζομετρία Υδροφορέα

Οι διακυμάνσεις της πιεζομετρικής στάθμης των υδροφόρων στρωμάτων που μετρούνται στους σωλήνες των γεωτρήσεων κατά τη διάρκεια ενός υδρολογικού εξαμήνου και ενός υδρολογικού έτους είναι ενδεικτικές του ρυθμού φυσικής αποστράγγισης και επαναπλήρωσης του υδροφόρου ορίζοντα, όπως και ενδεικτικές του ρυθμού της εκμετάλλευσης αυτών από ανθρωπογενείς ενέργειες. Μεγάλες διακυμάνσεις της στάθμης κατά τη διάρκεια των θερινών υδρολογικών εξαμήνων δηλώνουν και υπέρμετρο βαθμό εκμετάλλευσης των υδροφορέων, πέρα από αυτόν που επιτρέπουν τα υδραυλικά τους χαρακτηριστικά. Μια τέτοια κατάσταση παρουσιάζει συνεχή ταπείνωση της πιεζομετρικής τους στάθμης στη διάρκεια συνεχών υδρολογικών ετών, δηλωτική της αυξημένης εκμετάλλευσης και εκκένωσης του υδροφορέα σε σχέση με τη φυσική του επαναπλήρωση από τις βροχοπτώσεις. Υπάρχουν διάφορες αιτίες που προκαλούν διακυμάνσεις της πιεζομετρικής επιφάνειας, είτε αυτές είναι φυσικές είτε είναι τεχνητές.

Οι φυσικές διακυμάνσεις προκαλούν είτε τυχαία αποτελέσματα, αν για παράδειγμα προκύψουν από μια φυσική καταστροφή, όπως σεισμό ή

κατάρρευση ενός μεγάλου γεωλογικού σχηματισμού, είτε επαναλαμβανόμενα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις συνηθισμένες διεργασίες του υδρολογικού κύκλου (βροχόπτωση, εξάτμιση, μεταβολές της ατμοσφαιρικής πίεσης κ.α.)

Αντίθετα οι τεχνητές διακυμάνσεις προκύπτουν από ανθρωπογενείς επεμβάσεις όπως είναι η διάνοιξη γεωτρήσεων για την άντληση των υδάτων ή η κατασκευή αποστραγγιστικών και εγγειοβελτιωτικών έργων.

4.3 Πιεζομετρικοί Χάρτες

Για τη διερεύνηση της πιεζομετρικής κατάστασης των εκμεταλλεόμενων υδροφόρων στρωμάτων στο χώρο της έρευνας, αξιοποιούμε τις μετρήσεις απόλυτης στάθμης των γεωτρήσεων που έχουμε στη διάθεσή μας, έτσι ώστε να πάρουμε μια όσο το δυνατόν ακριβέστερη εικόνα της κατανομής των ισοδυναμικών γραμμών της πιεζομετρικής επιφάνειας και να εντοπίσουμε τις διευθύνσεις των δρόμων της υπόγειας ροής του νερού και τις υδραυλικές της κλίσεις.

Οι μετρήσεις της πιεζομετρικής επιφάνειας στις γεωτρήσεις παρατήρησης, θα πρέπει να αναφέρονται στο ίδιο χρονικό διάστημα, έτσι ώστε η εικόνα του πιεζομετρικού χάρτη που θα πάρουμε να χαρακτηρίζει και να αντιπροσωπεύει την υδραυλική κατάσταση των υδροφορέων σε όλη την επιφάνεια του χώρου έρευνας για την ίδια χρονική περίοδο. Η αξιοποίηση των τιμών της πιεζομετρικής στάθμης που παίρνονται στις γεωτρήσεις μπορεί να γίνει για τη θέση της στην αρχή και το τέλος καθενός υδρολογικού εξαμήνου ή ακόμη στο τέλος κάθε υδρολογικού έτους ή σειράς ετών. Η θέση των ισοδυναμικών γραμμών των πιεζομετρικών χαρτών που κατασκευάζουμε μας δίνει και την υδραυλική κατάσταση των υδροφορέων που εκμεταλλεόμαστε (Δημόπουλος, www.geo.auth.gr).

Γενικά, από ένα πιεζομετρικό χάρτη μπορούμε να:

- προσδιορίσουμε το βάθος που βρίσκεται η στάθμη των υπόγειων νερών,
- σχεδιάσουμε τις γραμμές υπόγειας ροής και τη διεύθυνση της ροής,
- σχεδιάσουμε τους άξονες υπόγειας αποστράγγισης και τον υπόγειο υδροκρίτη,
- υπολογίσουμε την υδραυλική κλίση,
- κατασκευάσουμε το προφίλ ταπείνωσης της πιεζομετρικής επιφάνειας,
- κατασκευάσουμε το χάρτη των ισοπαχών καμπύλων του υδροφορέα,
- υπολογίσουμε την αποθηκευτική ικανότητα του υδροφορέα (συνδυασμός δύο πιεζομετρικών χαρτών για δύο διαφορετικές περιόδους),
- πάρουμε πληροφορίες για την ύπαρξη ή όχι πλευρικής τροφοδοσίας, για τις περιοχές εκτόνωσης του υδροφορέα, για την τροφοδοσία από ποτάμια, λίμνες κλπ. και
- να αντλήσουμε πληροφορίες για την υδροπερατότητα, την παροχή και τον τύπο του υδροφορέα.

4.4 Πλευρική Οριοθέτηση Υδροφορέα

Γενικά ένας υδροφορέας οριοθετείται βάση των γεωλογικών σχηματισμών που αποτελούν τα φυσικά εξωτερικά όρια. Τα όρια αυτά αποτελούνται από πρακτικά αδιαπέρατες γεωλογικές και υδρογεωλογικές δομές, οι οποίες επηρεάζουν μόνιμα την υπόγεια ροή. Η οριοθέτηση του υδροφορέα της περιοχής μελέτης, πραγματοποιήθηκε με βάση τα παρακάτω κριτήρια.

4.4.1 Βάσει φυσικών ορίων

Για τον υπόγειο και παράκτιο υδροφορέα της προσχωματικής λεκάνης Ζεφυρίας, οι αδιαπέρατοι σχηματισμοί που πρακτικά τον οριοθετούν, είναι κατά κύριο λόγο ηφαιστειακά υλικά. Πιο συγκεκριμένα στο βόρειο και νότιο τμήμα του υδροφορέα, οι γεωλογικοί σχηματισμοί αποτελούνται από ηφαιστειακά υλικά του Τεταρτογενούς και κυρίως πορώδεις τόφφοι, λεπτά στρώματα από πυροκλαστικά υλικά και ρυολιθικοί ιγνιμβρίτες στο ΒΔ τμήμα. Στο ανατολικό τμήμα συναντάμε κατά κύριο λόγο ηφαιστειακά υλικά του Νεογενούς όπως ιγνιμβρίτες, παλαιούς τοφφίτες, ηφαιστίτες και αποθέσεις ρευμάτων κίσηρης. Στο δυτικό τμήμα η οριοθέτηση του υδροφορέα γίνεται από τη θαλάσσια επιφάνεια. Γενικά εκτιμάται ότι εισροές ή εκροές δε λαμβάνουν χώρα, ακόμα και σε κάποια λεπτά τμήματα του υδροφορέα, στο νότιο και ανατολικό του τμήμα, που πιθανώς να προέκυψαν από αλλουβιακές προσχώσεις στους αδιαπέρατους σχηματισμούς. Οι θέσεις αυτές είναι περιορισμένης έκτασης και η τροφοδοσία θεωρείται ελάχιστη και αμελείται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης που θα εφαρμοστεί στη συνέχεια.

4.4.2 Βάσει υδραυλικών ορίων

Τα υδραυλικά όρια προκύπτουν από το δίκτυο ροής και μπορούν να τοποθετηθούν είτε κατά μήκος επιλεγμένων γραμμών ροής είτε κατά μήκος ισοδυναμικών – πιεζομετρικών γραμμών (όρια γνωστού υδραυλικού φορτίου). Ως εκ τούτου τα υδραυλικά όρια δεν αποτελούν μόνιμες δομές και μπορούν να μεταβληθούν χρονικά. Η θέση τους, αν και καθοδηγείται από τα δίκτυα ροής, τοποθετείται τεχνητά από τον ερευνητή και έτσι αποτελεί υποκειμενικό στοιχείο.

Για τους παραπάνω λόγους, είναι κατανοητό ότι τα φυσικά όρια γενικά προτιμώνται σε σχέση με τα υδραυλικά. Στις περιπτώσεις όμως που φυσικά όρια δεν είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν για τις ανάγκες μιας μελέτης, τότε τα

υδραυλικά όρια μπορούν να δώσουν τη λύση στην πλευρική οριοθέτηση του υδροφορέα. Στην περίπτωση που εξετάζεται η οριοθέτηση έγινε βάσει των φυσικών ορίων.

4.5 Κατακόρυφη Οριοθέτηση Υδροφορέα

Μετά την πλευρική οριοθέτηση του υδροφορέα, σημαντικό είναι να εκτιμηθεί το πάχος αυτού. Ο παράκτιος υδροφορέας της προσχωματικής λεκάνης Ζεφυρίας είναι φρεάτιος και ως εκ τούτου μπορεί να θεωρηθεί ως οροφή του η επιφάνεια του εδάφους.

Η τρίτη διάσταση δεν είναι εύκολο να εκτιμηθεί και βασίζεται σε σημειακές πληροφορίες, όπως το βάθος των υδρογεωτρήσεων και απλή περιγραφή της λιθολογίας, διότι κατά την ανόρυξη γεωτρήσεων δεν λαμβάνεται δείγμα εδάφους και η λιθολογία που συναντάται περιγράφεται επιτόπου από τον επιβλέποντα γεωλόγο, με κατανοητή την υποκειμενικότητα της διαδικασίας.

Στοιχεία σχετικά με την εκτίμηση της βάσης του υδροφορέα για την περίπτωση που εξετάζουμε, όπως γεωλογικές τομές, δεν υπάρχουν, οπότε θα λάβουμε υπόψη τα χαρακτηριστικά των γεωλογικών σχηματισμών που εμφανίζονται στην περιοχή και το βάθος των υδρογεωτρήσεων.

Βάσει των γεωλογικών σχηματισμών το πάχος του υδροφορέα μπορεί να κυμαίνεται από 50 έως 75m. Για την απλοποίηση των υπολογισμών που ακολουθούν στα επόμενα κεφάλαια, το πάχος του υδροφόρου ορίστηκε 50m, τιμή που ούτως ή άλλως είναι απλά προσεγγιστική.

4.6 Πιεζομετρία του Υδροφορέα στην Περιοχή Μελέτης

Για τη διερεύνηση της πιεζομετρίας ενός υδροφορέα χρειάζονται στοιχεία που αφορούν στάθμες των γεωτρήσεων και των πηγαδιών της περιοχής σε διάφορες χρονικές περιόδους. Για τον υδροφορέα που εξετάζουμε δεν υπήρχαν μελέτες που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την άντληση τέτοιας πληροφορίας. Τα στοιχεία που παρουσιάζονται παρακάτω, αφορούν μετρήσεις στατικής στάθμης σε φρέατα και γεωτρήσεις που πραγματοποιήθηκαν υπό την εποπτεία του Δρ. Υδρογεωλόγου Παναγιώτη Γιαννουλόπουλου και πρόκειται για αδημοσίευστα στοιχεία που παραχωρήθηκαν αποκλειστικά και μόνο για τη σύνταξη της διπλωματικής εργασίας.

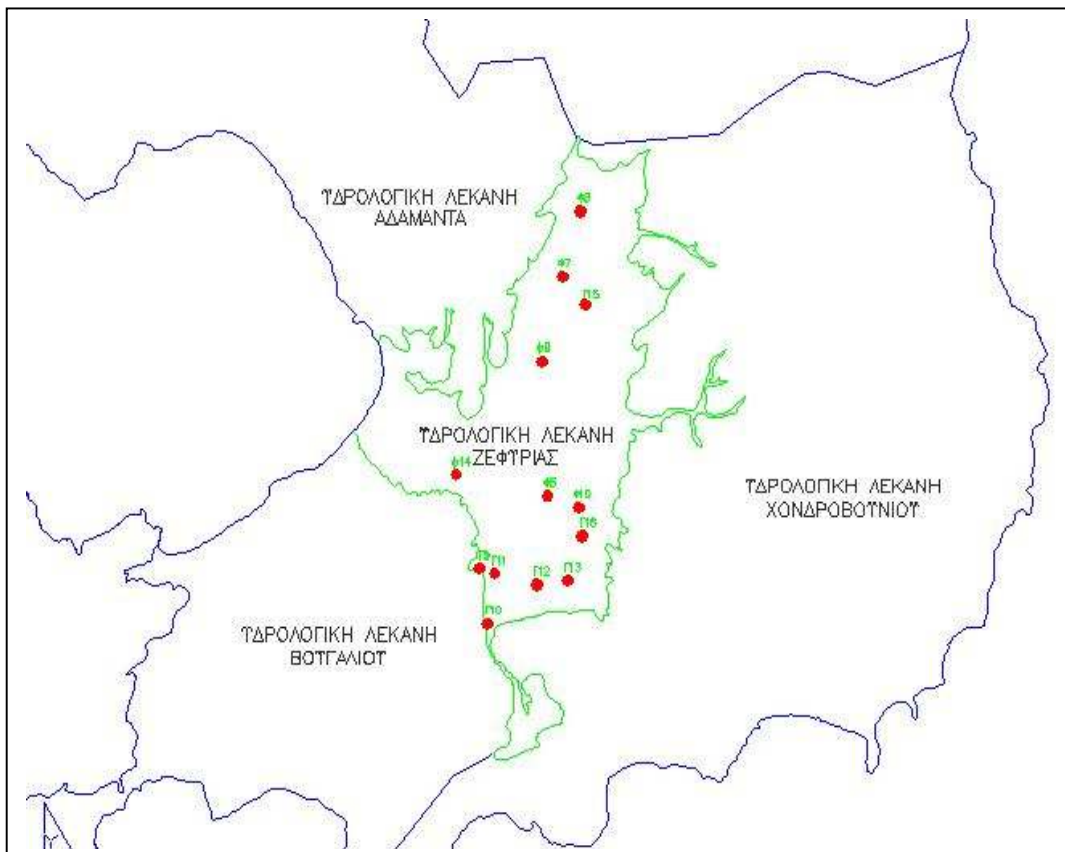
Τα στοιχεία αυτά αφορούν τις γεωτρήσεις Γ10, έως Γ13, Γ15, Γ16 και τα φρέατα Φ5 και Φ7 έως Φ10 σύμφωνα με την κωδικοποίηση του Υπουργείου Γεωργίας, η θέση των οποίων εντοπίζεται μέσα στα όρια του υδροφορέα.

Κωδική Ονομασία	X	Y	Z	Μέση Στάθμη
Φ14	542592,00	4060941,00	6.60	7,1
Φ9	543490,00	4062040,00	8.40	5,7
Γ15	543950,00	4062553,00	9.30	7,7
Φ7	543701,00	4062864,00	11.20	10,3
Φ5	543546,00	4060751,00	11,80	11,6
Φ8	543885,00	4063499,00	13.50	12,0
Φ10	543870,00	4060637,00	18.00	17,5
Γ11	542994,00	4059999,00	22.30	21,3
Γ12	543434,00	4059895,00	20,70	22,5
Γ16	543907,00	4060364,00	24.20	22,7
Γ9	542838,00	4060051,00	23.80	23,3
Γ13	543760,00	4059933,00	29.70	27,9
Γ10	542921,00	4059513,00	39.90	39,4

Πίνακας 4.1: Θέση, χρήση και μέση στάθμη φρεάτων και γεωτρήσεων στον υδροφορέα

Η καταγραφή των τιμών της μέσης στάθμης στις γεωτρήσεις αναφέρονται στην περίοδο Μάιος – Σεπτέμβριος του έτους 2007 και επομένως μπορούν να

θεωρηθούν επιβαρυμένες. Τα ύψη Z έχουν ως σημείο αναφοράς τη στάθμη της θάλασσας και υπολογίσθηκαν από τα φύλλα χάρτη 7572_8 και 7582_2 της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού κλίμακας 1:5000, με εκτίμηση από τις ισοϋψείς καμπύλες αφού πρώτα έγινε γεωαναφορά των χαρτών στο Ελληνικό γεωδαιτικό Σύστημα Ε.Γ.Σ.Α. '87. Η εκτίμηση των υψομέτρων ελέγχεται για την ακρίβειά της, αλλά λόγω έλλειψης υψομετρικών δεδομένων θεωρήθηκε η πιο ενδεδειγμένη. Από τη διαφορά του ύψους Z του φρέατος ή της γεώτρησης με τη μέση στάθμη προκύπτει το μέσο υδραυλικό φορτίο ως προς την επιφάνεια της θάλασσας.



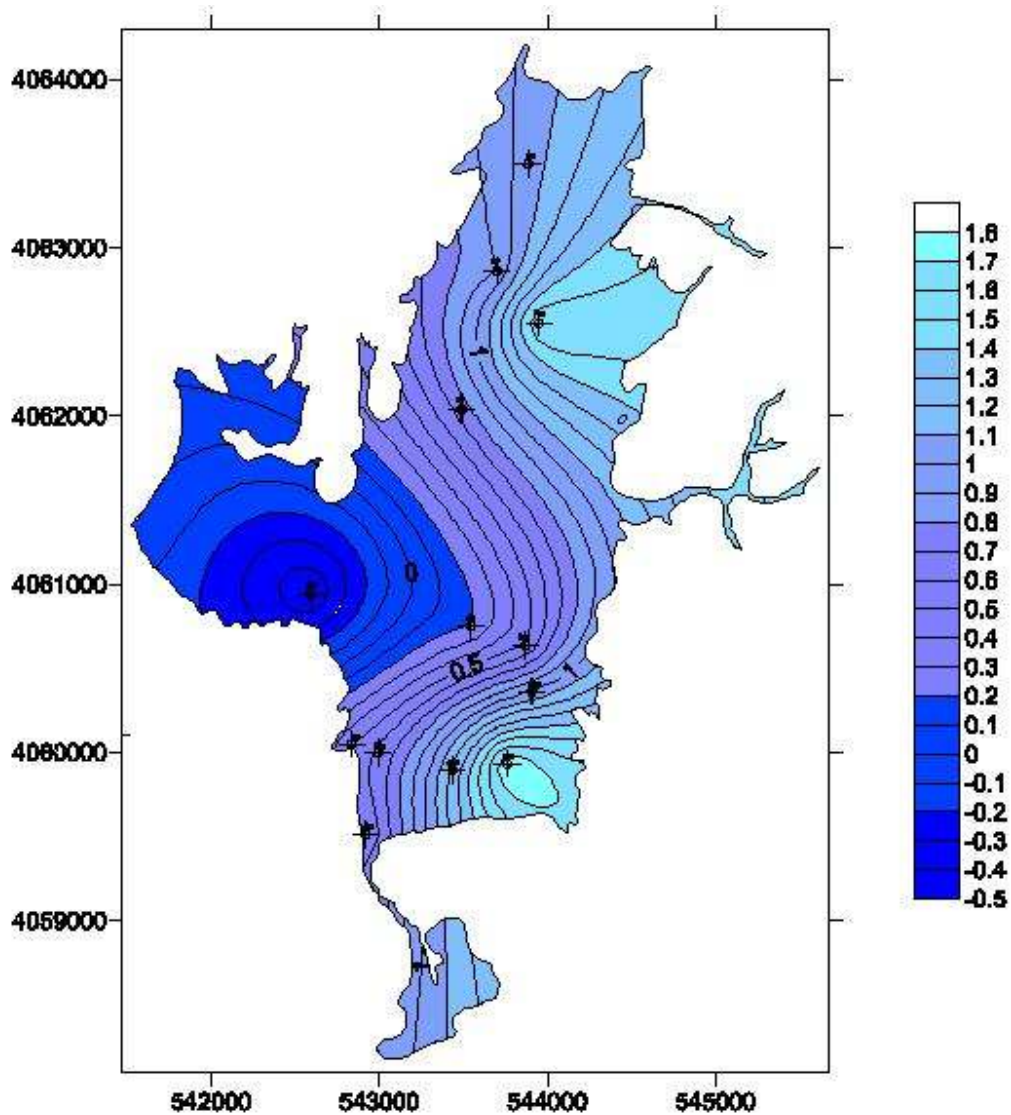
Εικόνα 4.1: Κατανομή γεωτρήσεων στον υπόγειο υδροφόρα της προσχωματικής λεκάνης Ζεφυρίας στη ν. Μήλο

Κωδική Ονομασία	Μέσο Υδραυλικό Φορτίο
Φ14	-0,50
Φ9	2,70
Γ15	1,60
Φ7	0,90
Φ5	0,20
Φ8	1,50
Φ10	0,50
Γ11	1,00
Γ12	-1,80
Γ16	1,50
Γ9	0,50
Γ13	1,80
Γ10	0,50

Πίνακας 4.2: Μέσο υδραυλικό φορτίο γεωτρήσεων και φρεάτων

Από τις παραπάνω μετρήσεις παρατηρούμε πως μόνο σε ένα φρέαρ και σε μια γεώτρηση παρατηρείται αρνητική τιμή του υδραυλικού φορτίου και συγκεκριμένα στο Φ14 όπου καταγράφεται τιμή -0,50m και στη Γ12 με -1,80m αντίστοιχα. Αντίθετα στο φρέαρ Φ9 καταγράφεται η μέγιστη θετική τιμή υδραυλικού φορτίου που φτάνει τα 2,70m. Η τιμή ωστόσο του μέσου υδραυλικού φορτίου που καταγράφεται στη γεώτρηση Γ12 δεν συνάδει με τις τιμές των γειτονικών Γ13 και Γ11 που είναι αρκετά υψηλές και επομένως δεν συμπεριλήφθηκε στον προσδιορισμό της πιεζομετρίας του υδροφορέα.

Με τη χρήση των παραπάνω δεδομένων και τη βοήθεια του λογισμικού *Surfer Golden Software 8*, σχεδιάστηκαν οι ισοσταθμικές καμπύλες οι οποίες παρουσιάζουν την στάθμη των υπογείων νερών του παράκτιου υδροφορέα κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου του έτους 2007. Επειδή οι τιμές για τις στάθμες είναι σημειακές, χρησιμοποιήθηκε η γεωστατιστική μέθοδος *Kriging* στην κατασκευή του κανάβου. Έτσι προκύπτει ο παρακάτω πιεζομετρικός χάρτης της περιοχής του υδροφορέα, που δεν είναι άλλο από τη δισδιάστατη απεικόνιση της κατανομής του υδραυλικού φορτίου και της ροής του.



Εικόνα 4.2: Ισοσταθμικές καμπύλες υπόγειου υδροφόρα προσχωματικής λεκάνης Ζεφυρίας

Η μέθοδος *Kriging* παρέχει τη δυνατότητα περαιτέρω εμβάθυνσης στη δομή της χωρικής μεταβολής της μελετώμενης μεταβλητής. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της είναι ότι έχει την ιδιότητα της ανισοτροπίας. Στη γενική της μορφή, η μέθοδος αυτή, αποτελεί μια τεχνική που στηρίζεται στη θεωρία των περιοχοποιημένων

μεταβλητών που αναπτύχθηκε στα πλαίσια μιας ευρύτερης επιστημονικής περιοχής, της Γεωστατιστικής (Λατινόπουλος, 1995).

Από τον παραπάνω πιεζομετρικό χάρτη παρατηρούμε πως οι αρνητικές στάθμες είναι ελάχιστες και τοποθετούνται κυρίως στο δυτικό και παράκτιο τμήμα του υδροφορέα. Εξάλλου το αποτέλεσμα αυτό ήταν αναμενόμενο εφόσον η μοναδική αρνητική στάθμη που χρησιμοποιήθηκε, παρατηρήθηκε στο φρέαρ Φ14, το οποίο βρίσκεται δυτικά στον υδροφορέα μας, και είναι το πλησιέστερο στην ακτογραμμή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5
ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ
ΕΜΠΕΙΡΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ

5. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ

5.1 Γενικά

Η εξατμισοδιαπνοή του νερού στο φυσικό περιβάλλον, είτε από ελεύθερες υδάτινες επιφάνειες, είτε από γυμνές ή φυτοκαλυμμένες επιφάνειες της γης είναι από τις σημαντικές συνιστώσες του υδρολογικού κύκλου. Ο υδρολογικός κύκλος, ξεκινά με τη διαρκή προσφορά νερού από την ατμόσφαιρα στην επιφάνεια της γης υπό τη μορφή υδρομετεώρων που καταλήγουν στους ποταμούς, στις λίμνες και στις θάλασσες, είτε μέσα από διήθηση των υπογείων νερών, είτε άμεσα σαν επιφανειακή απορροή. Ο κύκλος κλείνει με την επαναφορά νερού στην ατμόσφαιρα μέσω της εξάτμισης. (Παπαϊωάννου 1995).



Εικόνα 5.1: Ο υδρολογικός κύκλος

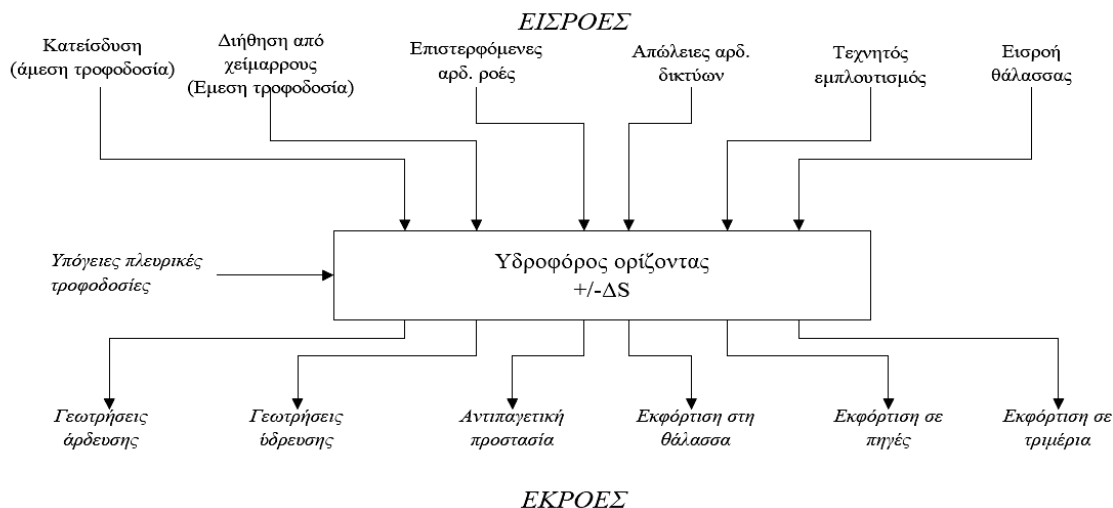
Το νερό εισερχόμενο στη φάση της εξάτμισης του υδρολογικού κύκλου είναι πλέον μη προσιτό και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί περαιτέρω. Αυτό αποτελεί πολύ σημαντικό στοιχείο για τη προστασία και διαχείριση των υδατικών πόρων μιας περιοχής, αφού σε πολλά σημεία ανά τον κόσμο οι υπάρχοντες υδατικοί πόροι βρίσκονται σε οριακό σημείο, κάτι που χρήζει απαραίτητη μια πιο ορθολογική τους χρήση. Η υλοποίηση μέτρων προστασίας και αξιοποίησης των υδατικών πόρων μιας περιοχής προϋποθέτει τη γνώση των ποσοτήτων νερού που διακινούνται, στα πλαίσια του υδρολογικού κύκλου, στη θεωρούμενη περιοχή. Αυτή ακριβώς η ποσότητα αποτελεί το σύνολο των διαθέσιμων υδατικών πόρων (Ναλμπάντης & Τσακίρης, 2006).

Ο υπολογισμός του υδατικού ισοζυγίου των υδροφόρων σχηματισμών και των υδατικών συστημάτων γενικότερα αποσκοπεί στον προσδιορισμό όλων των εισροών και εκροών νερού στη μονάδα του χρόνου (Π. Γιαννουλόπουλος 2000). Η εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου στην ουσία εκφράζει τη διατήρηση της μάζας, ότι δηλαδή το αλγεβρικό άθροισμα των διακινήσεων και των μεταβολών αποθήκευσης νερού στον όγκο αναφοράς είναι μηδέν για οποιαδήποτε χρονική διάρκεια. Δηλαδή

$$\Delta S = I - O$$

που αποτελεί και την εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου. Στην παραπάνω εξίσωση ο παράγοντας ΔS συμβολίζει τη διαφορά της αποθήκευσης νερού στον όγκο αναφοράς στη συγκεκριμένη περίοδο, ο παράγοντας I τις συνολικές εισροές και ο παράγοντας O τις συνολικές εκροές από τον όγκο αναφοράς στην ίδια περίοδο. Και οι τρεις όροι αναλύονται σε διάφορες συνιστώσες αλλά η ανάλυση εξαρτάται πάντα από το συγκεκριμένο όγκο αναφοράς (π.χ. λεκάνη απορροής, τμήμα λεκάνης, υπόγειος υδροφορέας, λίμνη κλπ). Για τους υδροφόρους σχηματισμούς, οι οποίοι και μας ενδιαφέρουν στην παρούσα εργασία, το υδατικό ισοζύγιο περιγράφεται λοιπόν από τη σχέση:

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



Πίνακας 5.1: Σχηματική απεικόνιση υδατικού ισοζυγίου (Γιαννουλόπουλος,2000)

5.2 Βασικές Συνιστώσες Υδατικού Ισοζυγίου

Η εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου μπορεί να γραφεί πιο αναλυτικά ως:

$$P=AE+RO+RCH$$

Με βάση τον ορισμό του υδατικού ισοζυγίου όπως δόθηκε παραπάνω, είναι εύκολα κατανοητό πως ο όρος **P** που αντιπροσωπεύει τη βροχόπτωση αποτελεί τη μοναδική εισροή στη μονάδα του χρόνου για το συγκεκριμένο όγκο αναφοράς. Οι εκροές επομένως έχουν δύο συνιστώσες, την πραγματική εξατμισοδιαπνοή **AE** και την επιφανειακή απορροή **RO**. Ο παράγοντας **RCH** στην παραπάνω

εξίσωση αντιστοιχεί στην κατείσδυση του νερού και αντιπροσωπεύει την αποθήκευση του νερού στον όγκο αναφοράς.

Γενικά οι εισροές νερού προέρχονται συνήθως από το νερό της βροχής που εγκαταλείπει την εδαφική ζώνη, από τις διηθήσεις επιφανειακών απορροών και χειμάρρων, από τις διάφορες υπόγειες πλευρικές τροφοδοσίες από γειτονικούς υδροφόρους σχηματισμούς, από τις επιστρεφόμενες αρδευτικές ροές, από τον τεχνητό εμπλουτισμό, καθώς και από τις απώλειες δικτύων ύδρευσης αποχέτευσης και άρδευσης.

Οι εκροές, στις οποίες περιλαμβάνονται και οι απολήψεις νερού από υδροφόρους σχηματισμούς που υφίστανται οποιοδήποτε είδους εκμετάλλευση, λαμβάνουν χώρα είτε από διάφορα τεχνητά έργα όπως γεωτρήσεις, είτε από φυσικά σημεία εξόδου όπως οι πηγές, η θάλασσα, τα ποτάμια και προς άλλους γειτονικούς υδροφόρους σχηματισμούς ανάλογα πάντοτε με τις εκάστοτε υδροδυναμικές και οριακές συνθήκες που επικρατούν.

Οι συνιστώσες του υδατικού ισοζυγίου ρυθμίζονται από αρκετούς παράγοντες όπως τα κλιματικά, γεωλογικά, εδαφικά και μορφολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής, η κάλυψη και χρήση γης, ανθρωπογενείς παράγοντες κ.α.

5.2.1 Βροχόπτωση

Στην ουσία ο παράγοντας βροχόπτωση περιλαμβάνει όλα τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα όπως τη βροχή, το χιόνι και το χαλάζι, και αποτελεί τη μοναδική εισροή στον εξεταζόμενο όγκο αναφοράς. Οι βροχοπτώσεις ενδιαφέρουν πολύ περισσότερο την υδρολογία λόγω του ότι είναι συνηθέστερες και υπερέχουν ποσοτικά έναντι των υπόλοιπων κατακρημνισμάτων, αλλά κυρίως γιατί δημιουργούν σημαντικά φαινόμενα επιφανειακής απορροής. (Τσακίρης 1999).

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τις βροχοπτώσεις είναι οι ακόλουθοι:

- το γεωγραφικό πλάτος
- η απόσταση από τη θάλασσα
- η μέση ετήσια θερμοκρασία
- η διεύθυνση του αέρα
- η μορφολογία του αναγλύφου
- η υγρασία του εδάφους και του αέρα και
- η πυκνότητα της βλάστησης

Η μέτρηση των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων μπορεί να πραγματοποιηθεί με ικανοποιητική ακρίβεια, με τη χρήση διαφόρων οργάνων και την εφαρμογή σύγχρονων επιστημονικών μεθόδων. Ενδεικτικά τα κυριότερα όργανα μέτρησης είναι:

- τα βροχόμετρα
- οι βροχογράφοι
- τα ραντάρ και
- οι δορυφόροι

Ανάλογα με τα όργανα που χρησιμοποιούνται εφαρμόζονται και διαφορετικές επιστημονικές μέθοδοι, από απλές παρατηρήσεις με τη χρήση του βροχόμετρου, έως και σύγχρονες καταχωρήσεις και τηλεμετάδοση με τη βοήθεια αισθητήρων και χρήση Η/Υ.

Για τη μέτρηση των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων πέρα από τα απαραίτητα όργανα πρέπει να υπάρχουν και οι κατάλληλες συνθήκες που να επιτρέπουν τις μετρήσεις με την απαιτούμενη ακρίβεια. Για το λόγο αυτό τα όργανα μέτρησης τοποθετούνται σε επιλεγμένες θέσεις ειδικά διαμορφωμένες και περιφραγμένες που ονομάζονται βροχομετρικοί σταθμοί. (Τσακίρης 1999).

5.2.2 Εξατμισοδιαπνοή

Ο όρος εξατμισοδιαπνοή είναι σύνθετος και προκύπτει από τη σύνθετη διαδικασία της εξάτμισης και της διαπνοής. Γενικώς εξάτμιση είναι το φαινόμενο μέσω του οποίου ένα υλικό μεταπίπτει από την υγρή κατάσταση στην αέρια, ενώ το φαινόμενο της εξάτμισης του νερού που έχει περάσει μέσω ενός φυτού καλείται διαπνοή (Τσακίρης 1999).

Η απ' ευθείας εξάτμιση από το έδαφος και η διαπνοή γίνονται ταυτόχρονα στη φύση και είναι δύσκολο να διαχωριστούν οι υδρατμοί που παράγονται με τις δύο διεργασίες. Έτσι χρησιμοποιείται ο σύνθετος όρος της εξατμισοδιαπνοής που περιλαμβάνει τις σύνθετες διαδικασίες εξάτμισης του νερού από τις υγρές περιοχές και της διαπνοής από τα φυτά, δηλαδή τη μεταφορά του νερού από την επιφάνεια στην ατμόσφαιρα και από την υγρή φάση στην αέρια. Ο μηχανισμός της εξατμισοδιαπνοής ενδιαφέρει πολύ την επιστήμη της υδρολογίας και κατέχει σημαντικό ρόλο στον υπολογισμό του υδατικού ισοζυγίου κι αυτό γιατί πάνω από το 60% των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων που πέφτουν στο χερσαίο τμήμα της γης χάνεται εξ' αιτίας του.

Η εξατμισοδιαπνοή από εδαφικές επιφάνειες, φυτοκαλυμμένες ή όχι, εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα νερού στο έδαφος, ενώ δεν συμβαίνει το ίδιο με την εξάτμιση από υδάτινες επιφάνειες, όπου η διαθεσιμότητα του νερού είναι δεδομένη και δεν αποτελεί περιοριστικό παράγοντα. Η ποσότητα της εξατμισοδιαπνοής που πραγματοποιείται από εδαφικές επιφάνειες, πλήρως και ομοιόμορφα καλυμμένες από αναπτυσσόμενη χλωρίδα, κάτω από συνθήκες απεριόριστης διαθεσιμότητας νερού, σε αντιστοιχία δηλαδή με την εξάτμιση υδάτινων επιφανειών, ονομάζεται δυναμική εξατμισοδιαπνοή, ενώ 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 ονομάζεται πραγματική εξατμισοδιαπνοή.

Προφανώς η πραγματική εξατμισοδιαπνοή είναι μικρότερη ή το πολύ ίση με τη δυνητική.

Η πραγματική εξατμισοδιαπνοή θεωρείται υδρολογική απώλεια και περιλαμβάνει δύο συνιστώσες, την άμεση και την εδαφική εξατμισοδιαπνοή. Η άμεση εξατμισοδιαπνοή αναφέρεται στον ταχύ μετασχηματισμό μέρους της βροχόπτωσης σε απώλειες λόγω εξάτμισης, ενώ η εδαφική εξατμισοδιαπνοή αναφέρεται στην ικανοποίηση του ελλείμματος της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής μέσω της διαθέσιμης εδαφικής υγρασίας (Γιαννουλόπουλος 2000).

Η εξατμισοδιαπνοή, δυνητική ή πραγματική, εξαρτάται, όπως είπαμε, από το είδος της φυτοκάλυψης και τα χαρακτηριστικά της (ύψος, φύλλωμα, στάδιο ανάπτυξης, κ.ά.). Για λόγους τυποποίησης των υπολογισμών έχει εισαχθεί η έννοια της *εξατμισοδιαπνοής αναφοράς* (reference crop evapotranspiration), η οποία ορίζεται ως ο ρυθμός εξάτμισης (mm/d) από μια επιφάνεια γρασιδιού ύψους 0.12 m, αντανakλαστικότητας 0.23, επιφανειακής αντίστασης 69 s/m και απεριόριστης διαθεσιμότητας εδαφικού νερού.

Δυστυχώς, η εξατμισοδιαπνοή από φυτοκαλυμμένες περιοχές και η εξάτμιση από ελεύθερες επιφάνειες νερού είναι από τις λιγότερο κατανοητές συνιστώσες του υδρολογικού κύκλου και επομένως η ακριβής εκτίμησή τους σε εκτεταμένες περιοχές παραμένει δύσκολη.

5.2.3 Μέθοδοι εκτίμησης της εξατμισοδιαπνοής

5.2.3.1 Γενικά

Ένα μοντέλο που θα περιλαμβάνει όλες τις διεργασίες της ροής του νερού μέσα από το σύστημα έδαφος-φυτό-ατμόσφαιρα και θα βασίζεται σε καταξιωμένες φυσικές αρχές θα μπορεί να εφαρμόζεται παγκόσμια για την εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής. Όμως η δημιουργία ενός τέτοιου μοντέλου δεν είναι εφικτή αφ'

ενός μεν γιατί όλες οι διεργασίες της ροής του νερού δεν είναι εξ' ολοκλήρου κατανοητές και αφετέρου εάν ήταν κατανοητές η μαθηματική τους παρουσίαση θα απαιτούσε έναν μεγάλο αριθμό παραμέτρων στον υπολογιστή. (Παπαϊωάννου 1995). Επομένως η διαδικασία υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής θα πρέπει να είναι πιο κατανοητή και λιγότερο σύνθετη και γι' αυτό το λόγο τα μοντέλα προσομοίωσής της ποικίλουν, ανάλογα με το υπόβαθρο. Έτσι υπάρχουν τα πιο σύνθετα μοντέλα τα οποία χρησιμοποιούν φυσικό υπόβαθρο και αναφέρονται στις φυσικές διεργασίες που διέπουν την εξατμισοδιαπνοή και πιο απλά μοντέλα που βασίζονται σε συσχετίσεις της εξατμισοδιαπνοής με μια μόνο παράμετρο. Τα πρώτα μοντέλα που βασίζονται στις διεργασίες της εξατμισοδιαπνοής και χρησιμοποιούν μεθόδους συνδυασμού δίνουν ακριβέστερα αποτελέσματα σε σχέση με τα πιο απλά εμπειρικά μοντέλα που βασίζονται σε μια ατμοσφαιρική παράμετρο για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής.

Για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, χρησιμοποιήθηκαν τόσο απλές εμπειρικές μέθοδοι (Thorntwaite) όσο και συνδυαστικές μέθοδοι (Penmann, Penmann-Monteith) τα αποτελέσματα των οποίων παραθέτονται σε ξεχωριστή παράγραφο.

5.2.3.2 Μέθοδοι συνδυασμού

Όπως αναφέρθηκε υπάρχουν πολλά μοντέλα υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής που είναι βασισμένα στις διεργασίες αυτής και χρησιμοποιούν εξισώσεις που εκτιμούν τη δυναμική εξατμισοδιαπνοή ή την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς. Οι εξισώσεις συνδυασμού βασιζόμενες σε φυσικό υπόβαθρο έχουν μια γενικότητα και για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται συχνά σε ερευνητικούς σκοπούς, λόγω του μεγάλου αριθμού δεδομένων που απαιτούνται για τη διεκπεραίωσή τους. Παρακάτω περιγράφονται οι εκ των κυριότερων και πιο διαδεδομένων μεθόδων.

➤ Μέθοδος **Penman**

Ο **Penman** (1948) ήταν ο πρώτος που έκανε εφικτή την εκτίμηση της εξάτμισης από μετρήσεις θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας και ταχύτητας ανέμου σε μία μόνο στάθμη της ατμόσφαιρας, μέσα από το *συνδυασμό* των δύο γνωστών τρόπων εκτίμησής της (εξίσωση μεταφοράς και εξίσωση ενεργειακού ισοζυγίου). Ως τότε η εκτίμηση της εξάτμισης προϋπέθετε τη μέτρηση όλων αυτών των παραγόντων σε δύο επίπεδα (επιφάνεια και ατμόσφαιρα). Η εξίσωση Penman κανονικά εφαρμόζεται για την εκτίμηση της εξάτμισης από υδάτινη επιφάνεια. Μια βασική παραδοχή για την ανάπτυξή της, η οποία ευσταθεί για υδάτινη επιφάνεια, είναι ότι οι υδρατμοί κοντά στην επιφάνεια είναι κορεσμένοι. Η παραδοχή αυτή δεν ευσταθεί στην περίπτωση της διαπνοής, όπου οι υδρατμοί δεν είναι κορεσμένοι στην επιφάνεια των φύλλων. Παρόλη την αδυναμία της αυτή, η μέθοδος Penman έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως και για την εκτίμηση της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής από εδαφικές επιφάνειες (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999).

Η **εξίσωση του Penman** είναι:

$$E' = (\Delta \cdot R_n) / (\Delta + \gamma) + (\gamma \cdot F(u) \cdot D) / (\Delta + \gamma)$$

όπου:

Δ : η κλίση της καμπύλης της πίεσης κορεσμού υδρατμών

R_n : η ολική καθαρή ενέργεια ακτινοβολίας

γ : ψυχομετρικός συντελεστής

λ : λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης

D : το έλλειμμα κορεσμού στην ατμόσφαιρα και είναι ίσο με: $D = e^* T_a^* (1 - U)$

$F(u)$: η συνάρτηση ανέμου και υπολογίζεται από τη σχέση: $F(u) = 0,13 + 0,14u$.

➤ Μέθοδος **Penman - Monteith**

Για να αντιμετωπίσει την παραπάνω αδυναμία της μεθόδου Penman, ο Monteith (1965) αναδιατύπωσε τη μέθοδο εισάγοντας την επιφανειακή αντίσταση των στομάτων (r_s) των φυλλωμάτων στην εξάτμιση. Προέκυψε έτσι η αποκαλούμενη μέθοδος **Penman-Monteith**, η οποία είναι κατάλληλη για την εκτίμηση της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής των φυτών και ειδικότερα της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας αναφοράς. Η ίδια μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την εκτίμηση της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής, με τη διαφορά ότι δεν αρκούν πλέον τα τυπικά για τη μέθοδο Penman μετεωρολογικά δεδομένα αλλά χρειάζονται και μετρήσεις της επιφανειακής αντίστασης των φυλλωμάτων. Η χρήση της μεθόδου Penman-Monteith τείνει να γενικευτεί τα τελευταία χρόνια σε εκτιμήσεις εξατμισοδιαπνοής, λόγω της ακριβέστερης περιγραφής του φαινομένου (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999).

Ο Monteith κατέληξε λοιπόν στην ακόλουθη τροποποιημένη σχέση Penman, γνωστή ως **εξίσωση Penman-Monteith**:

$$E' = (\Delta \cdot R_n) / (\Delta + \gamma) \cdot \lambda + (\gamma \cdot F(u) \cdot D) / (\Delta + \gamma)$$

Όπου $F(u) = \frac{\varepsilon^* \rho_a}{p^* r_a}$

➤ Μέθοδος **Doorenbos and Pruitt**

Το 1977 οι **Doorenbos and Pruitt** πρότειναν ελαφρές τροποποιήσεις της μεθόδου Penman, για να την κάνουν κατάλληλη για την εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας αναφοράς. Η μέθοδος αυτή συνοψίζεται στην εξίσωση:

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

Παρατηρούμε ότι μια τροποποίηση στη μέθοδο αυτή είναι η εισαγωγή του συντελεστή αναγωγής c , ο οποίος λαμβάνει υπόψη τις διαφορές των μετεωρολογικών συνθηκών που επικρατούν σε ένα τόπο μεταξύ ημέρας και νύχτας. Μια δεύτερη τροποποίηση αφορά στη συνάρτηση ανέμου, η οποία εδώ είναι:

$$F(u)=0,27(1+0,86u)$$

Από τη δεκαετία του 1970 μέχρι πρόσφατα η μέθοδος Doorenbos-Pruitt αποτέλεσε το διεθνές πρότυπο, γνωστό και ως πρότυπο **F.A.O.** (Food and Agriculture Organization), εκτίμησης των υδατικών αναγκών των καλλιεργειών. Ως αποτέλεσμα όλων των τροποποιήσεων της μεθόδου Penman, η μέθοδος Doorenbos-Pruitt παρουσιάζει την τάση υπερεκτίμησης της εξαμισοδιαπνοής (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999).

➤ Μέθοδος **Priestley and Taylor**

Η υπολογιστική πολυπλοκότητα των παραπάνω μεθόδων οδήγησε πολλούς ερευνητές στην αναζήτηση απλοποιήσεων της, χρησιμοποιώντας κατά το δυνατό λιγότερα δεδομένα πρωτογενών μετρήσεων. Μια αρκετά διαδεδομένη, εύχρηστη και ικανοποιητικά ακριβής απλοποίηση είναι αυτή των **Priestley and Taylor** (1972) που περιγράφεται από την εξίσωση:

$$E'=a_e \frac{\Delta}{\Delta+\gamma} \cdot \frac{R_n}{\lambda}$$

όπου a_e αριθμητική σταθερά (λαμβάνεται ίση με 1.3).

Παρατηρούμε ότι η εξίσωση Priestley-Taylor χρησιμοποιεί μόνο τον ενεργειακό όρο της εξίσωσης Penman, τον οποίο επαυξάνει κατά 30% παραλείποντας τελείως τον όρο μεταφοράς. Κατά συνέπεια για την εφαρμογή της δε χρειάζεται να είναι γνωστή η ταχύτητα ανέμου και τα παρεπόμενα μεγέθη (τραχύτητα,

επιφανειακή αντίσταση κλπ.). Η μέθοδος έχει προταθεί ως εφαρμόσιμη τόσο για την εξάτμιση από υδάτινες επιφάνειες όσο και για τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή εδαφών (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999).

5.2.3.3 Εμπειρικές μέθοδοι

Αρκετές από τις εμπειρικές μεθόδους βασίζονται στη θερμοκρασία και μόνο, ενώ άλλες είναι πιο σύνθετες. Παρακάτω περιγράφονται οι πιο διαδεδομένες.

➤ **Μέθοδος Blaney-Criddle**

Στην αρχική της μορφή (Blaney and Criddle, 1950) εκτιμά τη μηνιαία δυνητική εξατμισοδιαπνοή μιας καλλιέργειας με βάση την ακόλουθη απλή σχέση, η οποία έχει μοναδικό μετεωρολογικό δεδομένο εισόδου τη θερμοκρασία:

$$E_p = 0.254 \cdot k_c \cdot p (32 + 1.8 T_a)$$

όπου:

E_p : η δυνητική εξατμισοδιαπνοή σε mm/μήνα

k_c : συντελεστής καταναλωτικής χρήσης (φυτικός συντελεστής)

T_a : θερμοκρασία σε °C

p = ποσοστό (%) των ωρών ημέρας του συγκεκριμένου μήνα σε σχέση με το σύνολο των ωρών ημέρας του έτους.

Η μέθοδος αυτή έχει χρησιμοποιηθεί ευρύτατα σε πολλές χώρες και ειδικότερα στην Ελλάδα για την εκτίμηση των αρδευτικών αναγκών.

➤ **Μέθοδος Thornthwaite**

Ο **Thornthwaite** το 1948 περιέγραψε τη βιολογική και φυσική σημασία της εξατμισοδιαπνοής στην κλιματική ταξινόμηση και ανέπτυξε μια εξίσωση για την εκτίμηση της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής. Η μέθοδος αυτή έχει χρησιμοποιηθεί στην πράξη περισσότερο από κάθε άλλη, διεθνώς αλλά και στην Ελλάδα, λόγω

των φειδωλών απαιτήσεων της σε δεδομένα εισόδου (μόνο μέση θερμοκρασία) αλλά και της παλαιότητας της. Βασίζεται στην εξίσωση

$$ET=16(10T_a/I)^a \cdot (\mu N/360)$$

Όπου:

ET : η δυναμική εξατμισοδιαπνοή σε mm/μήνα

T_a : η μέση θερμοκρασία του μήνα σε °C

μ : ο αριθμός των ημερών του μήνα

N : η μέση αστρονομική διάρκεια ημέρας

I : εμπειρικός συντελεστής (ετήσιος θερμικός δείκτης)

Και α άλλος εμπειρικός συντελεστής, συνάρτηση του I .

Οι δύο εμπειρικοί συντελεστές υπολογίζονται με βάση τις μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες των 12 μηνών του έτους (που συμβολίζονται με το δείκτη j =1,2,...,12), από τις εξισώσεις:

$$I = \sum_{j=1}^{12} i_j$$

$$i_j = 0.09 \cdot T a_j^{3/2}$$

$$a = 0.016 \cdot I + 0.5$$

Οι δύο τελευταίες εξισώσεις, γνωστές ως εξισώσεις του Serra, αποτελούν απλοποιήσεις των αρχικών εξισώσεων του Thornthwaite.

➤ Μέθοδος Turc

Εκδόθηκε το 1954-1955 και προσδιορίζει την ετήσια πραγματική εξατμισοδιαπνοή με την απλή σχέση που ακολουθεί:

$$E = \frac{P}{\sqrt{(0.90 + (P/L)^2)}}$$

όπου E η μέση ετήσια πραγματική εξατμισοδιαπνοή σε mm/έτος και

$$L = 300 + 25 \cdot T + 0,05 \cdot T^3 \text{ σε mm}$$

όπου T η μέση ετήσια θερμοκρασία του αέρα (σε °C).

➤ Μέθοδος Hargreaves

Είναι μια σχετικά πρόσφατη εμπειρική μέθοδος εκτίμησης της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας αναφοράς, που απαιτεί μόνο θερμοκρασιακά δεδομένα εισόδου και βασίζεται στην απλή εξίσωση:

$$E_{rc} = 0.0023 \cdot (S_0 / \lambda) \cdot (T_a + 17.8) \cdot (T_{max} - T_{min})^{0.5}$$

όπου:

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

S_0 : η εξωγήινη ακτινοβολία σε $Kj/(m^2d)$

λ : η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης σε Kj/Kg

T_a : η μέση μηνιαία θερμοκρασία του αέρα σε °C

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

Η μέθοδος αυτή φαίνεται ότι δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα με σφάλμα της τάξης του 10 – 15% ή του $1 \frac{mm}{d}$ (το μεγαλύτερο από τα 2) και συστήνεται ως μια ανεκτή προσέγγιση για την περίπτωση που τα μόνα διαθέσιμα μετεωρολογικά δεδομένα είναι τα θερμοκρασιακά (Shuttleworth, 1993).

5.2.4 Απορροή

Η υδρολογική λεκάνη αποτελεί το φυσικό υποδοχέα των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων και δρα, με όλα τα μορφολογικά, εδαφολογικά και λοιπά φυσικά χαρακτηριστικά της, σαν ένα σύστημα μετασχηματισμού. Στο σύστημα αυτό, εισερχόμενα θεωρούνται τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα που απορροφούνται από το έδαφος και αποθηκεύονται στους υπόγειους υδροφορείς. Όταν το έδαφος κορεστεί εμποδίζει την περαιτέρω διήθηση του νερού με αποτέλεσμα αυτό να απορρέει επιφανειακά.

Με βάση τα παραπάνω η απορροή μπορεί να εμφανιστεί με διάφορες μορφές. Έτσι παρατηρούμε

- την *άμεση απορροή*, που οφείλεται στην ύπαρξη διαπερατών σχηματισμών, μέσω των οποίων ποσοστό της βροχής απορρέει άμεσα,
- την *επίγεια ροή*, που είναι μια ταχεία απόκριση που οφείλεται στον κορεσμό του εδάφους,
- την *υποδερμική ροή*, που είναι μια αργή απόκριση που οφείλεται στην πλευρική (οριζόντια) κίνηση του νερού που εισχωρεί στο έδαφος και
- τη *βασική ροή*, δηλαδή την απόκριση των κατώτερων εδαφικών στρωμάτων (υδροφορείς), μέσω πηγών.

Συχνά με τον όρο απορροή εννοείτε η επιφανειακή απορροή. Αυτό συμβαίνει διότι στην υδρολογία η επιφανειακή απορροή ενδιαφέρει περισσότερο από κάθε άλλη συνιστώσα του υδρολογικού κύκλου, τόσο γιατί δίνει το μεγαλύτερο μέρος των εκμεταλλεύσιμων υδατικών πόρων, όσο και γιατί δημιουργεί σημαντικούς φυσικούς κινδύνους στην περίπτωση των πλημμυρών. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την επιφανειακή απορροή είναι:

- η ένταση των βροχοπτώσεων
- η κατανομή των βροχοπτώσεων μέσα στο έτος

- η διάρκεια και ο όγκος των βροχοπτώσεων
- η θερμοκρασία, οι άνεμοι, το κλίμα
- η κλίση της επιφάνειας του εδάφους
- η πυκνότητα της βλάστησης
- η σύσταση και η λιθολογία του εδάφους

Ιδιαίτερα όσο αφορά τη σύσταση του εδάφους, αξίζει να αναφερθεί πως η μεγαλύτερη επιφανειακή απορροή παρατηρείται σε μεταμορφωσιγενή και ηφαιστειογενή εδάφη με ποσοστό που αγγίζει μέχρι και το 50% της βροχόπτωσης, ενώ οι μικρότερες τιμές παρουσιάζονται σε πιο διαπερατά εδάφη ασβεστολιθικών πετρωμάτων και προσχώσεων.

5.2.5 Διήθηση - Κατείσδυση

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο η απορροή εμφανίζεται με διάφορους τρόπους ανάλογα με την περιοχή του εδάφους στην οποία απορρέει το νερό. Όταν το νερό που προέρχεται από τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα εισχωρεί στο έδαφος, λέγεται πως διηθείται, δημιουργώντας την υποδερμική και βασική υπόγεια ροή. Η διήθηση και η κίνηση του νερού στο έδαφος παίζουν σημαντικό υδρολογικό ρόλο και επηρεάζουν την επιφανειακή απορροή, την εξατμισοδιαπνοή, την επαναφόρτιση των υδροφορέων αλλά και τη μεταφορά διαλυμένων ουσιών στο έδαφος. (Κουτσογιάννης 1999).

Το νερό της βροχής που κατέρχεται στο έδαφος (περίσσεια βροχόπτωσης), εφόσον το έδαφος δεν έχει κορεστεί, αποθηκεύεται ένα μέρος του ως εδαφική υγρασία (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 1999). Όταν όμως το έδαφος κορεστεί, η ποσότητα που δεν μπορεί πλέον να αποθηκευτεί, απορρέει επιφανειακά. Εξάλλου, εφόσον η βροχόπτωση είναι μικρότερη από την δυνητική εξατμισοδιαπνοή, ένα μέρος της αποθηκευμένης εδαφικής υγρασίας εξατμίζεται (εδαφική εξατμισοδιαπνοή) με ρυθμό ανάλογο της διαφοράς της δυνητικής

εξατμισοδιαπνοής μείον την βροχόπτωση και ανάλογο της εδαφικής αποθήκευσης.

Ο ρυθμός διήθησης είναι μεταβλητός χωρικά και χρονικά. Οι παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται είναι:

- η ένταση και η διάρκεια των βροχοπτώσεων,
- οι φυσικές ιδιότητες του εδάφους,
- η κατάσταση του επιφανειακού εδαφικού καλύμματος, δηλαδή τη βλάστηση
- η περιεκτικότητα σε υγρασία του επιφανειακού εδάφους πριν την έναρξη της βροχόπτωσης,
- η θερμοκρασία,
- η ποιότητα του βρόχινου νερού
- η περιεκτικότητα του εδάφους σε αέρα, το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα, τα τριχοειδή φαινόμενα

Όπως είναι εύκολα αντιληπτό οι παραπάνω παράμετροι που επηρεάζουν τη διήθηση δεν είναι εύκολο να εκτιμηθούν.

Η βαθιά διήθηση ονομάζεται κατείσδυση και αναφέρεται στο υπόλοιπο νερό από αυτό που εξατμίζεται ως εδαφική εξατμισοδιαπνοή και αποθηκεύεται ως εδαφική υγρασία, και διηθείται μέσα στα πετρώματα κατεισδύοντας στους υπόγειους υδροφορείς και εμπλουτίζοντας τους. Η κατείσδυση αποτελεί μια από τις πιο ενδιαφέρουσες συνιστώσες του υδατικού ισοζυγίου των υδροφόρων σχηματισμών, γιατί συμβάλλει άμεσα όχι μόνο στην εκτίμηση των ανανεώσιμων υδατικών αποθεμάτων τους αλλά και στην αποσαφήνιση των μηχανισμών λειτουργίας τους και συνεπώς στη διαχείρισή τους.

5.2.6 Μέθοδοι προσδιορισμού της κατείδυσης

Σε γενικές γραμμές η κατείδυση υπολογίζεται από την εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου της εδαφικής ζώνης, δηλαδή αν από το ύψος του νερού της βροχής και των αρδεύσεων αφαιρεθούν η πραγματική εξατμισοδιαπνοή, οι επιφανειακές απορροές και ληφθούν υπόψη οι μεταβολές σε υγρασία της εδαφικής ζώνης.

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι προσδιορισμού της τιμής της κατείδυσης. Οι Lerner et al (1990) συνοψίζουν όλες τις μεθόδους που συνήθως εφαρμόζονται, παρακάτω:

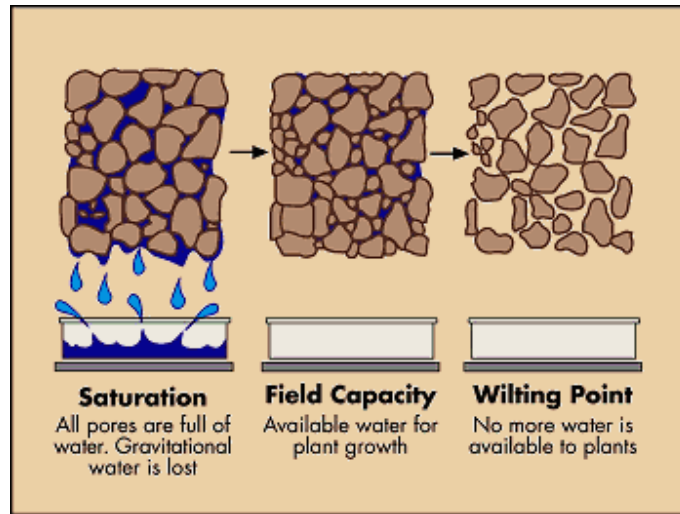
- Άμεσες μετρήσεις σε περιοχές με έκταση μέχρι 100 m². Η μέθοδος αυτή αναφέρεται στα λυσίμετρα.
- Εμπειρικές μέθοδοι της μορφής $RCH = f(P)$, που υπολογίζουν την κατακόρυφη τροφοδοσία (RCH) ως συνάρτηση της βροχόπτωσης (P). Η συνάρτηση αυτή μπορεί να είναι γραμμική ή μη γραμμική και να περιλαμβάνει εύκολα μετρήσιμες μεταβλητές όπως την έκταση της λεκάνης κλπ. Στην κατηγορία αυτή των εμπειρικών μεθόδων εντάσσεται και η μέθοδος του Turc (1954).
- Μέθοδοι υδατικού ισοζυγίου: εφαρμόζονται είτε σε μικρή είτε σε μεγάλη κλίμακα. Στην πρώτη περίπτωση πρόκειται συνήθως για υδατικά ισοζύγια εδαφικών κατατομών.
- Προσεγγίσεις μεθόδου Darcy: Βασίζονται σε εξισώσεις της ακόρεστης ροής πάνω από την ελεύθερη επιφάνεια του υπογείου νερού στις οποίες εισάγονται μετρήσεις εδαφικής υγρασίας ή υδραυλικού φορτίου ακόρεστης ζώνης και επιλύονται ακόμα και με αριθμητικά μοντέλα.
- Με χρήση ιχνηθετών, όπως το τρίτιο και το χλώριο που ακολουθούν την κίνηση του νερού στην εδαφική κατατομή.

5.2.6.1 Η μέθοδος Thornthwaite – Mather

Η μέθοδος που αναπτύχθηκε από τους Thornthwaite και Mather (1955, 1957) έχει εφαρμοστεί ευρύτατα στον υπολογισμό του υδατικού ισοζυγίου. Αποτελεί εμπειρική μέθοδο και η ιδιαιτερότητά της έγκειται στο γεγονός ότι λαμβάνει υπόψη της τόσο τα υδραυλικά χαρακτηριστικά της εδαφικής κατατομής όσο και τα χαρακτηριστικά της φυτοκάλυψης. Εφαρμόζεται συνήθως σε μηνιαία χρονικά βήματα (Τσακίρης, 1995).

Τα απαραίτητα δεδομένα για την εφαρμογή της είναι: η διαθέσιμη υδατοϊκανότητα της εδαφικής κατατομής (σε mm), καθώς και μηνιαίες τιμές ύψους βροχής (σε mm), επιφανειακής απορροής (%), δυνητικής εξατμισοδιαπνοής (σε mm) και συντελεστές βλάστησης (K_c). Η διαθέσιμη υδατοϊκανότητα της εδαφικής κατατομής υπολογίζεται ως διαφορά μεταξύ της *υδατοϊκανότητας (field capacity)* και του *σημείου μάρανσης (wilting point)*.

Σύμφωνα με τις διάφορες εμπειρικές μεθόδους, όταν ένα έδαφος κορεστεί με νερό, από βροχή ή άρδευση, έχει αρχικά υγρασία θ_s . Η υγρασία του εδάφους αρχίζει να μειώνεται ανεμπόδιστα με τους μηχανισμούς της εξατμισοδιαπνοής και της κατακόρυφης διήθησης, προς τα βαθύτερα εδαφικά στρώματα, ώσπου να φτάσει σε μια χαρακτηριστική τιμή θ_f που ονομάζεται *υδατοϊκανότητα (Field Capacity - FC)*. Σύμφωνα με ορισμένες προσεγγίσεις, η μείωση της εδαφικής υγρασίας συνεχίζεται με μέγιστο ρυθμό μέχρις ότου η περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό φτάσει στο σημείο θ_d , που αντιστοιχεί περίπου στο 50% - 80% της τιμής θ_f . Στο σημείο αυτό η υδραυλική του αγωγιμότητα K και ο ρυθμός απομάκρυνσης του νερού αρχίζουν σταδιακά να μειώνονται ώσπου η περιεκτικότητά του σε νερό φτάσει στο σημείο θ_w , που ονομάζεται *σημείο μάρανσης (Wilting Point - WP)*. Στο σημείο αυτό το φυτό δε μπορεί να απορροφήσει νερό από το έδαφος και αρχίζει να μαραίνεται (Γιαννουλόπουλος, 2000).



Σχήμα 5.1: Τα στάδια συγκράτησης του νερού από το έδαφος: κορεσμός, υδατοϊκανότητα και σημείο μάρανσης (Dept of Agriculture Bulletin 462, 1960)

Σε περιόδους που η βροχόπτωση υπερβαίνει τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή ($P > ET$), η πραγματική εξατμισοδιαπνοή ταυτίζεται με την δυνητική και υπάρχει περίσσειμα νερού. Το περίσσειμα ($P - ET$) αποθηκεύεται ως εδαφική υγρασία, εφόσον δεν έχει κορεστεί το έδαφος. Όταν κορεστεί, όπως είπαμε και παραπάνω, η ποσότητα που δεν μπορεί πλέον να αποθηκευτεί, απορρέει επιφανειακά.

Σε περιόδους που η βροχόπτωση είναι μικρότερη από τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή ($P < ET$), η πραγματική εξατμισοδιαπνοή είναι μικρότερη από τη δυνητική. Συγκεκριμένα, θεωρείται ότι κατ' αρχήν όλη η ποσότητα της βροχόπτωσης P εξατμίζεται και επίσης, εφόσον υπάρχει αποθηκευμένη εδαφική υγρασία, εξατμίζεται και ένα επιπλέον μέρος από αυτήν. Ο ρυθμός της επιπλέον εξατμισοδιαπνοής είναι ανάλογος της διαφοράς ($ET - P$) καθώς και της εδαφικής αποθήκευσης και ειδικότερα του λόγου S/K .

Ο συντελεστής καλλιέργειας K_c εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της καλλιέργειας και του εδάφους (ύψος και ανακλαστικότητα καλλιέργειας, βαθμός κάλυψης εδάφους από τα φύλλα, τραχύτητα εδάφους, αντίσταση φύλλων στη

διαπνοή κλπ.) (Ναλμπάντης, 2007). Συνεπώς ο συντελεστής K_c ενσωματώνει όλα τα χαρακτηριστικά που διαφοροποιούν μια τυπική καλλιέργεια από την καλλιέργεια αναφοράς, η οποία έχει πάντα σταθερά χαρακτηριστικά και πλήρη εδαφική κάλυψη και επιπρόσθετα το K_c δε διαφοροποιείται μόνο από τον τύπο κάθε καλλιέργειας αλλά επηρεάζεται φυσικά και από τα στάδια ανάπτυξης κάθε καλλιέργειας (Κερκίδης και Τσακίρης, 2006).

Συμπερασματικά, το απλό μοντέλο Thornthwaite με δεδομένα εισόδου τη βροχόπτωση και τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή δίνει ως εξόδους την απορροή και την πραγματική εξατμισοδιαπνοή, χρησιμοποιώντας μία μόνο παράμετρο, την χωρητικότητα της εδαφικής δεξαμενής, K . Τυπικά η χωρητικότητα αυτή, ανηγμένη σε ισοδύναμο ύψος, κυμαίνεται ανάμεσα στα 100 - 200 mm (Brutsaert, 1982). Εάν υπάρχουν δεδομένα απορροής, η παράμετρος K μπορεί να εκτιμηθεί με τρόπο ώστε η σειρά τιμών της επιφανειακής απορροής που εξάγεται από το μοντέλο να συμφωνεί κατά το δυνατόν με τη μετρημένη σειρά απορροής.

5.2.7 Υπολογισμός δυνητικής εξατμισοδιαπνοής στον υδροφορέα της Μήλου με χρήση εμπειρικών μεθόδων

Για τον υπολογισμό της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής στον υδροφορέα της Νήσου Μήλου, χρειάστηκε να χρησιμοποιηθούν πρωτογενή μετεωρολογικά δεδομένα, των οποίων οι ημερήσιες τιμές τους για χρονικό διάστημα πενήντα ετών παραχωρήθηκαν από την Ε.Μ.Υ. για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Τα δεδομένα αυτά συλλέχθηκαν από τον μετεωρολογικό σταθμό με κωδικό 738 που λειτουργεί στο νησί από το έτος 1955 έως σήμερα. Ο σταθμός αυτός βρίσκεται σε γεωγραφικό πλάτος $\varphi = 36^\circ 40' 28''$ και γεωγραφικό μήκος $\lambda = 24^\circ 25' 17''$.

Ο υπολογισμός της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής πραγματοποιήθηκε τόσο με τη χρήση εμπειρικών, όσο και συνδυαστικών μεθόδων, έτσι ώστε να υπάρχει η

δυνατότητα σύγκρισης των μεθόδων αυτών τόσο ως προς τη διαδικασία εφαρμογής τους όσο και ως των εξαγόμενων τιμών. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν οι εμπειρικές μέθοδοι Thornthwaite και Hargreaves και οι συνδυαστικές μέθοδοι των Penmann και Penmann – Monteith.

Από τα διαθέσιμα μετεωρολογικά δεδομένα είναι πολύ εύκολο να καταλήξουμε στο συμπέρασμα πως οι υδρομετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούν στη νήσο Μήλο, χαρακτηρίζονται γενικά δυσμενείς, κυρίως λόγω των χαμηλών τιμών της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με την ύπαρξη ηφαιστειογενών πετρωμάτων χαμηλής διαπερατότητας στην περιοχή, οξύνει περισσότερο το πρόβλημα που αφορά την δυνατότητα αποθήκευσης του νερού στον υπόγειο υδροφόρα.

Με δεδομένα εισόδου τη μέση μηνιαία θερμοκρασία, τη μηνιαία βροχόπτωση και το γεωγραφικό πλάτος του μετεωρολογικού σταθμού, με τη βοήθεια του λογισμικού “Υδρογνώμων” υπολογίστηκε η μέση μηνιαία δυνητική εξατμισοδιαπνοή για τα έτη 1955 – 2003 με τις μεθόδους των Thornthwaite και Hargreaves.

Ο “Υδρογνώμων” είναι ένα εργαλείο διαχείρισης και ανάλυσης των υδρολογικών πληροφοριών. Η διαχείριση των δεδομένων βασίζεται στη γεωγραφική οργάνωση οντοτήτων (λεκάνες απορροής, μετρητικοί σταθμοί, ταμιευτήρες κ.ά.), στις οποίες αντιστοιχούν φυσικές ιδιότητες, τεχνικά χαρακτηριστικά, καθώς και χρονοσειρές μετρήσεων. Το πρόγραμμα υποστηρίζει τυπικές επεξεργασίες χρονοσειρών και εξειδικευμένες υδρολογικές εφαρμογές (μοντέλα εκτίμησης της εξατμισοδιαπνοής, κατασκευή καμπυλών στάθμης-παροχής, ανάλυση υδατικού ισοζυγίου ταμιευτήρων) και παρέχει δυνατότητες οπτικοποίησης των δεδομένων και αμφίδρομης επικοινωνίας με σύστημα γεωγραφικής πληροφορίας.

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

Ε.Μ.Π. Είναι μία εφαρμογή για την διαχείριση και την επεξεργασία των υδρολογικών δεδομένων που περιέχονται στην Βάση Δεδομένων, το οποίο μπορεί να διαχειριστεί :

- Χρονοσειρές όπως βροχόπτωση, εξάτμιση, θερμοκρασία, σχετική υγρασία, στάθμη ταμιευτήρα, απορροή λεκάνης, παροχή υδατορεύματος κ.α.
- Γεωγραφικά δεδομένα ως «οντότητες πραγματικού κόσμου» ή απλούστερα «γεωγραφικές οντότητες» όπως πόλεις, ταμιευτήρες, φράγματα, μετεωρολογικούς (μετρητικούς εν γένει) σταθμούς κ.α.
- Σταθερές υπολογισμών που συσχετίζονται με οντότητες του πραγματικού κόσμου όπως καμπύλες στάθμης - παροχής υδατορεύματος, καμπύλες στάθμης - αποθέματος ταμιευτήρα κ.α.

Επιπλέον, το λογισμικό “Υδρογνώμων” έχει την δυνατότητα εκτέλεσης απλών επεξεργασιών όπως στατιστική συσχέτιση χρονοσειρών (γραμμική παλινδρόμηση), συνάθροιση χρονοσειρών, υπολογισμός παροχής από στάθμη, υπολογισμός ύψους εξάτμισης, ισοζύγια ταμιευτήρων κ.α.

Τα ημερήσια δεδομένα της θερμοκρασίας και της βροχόπτωσης που παραχωρήθηκαν από την Ε.Μ.Υ. μετατράπηκαν σε μηνιαία, καθώς το λογισμικό για την εφαρμογή των μεθόδων Thornthwaite και Hargreaves δεν χρησιμοποιεί ημερήσιο βήμα για τον υπολογισμό της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής και παρουσιάζονται στη συνέχεια.

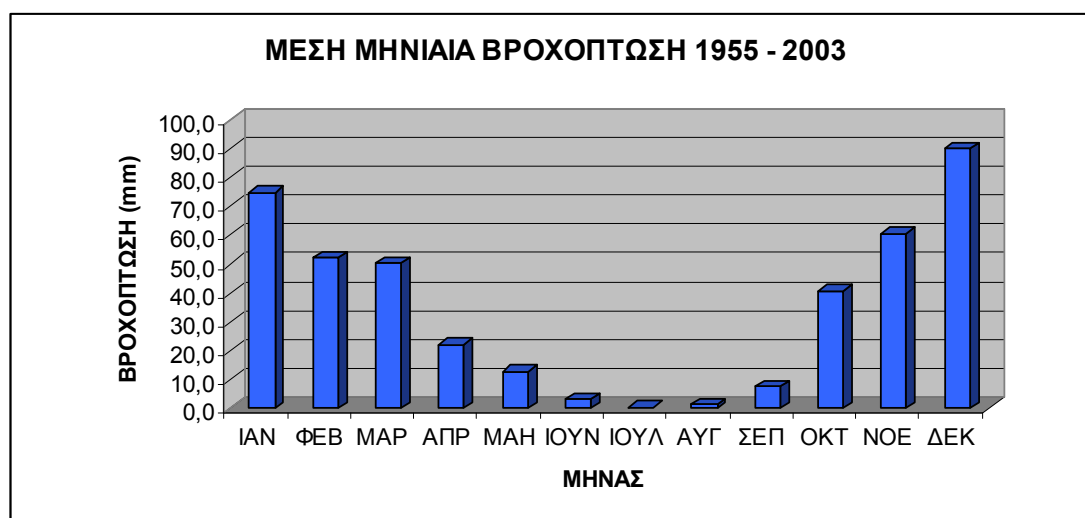
ΕΤΟΣ	ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	ΜΑΡΤΙΟΣ	ΑΠΡΙΛΙΟΣ	ΜΑΙΟΣ	ΙΟΥΝΙΟΣ	ΙΟΥΛΙΟΣ	ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ
1955	60,8	26,5	48,5	67,4	4,4	0,0	0,0	0,0	5,0	118,8	73,8	26,2
1956	66,1	69,8	75,4	1,2	5,8	3,2	0,0	0,0	0,0	2,1	32,6	50,3
1957	139,9	0,0	80,8	28,8	15,8	21,3	0,0	0,0	21,8	93,1	92,0	97,4
1958	69,3	6,0	77,3	22,7	9,7	0,5	0,0	0,0	69,4	16,4	21,7	83,6
1959	114,8	6,4	39,9	37,2	1,2	0,0	2,1	0,0	0,0	38,8	19,8	58,0
1960	79,4	54,0	43,9	41,9	3,6	1,6	0,0	0,0	0,0	11,0	36,8	89,9
1961	77,8	65,9	36,4	3,8	53,0	0,8	0,0	0,0	0,0	11,8	30,5	188,0
1962	75,3	106,8	38,5	15,7	14,6	0,0	0,0	0,0	14,4	31,4	31,8	241,5
1963	55,5	32,1	76,4	8,3	43,3	0,0	0,0	0,0	0,0	174,6	56,0	29,1
1964	79,2	21,1	15,0	3,3	0,6	0,0	0,0	0,0	32,2	9,2	45,3	33,4
1965	74,8	65,9	98,9	26,7	24,0	1,6	0,0	0,0	0,0	11,7	30,9	157,6
1966	77,7	8,3	62,9	12,9	2,6	0,7	0,0	0,0	15,4	3,4	26,9	109,0
1967	55,1	31,5	41,2	41,2	15,2	9,5	0,0	0,0	0,0	79,4	49,4	93,3
1968	81,4	75,3	32,4	3,0	0,0	0,0	0,0	1,4	0,0	96,6	149,1	42,3
1969	124,6	7,0	44,5	12,0	30,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	10,0	147,8
1970	16,7	24,6	32,0	18,0	30,5	3,0	0,0	0,0	2,0	82,0	4,2	55,3
1971	119,2	138,0	44,0	5,3	5,4	0,0	2,7	0,0	3,8	8,2	50,9	47,1
1972	54,1	82,0	52,7	43,2	71,5	0,0	4,2	34,0	3,0	92,6	0,7	20,8
1973	142,6	61,6	14,3	53,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	42,5	38,5	26,8
1974	49,8	65,6	46,2	9,3	1,5	0,0	0,0	0,0	11,7	18,6	68,9	55,0
1975	58,3	62,6	17,5	4,3	5,7	71,4	0,0	0,0	0,0	38,8	174,0	97,8
1976	20,8	77,0	82,6	6,5	0,7	0,0	0,0	0,0	1,9	121,6	71,0	97,6
1977	65,3	14,8	5,0	3,9	0,0	0,4	0,0	0,0	19,4	46,4	50,9	117,8
1978	126,9	38,3	42,1	40,2	6,9	0,0	0,0	0,0	44,7	19,9	31,8	77,5
1979	57,5	25,8	52,4	6,5	7,3	0,0	2,9	0,0	0,0	38,5	153,3	54,4
1980	75,7	56,3	50,5	12,8	6,7	0,0	0,0	0,0	0,7	79,9	18,5	159,5
1981	260,1	45,9	22,8	6,6	4,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	150,5	74,0

ΕΤΟΣ	ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	ΜΑΡΤΙΟΣ	ΑΠΡΙΛΙΟΣ	ΜΑΙΟΣ	ΙΟΥΝΙΟΣ	ΙΟΥΛΙΟΣ	ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ
1982	57,9	67,7	83,0	46,0	19,0	0,0	0,0	0,8	0,0	13,1	7,7	35,3
1983	13,8	76,2	69,1	16,0	12,7	0,0	0,0	0,0	12,0	3,1	56,2	161,8
1984	54,0	30,9	37,1	49,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	88,9	90,2
1985	129,1	31,1	94,9	14,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	48,8	35,5	46,7
1986	99,1	50,5	7,6	11,3	18,4	10,3	0,0	0,0	0,5	27,8	25,7	52,6
1987	25,5	50,0	55,9	107,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	26,3	130,4	63,3
1988	109,8	36,2	74,7	8,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	25,2	153,0	125,0
1989	2,3	2,8	84,6	0,0	17,3	0,0	0,0	0,0	7,5	131,2	18,1	26,7
1990	2,4	66,1	0,0	25,2	0,0	0,0	0,0	6,0	3,8	2,1	63,2	176,8
1991	22,8	70,1	14,9	42,0	33,1	0,0	0,0	0,0	0,0	42,0	16,8	111,8
1992	30,5	58,9	41,6	24,6	4,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	50,0	93,3
1993	54,7	111,3	59,0	15,4	59,4	18,6	0,0	0,0	0,0	0,0	92,2	23,9
1994	67,0	100,0	22,1	24,4	27,3	13,9	1,0	0,0	0,0	18,5	90,8	70,5
1995	106,8	19,6	70,5	17,7	0,0	0,6	0,0	0,0	6,5	23,6	85,4	26,9
1996	126,2	93,6	101,3	8,8	1,7	0,0	0,0	0,0	3,2	189,1	52,0	94,3
1997	52,1	69,0	93,0	27,0	49,0	1,2	0,0	0,0	0,0	13,6	54,3	62,2
1998	81,9	12,4	87,3	12,4	12,0	0,0	0,0	0,0	2,0	3,5	77,1	106,1
1999	73,4	74,4	51,4	7,6	0,0	0,0	0,0	0,0	10,3	0,0	21,7	84,5
2000	55,9	91,0	45,2	3,7	3,9	0,0	0,0	0,0	0,0	62,3	22,2	114,9
2001	44,2	35,1	1,8	36,7	7,5	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	98,1	176,1
2002	78,3	12,0	73,2	10,2	2,8	0,0	3,7	21,2	73,7	50,0	171,3	175,1
2003	64,0	135,8	66,2	56,4	4,1	0,0	0,0	0,0	2,1	14,4	29,4	162,7
2004	110,0	48,4	8,3	2,9	7,8	0,0	0,0	0,0	0,0	40,6	60,4	90,0

Πίνακας 5.2: Μηνιαίες τιμές βροχόπτωσης για τα έτη 1955 – 2004 σε mm για τη νήσο Μήλο (Στοιχεία Ε.Μ.Υ.)

ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	74,8
ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	52,2
ΜΑΡΤΙΟΣ	50,3
ΑΠΡΙΛΙΟΣ	22,1
ΜΑΙΟΣ	12,9
ΙΟΥΝΙΟΣ	3,2
ΙΟΥΛΙΟΣ	0,3
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	1,3
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	7,3
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	40,6
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	60,4
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ	90,0

Πίνακας 5.3: Μέση μηνιαία βροχόπτωση για τα έτη 1955 – 2004 σε mm για τη νήσο Μήλο (Στοιχεία Ε.Μ.Υ.)



Διάγραμμα 5.1: Μέση μηνιαία βροχόπτωση (mm) – Γραφική αναπαράσταση

Όπως παρατηρούμε από τους παραπάνω πίνακες τους μήνες Δεκέμβριο και Ιανουάριο παρατηρούνται οι μεγαλύτερες μέσες τιμές της βροχόπτωσης όπως άλλωστε θα περίμενε κανείς, ενώ οι μικρότερες τιμές καταγράφονται κατά τη θερινή περίοδο, με μικρότερη εκείνη του Ιουλίου, όπου πρακτικά καταγράφεται μηδενική βροχόπτωση.

Στον παρακάτω πίνακα καταγράφεται το ετήσιο ύψος βροχόπτωσης για τα έτη 1955 - 2003. Για τα πρώτα 15 έτη υπάρχουν ορισμένα κενά δεδομένων, επομένως η καταγραφή των τιμών αυτών δεν είναι απόλυτα ακριβής. Ωστόσο

μπορούν να αναφερθούν ενδεικτικά. Για το έτος 2004 απουσιάζουν τα στοιχεία του δεύτερου εξαμήνου και για το λόγο αυτό παρουσιάζονται τα στοιχεία έως το 2003.

ΕΤΟΣ	ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ
1955	431,4
1956	306,5
1957	590,9
1958	376,6
1959	318,2
1960	362,1
1961	468,0
1962	570,0
1963	475,3
1964	239,3
1965	492,1
1966	319,8
1967	415,8
1968	481,5
1969	377,9
1970	268,3
1971	424,6
1972	458,8
1973	380,1
1974	326,6
1975	530,4
1976	479,7
1977	323,9
1978	428,3
1979	398,6
1980	460,6
1981	564,6
1982	330,5
1983	420,9
1984	350,4
1985	400,8
1986	303,8
1987	459,0
1988	532,1
1989	290,5
1990	345,6
1991	353,5

1992	303,5
1993	434,5
1994	435,5
1995	357,6
1996	670,2
1997	421,4
1998	394,7
1999	323,3
2000	399,1
2001	402,5
2002	671,5
2003	535,1

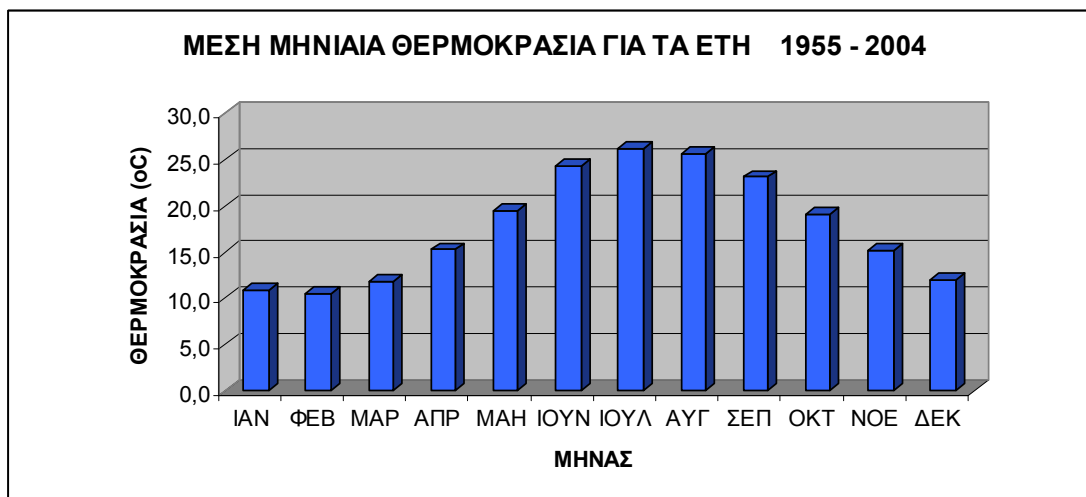
Πίνακας 5.4: Ετήσιες τιμές βροχόπτωσης σε mm για τη νήσο Μήλο (Στοιχεία Ε.Μ.Υ.)

Σύμφωνα με τα παραπάνω στοιχεία, η ελάχιστη τιμή ετήσιας βροχόπτωσης καταγράφεται το έτος 1970 με μόλις 268,3 mm, ενώ η μέγιστη καταγράφεται το έτος 2002 με 671,5 mm αντίστοιχα.

Αντιστοίχως παρακάτω παρουσιάζονται τα δεδομένα για τη θερμοκρασία.

ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	10,8
ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	10,5
ΜΑΡΤΙΟΣ	11,8
ΑΠΡΙΛΙΟΣ	15,3
ΜΑΙΟΣ	19,5
ΙΟΥΝΙΟΣ	24,3
ΙΟΥΛΙΟΣ	26,2
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	25,7
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	23,1
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	19,1
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	15,2
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ	12,0

Πίνακας 5.5: Μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες της νήσου Μήλου για τα έτη 1955 – 2003 σε °C (Στοιχεία Ε.Μ.Υ.)



Διάγραμμα 5.2: Μέση μηνιαία θερμοκρασία (°C) – Γραφική αναπαράσταση

Από τους παραπάνω πίνακες και διαγράμματα, παρατηρούμε πως οι υψηλότερες θερμοκρασίες καταγράφονται τους θερινούς μήνες συγκεκριμένα Ιούλιο και Αύγουστο, ενώ οι χαμηλότερες αντίστοιχα καταγράφονται Φεβρουάριο και Ιανουάριο.

ΕΤΟΣ	ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	ΜΑΡΤΙΟΣ	ΑΠΡΙΛΙΟΣ	ΜΑΙΟΣ	ΙΟΥΝΙΟΣ	ΙΟΥΛΙΟΣ	ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ
1955	12,6	14,2	13,4	14,0	20,5	23,9	26,1	24,9	22,6	20,9	15,8	13,5
1956	11,9	10,7	9,5	16,1	19,0	23,2	26,1	25,6	21,7	18,4	15,9	11,3
1957	9,1	12,3	11,5	14,0	17,6	22,2	23,1	25,8	22,5	17,9	15,2	10,8
1958	10,6	12,8	12,8	15,0	20,7	23,6	25,3	25,8	21,3	18,4	15,8	13,7
1959	10,7	8,7	12,6	14,7	19,8	22,2	25,1	25,5	21,3	16,2	14,9	13,9
1960	11,7	12,2	11,6	14,7	20,3	22,9	25,0	26,5	22,3	21,8	17,7	15,3
1961	11,2	9,9	13,2	16,9	19,6	23,0	24,8	24,4	21,4	18,2	17,7	13,4
1962	12,1	10,3	13,6	15,2	20,6	23,4	24,7	25,3	23,2	19,0	18,0	12,5
1963	11,5	12,4	11,6	14,9	18,2	23,3	25,4	18,8	23,4	19,1	17,1	13,4
1964	8,8	9,7	12,1	14,7	18,2	23,6	24,1	24,3	21,1	20,2	15,9	13,1
1965	10,8	10,0	12,5	14,6	18,9	23,5	26,2	23,6	22,4	16,9	16,1	13,2
1966	10,9	13,2	12,2	16,0	18,4	23,4	25,8	25,9	21,7	21,5	17,7	12,8
1967	10,3	8,9	11,6	14,7	19,1	22,4	23,9	25,0	22,7	19,2	15,3	12,8
1968	9,8	11,7	11,6	16,1	22,1	23,4	25,6	26,0	22,7	17,7	15,2	12,0
1969	9,5	12,5	11,6	12,8	20,9	24,4	23,3	24,4	22,5	17,1	16,1	13,1
1970	11,9	12,4	12,9	17,1	18,2	23,8	24,9	25,1	21,6	18,3	15,3	12,0
1971	12,2	10,3	12,3	14,4	20,4	24,5	23,5	24,2	21,4	16,7	14,9	11,6
1972	10,2	10,2	11,4	15,7	19,0	24,2	25,1	25,0	22,8	17,3	14,7	10,8
1973	9,9	11,1	11,0	14,0	20,4	22,9	26,3	23,2	22,1	18,8	13,9	13,0
1974	9,1	11,1	11,6	14,0	18,4	23,5	24,6	23,7	22,0	20,4	15,2	11,4
1975	9,9	9,2	13,3	15,7	20,0	23,0	24,7	23,8	22,6	18,4	14,2	10,9
1976	10,5	8,8	11,3	14,6	18,7	21,8	24,3	23,1	21,6	18,5	14,5	12,3
1977	10,8	13,6	12,4	15,2	20,1	24,2	26,2	25,5	21,3	16,6	16,2	10,6
1978	10,2	12,2	12,7	15,1	19,3	24,1	25,2	23,4	21,1	17,7	13,1	13,1
1979	10,8	11,1	13,6	14,6	19,2	24,3	25,0	24,8	22,6	18,7	15,0	12,4
1980	9,8	9,2	11,5	14,2	18,0	23,2	25,7	24,7	21,4	19,7	17,3	12,3
1981	9,0	10,2	13,4	15,7	17,8	24,6	24,4	24,0	22,4	21,2	14,1	14,1
1982	11,1	8,6	10,9	14,2	17,9	24,1	24,2	24,7	22,3	19,3	14,1	11,8
1983	9,8	8,7	11,2	16,5	20,1	21,8	24,9	23,9	21,5	17,4	14,2	11,7

ΕΤΟΣ	ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	ΜΑΡΤΙΟΣ	ΑΠΡΙΛΙΟΣ	ΜΑΙΟΣ	ΙΟΥΝΙΟΣ	ΙΟΥΛΙΟΣ	ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ
1984	11,3	11,2	11,9	13,8	20,3	22,5	24,3	23,6	23,1	20,8	15,3	11,7
1985	11,6	9,0	11,5	16,4	20,8	24,2	24,5	25,1	22,0	16,6	16,2	13,2
1986	11,7	11,5	11,9	16,6	18,6	23,6	25,3	25,2	22,5	18,0	13,5	11,2
1987	11,6	11,1	8,7	14,0	17,7	23,7	25,5	25,0	23,4	17,6	14,8	12,2
1988	11,8	10,6	11,9	14,8	20,2	24,7	26,9	24,9	23,1	17,5	12,5	11,4
1989	9,2	10,8	13,1	17,0	18,3	23,3	25,5	24,3	22,8	17,4	14,5	12,2
1990	9,5	10,8	13,2	16,0	19,6	23,5	25,8	24,3	22,9	19,2	17,1	12,8
1991	10,2	10,3	12,6	14,6	17,6	24,1	25,1	25,1	22,6	19,7	15,3	8,7
1992	9,8	8,2	11,1	15,0	17,6	23,7	24,8	25,3	21,7	21,7	15,9	10,4
1993	10,0	8,4	11,4	15,0	19,1	24,5	25,4	25,4	23,2	20,9	14,4	13,5
1994	12,1	10,9	12,3	16,1	20,9	23,3	25,6	26,7	25,0	21,2	14,6	11,6
1995	11,5	12,3	12,5	14,9	19,4	26,0	25,8	25,5	23,6	17,2	12,9	12,9
1996	9,8	10,6	9,8	14,0	21,1	24,0	26,0	25,8	23,1	17,7	15,5	13,5
1997	11,7	10,5	10,9	12,5	19,8	25,4	27,0	24,9	20,9	17,8	15,3	12,5
1998	11,2	11,9	10,2	16,5	19,2	24,9	27,3	26,4	23,1	20,3	16,5	11,2
1999	11,3	11,0	13,0	16,6	20,9	25,6	26,8	27,5	23,9	21,2	16,5	14,3
2000	8,5	10,5	11,9	16,4	20,7	23,9	27,7	25,5	24,0	18,6	17,3	12,9
2001	12,2	11,4	16,1	15,6	20,1	24,1	27,8	27,0	24,9	20,1	15,3	10,1
2002	9,8	12,9	13,4	15,1	19,4	24,3	27,8	27,0	23,5	19,4	15,6	11,3
2003	12,8	7,2	10,0	13,4	20,4	25,2	27,2	26,7	22,9	21,1	15,6	11,8

Πίνακας 5.6: Μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες (°C) της νήσου Μήλου για τα έτη 1955 – 2003 (Στοιχεία Ε.Μ.Υ.)

ΕΤΟΣ	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ
1955	18,5
1956	17,5
1957	16,8
1958	18,0
1959	17,1
1960	18,5
1961	17,8
1962	18,2
1963	17,4
1964	17,2
1965	17,4
1966	18,3
1967	17,1
1968	17,8
1969	17,3
1970	17,8
1971	17,2
1972	17,2
1973	17,2
1974	17,1
1975	17,1
1976	16,7
1977	17,7
1978	17,3
1979	17,7
1980	17,2
1981	17,6
1982	16,9
1983	16,8
1984	17,5
1985	17,6
1986	17,5
1987	17,1
1988	17,5
1989	17,4
1990	17,9
1991	17,2
1992	17,1
1993	17,6
1994	18,3
1995	17,9
1996	17,6
1997	17,4
1998	18,2
1999	19,0
2000	18,2
2001	18,7
2002	18,3
2003	17,9

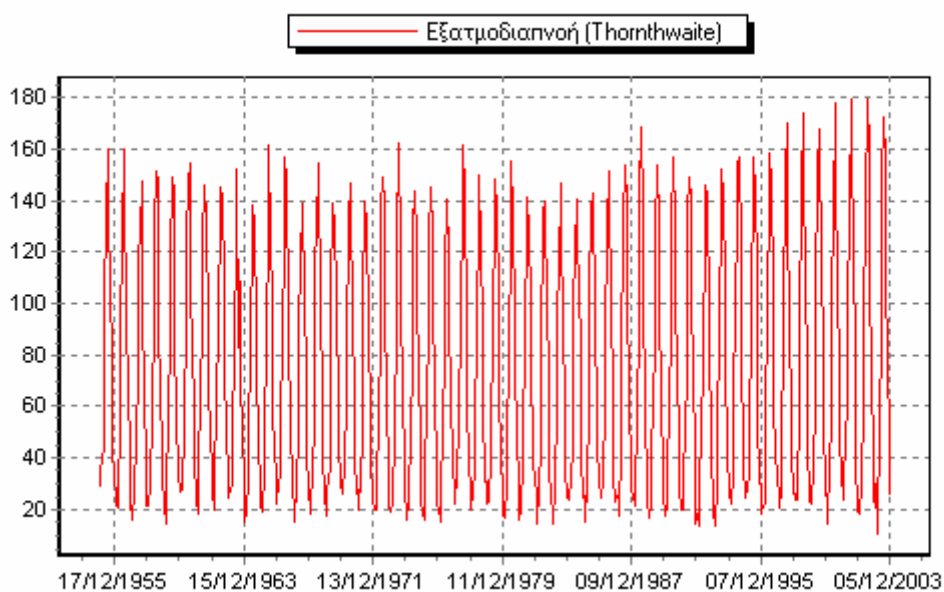
Πίνακας 5.7: Μέση ετήσια θερμοκρασία (°C) για την περίοδο 1955 – 2003 (Στοιχεία Ε.Μ.Υ.)

Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρούμε πως η μέση ετήσια θερμοκρασία κυμαίνεται από 16,7 °C η ελάχιστη έως 19 °C η μέγιστη, τιμές που καταγράφονται τα έτη 1976 και 1999 αντίστοιχα.

Στη συνέχεια με βάση τα παραπάνω δεδομένα υπολογίστηκε η τιμή της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής με δύο διαφορετικές εμπειρικές μεθόδους. Τη μέθοδο Thornthwaite και τη μέθοδο Hargreaves.

➤ Μέθοδος Thornthwaite

Για τη μέθοδο Thornthwaite χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου οι μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες για την περίοδο 1955 – 2003 καθώς και το γεωγραφικό πλάτος του μετεωρολογικού σταθμού. Τα δεδομένα αυτά εισήχθησαν στο λογισμικό “Υδρογνώμων” και παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα.



Διάγραμμα 5.3: Γραφική απεικόνιση της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής κατά Thornthwaite

ΕΤΟΣ	ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	ΜΑΡΤΙΟΣ	ΑΠΡΙΛΙΟΣ	ΜΑΙΟΣ	ΙΟΥΝΙΟΣ	ΙΟΥΛΙΟΣ	ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ
1955	29,0	35,4	38,9	45,1	100,6	133,9	160,2	138,2	102,3	82,8	43,6	32,1
1956	26,1	21,9	20,9	58,3	87,8	126,9	160,0	145,0	94,7	65,4	44,0	23,2
1957	16,0	27,2	29,5	45,1	76,2	117,1	128,3	147,4	101,4	62,4	40,6	21,4
1958	21,2	29,3	35,8	51,1	102,4	130,8	151,4	147,4	91,8	65,6	43,6	33,0
1959	21,5	14,5	34,8	49,2	94,4	117,1	149,2	144,3	91,8	52,1	39,2	33,8
1960	25,32	27,79	30,02	49,39	99,01	123,9	147,9	154,37	99,47	89,07	53,47	40,27
1961	23,39	18,34	37,85	63,48	92,7	124,84	145,95	133,17	92,59	64,34	53,61	31,65
1962	26,92	19,71	39,97	52,34	101,49	128,82	144,88	142,25	107,25	69,58	55,28	27,89
1963	24,54	27,64	29,92	50,47	81	127,82	152,44	82,85	108,94	70,25	50,35	31,65
1964	15,08	18,3	32,42	49,39	81,16	130,89	138,35	131,84	89,94	77,52	43,98	30,35
1965	21,89	18,68	34,28	48,64	86,76	129,83	161,29	125,33	100,61	56,22	45,12	30,79
1966	22,26	30,97	32,8	57,46	82,63	128,82	156,84	148,45	94,96	87,15	53,61	29,12
1967	20,08	15,11	29,92	49,24	88,44	118,98	136,45	139,19	103,08	70,92	41,12	29,12
1968	18,34	25,75	30,02	58,29	115,57	128,87	154,43	149,11	102,75	60,95	40,52	25,87
1969	17,33	28,04	29,92	38,28	104,2	139,02	130,28	133,17	101,43	57,44	45,12	30,37
1970	26,11	27,64	36,3	64,85	81	132,86	147,02	140,21	94,17	64,99	41,12	25,89
1971	27,32	19,71	33,29	47,43	99,7	140,06	132,32	131,19	92,59	55,02	39,18	24,34
1972	19,72	20,06	29,09	55,68	87,77	137,01	148,98	138,83	103,57	58,47	38,13	21,36
1973	18,68	22,59	27,16	45,06	99,7	123,86	162,41	121,49	98,18	68,26	34,53	29,95
1974	16,02	22,59	29,92	45,06	82,63	129,83	143,81	126,3	97,37	79,2	40,63	23,58
1975	18,68	16,05	38,38	55,51	96,17	124,84	144,88	127,27	102,26	65,64	35,9	21,73
1976	20,79	15,33	28,62	48,78	85,27	113,28	140,45	120,22	93,86	66,06	37,19	27,06
1977	21,89	32,7	33,78	52,34	97,05	136,95	161,29	144,3	91,8	54,42	45,63	20,66
1978	19,72	26,83	35,28	51,71	90,13	135,92	150,26	123,4	90,24	61,16	31	30,37
1979	21,89	22,59	39,97	48,64	89,28	137,98	148,1	137,17	102,26	67,6	39,66	27,48
1980	18,34	16,62	29,55	46,37	79,54	126,87	155,53	135,81	92,29	74,07	51,29	27,06
1981	15,7	19,37	38,9	55,51	77,79	141,1	141,69	129,22	100,61	84,94	35,44	34,72
1982	23,01	14,2	26,71	46,24	78,58	135,92	139,58	136,17	99,8	71,6	35,44	25,11
1983	18,34	14,5	28,07	60,77	97,05	113,24	147,02	128,24	93,38	59,29	35,9	24,72

ΕΤΟΣ	ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	ΜΑΡΤΙΟΣ	ΑΠΡΙΛΙΟΣ	ΜΑΙΟΣ	ΙΟΥΝΙΟΣ	ΙΟΥΛΙΟΣ	ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ
1984	23,77	23,78	31,45	44,02	99,01	119,99	140,45	125	106,07	81,77	41,01	24,71
1985	24,93	15,42	29,45	60,1	103,29	136,95	142,75	140,21	97,37	54,42	45,63	30,79
1986	25,32	24,09	31,34	61,44	84,27	130,83	151,35	141,23	101,43	63,06	32,74	22,83
1987	24,93	22,59	17,72	45,06	76,99	131,84	153,53	139,19	108,94	60,53	38,71	26,68
1988	25,72	21,51	31,45	50	98,13	142,2	169	137,82	106,07	59,7	28,38	23,57
1989	16,35	21,49	37,33	64,16	81,81	127,82	153,53	132,18	103,91	59,29	37,29	26,68
1990	17,33	21,49	37,85	57,46	92,7	129,83	156,84	132,18	104,74	70,92	50,35	29,12
1991	19,72	19,71	34,78	48,64	76,2	135,92	149,18	140,21	102,26	74,32	41,12	14,42
1992	18,34	13,48	27,71	51,24	76,36	131,9	145,75	141,88	94,65	88,32	43,98	19,94
1993	19,03	13,6	28,99	51,09	88,44	140,06	152,44	143,27	107,25	82,77	36,82	32,08
1994	26,92	21,85	33,29	58,11	104,2	127,82	154,63	156,9	122,88	84,94	37,76	24,34
1995	24,54	27,23	34,28	50,47	90,98	156,06	156,84	144,3	110,64	58,05	30,14	29,53
1996	18,34	21,51	22,09	45,19	106,23	134,95	158,85	147,03	106,07	60,95	41,99	32,06
1997	25,32	20,42	26,71	36,66	94,43	149,57	170,37	138,18	88,69	61,79	41,12	27,89
1998	23,39	25,64	23,67	60,77	89,28	144,25	173,83	153,71	106,41	78,49	47,18	22,83
1999	23,77	22,22	36,82	61,44	104,2	151,72	168,08	166,57	113,22	84,94	47,18	35,62
2000	14,15	21,15	31,45	60,28	102,59	133,93	178,26	143,93	113,71	66,71	51,29	29,52
2001	27,32	23,71	54,34	54,87	97,05	135,92	179,67	160,13	121,99	77,09	41,12	18,92
2002	18,34	29,7	38,9	51,71	90,98	137,98	179,67	160,13	109,79	72,27	42,6	23,21
2003	29,82	10,27	22,84	41,61	99,7	147,43	172,67	156,9	104,74	84,22	42,6	25,11

Πίνακας 5.8: Μέση μηνιαία δονητική εξαμυσοδιαπνοή σε mm νήσου Μήλου για τα έτη 1955 – 2003 κατά Thornthwaite

ΕΤΟΣ	ΔΥΝΗΤΙΚΗ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗ ΚΑΤΑ ΤΗΟΡΝΤΗΩΑΙΤΕ
1955	941,84
1956	873,94
1957	812,53
1958	903,28
1959	841,86
1960	939,98
1961	881,91
1962	916,38
1963	837,87
1964	839,22
1965	859,44
1966	925,07
1967	841,65
1968	910,47
1969	854,6
1970	882,16
1971	842,15
1972	858,67
1973	851,87
1974	836,94
1975	847,31
1976	796,91
1977	892,81
1978	846,02
1979	882,62
1980	853,34
1981	874,99
1982	832,36
1983	820,52
1984	861,03
1985	881,31
1986	869,93
1987	846,71
1988	893,55
1989	861,84
1990	900,81
1991	856,48
1992	853,55
1993	895,84
1994	953,64
1995	913,06
1996	895,26
1997	881,15
1998	949,45
1999	1014,78
2000	946,97
2001	992,13

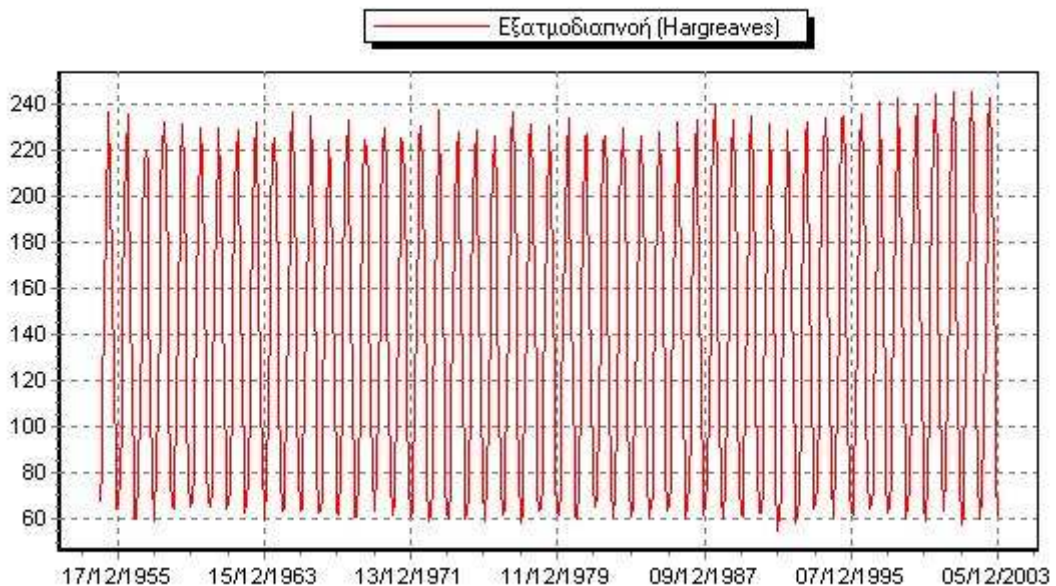
2003	937,91
ΜΕΣΗ ΥΠΕΡΕΤΗΣΙΑ	882,8

Πίνακας 5.9: Μέση ετήσια δυνητική εξατμισοδιαπνοή (mm) νήσου Μήλου κατά Thornthwaite

Με βάση τους παραπάνω πίνακες καταλήγουμε σε μια μέση υπερετήσια τιμή της κατεΐσδυσης της τάξης των 882,8 mm. Η ελάχιστη ετήσια τιμή αντιστοιχεί στην τιμή 796,91 mm και καταγράφεται το έτος 1976, ενώ αντίθετα η μέγιστη τιμή της κατεΐσδυσης καταγράφεται το έτος 1999 και αντιστοιχεί σε 1014,78 mm.

➤ Μέθοδος Hargreaves

Με την ίδια μεθοδολογία υπολογίσθηκε η δυνητική εξατμισοδιαπνοή με τη μέθοδο Hargreaves.



Διάγραμμα 5.4: Γραφική απεικόνιση της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής κατά Thornthwaite

ΕΤΟΣ	ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	ΜΑΡΤΙΟΣ	ΑΠΡΙΛΙΟΣ	ΜΑΙΟΣ	ΙΟΥΝΙΟΣ	ΙΟΥΛΙΟΣ	ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ
1955	68,11	82,87	117,77	142,8	201,06	221,39	235,9	209,3	161,7	123,5	78,8	64,38
1956	66,54	77,18	103,9	153,1	193,68	217,75	235,5	211,81	157	114,4	78,39	59,77
1957	60,27	77,95	110,6	142,8	185,84	212,37	219,8	213,71	161,3	113,9	77,39	58,82
1958	63,63	79,24	115,51	147,3	202,11	219,8	231,6	213,71	156,5	115,5	78,8	64,79
1959	63,85	68,63	114,75	146	197,39	212,37	230,5	212,24	156,5	108,5	76,69	65,2
1960	66,77	81,24	111,9	146,8	200,53	216,16	229,6	216,21	159,3	125,2	82,58	67,99
1961	64,97	71,73	117,02	155,9	196,34	216,61	228,9	206,85	156,9	114,9	83,25	64,17
1962	66,99	72,77	118,53	148,2	201,59	218,74	228,4	211,26	164,1	117,4	83,96	62,32
1963	65,65	78,21	110,98	146,9	188,99	218,21	232,1	179,4	164,9	117,8	81,85	64,17
1964	59,6	74,47	113,8	146,8	189,47	219,88	224,7	205,47	154,6	120,1	78,39	63,47
1965	64,08	71,99	114,37	145,5	192,66	219,27	236,4	202,93	160,9	110,7	79,5	63,76
1966	64,3	80,28	113,24	151,8	190,04	218,74	234,3	214,2	158,1	125,4	83,25	62,94
1967	62,96	69,14	110,98	146	193,71	213,43	224,1	209,79	162,1	118,1	77,63	62,94
1968	61,84	79,88	111,9	153,1	210	218,82	232,8	213,77	160,9	112,2	76,76	61,21
1969	61,16	78,47	110,98	137,5	203,16	224,05	220,8	206,85	161,3	111,4	79,5	63,55
1970	66,54	78,21	115,88	156,8	188,99	220,86	229,4	210,28	157,7	115,2	77,63	61,29
1971	67,21	72,77	113,62	144,6	200,54	224,58	221,9	205,87	156,9	110,1	76,69	60,47
1972	62,73	75,82	111,13	151,3	193,68	223,07	230,1	208,89	161,3	111	75,6	58,74
1973	62,06	74,84	108,71	142,8	200,54	216,08	237	200,96	159,7	116,8	74,34	63,35
1974	60,27	74,84	110,98	142,8	190,04	219,27	227,8	203,42	159,3	121,9	77,39	60,06
1975	62,06	69,92	117,39	150,5	198,44	216,61	228,4	203,91	161,7	115,5	75,05	59,03
1976	63,4	72,03	110,75	146,3	192,1	210,32	225,8	199,61	156,6	114,8	75,13	61,82
1977	64,08	81,31	114	148,2	198,96	222,99	236,4	212,24	156,5	109,8	79,74	58,41
1978	62,73	77,69	115,13	147,8	194,76	222,45	231	201,94	155,7	113,3	72,47	63,55
1979	64,08	74,84	118,53	145,5	194,24	223,52	230	208,81	161,7	116,5	76,92	62,12
1980	61,84	73,11	111,51	144,5	188,42	217,75	233,3	207,42	155,8	118,6	81,65	61,82
1981	60,04	72,51	117,77	150,5	186,89	225,11	226,8	204,89	160,9	124,5	74,81	65,61
1982	64,75	68,37	108,33	143,7	187,41	222,45	225,7	208,32	160,5	118,4	74,81	60,88
1983	61,84	68,63	109,47	154,1	198,96	210,24	229,4	204,4	157,3	112,3	75,05	60,68
1984	65,2	78,53	113,04	142,7	200,53	214,04	225,8	202,05	162,5	122	76,99	60,59

ΕΤΟΣ	ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	ΜΑΡΤΙΟΣ	ΑΠΡΙΛΙΟΣ	ΜΑΙΟΣ	ΙΟΥΝΙΟΣ	ΙΟΥΛΙΟΣ	ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ
1985	65,87	69,4	110,6	153,6	202,64	222,99	227,3	210,28	159,3	109,8	79,74	63,76
1986	66,09	75,88	112,11	154,5	191,09	219,8	231,6	210,77	161,3	114,2	73,4	59,65
1987	65,87	74,84	100,03	142,8	186,36	220,33	232,7	209,79	164,9	113	76,45	61,7
1988	66,32	76,9	113,04	147,2	200	225,72	239,8	208,4	162,5	111,6	70,48	59,98
1989	60,49	74,06	116,64	156,3	189,51	218,21	232,7	206,36	162,5	112,3	75,75	61,7
1990	61,16	74,06	117,02	151,8	196,34	219,27	234,3	206,36	162,9	118,1	81,85	62,94
1991	62,73	72,77	114,75	145,5	185,84	222,45	230,5	210,28	161,7	119,7	77,63	54,5
1992	61,84	70,41	109,99	148,1	186,32	220,41	228,5	210,35	157	124,9	78,39	57,92
1993	62,28	67,85	110,22	147,3	193,71	224,58	232,1	211,75	164,1	123,5	75,51	64,38
1994	66,99	74,32	113,62	152,3	203,16	218,21	233,2	218,12	171,3	124,5	75,98	60,47
1995	65,65	77,95	114,37	146,9	195,29	232,54	234,3	212,24	165,7	111,7	72	63,14
1996	61,84	76,9	105,04	143,6	204,74	222	234,9	212,79	162,5	112,2	77,46	64,29
1997	66,09	73,29	108,33	136,1	197,39	229,36	240,7	209,3	154,9	113,6	77,63	62,32
1998	64,97	76,91	105,69	154,1	194,24	226,7	242,3	216,65	163,7	121,6	80,44	59,65
1999	65,2	74,58	116,26	154,5	203,16	230,42	239,6	222,04	166,9	124,5	80,44	66,02
2000	58,92	76,63	113,04	154,5	202,63	221,47	244	211,33	166,1	115,1	81,65	63,06
2001	67,21	75,62	127,96	150	198,96	222,45	245	219,59	170,9	120,9	77,63	57,38
2002	61,84	79,5	117,77	147,8	195,29	223,52	245	219,59	166,3	118,7	78,33	59,85
2003	68,56	64,74	104,94	140,2	200,54	228,29	241,8	218,12	162,9	124,1	78,33	60,88

Πίνακας 5.10: Μέση μηνιαία δονητική εξασθεωμένη σε mm νήσου Μήλου για τα έτη 1955 – 2003 κατά Hargreaves

ΕΤΟΣ	ΔΥΝΗΤΙΚΗ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗ ΚΑΤΑ HARGREAVES
1955	1707,6
1956	1669,0
1957	1634,8
1958	1688,5
1959	1652,6
1960	1704,2
1961	1677,5
1962	1694,3
1963	1649,1
1964	1650,8
1965	1662,1
1966	1696,6
1967	1650,8
1968	1693,2
1969	1658,7
1970	1678,8
1971	1655,3
1972	1663,3
1973	1657,1
1974	1648,1
1975	1658,4
1976	1628,6
1977	1682,6
1978	1658,5
1979	1676,7
1980	1655,7
1981	1670,2
1982	1643,6
1983	1642,4
1984	1664,0
1985	1675,2
1986	1670,4
1987	1648,7
1988	1681,9
1989	1666,5
1990	1686,1
1991	1658,3
1992	1654,1
1993	1677,3
1994	1712,1
1995	1691,7
1996	1678,3
1997	1669,0
1998	1706,9
1999	1743,6
2000	1708,4
2001	1733,7

2002	1712,5
2003	1693,4
ΜΕΣΗ ΥΠΕΡΕΤΗΣΙΑ	1674,30

Πίνακας 5.11: Μέση ετήσια δυνητική εξατμισοδιαπνοή (mm) νήσου Μήλου κατά Hargreaves

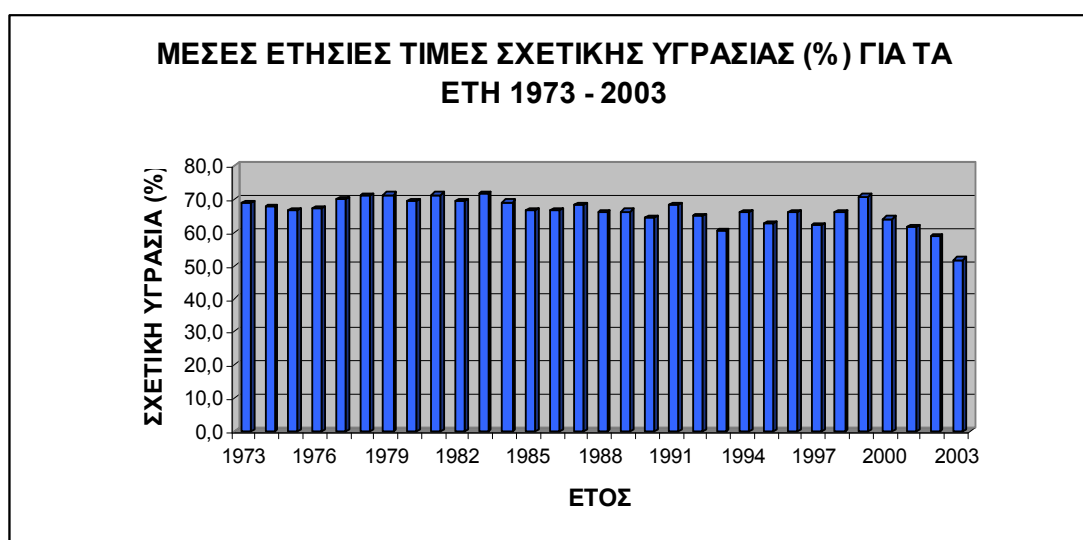
Παρατηρούμε από τους παραπάνω πίνακες πως το εύρος στις διακυμάνσεις των τιμών της ετήσιας δυνητικής εξατμισοδιαπνοής είναι μικρό, αφού η ελάχιστη τιμή παρουσιάζεται το έτος 1976 και αντιστοιχεί σε 1628,6mm, ενώ η μέγιστη τιμή παρουσιάζεται το έτος 1999 και αντιστοιχεί σε 1743,6mm.

5.2.8 Υπολογισμός δυνητικής εξατμισοδιαπνοής στον υδροφορέα της Μήλου με χρήση μεθόδων συνδυασμού

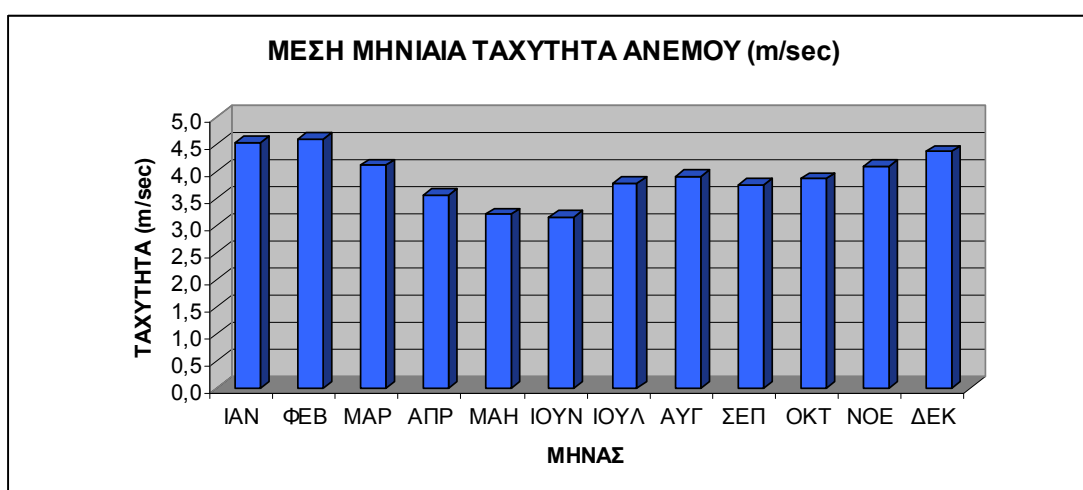
Γενικά οι συνδυαστικές μέθοδοι μπορούν να προσφέρουν ακριβέστερα αποτελέσματα σε σχέση με τις εμπειρικές μεθόδους, ωστόσο απαιτούν μεγαλύτερο αριθμό δεδομένων εισαγωγής και χρησιμοποιούν πιο πολύπλοκες εξισώσεις, με αποτέλεσμα να είναι χρονοβόρες. Για την ακριβέστερη εκτίμηση του υδατικού ισοζυγίου του υδροφορέα της Μήλου, κρίθηκε αναγκαίος ο υπολογισμός της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής με τη βοήθεια των εξισώσεων Penmann και Penmann – Monteith. Οι υπολογισμοί αυτοί δίνουν τη δυνατότητα σύγκρισης των μεθόδων και μια σφαιρικότερη αντιμετώπιση του προβλήματος του υπολογισμού των συνιστωσών του υδατικού ισοζυγίου.

Για τον υπολογισμό της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα που παρείχε η Ε.Μ.Υ. για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας, και χρησιμοποιήθηκε ημερήσιο βήμα. Λόγω ελλειμματικών δεδομένων για τα έτη 1955 – 1970, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί μια χρονοσειρά δεδομένων 30 ετών, για τα έτη 1973 – 2003, όπου οι καταγραφές είναι πλήρης και ακριβείς.

Για την εφαρμογή των μεθόδων χρησιμοποιήθηκαν πέρα από τις ημερήσιες τιμές της θερμοκρασίας και της βροχόπτωσης, οι αντίστοιχες τιμές της σχετικής υγρασίας (σε ποσοστό επί τοις εκατό), της ταχύτητας του ανέμου (σε m/sec) και της ηλιοφάνειας (σε h/day). Λόγω του μεγάλου όγκου, τα δεδομένα παρουσιάζονται σε ψηφιακή μορφή συνοδευτικά με το τεύχος. Παρακάτω παρουσιάζονται ενδεικτικά τα διαγράμματα της σχετικής υγρασίας και της ταχύτητας του ανέμου.



Διάγραμμα 5.5: Μέσες ετήσιες τιμές σχετικής υγρασίας νήσου Μήλου για τα έτη 1973 – 2003 (Στοιχεία Ε.Μ.Υ.)



Διάγραμμα 5.6: Μέση μηνιαία ταχύτητα ανέμου νήσου Μήλου για τα έτη 1973 – 2003 (Στοιχεία Ε.Μ.Υ.)

Λόγω έλλειψης δεδομένων για την ηλιοφάνεια από το μετεωρολογικό σταθμό της νήσου Μήλου, χρησιμοποιήθηκαν τα αντίστοιχα δεδομένα από τη νήσο Ρόδο. Βέβαια η Ρόδος γεωγραφικά απέχει αρκετά από τη Μήλο, ωστόσο τα δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν ενδεικτικά, αφενός διότι δεν υπήρχαν άλλα διαθέσιμα και αφετέρου διότι η έκταση του ελλαδικού χώρου δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλη ώστε τα δεδομένα αυτά να παρουσιάσουν μεγάλες αποκλίσεις και να επηρεάσουν σημαντικά το τελικό αποτέλεσμα.

➤ Μέθοδος Penmann

Με βάση τα παραπάνω στοιχεία εφαρμόστηκε η μέθοδος Penmann με τη βοήθεια των εξισώσεων που περιγράφηκαν στην παράγραφο 5.2.3.2. Στην εξίσωση του Penmann $E'=(\Delta \cdot R_n)/(\Delta+\gamma) \cdot \lambda+(\gamma \cdot F(u) \cdot D)/(\Delta+\gamma)$ εμπεριέχονται οι βασικοί συντελεστές για τους οποίους αναφέρθηκαν επιγραμματικά οι μαθηματικές σχέσεις για τον υπολογισμό τους.

Στην πραγματικότητα οι εξισώσεις υπολογισμού των βασικών παραμέτρων της εξίσωσης Penmann, εξαρτώνται και από άλλα μεγέθη, τα οποία περιγράφονται από άλλες μαθηματικές σχέσεις. Για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αρκετά από τα μεγέθη αυτά θεωρήθηκαν με συγκεκριμένες τιμές, λόγω της έλλειψης περαιτέρω στοιχείων για την ακριβή εκτίμησή τους.

Οι εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των απαιτούμενων μεγεθών αναφέρονται στο παράρτημα στο τέλος του τεύχους. Στους πίνακες που ακολουθούν καταγράφονται οι τιμές της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής όπως προέκυψαν από την εφαρμογή της μεθόδου.

ΜΗΝΑΣ	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ
ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	32,06
ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	52,79
ΜΑΡΤΙΟΣ	100,09
ΑΠΡΙΛΙΟΣ	153,21
ΜΑΙΟΣ	212,96
ΙΟΥΝΙΟΣ	250,25
ΙΟΥΛΙΟΣ	262,10
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	244,82
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	165,91
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	103,68
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	48,47
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ	27,20

Πίνακας 5.12: Μέση μηνιαία τιμή δυναμικής εξατμισοδιαπνοής κατά Penman

ΥΑΡΟΛΟΓΙΚΟ ΕΤΟΣ	ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ	ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	ΜΑΡΤΙΟΣ	ΑΠΡΙΛΙΟΣ	ΜΑΙΟΣ	ΙΟΥΝΙΟΣ	ΙΟΥΛΙΟΣ	ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ
1973-1974	103,51	44,47	29,54	28,51	54,91	98,48	144,32	203,87	251,00	251,00	242,06	162,97
1974-1975	110,70	47,79	25,09	30,90	48,94	105,00	150,57	269,55	247,32	261,26	238,63	165,85
1975-1976	99,82	44,52	23,25	29,55	49,16	96,90	149,35	210,86	238,85	258,29	229,52	157,74
1976-1977	102,71	46,93	26,96	33,39	59,24	103,00	150,83	221,02	260,13	275,67	253,12	164,07
1977-1978	91,59	52,08	25,51	32,40	56,21	101,04	151,39	215,57	257,79	266,02	237,11	162,81
1978-1979	101,93	42,92	29,89	35,28	55,21	109,44	149,04	216,81	255,77	260,80	246,81	163,19
1979-1980	102,67	49,27	28,33	30,74	51,53	100,74	146,84	205,86	245,88	264,64	246,32	158,74
1980-1981	105,93	53,56	26,39	29,66	52,14	107,96	154,59	202,92	261,25	262,15	243,92	169,91
1981-1982	116,78	43,69	30,72	33,39	48,18	94,75	148,50	199,72	250,07	257,90	243,92	169,05
1982-1983	106,40	46,42	26,96	30,66	49,05	98,14	156,99	219,63	241,72	270,24	244,79	161,44
1983-1984	97,50	47,77	28,41	34,62	59,38	102,68	145,24	212,99	238,88	252,90	236,66	170,15
1984-1985	109,41	48,51	24,79	34,16	47,96	99,37	153,62	224,53	258,30	249,28	243,70	163,49
1985-1986	93,67	52,83	29,32	33,19	54,78	99,81	156,04	208,37	254,34	263,37	250,69	167,05
1986-1987	97,87	42,72	23,65	33,73	54,45	87,59	143,68	201,88	257,55	267,55	246,83	171,42
1987-1988	99,24	48,87	27,26	35,31	54,60	101,02	149,94	218,31	256,43	276,40	242,82	165,64
1988-1989	95,10	41,37	26,22	28,43	52,16	105,42	159,33	203,70	246,42	259,91	242,91	169,36
1989-1990	96,39	47,37	28,84	29,13	52,24	101,69	155,03	210,77	246,30	261,32	240,00	167,41
1990-1991	105,40	53,81	28,34	30,37	53,53	104,99	234,59	203,00	254,08	263,98	247,62	161,78
1991-1992	106,19	49,33	21,53	30,77	49,08	100,17	151,18	200,01	253,79	258,04	248,50	157,04
1992-1993	111,24	48,36	24,24	31,16	45,21	95,25	144,66	207,85	247,66	247,36	244,06	169,26
1993-1994	112,20	48,70	31,27	35,82	54,37	102,67	157,12	221,11	244,55	262,32	247,19	178,51
1994-1995	116,84	47,75	28,09	34,67	58,18	100,06	148,83	208,43	262,46	256,84	244,10	172,14
1995-1996	94,11	44,32	27,22	29,24	55,39	93,81	145,08	221,03	241,65	256,74	248,08	168,75
1996-1997	96,84	50,12	30,77	35,59	52,98	93,00	135,55	205,85	249,86	258,75	232,94	149,22
1997-1998	100,06	49,97	27,21	31,91	53,70	90,14	154,69	209,48	248,90	268,36	259,84	173,40
1998-1999	113,04	56,93	26,80	33,58	53,13	105,11	158,46	221,06	269,21	279,65	271,28	181,96
1999-2000	117,24	52,13	33,67	26,53	54,41	101,15	162,94	214,68	241,37	263,92	244,88	166,88
2000-2001	101,41	53,14	29,12	36,42	54,57	113,36	151,86	212,30	244,42	269,28	250,82	171,22
2001-2002	103,85	48,52	23,53	29,23	57,89	102,02	149,26	205,94	241,85	265,76	243,66	167,99
2002-2003	100,61	50,05	23,13	33,61	41,13	87,81	136,88	211,69	239,61	253,41	231,83	148,81

Πίνακας 5.13: Μηνιαίες τιμές δηνειακής εξαμνησδιαπνοής για τα έτη 1973 – 2003 κατά Penmann

ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟ ΕΤΟΣ	ΕΤΗΣΙΑ
1973-1974	1614,62
1974-1975	1701,59
1975-1976	1587,81
1976-1977	1697,07
1977-1978	1649,51
1978-1979	1667,08
1979-1980	1631,54
1980-1981	1670,38
1981-1982	1636,66
1982-1983	1652,44
1983-1984	1627,18
1984-1985	1657,12
1985-1986	1663,47
1986-1987	1628,92
1987-1988	1675,85
1988-1989	1630,34
1989-1990	1636,50
1990-1991	1741,51
1991-1992	1625,62
1992-1993	1616,31
1993-1994	1695,84
1994-1995	1678,38
1995-1996	1625,41
1996-1997	1591,45
1997-1998	1667,65
1998-1999	1770,22
1999-2000	1679,81
2000-2001	1687,92
2001-2002	1639,50
2002-2003	1558,56
ΜΕΣΗ ΥΠΕΡΕΤΗΣΙΑ	1653,54

Πίνακας 5.14: Ετήσια και μέση υπερετήσια τιμή δυνητικής εξατμισοδιαπνοής κατά Penmann

Από τους παραπάνω πίνακες παρατηρούμε τις μεγαλύτερες τιμές της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής τους καλοκαιρινούς μήνες και τις μικρότερες τιμές τους χειμερινούς μήνες αντίστοιχα, γεγονός αναμενόμενο. Η μεγαλύτερη τιμή ετήσιας δυνητικής εξατμισοδιαπνοής καταγράφεται το υδρολογικό έτος 1998 – 1999 και η μικρότερη το υδρολογικό έτος 2002 – 2003. Η μέση υπερετήσια δυνητική εξατμισοδιαπνοή υπολογίστηκε 1653,54 mm, τιμή σχεδόν διπλάσια από εκείνη που υπολογίστηκε με την εμπειρική μέθοδο του Thornthwaite.

➤ Μέθοδος Penmann – Monteith

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, ο Monteith βελτίωσε τις εξισώσεις του Penmann, κατορθώνοντας να εξαλείψει κάποια από τα μειονεκτήματα της μεθόδου, έτσι ώστε ο υπολογισμός της δυναμικής εξατμισοδιαπνοής να πραγματοποιείται με πιο ακριβή τρόπο. Ο Monteith εισήγαγε την έννοια της επιφανειακής αντίστασης r_s των στομάτων, η οποία εκφράζει την ελεγχόμενη (έως ένα βαθμό) από τη χλωρίδα αντίσταση των φυλλωμάτων στην εξάτμιση. Από φυσική άποψη, η αντίσταση αυτή εκφράζει το γεγονός ότι οι υδρατμοί, ενώ μέσα στις κοιλότητες των στομάτων είναι σε κατάσταση κορεσμού, έξω από αυτές βρίσκονται σε ακόρεστη κατάσταση. (Κουτσογιάννης 1999).

Στην ουσία ο Monteith με τις θεωρήσεις του αυτές τροποποιεί τις εξισώσεις με τις οποίες υπολογίζονται κάποιες παράμετροι της εξίσωσης Penmann, με κυριότερες τον ψυχρομετρικό συντελεστή και τη συνάρτηση του ανέμου. Έτσι καταλήγει στην εξίσωση γνωστή ως Penmann – Monteith

$$E' = (\Delta \cdot R_n) / (\Delta + \gamma') \cdot \lambda + (\gamma \cdot F(u) \cdot D) / (\Delta + \gamma')$$

που αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο. Αναλυτικότερα οι εξισώσεις της μεθόδου Penmann – Monteith αναφέρονται στο παράρτημα που επισυνάπτεται στο τέλος του τεύχους. Στους πίνακες που ακολουθούν καταγράφονται οι τιμές της δυναμικής εξατμισοδιαπνοής όπως προέκυψαν από την εφαρμογή της μεθόδου.

ΜΗΝΑΣ	ΔΥΝΗΤΙΚΗ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗ
ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	61,14
ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	65,82
ΜΑΡΤΙΟΣ	91,06
ΑΠΡΙΛΙΟΣ	123,83
ΜΑΙΟΣ	169,98
ΙΟΥΝΙΟΣ	209,74
ΙΟΥΛΙΟΣ	231,80
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	213,77
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	154,93
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	105,26
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	69,39
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ	59,50

Πίνακας 5.15: Μέση μηνιαία δυναμική εξατμισοδιαπνοή (mm) κατά Penmann - Monteith

ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟ ΕΤΟΣ	ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ	ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	ΜΑΡΤΙΟΣ	ΑΠΡΙΛΙΟΣ	ΜΑΙΟΣ	ΙΟΥΝΙΟΣ	ΙΟΥΛΙΟΣ	ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ
1973-1974	101,93	73,08	55,64	61,39	55,83	90,68	117,56	163,96	191,00	204,60	182,96	153,38
1974-1975	102,25	67,22	57,85	56,12	60,94	95,02	136,10	157,64	189,34	214,62	186,44	152,34
1975-1976	112,44	79,81	66,31	74,90	72,11	91,78	119,82	150,28	181,12	205,03	185,42	146,82
1976-1977	91,05	65,34	65,62	55,11	79,46	87,62	121,79	175,05	183,10	210,82	191,92	133,03
1977-1978	113,74	67,28	55,60	53,70	72,96	102,58	118,31	157,40	204,15	206,75	195,27	125,72
1978-1979	90,28	74,74	56,98	47,91	60,43	83,18	111,73	147,10	204,69	212,11	201,20	166,83
1979-1980	109,03	61,99	54,80	60,68	54,86	83,58	110,16	150,85	196,32	207,01	183,48	140,07
1980-1981	98,01	70,40	68,89	53,09	58,22	85,32	117,42	153,28	187,62	194,42	186,85	134,63
1981-1982	99,00	85,59	66,58	58,33	58,86	87,45	99,63	166,46	204,74	198,58	193,54	139,48
1982-1983	97,10	70,60	52,67	59,15	54,58	81,32	133,51	156,75	173,76	186,57	177,01	139,08
1983-1984	99,53	59,57	43,77	46,58	49,51	72,72	107,45	185,78	197,26	220,42	191,18	146,58
1984-1985	116,67	68,06	66,65	61,48	62,81	79,25	141,40	163,85	181,88	247,79	221,99	155,18
1985-1986	105,51	65,75	60,29	69,19	71,20	89,52	139,62	159,20	201,05	216,74	210,19	144,43
1986-1987	114,95	72,88	73,18	71,88	70,29	86,68	120,30	152,92	185,66	226,06	203,63	176,58
1987-1988	100,97	66,14	65,02	53,71	70,81	91,53	121,67	176,47	207,59	228,09	222,80	159,14
1988-1989	115,89	70,61	61,63	68,44	80,80	90,74	139,75	162,24	202,22	215,22	199,89	144,08
1989-1990	99,14	64,77	55,23	65,98	70,69	120,17	131,86	173,39	209,41	259,40	208,66	155,84
1990-1991	107,31	76,16	60,36	64,13	54,30	80,83	103,55	138,27	196,29	215,36	204,34	159,05
1991-1992	95,84	63,91	54,93	53,85	69,46	82,19	119,81	156,76	187,06	216,57	212,38	162,42
1992-1993	115,34	76,57	59,51	58,67	69,02	102,73	135,64	172,63	211,08	253,66	234,28	152,31
1993-1994	99,71	58,72	52,86	54,81	57,29	81,02	127,89	174,28	202,53	231,84	251,92	163,51
1994-1995	103,87	74,14	47,92	53,92	63,34	94,69	122,01	174,09	208,42	237,19	217,27	147,24
1995-1996	104,89	61,18	66,32	69,25	57,92	70,82	117,63	188,49	252,75	240,77	207,33	145,77
1996-1997	94,84	57,64	48,86	50,49	62,30	93,80	113,60	190,80	219,02	248,75	253,28	179,66
1997-1998	102,06	62,24	67,94	61,02	82,56	88,56	143,87	178,82	253,23	275,97	228,84	143,80
1998-1999	99,22	60,23	54,98	63,26	68,79	82,28	130,27	184,86	220,05	239,28	207,37	137,26
1999-2000	103,53	85,90	49,96	74,45	62,78	90,71	112,51	200,23	257,42	291,33	231,49	174,68
2000-2001	107,04	65,03	58,75	55,91	68,57	125,78	137,08	194,95	242,30	278,84	261,64	192,48
2001-2002	132,69	76,68	63,56	73,98	70,90	106,58	130,50	194,62	252,18	275,89	240,24	154,02
2002-2003	123,96	79,51	72,32	82,79	83,12	112,70	132,55	197,91	288,99	294,26	320,33	222,34

Πίνακας 5.16: Μηνιαίες τιμές δονητικής εξετασμοδιαπνοής κατά Penmann - Monteith

ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟ ΕΤΟΣ	ΕΤΗΣΙΑ ΔΥΝΗΤΙΚΗ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗ
1973-1974	1452,00
1974-1975	1475,90
1975-1976	1485,86
1976-1977	1459,90
1977-1978	1473,45
1978-1979	1457,19
1979-1980	1412,84
1980-1981	1408,17
1981-1982	1458,24
1982-1983	1382,10
1983-1984	1420,35
1984-1985	1567,00
1985-1986	1532,66
1986-1987	1554,99
1987-1988	1563,95
1988-1989	1551,51
1989-1990	1614,54
1990-1991	1459,95
1991-1992	1475,17
1992-1993	1641,41
1993-1994	1556,40
1994-1995	1544,09
1995-1996	1583,13
1996-1997	1613,06
1997-1998	1688,90

1998-1999	1547,86
1999-2000	1735,00
2000-2001	1788,36
2001-2002	1771,85
2002-2003	2010,77
ΜΕΣΗ ΥΠΕΡΕΤΗΣΙΑ	1556,22

Πίνακας 5.17: Ετήσια και μέση υπερετήσια τιμή δυνητικής εξατμισοδιαπνοής κατά Penmann - Monteith

Από τους παραπάνω πίνακες διαπιστώνουμε πως οι μέθοδοι Penmann και Penmann – Monteith καταλήγουν σε πολύ κοντινά αποτελέσματα όσο αφορά την τιμή της μέσης υπερετήσιας δυνητικής εξατμισοδιαπνοής. Η μέγιστη τιμή της ωστόσο παρουσιάζεται το υδρολογικό έτος 2001 – 2003 και φτάνει τα 2010,77 mm, τη στιγμή που με τη μέθοδο Penmann το εν λόγω υδρολογικό έτος παρουσιάζει την ελάχιστη τιμή. Αντίθετα με τη μέθοδο Penmann – Monteith η ελάχιστη τιμή της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής παρατηρείται το υδρολογικό έτος 1982 – 1983 και φτάνει τα 1382,10 mm.

5.2.9 Σύγκριση αποτελεσμάτων υπολογισμού δυνητικής εξατμισοδιαπνοής

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι τιμές της ετήσιας εξατμισοδιαπνοής, καθώς και της μέσης υπερετήσιας, όπως αυτές προέκυψαν από την εφαρμογή των παραπάνω μεθόδων.

ΕΤΟΣ	ΕΤΗΣΙΑ ΔΥΝΗΤΙΚΗ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗ			
	THORNTHWAITE	HARGREAVES	PENMANN	PENMANN - MONTEITH
1974	836,94	1648,11	1614,62	1452,00
1975	847,31	1658,44	1701,59	1475,90
1976	796,91	1628,59	1587,81	1485,86
1977	892,81	1682,62	1697,07	1459,90
1978	846,02	1658,49	1649,51	1473,45
1979	882,62	1676,72	1667,08	1457,19
1980	853,34	1655,66	1631,54	1412,84
1981	874,99	1670,19	1670,38	1408,17
1982	832,36	1643,60	1636,66	1458,24
1983	820,52	1642,37	1652,44	1382,10
1984	861,03	1664,02	1627,18	1420,35
1985	881,31	1675,23	1657,12	1567,00
1986	869,93	1670,41	1663,47	1532,66
1987	846,71	1648,71	1628,92	1554,99
1988	893,55	1681,92	1675,85	1563,95
1989	861,84	1666,50	1630,34	1551,51
1990	900,81	1686,05	1636,50	1614,54
1991	856,48	1658,34	1741,51	1459,95
1992	853,55	1654,06	1625,62	1475,17
1993	895,84	1677,31	1616,31	1641,41
1994	953,64	1712,07	1695,84	1556,40
1995	913,06	1691,71	1678,38	1544,09
1996	895,26	1678,33	1625,41	1583,13
1997	881,15	1669,01	1591,45	1613,06
1998	949,45	1706,91	1667,65	1688,90
1999	1014,78	1743,61	1770,22	1547,86
2000	946,97	1708,38	1679,81	1735,00
2001	992,13	1733,66	1687,92	1788,36
2002	955,28	1712,47	1639,50	1771,85
2003	937,91	1693,35	1558,56	2010,77
ΜΕΣΗ ΥΠΕΡΕΤΗΣΙΑ	882,84	1674,30	1653,54	1556,22

Πίνακας 5.18: Συγκριτικός πίνακας ετήσιας και μέσης υπερετήσιας δυναμικής εξατμισοδιαπνοής

Από τον παραπάνω πίνακα προκύπτουν τεράστιες διαφορές στον υπολογισμό της δυναμικής εξατμισοδιαπνοής μεταξύ της μεθόδου Thornthwaite και των υπόλοιπων μεθόδων. Αυτό αποδεικνύει στην πράξη πως η μέθοδος Thornthwaite υποεκτιμά στους υπολογισμούς της τη δυναμική εξατμισοδιαπνοή, σε αντίθεση με τη μέθοδο Hargreaves που παρουσιάζει την υψηλότερη τιμή και σε γενικές γραμμές υπερεκτιμά το αποτέλεσμα. Ωστόσο, παρατηρείται σύγκλιση των αποτελεσμάτων που παρουσιάζουν οι μέθοδοι

Penmann και Penmann – Monteith και Hargreaves με τη δεύτερη πάντως να θεωρείται ακριβέστερη και εγκυρότερη από όλες τις μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής. Βέβαια τα παραπάνω αποτελέσματα δεν είναι άμεσα συγκρίσιμα, αφού έχουν ακολουθηθεί διαφορετικές μέθοδοι για τους τελικούς υπολογισμούς, ωστόσο ενδεικτικά αναδεικνύουν διαφορές μεταξύ των εμπειρικών και των μεθόδων συνδυασμού.

5.2.10 Υπολογισμός κατείδυσης

Για την ολοκλήρωση του υπολογισμού των συνιστωσών του υδατικού ισοζυγίου για τον υδροφορέα που εξετάζεται και με βάση τα αποτελέσματα της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής, όπως αυτά προέκυψαν στην προηγούμενη παράγραφο, υπολογίστηκε η συνιστώσα της κατείδυσης. Επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί τόσο η εμπειρική μέθοδος Thornthwaite – Mather που περιγράφηκε στο κεφάλαιο αυτό, όσο και υπολογιστική μέθοδος η οποία βασίζεται στην εφαρμογή μοντέλων διερεύνησης και αναπαράστασης του υδατικού ισοζυγίου.

Στην παρούσα παράγραφο αναπτύσσεται ο υπολογισμός του υδατικού ισοζυγίου με την εμπειρική μέθοδο Thornthwaite – Mather χρησιμοποιώντας τις τιμές της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής, όπως αυτές προέκυψαν από τις μεθόδους των Thornthwaite και Hargreaves.

Η μέθοδος εφαρμόστηκε με τη βοήθεια των λογισμικών *Matlab (7.0.1)* και *Water Balance* με στοιχεία εισαγωγής τη διαθέσιμη υδατοϊκανότητα της εδαφικής κατατομής (σε mm), καθώς και τις μηνιαίες τιμές ύψους βροχής (σε mm), επιφανειακής απορροής (%), δυνητικής εξατμισοδιαπνοής (σε mm) και συντελεστές βλάστησης (K_c).

Η επιφανειακή απορροή συνήθως λαμβάνεται σε ποσοστό 10% της βροχόπτωσης, κάτι που στην ουσία υπερεκτιμά το πραγματικό ποσοστό το οποίο ούτως ή άλλως θα ήταν εξαιρετικά δύσκολο να εκτιμηθεί.

Ο συντελεστής φυτοκάλυψης διαφέρει από περιοχή σε περιοχή και ανάλογα με τον εδαφικό τύπο. Για την περιοχή της Μήλου, λήφθηκε μια μέση τιμή του συντελεστή ίση με 0,35.

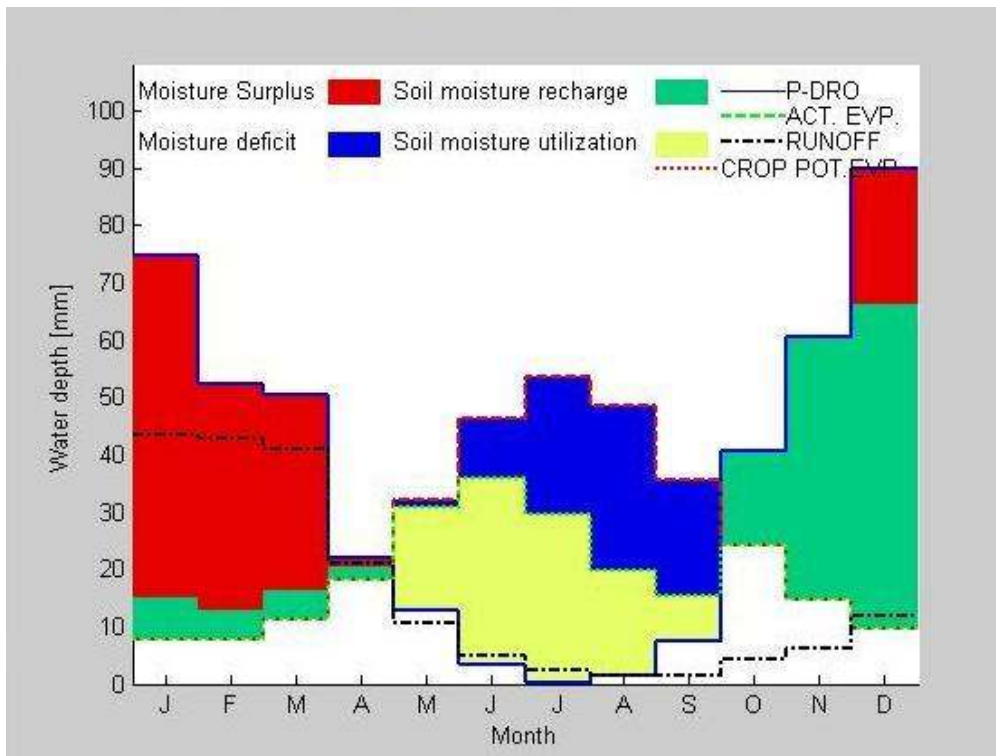
Επιπλέον, λόγω έλλειψης γεωλογικών στοιχείων για τον υδροφορέα, η κατηγορία του εδάφους στο οποίο αναφερόμαστε, είναι άγνωστη με αποτέλεσμα να μην μπορούν να εκτιμηθούν με ακρίβεια οι τιμές της υδατοϊκανότητας (FC) και του σημείου μάρανσης (WP) και για το λόγο αυτό θεωρήθηκε η τιμή $FC=0.6$. Το σημείο μάρανσης αντιστοιχεί σε μια τιμή της τάξης του 50 – 80% της αντίστοιχης υδατοϊκανότητας και για το λόγο αυτό θεωρήθηκε 0.3. Οι τιμές αυτές πολλαπλασιάστηκαν με το βάθος ριζοστρώματος έτσι ώστε να προκύψουν οι τελικές μονάδες σε mm. Το βάθος ριζοστρώματος θεωρήθηκε 150mm.

Με επιπλέον δεδομένα τη μέση μηνιαία βροχόπτωση εξατμισοδιαπνοή όπως προέκυψε από τις μεθόδους των Thornthwaite και Hargreaves, δημιουργούμε ένα αρχείο σε μορφή .txt το οποίο επεξεργάζεται το πρόγραμμα *Water Balance* και με τη βοήθεια του λογισμικού Matlab (7.0.1) καταλήγουμε στην τελική τιμή της κατείδυσης και της σχηματικής απεικόνισης του υδατικού ισοζυγίου.

Δυνητική Εξατμισοδιαπνοή κατά Thornthwaite (mm)	Βροχόπτωση (mm)
21,68	74,81
21,84	52,24
32,13	50,34
51,92	22,09
91,69	12,90
132,33	3,17
152,83	0,33
138,81	1,27
101,35	7,34
69,12	40,56
41,90	60,40
27,23	90,03

Επιφ.Απορροή (mm)	Kc (%)	FC (mm)	WP (mm)
41,6	0,35	90	45

Πίνακας 5.19: Δεδομένα εισαγωγής για τον υπολογισμό του υδατικού ισοζυγίου



Εικόνα 3: Σχηματική αναπαράσταση συνιστωσών υδατικού ισοζυγίου με τη μέθοδο Thornthwaite – Mather με δεδομένα δυνητικής εξατμισοδιαπνοής κατά Thornthwaite

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι από τον Ιανουάριο το έδαφος έχει κορεστεί και έτσι η βροχόπτωση αποτελεί πλέον πλεόνασμα νερού, οπότε ξεκινά η κατείσδυση (τροφοδοσία του υδροφορέα), η οποία συνεχίζεται και τον Απρίλιο με μικρές τιμές. Από τον Μάιο μέχρι και τον Σεπτέμβρη υπάρχει έλλειμμα ύδατος, κάτι που ήταν αναμενόμενο μιας και οι βροχοπτώσεις αυτή την περίοδο είναι είτε πολύ αραιές είτε ανύπαρκτες, με αποτέλεσμα η εξατμισοδιαπνοή και οι αυξημένες αντλήσεις να τις υπερκαλύπτουν. Από τα μέσα Σεπτεμβρίου οι βροχοπτώσεις αρχίζουν πάλι να γίνονται πιο έντονες, το έδαφος αρχίζει ξανά να συγκεντρώνει νερό για να ξεκινήσει και πάλι η κατείσδυση τον Δεκέμβριο και να συνεχιστεί έως τον Απρίλιο. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές ορισμένων

παραμέτρων όπως αυτές προέκυψαν μετά τους υπολογισμούς του προγράμματος.

ΜΗΝΑΣ	P	Eto	Aet	Acpwl	Sm	Pr- Petr	Ro	Rot	Dsm	S
ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	74,8	21,7	7,595	0	150	59,70	35,841	43,341	0	59,705
ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	52,2	21,8	7,63	0	150	39,37	37,605	42,805	0	39,37
ΜΑΡΤΙΟΣ	50,3	32,1	11,235	0	150	34,065	35,835	40,835	0	34,065
ΑΠΡΙΛΙΟΣ	22,1	51,9	18,165	0	150	1,735	18,785	20,985	0	1,735
ΜΑΙΟΣ	12,9	91,7	30,756	-20,495	130,84	-20,49	9,3926	10,693	-19,156	0
ΙΟΥΝΙΟΣ	3,2	132,3	35,776	-63,9	97,967	-43,40	4,6963	4,9963	-32,876	0
ΙΟΥΛΙΟΣ	0,3	152,8	29,527	-117,11	68,71	-53,21	2,3481	2,3781	-29,257	0
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	1,3	138,8	19,81	-164,49	50,101	-47,38	1,1741	1,2741	-18,61	0
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	7,3	101,4	15,377	-193,38	41,324	-28,89	0,58703	1,287	-8,7771	0
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	40,6	69,1	24,185	0	53,739	12,41	0,29352	4,2935	12,415	0
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	60,4	41,9	14,665	0	93,474	39,73	0,14676	6,1468	39,735	0
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ	90	27,2	9,52	0	150	80,48	11,977	11,977	56,526	23,954
ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΑ	415,4	882,7	224,24			74,125	158,68	191,01		158,83

Πίνακας 5.20: Εξαγόμενες τιμές παραμέτρων για τον υπολογισμό του υδατικού ισοζυγίου

όπου:

- P , η βροχόπτωση που εισήχθη στο πρόγραμμα,
- Eto , η δυνητική εξατμισοδιαπνοή όπως υπολογίστηκε με τη μέθοδο Thornthwaite,
- Aet , η δυνητική εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας ($Aet = Eto * Kc$),
- $Acpwl$, η αθροιστική δυνητική απώλεια νερού,
- Sm , η εδαφική υγρασία,
- Dsm , μεταβολή της εδαφικής υγρασίας ανά μήνα,
- AE , η πραγματική εξατμισοδιαπνοή,
- $Pr - Petr$, ύψος βροχής μείον δυνητική εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας και επιφανειακή απορροή,
- Ro , απορροή χωρίς την επιφανειακή απορροή,
- Rot , συνολική απορροή και
- S , το πλεόνασμα νερού – κατείσδυση.

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

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

$$RCH (m^3) = 0.15883 m * 7839764 m^2 \Rightarrow$$

$$RCH = 1245189.72 m^3 \text{ περίπου ίση δηλαδή με}$$

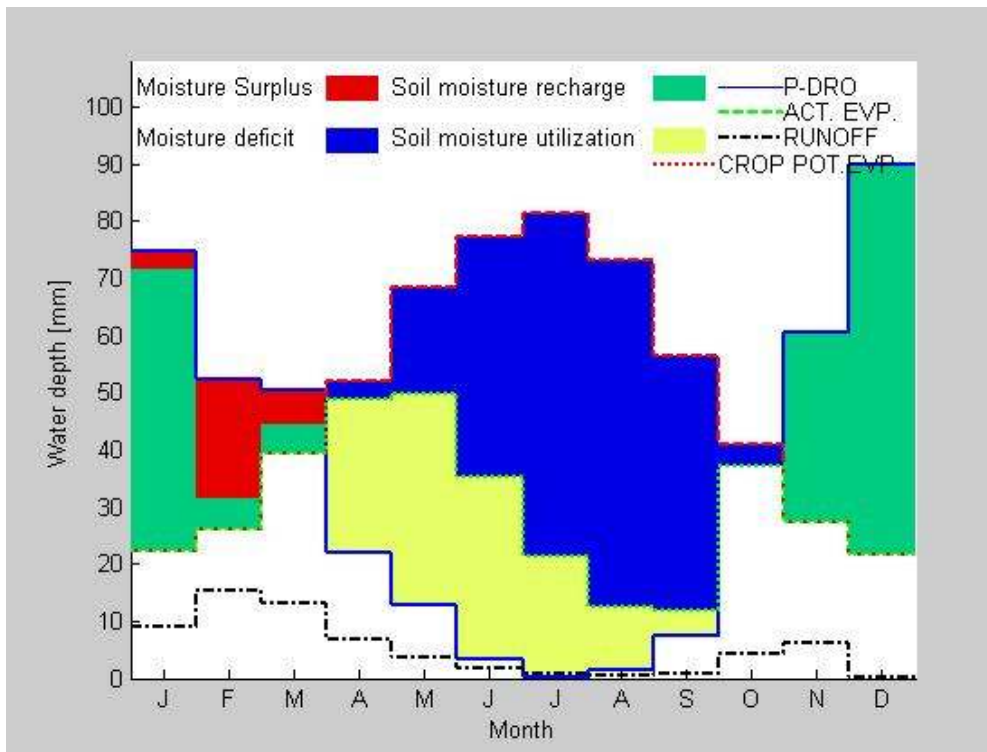
$$RCH = 1,25 * 10^6 m^3/\acute{\epsilon}τος$$

Στη συνέχεια εκτελούμε την ίδια διαδικασία χρησιμοποιώντας ως δεδομένη δυναμική εξατμισοδιαπνοή όπως προέκυψε από τη μέθοδο Hargreaves.

Δυναμική Εξατμισοδιαπνοή κατά Hargreaves (mm)	Βροχόπτωση (mm)
63,87	74,81
74,78	52,24
112,73	50,34
147,96	22,09
195,68	12,90
220,52	3,17
232,13	0,33
209,28	1,27
160,93	7,34
116,8	40,56
77,76	60,40
61,87	90,03

Επιφ.Απορροή (mm)	Kc (%)	FC (mm)	WP (mm)
41,6	0,35	90	45

Πίνακας 5.21: Δεδομένα εισαγωγής για τον υπολογισμό του υδατικού ισοζυγίου



Εικόνα 5.3: Σχηματική αναπαράσταση συνιστωσών υδατικού ισοζυγίου με τη μέθοδο Thornthwaite – Mather με δεδομένα δυνητικής εξατμισοδιαπνοής κατά Hargreaves

Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται η εικόνα του υδατικού ισοζυγίου όπως προκύπτει με τα δεδομένα δυνητικής εξατμισοδιαπνοής κατά Hargreaves. Από τον μήνα Ιανουάριου έως και τα τέλη Μαρτίου υπάρχει πλεόνασμα νερού το οποίο κατεισδύει και τροφοδοτεί τον υδροφόρα. Από τον Απρίλιο έως και τον Οκτώβριο υπάρχει έλλειμμα το οποίο μεγιστοποιείται από τα μέσα Ιουνίου έως τα μέσα Ιουλίου μιας και οι βροχοπτώσεις που πραγματοποιούνται αυτήν την περίοδο είναι πρακτικά μηδενικές. Από τα μέσα Οκτωβρίου ωστόσο, οι βροχοπτώσεις αρχίζουν να γίνονται πιο έντονες παίρνοντας τη μέγιστη τιμή τους μήνες Δεκέμβριο και Ιανουάριο, χρονική περίοδος όπου έχουμε και πάλι πλεόνασμα ύδατος, με τη διαδικασία να επαναλαμβάνεται.

ΜΗΝΑΣ	P	Eto	Aet	Acpwl	Pr - Petr	Ro	Rot	Sm	Dsm	S
ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	74,8	63,9	22,36	0	44,935	1,424	8,924	150	41,77	3,1654
ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	52,2	74,8	26,18	0	20,82	10,152	15,352	150	0	20,82
ΜΑΡΤΙΟΣ	50,3	112,7	39,45	0	5,855	8,218	13,219	150	0	5,855
ΑΠΡΙΛΙΟΣ	22,1	148,0	48,64	-31,9	-31,9	4,520	6,7202	121,26	-28,736	0
ΜΑΙΟΣ	12,9	195,7	49,88	-88,795	-56,895	2,486	3,7861	82,986	-38,278	0
ΙΟΥΝΙΟΣ	3,2	220,5	35,31	-163,07	-74,275	1,367	1,667	50,577	-32,408	0
ΙΟΥΛΙΟΣ	0,3	232,1	21,39	-244,01	-80,935	0,752	0,752	29,487	-21,091	0
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	1,3	209,3	12,45	-316,06	-72,055	0,413	0,513	18,239	-11,247	0
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	7,3	160,9	11,75	-365,77	-49,715	0,227	0,927	13,094	-5,1454	0
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	40,6	116,8	36,97	-370,05	-4,28	0,125	4,125	12,725	-0,36833	0
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	60,4	77,8	27,23	0	27,17	0,068	6,068	39,895	27,17	0
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ	90,0	61,9	21,67	0	68,335	0,037	0,037	108,23	68,335	0
ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΑ	415,4	1674,3	353,26		-202,94	29,794	62,094			29,84

Πίνακας 5.22: Εξαγόμενες τιμές παραμέτρων για τον υπολογισμό του υδατικού ισοζυγίου

Από τον παραπάνω πίνακα φαίνονται και οι διαφορές μεταξύ των δύο μεθόδων. Η μέθοδος Hargreaves δίνει πολύ μεγαλύτερες τιμές της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής, με αποτέλεσμα οι τιμές της κατείδυσης που υπολογίζονται να είναι πολύ μικρότερες από τις αντίστοιχες που προκύπτουν από τη μέθοδο Thornthwaite. Επίσης αξίζει να αναφερθεί πως η ετήσια τιμή της κατείδυσης κατά Thornthwaite κρίνεται υπερβολικά υψηλή σύμφωνα με τα μετεωρολογικά δεδομένα για τη βροχόπτωση στην περιοχή, οπότε τα αποτελέσματα της μεθόδου Hargreaves θα θεωρηθούν εγκυρότερα και πιο κοντά στις πραγματικές τιμές.

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

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

$$RCH (m^3) = 0.02984 m * 7839764 m^2 \Rightarrow$$

$$RCH = 233938,6 m^3 \text{ περίπου ίση δηλαδή με}$$

$$RCH = 0,23 * 10^6 m^3/\text{έτος}$$

Στο επόμενο κεφάλαιο εξετάζεται μια διαφορετική μεθοδολογία εκτίμησης του υδατικού ισοζυγίου με τη χρήση υπολογιστικών μοντέλων, όπου αξιοποιούνται οι υπολογισμοί της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής κατά Penmann – Monteith που περιγράφηκαν στο παρόν κεφάλαιο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6
ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ – ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ CLASS

6. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

6.1 Γενικά

Τα μοντέλα παρέχουν τη δυνατότητα γρήγορης, ακριβούς και ευέλικτης αναπαράστασης και μελέτης ενός φυσικού συστήματος. Είναι χρήσιμα εργαλεία στην έρευνα των υπόγειων νερών γιατί σύμφωνα με το U.S. National Research Council (1990) συμβάλλουν :

- Στη διερεύνηση και μελέτη πιθανών προβλημάτων
- Στο σχεδιασμό επανορθωτικών μέτρων
- Στην αποσαφήνιση και αποκωδικοποίηση των μηχανισμών λειτουργίας
- Στην παροχή πρόσθετων πληροφοριών που βοηθούν στη λήψη αποφάσεων
- Στον εντοπισμό έλλειψης απαραίτητων δεδομένων και συνεπώς στον ορθολογικότερο σχεδιασμό συλλογής τους

Τα μοντέλα υδατικού ισοζυγίου των υπόγειων νερών μπορούν να χρησιμεύσουν στα πλαίσια λήψης αποφάσεων στη διαχείριση των φυσικών πόρων και στοχεύουν στον καθορισμό των ενεργειών εκείνων που θα εξομαλύνουν και θα περιορίσουν το ανησυχητικό πλέον φαινόμενο της συνεχούς ποιοτικής και ποσοτικής υποβάθμισης των υπόγειων υδροφορέων.

6.2 Το μοντέλο CLASS

6.2.1 Γενικά

Το μοντέλο CLASS (Catchment scale multiple-Landuse Atmosphere Soil water and Solute transport model) αναπτύχθηκε από το Τμήμα Υποδομής, Σχεδιασμού και Φυσικών Πηγών (Department of Infrastructure, Planning and Natural Resources) της Νέας Νότιας Ουαλίας (DIPNR), σε συνεργασία με το

ερευνητικό κέντρο περί Υδρολογίας Λεκανών (Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology (CRCCH)) της Αυστραλίας. Αποτελείται από μια σειρά από εργαλεία που συνιστούν τη βάση για τον μεμονωμένο υπολογισμό των συνιστωσών του εκάστοτε υδρολογικού φαινομένου που εξετάζουν.

Η χρησιμότητα του συγκεκριμένου μοντέλου έγκειται κυρίως στις δυνατότητες που παρέχει στην πρόβλεψη των αποτελεσμάτων της εδαφικής χρήσης τόσο σε λοφοπλαγιές ή σε όρια αγρών, όσο και σε υδρολογικές λεκάνες (land-use effects). Πιο συγκεκριμένα για τις υδρολογικές λεκάνες, τομέας που απασχολεί την παρούσα διπλωματική εργασία, υπάρχει η δυνατότητα της ανάλυσης των επιδράσεων των διαφόρων κλιματολογικών σεναρίων που προβλέπονται από στοχαστικά κλιματολογικά μοντέλα, όπως επίσης και οι επιδράσεις των χωροχρονικών μεταβολών κλίματος στα όρια της λεκάνης.

Το μοντέλο *CLASS* περιλαμβάνει επτά εργαλεία που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάπτυξη μοντέλων υδατικού ισοζυγίου, ισοζυγίου φερτών υλών και ανάπτυξης της βλάστησης, μοντέλων αναγλύφου εδάφους, κατείσδυσης, εκφόρτισης, πλευρικής ροής και ροής χειμάρρων. Για τον υπολογισμό των συνιστωσών του υδατικού ισοζυγίου του υδροφορέα της νήσου Μήλου, χρησιμοποιήθηκε ένα εξ' αυτών, το *CLASS Unsaturated Moisture Movement Model U3M-1D*.

5.2.2 Το εργαλείο *CLASS Unsaturated Moisture Movement Model U3M-1D*

Το εργαλείο *CLASS Unsaturated Moisture Movement Model U3M-1D* χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των συνιστωσών του υδατικού ισοζυγίου. Βασίζεται στην εφαρμογή της εξίσωσης *Richards*, η οποία εφαρμόζεται στην *ακόρεστη* ζώνη για οποιονδήποτε συνδυασμό κλιματικών συνθηκών, εδαφικής χρήσης και εδαφολογικού τύπου.

Η εξίσωση *Richards* περιγράφεται μαθηματικά από την διαφορική εξίσωση

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right]$$

όπου:

- K η υδραυλική αγωγιμότητα
- ψ το ύψος πίεσης, που λαμβάνει αρνητικές τιμές για την ακόρεστη ροή,
- z το υψόμετρο σε ένα κατακόρυφο σύστημα αναφοράς
- θ η ποσότητα νερού και
- t ο χρόνος

Το εργαλείο *CLASS Unsaturated Moisture Movement Model U3M-1D* χρησιμοποιεί ημερήσιο χρονικό βήμα το οποίο προσαρμόζεται ανάλογα για να ανιχνεύει την παροδική φύση των κλιματικών συνθηκών, ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες. Κατά την εκτίμηση του υδατικού ισοζυγίου, το μοντέλο προσομοιώνει τις διάφορες διακυμάνσεις που παρουσιάζουν οι διάφορες συνιστώσες του, έτσι ώστε τα σφάλματα κατά την εκτίμηση αυτή, να ποσοτικοποιούνται και να περιγράφονται με απλές αριθμητικές προσεγγίσεις.

Για την εφαρμογή του μοντέλου φυσικά, χρειάζονται κάποια δεδομένα εισόδου, καθώς και ο καθορισμός κάποιων παραμέτρων που έχουν να κάνουν με τον προσδιορισμό του εδαφικού προφίλ, των κλιματικών δεδομένων, των υδραυλικών ιδιοτήτων καθώς και παραμέτρους συνδεδεμένες με την κατανομή του ριζοστρώματος και την εδαφική εξάτμιση. Τα δεδομένα εισόδου αποτελούνται από ημερήσια δεδομένα για τη βροχόπτωση και τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή, τα οποία καταχωρούνται βάση της αντίστοιχης ημερομηνίας καταγραφής τους και εισάγονται στο πρόγραμμα μέσω ενός αρχείου τύπου .csv. Οι ακριβείς παράμετροι που απαιτούνται και τα δεδομένα εξόδου που παίρνουμε, περιγράφονται αναλυτικά μέσα από την εφαρμογή στον υδροφορέα που εξετάζεται και παρουσιάζεται στη συνέχεια.

6.3 Εφαρμογή του CLASS U3M-1D

6.3.1 Στάδια της εφαρμογής

Κατά την εκτέλεση του προγράμματος CLASS U3M-1D για τη δημιουργία του μονοδιάστατου μοντέλου της κατείσδυσης για τον υδροφορέα της Μήλου ακολουθήθηκαν τα εξής στάδια:

- Επεξεργασία δεδομένων εισόδου
- Εισαγωγή του αρχείου εισόδου στο πρόγραμμα
- Συμπλήρωση παραμέτρων αρχείων προγράμματος
- Εκτέλεση του προγράμματος
- Επισκόπηση αποτελεσμάτων

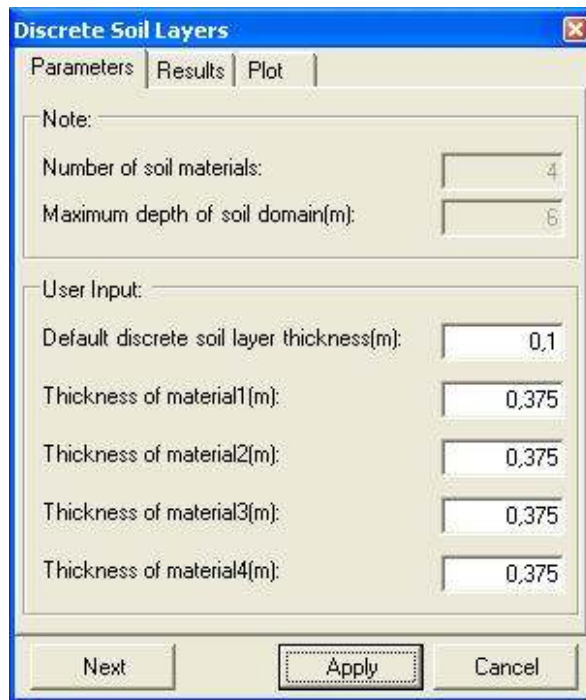
Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο ως δεδομένα εισόδου χρησιμοποιούνται οι ημερήσιες τιμές της βροχόπτωσης και της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής βάση της ημερομηνίας που καταγράφονται. Στο προηγούμενο κεφάλαιο ο υπολογισμός της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής πραγματοποιήθηκε με την εφαρμογή τεσσάρων διαφορετικών μεθόδων. Γενικά, η μέθοδος Penmann – Monteith θεωρείται η πιο αξιόπιστη και για το λόγο αυτό προτιμήθηκε η χρησιμοποίηση των εξαγόμενων αποτελεσμάτων για την δυνητική εξατμισοδιαπνοή, όπως αυτά προέκυψαν από την εφαρμογή της μεθόδου. Τα δεδομένα αυτά καταχωρήθηκαν βάση της ημερομηνίας τους σε ένα τροποποιημένο αρχείο .xls (αρχείο τύπου .csv) μαζί με τα αντίστοιχα ημερήσια δεδομένα της βροχόπτωσης, τα οποία έχουν παραχωρηθεί από την Ε.Μ.Υ. Η χρονοσειρά των δεδομένων αφορά τα τελευταία 30 έτη των διαθέσιμων στοιχείων (1973 – 2003), καθώς παρά τη διάθεση δεδομένων για τη βροχόπτωση και για παλαιότερα έτη, παρουσιάστηκε έλλειψη δεδομένων για τον ακριβή υπολογισμό της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής.

6.3.2 Καθορισμός παραμέτρων

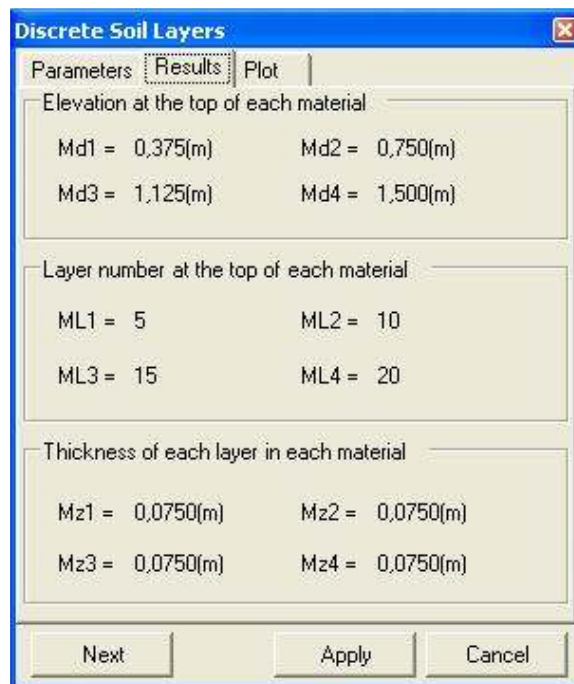
6.3.2.1 Παράμετροι για τη διάκριση του εδαφικού προφίλ

Κατ' αρχήν ορίζεται το πάχος του υδροφόρου, η τιμή του οποίου επιλέχθηκε να είναι ίση με 1,5 m. Ο υδροφορέας καλύπτεται από διάφορες στρώσεις εδαφικών υλικών. Βάση του προγράμματος, ο μέγιστος αριθμός εδαφικών στρώσεων που μπορεί να εισαχθεί είναι τέσσερις. Βέβαια με βάση τα υπάρχοντα δεδομένα είναι αδύνατος ο σαφής προσδιορισμός των εδαφικών στρώσεων και για το λόγο αυτό επιλέχθηκαν τέσσερις στρώσεις υλικών, όσες αναφέρονται ως προεπιλογή στο πρόγραμμα. Οι στρώσεις των εδαφικών υλικών επιλέχθηκαν να είναι ισοπαχής και ίσες με 0,375m. Το πάχος του υδροφόρου χωρίζεται σε επιμέρους τμήματα (layers), τα οποία βάση της προεπιλογής του προγράμματος θεωρούνται με πάχος 0,10m έκαστο.

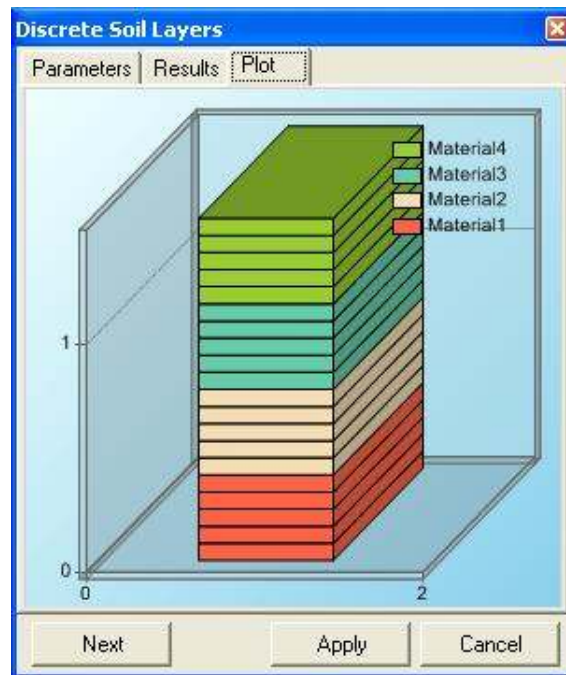
Ο λόγος για τον οποίο γίνεται ο διαχωρισμός των εδαφικών στρώσεων σε layers, είναι για να μπορέσει να επιλυθεί εξίσωση Richards. Λόγω της μη γραμμικότητάς της η εξίσωση Richards επιλύεται με τη χρήση προσεγγιστικών αριθμητικών μεθόδων. Τέτοια αριθμητική μέθοδος είναι και αυτή των πεπερασμένων διαφορών. Στόχος της μεθόδου είναι να μετατραπεί η διαφορική εξίσωση, σε εξίσωση διαφορών, δηλαδή σε αλγεβρική, πράγμα που επιτυγχάνεται με την προσέγγιση των μερικών παραγώγων με όρους διαφορών. (Λατινόπουλος 1995). Για να υλοποιηθεί η αριθμητική διακριτοποίηση της διαφορικής εξίσωσης, πρέπει να γίνει πρώτα η διακριτοποίηση του πεδίου ροής. Για το λόγο αυτό, οι εδαφικές στρώσεις του υδροφορέα, χωρίζονται σε layers και επομένως το μοντέλο χωρίζεται σε πεπερασμένα στοιχεία.



Εικόνα 6.1: Διακριτοποίηση εδαφικών στρώσεων του υδροφορέα



Εικόνα 6.2: Αποτελέσματα διακριτοποίησης εδαφικών στρώσεων υδροφορέα



Εικόνα 6.3: Σχηματική αναπαράσταση της διακριτοποίησης των εδαφικών στρώσεων του υδροφορέα

6.3.2.2 Κλιματικά δεδομένα και δεδομένα εδαφικής χρήσης

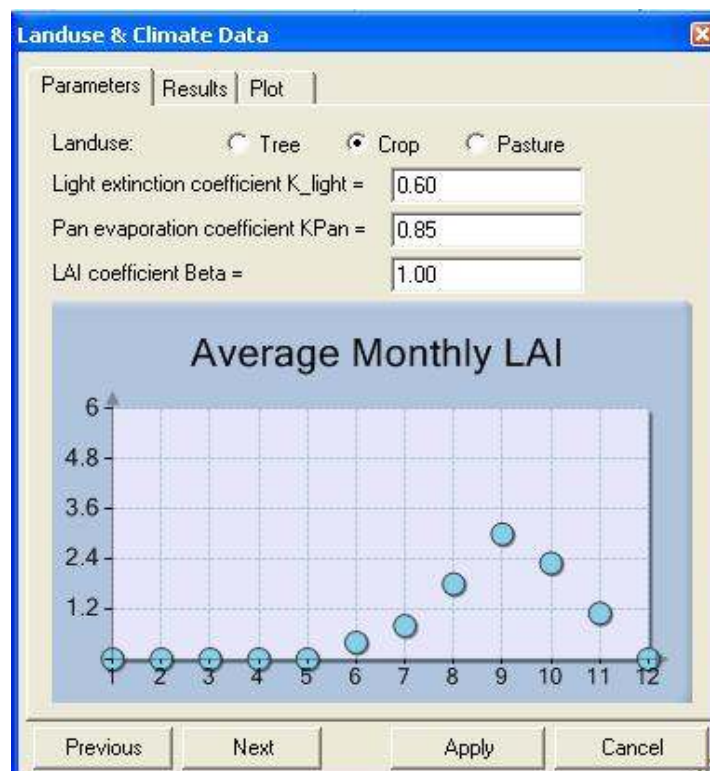
Η εδαφική χρήση ορίζεται από το πρόγραμμα με τρεις προεπιλογές, που αφορούν περιοχές στις οποίες φύονται δέντρα (*Tree*), περιοχές με καλλιέργειες (*Crop*) και περιοχές με βοσκότοπους (*Pasture*). Στην περιοχή που εξετάζουμε χαρακτηριστική είναι η απουσία δέντρων επομένως η επιλογή *Tree* δεν θα μπορούσε να είναι αποδεκτή. Στην ουσία στη Μήλο υπάρχουν λίγες καλλιέργειες και ελάχιστοι βοσκότοποι, οπότε θα μπορούσε να επιλεγεί οποιαδήποτε από τις άλλες δύο επιλογές. Για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας η εδαφική χρήση επιλέχθηκε ως *crop*.

Εφόσον οριστεί η εδαφική χρήση, το πρόγραμμα μας δίνει τους μέσους μηνιαίους συντελεστές του δείκτη επιφάνειας φυλλώματος (*Leaf Area Index – LAI*), που ορίζεται ως η συνολική επιφάνεια που καταλαμβάνουν τα φύλλα μιας καλλιέργειας προς το συνολικό εμβαδό της επιφάνειας του εδάφους που καλύπτεται από την καλλιέργεια αυτή.

Ο συντελεστής *Light extinction coefficient* (K_{light}) είναι αδιάστατος και μειώνει την ποσότητα του φωτός που μεταδίδεται μέσα από την καλλιέργεια προς το έδαφος, μέσω αντανάκλασης από την επιφάνεια του ενός φύλλου στο άλλο. Στην ουσία είναι ο συντελεστής που χρησιμοποιείται για το διαχωρισμό της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής, σε δυνητική διαπνοή από τα φυτά και δυνητική εξάτμιση από το έδαφος.

Ο συντελεστής *Pan evaporation coefficient* (K_{pan}) είναι εκείνος που μετατρέπει την εξατμισοδιαπνοή από εξατμισίμετρα σε δυνητική εξατμισοδιαπνοή.

Τέλος ο συντελεστής *LAI coefficient Beta*: που βοηθά στο να προσαρμοστεί ο μέσος μηνιαίος δείκτης επιφάνειας φυλλώματος όσο καλύτερα γίνεται σύμφωνα με τις μηνιαίες βροχοπτώσεις, για τη δεδομένη περίοδο προσομοίωσης.



Εικόνα 6.4: Ορισμός παραμέτρων κλίματος και εδαφικής χρήσης – Μέσος μηνιαίος δείκτης επιφάνειας φυλλώματος

6.3.2.3 Υδραυλικές ιδιότητες εδάφους

Οι παράμετροι για τον ορισμό των υδραυλικών ιδιοτήτων του εδάφους ορίζονται ως προεπιλογή από το πρόγραμμα, εφόσον τα στοιχεία που είχαμε στη διάθεσή μας ήταν ανεπαρκή. Ακόμα λόγω έλλειψης στοιχείων από εδαφολογική μελέτη που θα καθόριζε τη σύσταση του εδάφους και κατ' επέκταση των ακριβή χαρακτηρισμό του, επιλέχθηκε να γίνουν δοκιμές με διαφορετικού τύπου εδαφικής σύστασης. Βάση των διαθέσιμων δεδομένων, θεωρήθηκε πιθανή η εδαφική σύσταση από άργιλο και ιλή. Για το λόγο αυτό εξετάστηκαν οι αντίστοιχες κατηγορίες αργιλοιλυώδους εδάφους Silty Clay Loam, Sandy Clay Loam, καθώς και οι κατηγορίες Silty Loam, Sandy Loam που αντιστοιχούν σε λασπώδες ή αμμώδες έδαφος. Βάση του εδαφικού τύπου που επιλέγεται σε κάθε περίπτωση, το πρόγραμμα παρέχει τιμές των προσδιορισμένων παραμέτρων.

Στο παράθυρο του προγράμματος, δίνεται η δυνατότητα επιλογής ενός υδραυλικού μοντέλου. Τα μοντέλα αυτά χρησιμοποιούν εξισώσεις οι οποίες απλοποιούν την εξίσωση Richards, την γραμμικοποιούν στην ουσία, και καταλήγουν στην επίλυσή της. Δίνεται επομένως η δυνατότητα επιλογής μεταξύ των μοντέλων Van Genuchten (1980), Vogel and Cislerova (1988) και Brooks and Corey (1966). Το πιο διαδεδομένο από αυτά τα μοντέλα είναι εκείνο του Van Genuchten, το οποίο επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί σε αυτήν την εφαρμογή. Η μαθηματική έκφραση του μοντέλου αυτού, περιγράφεται από την εξίσωση

$$K_r = S_e^{(l_p)} [1 - (1 - S_e^{1/n})]^2$$

όπου

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{n - \theta_r} = \frac{S_w - S_{wr}}{1 - S_{wr}}$$

και

$$S_w = \frac{\theta}{\theta_s}$$

ή

$$S_w = S_{wr} + (1 - S_{wr}) [1 + |\alpha \psi|^\beta]^{-\nu}, \text{ για } \psi < 0$$

Για το μοντέλο του van Genuchten και το εδαφικό υλικό που εξετάζουμε πρέπει να καθορίσουμε στο πρόγραμμα τις παραμέτρους: θ_r , θ_s , α , n , K_r και I_p , οι οποίες στο περιβάλλον του προγράμματος αναφέρονται ως: *thetaR*, *thetaS*, *alpha*, *n*, *Ksat* και *I*, όπου:

- θ_r : το παραμένον εδαφικό νερό
- θ_s : το κορεσμένο εδαφικό νερό
- α , n : παράμετροι του μοντέλου, με $n = 1 - 1/\beta$
- K_r : σχετική υδραυλική αγωγιμότητα (σε κορεσμό)
- I_p : παράμετρος για τη στατιστική διανομή του νερού (σε επίπεδο πόρου)
- S_e : πραγματικός κορεσμός
- S_w : βαθμός κορεσμού (για την κορεσμένη ροή ισχύει ότι $S_w = S_{wr}$)

Material	thetaR	thetaS	alpha(1/cm)	n	Ksat(cm/day)
1	0.067	0.45	0.02	1.41	10.8
2	0.067	0.45	0.02	1.41	10.8
3	0.067	0.45	0.02	1.41	10.8
4	0.067	0.45	0.02	1.41	10.8

Εικόνα 6.5: Καθορισμός υδραυλικών ιδιοτήτων του εδάφους

6.3.2.4 Παράμετροι συνδεδεμένοι με το χρονικό βήμα

Ορίζεται ως προεπιλογή από το πρόγραμμα χρονικό βήμα μιας ώρας (3600 sec). Εδώ δίνεται η δυνατότητα αλλαγής του χρονικού βήματος, χωρίς ωστόσο αυτό να αποδεικνύεται πρακτικά χρήσιμο, αφού μια μικρότερη τιμή χρονικού βήματος θα αυξήσει το χρόνο προσομοίωσης, χωρίς να διαφοροποιούνται σημαντικά τα αποτελέσματα. Εξ' άλλου μεγαλύτερο χρονικό βήμα, θα μειώσει το χρόνο προσομοίωσης, με αρκετή πιθανότητα αλλοίωσης των αποτελεσμάτων. Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης το χρονικό βήμα αυξάνεται κατά 30%, αφού έχει επιλεγθεί ένας πολλαπλασιαστής που λαμβάνει την τιμή 1,3 (ορίζεται και αυτός ως προεπιλογή από το πρόγραμμα).

Στη συνέχεια καθορίζονται οι παράμετροι που αφορούν:

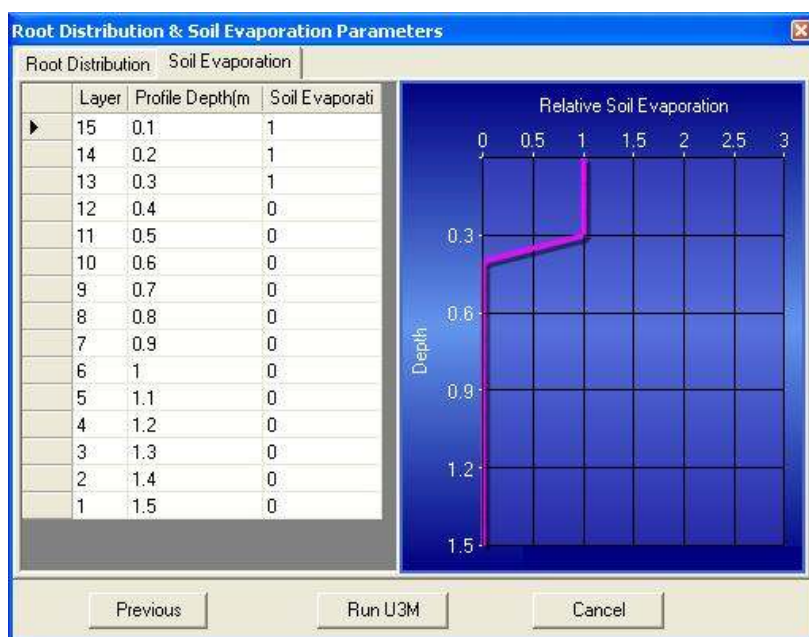
- τον υπολογισμό της υγρασίας, για την οποία η καλλιέργεια αντιμετωπίζει έλλειψη νερού,
- την προσομοίωση της ικανότητας της καλλιέργειας να αντιμετωπίσει το πρόβλημα της έλλειψης νερού σε όλο το βάθος του ριζοστρώματος,
- τον ορισμό της αρχικής ποσότητας εδαφικής υγρασίας για το εδαφικό υλικό που εξετάζουμε και
- το χρονικό βήμα μιας συγκεκριμένης μέρας που βρίσκεται σε αντιστοιχία με τη ζώνη βροχόπτωσης

Parameter	Value
Vertical water balance time step (sec)	3600
Time step multiplier	1,3
Moisture stress threshold multiplier	0,5
Transpiration compensation parameter	0
Parameter for initial soil moisture content (materials 1, 2, 3 and 4)	6084, 6244, 6307, 6812
Rainfall bands (mm/day)	5, 10, 20, 40, 5000
Time step bands (sec)	3600, 2400, 1200, 600, 300

Εικόνα 6.6: Καθορισμός παραμέτρων χρονικού βήματος

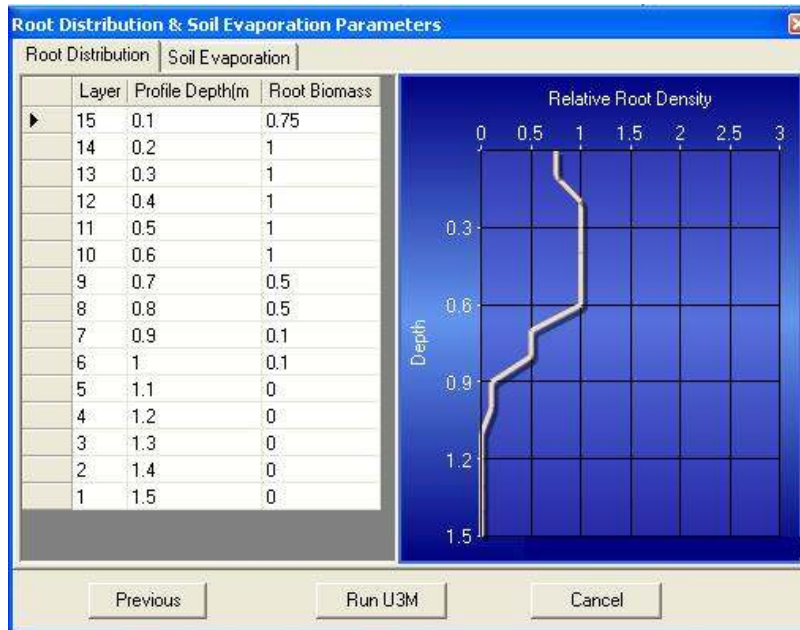
6.3.2.5 Παράμετροι συνδεδεμένοι με την κατανομή του ριζοστρώματος και την εδαφική εξάτμιση

Η τελευταία κατηγορία παραμέτρων που καθορίζονται πριν την έναρξη της προσομοίωσης αφορούν την κατανομή του ριζοστρώματος και της εδαφικής εξάτμισης. Εδώ καθορίζεται η πυκνότητα των ριζών (*Root Biomass*) σε κάθε εδαφική στρώση (*Layer*), όπως αυτές προκαθορίστηκαν στα αρχικά βήματα εισαγωγής των παραμέτρων.



Εικόνα 6.7: Κατανομή ριζοστρώματος και πυκνότητας ριζών

Επιπλέον εισάγονται οι παράμετροι που αφορούν την εδαφική εξάτμιση για τα αντίστοιχα *layers*.



Εικόνα 6.8: Εδαφική εξάτμιση κατ' αντιστοιχία με τις εδαφικές στρώσεις

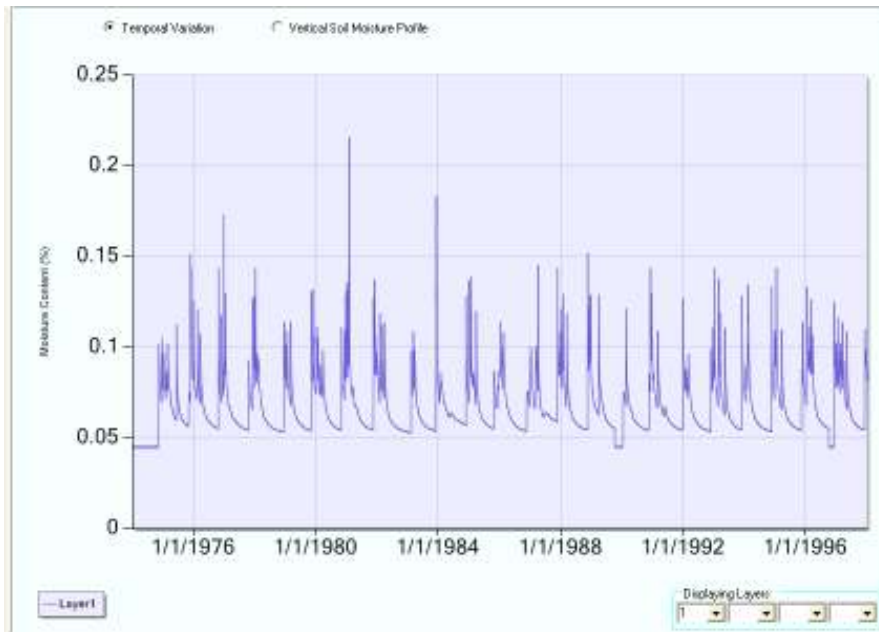
Στο σημείο αυτό έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία καθορισμού των απαιτούμενων παραμέτρων. Το επόμενο βήμα είναι η έναρξη της προσομοίωσης και η εξαγωγή των αποτελεσμάτων.

6.3.3 Εκτέλεση προγράμματος – Αποτελέσματα

Αφού εκτελεστεί η εντολή *Run U3M* που εμφανίζεται στο τελευταίο παράθυρο του προγράμματος, ξεκινά η προσομοίωση. Μετά το πέρας αυτής, έχουν γίνει οι απαραίτητοι υπολογισμοί και έχουν εξαχθεί τα διάφορα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο γραφικό περιβάλλον του προγράμματος. Έτσι έχουν υπολογιστεί διάφορες παράμετροι όπως η συνολική εδαφική υγρασία και η περίσσεια αυτής, έχει γίνει ο διαχωρισμός της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής σε δυνητική διαπνοή και εξάτμιση, των φυτών και του εδάφους αντίστοιχα, καθώς επίσης έχουν υπολογιστεί και οι τιμές της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής. Ωστόσο η σημαντικότερη παράμετρος που υπολογίζεται είναι η κατείδυση και με βάση αυτή ολοκληρώνεται η εκτίμηση του υδατικού ισοζυγίου για τον υδροφόρα που εξετάζεται. Παρακάτω σχολιάζονται επιγραμματικά κάποια από τα εξαγόμενα αποτελέσματα.

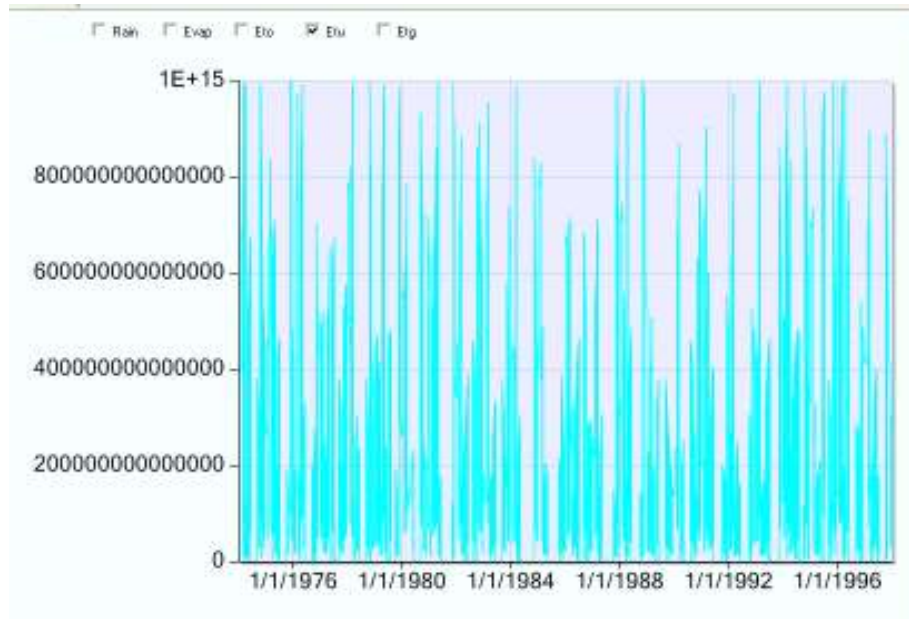
Παρατηρώντας το διάγραμμα της εδαφικής υγρασίας βλέπουμε πως το πρώτο στρώμα έχει τις ίδιες περίπου διακυμάνσεις σε όλα τα έτη, με μόνη

αξιόλογη αλλαγή το διάστημα μεταξύ 1980 και 1984, όπου παρατηρούνται οι υψηλότερες τιμές και τα έτη 1990 και 1996, όπου παρατηρούνται οι χαμηλότερες τιμές της. Εδώ πρέπει να σημειώσουμε ότι η εδαφική υγρασία αυτή αναφέρεται στην τελευταία στρώση του υδροφορέα, δηλαδή στο κατώτερο τμήμα του και την παραθέτουμε ενδεικτικά, καθώς είναι ανώφελο να παρουσιαστεί σχετικό διάγραμμα για κάθε ένα από τα 15 εδαφικά επίπεδα.

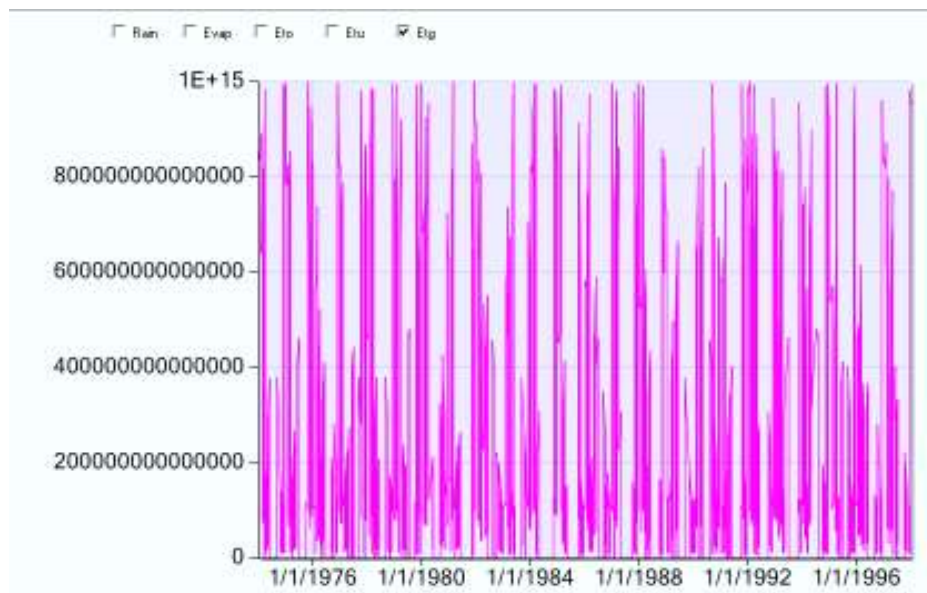


Εικόνα 6.9: Χρονική μεταβολή της εδαφικής υγρασίας (σε mm) για το πρώτο εδαφικό επίπεδο

Η δυνητική εξατμισοδιαπνοή διαχωρίζεται από το πρόγραμμα όπως αναφέρθηκε σε δυνητική εξάτμιση του εδάφους και δυνητική διαπνοή από τα φυτά όπως παρουσιάζεται στα παρακάτω διαγράμματα



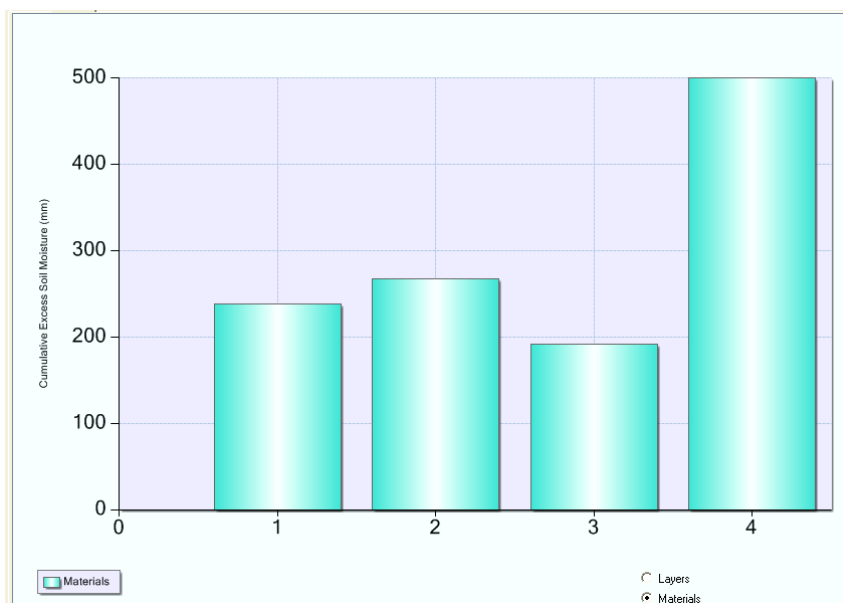
Εικόνα 6.10: Διάγραμμα δυναμικής διαπνοής (Etu) σε mm



Εικόνα 6.11: Διάγραμμα δυναμικής εξάτμισης (Etg) σε mm

Στο επόμενο διάγραμμα παρουσιάζεται η περίσσεια της εδαφικής υγρασίας. Αξίζει να σημειωθεί πως όταν η διαθέσιμη εδαφική υγρασία σε μία στρώση ή σε ένα υλικό είναι μεγαλύτερη από το κορεσμένο περιεχόμενο εδαφικής υγρασίας, τότε η περίσσεια εδαφικής υγρασίας υπολογίζεται ως η διαφορά μεταξύ του διαθέσιμου και του κορεσμένου περιεχομένου εδαφικής υγρασίας. Η μεγαλύτερη τιμή περίσσειας εδαφικής υγρασίας σύμφωνα με το διάγραμμα

παρατηρείται στις επιφανειακές εδαφικές στρώσεις, όπως άλλωστε ήταν αναμενόμενο.

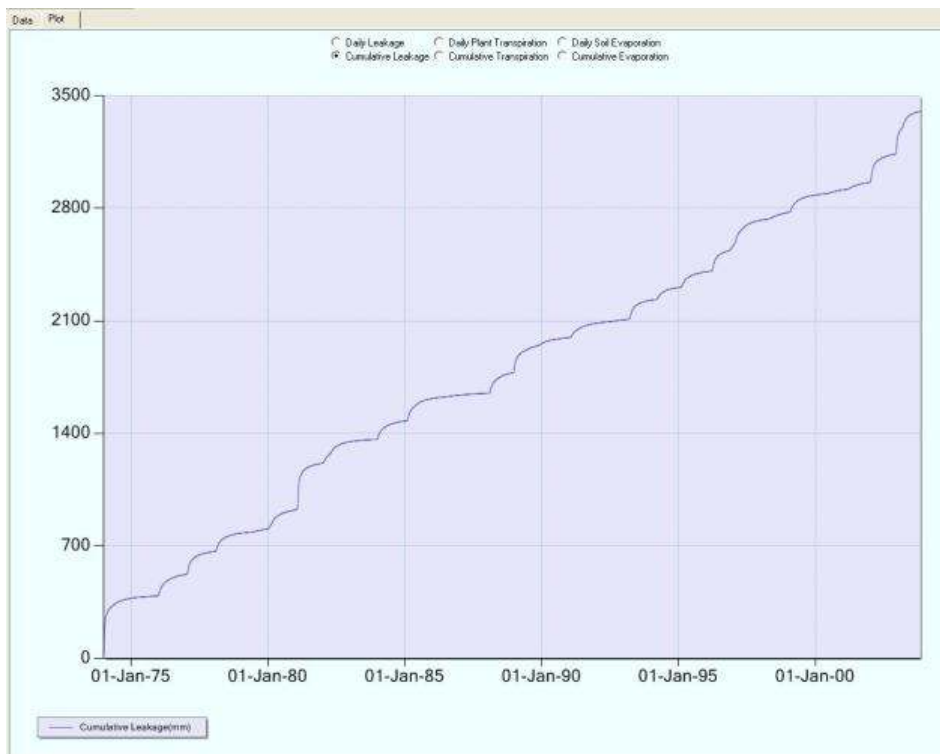


Εικόνα 6.12: Περίσσεια εδαφικής υγρασίας (σε mm) ανά εδαφική στρώση

Όπως αναφέρθηκε η κυριότερη υπολογισμένη παράμετρος είναι η κατείσδυση. Λόγω της έλλειψης δεδομένων για την εδαφολογική σύσταση, εφαρμόστηκαν τέσσερις διαφορετικοί τύποι εδάφους, οι οποίοι ανάλογα με τη διαπερατότητά τους δίνουν και διαφορετικά αποτελέσματα κατείσδυσης. Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται η αθροιστική κατείσδυση για τους διαφορετικούς εδαφικούς τύπους. Όπως είναι αναμενόμενο στα διαγράμματα αυτά πιστοποιείται το γεγονός πως τα αμμώδη εδάφη είναι σαφώς πιο διαπερατά από τα αργιλοϊλυώδη, με αποτέλεσμα να επιτρέπουν πολύ μεγαλύτερες ποσότητες νερού να κατεισδύουν στο έδαφος.



Διάγραμμα 1: Αθροιστική κατείδυση για εδαφικό τύπο Sandy Clay Loam



Διάγραμμα 2: Αθροιστική κατείδυση για εδαφικό τύπο Sandy Loam



Διάγραμμα 3: Αθροιστική κατείδωση για εδαφικό τύπο Silty Clay Loam



Διάγραμμα 4: Αθροιστική κατείδωση για εδαφικό τύπο Silty Loam

ΕΤΟΣ	ΚΑΤΕΙΣΔΥΣΗ
1974	161,65
1975	16,22
1976	72,30
1977	93,82
1978	78,21
1979	15,71
1980	60,45
1981	242,98
1982	85,60
1983	16,81
1984	60,45
1985	91,81
1986	18,17
1987	7,57
1988	51,71
1989	123,90
1990	18,43
1991	29,42
1992	15,11
1993	42,63
1994	36,34
1995	50,18
1996	88,15
1997	145,55
1998	19,15
1999	53,51
2000	16,31
2001	10,41
2002	179,90
2003	224,24
ΜΕΣΗ ΥΠΕΡΕΤΗΣΙΑ	70,89

**Πίνακας 6.1: Ετήσια κατείδυση για
τύπο εδάφους sandy clay loam σε (mm)**

ΕΤΟΣ	ΚΑΤΕΙΣΔΥΣΗ
1974	375,94
1975	18,63
1976	130,34
1977	140,21
1978	115,02
1979	26,67
1980	117,83
1981	291,48
1982	133,50
1983	15,39
1984	113,22
1985	139,84
1986	20,92
1987	11,93
1988	151,99
1989	156,21
1990	37,72
1991	89,33
1992	21,10
1993	122,11
1994	78,54
1995	98,23
1996	162,90
1997	157,53
1998	48,35
1999	108,59
2000	32,18
2001	46,94
2002	272,58
2003	230,13
ΜΕΣΗ ΥΠΕΡΕΤΗΣΙΑ	115,51

**Πίνακας 6.2: Ετήσια κατείδυση για
τύπο εδάφους sandy loam σε (mm)**

ΕΤΟΣ	ΚΑΤΕΙΣΔΥΣΗ
1974	114,99
1975	17,44
1976	30,78
1977	51,80
1978	45,92
1979	16,17
1980	18,33
1981	197,26
1982	53,10
1983	17,77
1984	21,78
1985	51,22
1986	18,86
1987	7,58
1988	12,44
1989	73,37
1990	15,35
1991	8,21
1992	7,76
1993	6,24
1994	7,94
1995	9,47
1996	30,20
1997	98,55
1998	19,64
1999	16,48
2000	12,92
2001	6,64
2002	68,07
2003	231,93
ΜΕΣΗ ΥΠΕΡΕΤΗΣΙΑ	42,94

Πίνακας 6.3: : Ετήσια κατείδυση για τύπο εδάφους silty clay loam σε (mm)

ΕΤΟΣ	ΚΑΤΕΙΣΔΥΣΗ
1974	76,85
1975	17,01
1976	17,06
1977	25,35
1978	25,28
1979	13,35
1980	10,48
1981	134,76
1982	41,03
1983	16,26
1984	14,02
1985	24,46
1986	15,20
1987	6,92
1988	6,69
1989	26,67
1990	13,08
1991	6,86
1992	5,84
1993	4,52
1994	4,49
1995	4,27
1996	6,96
1997	37,46
1998	18,23
1999	12,19
2000	9,69
2001	5,58
2002	17,86
2003	188,99
ΜΕΣΗ ΥΠΕΡΕΤΗΣΙΑ	26,91

Πίνακας 6.4: Ετήσια κατείδυση για τύπο εδάφους silty loam σε (mm)

Στους παραπάνω πίνακες βλέπουμε τις ετήσιες και μέσες υπερετήσιες τιμές της κατείδυσης, όπως υπολογίστηκε μέσω του προγράμματος CLASS U3M - 1D για τέσσερις διαφορετικούς εδαφικούς τύπους. Ωστόσο οι τιμές αυτές είναι πιθανό να αποκλίνουν από τις πραγματικές, διότι δεν υπήρχαν ακριβή στοιχεία για τις παραμέτρους που ζητάει το πρόγραμμα σε κάθε βήμα με αποτέλεσμα στις περισσότερες από αυτές να δεχθούμε εκείνες τις τιμές που ορίζει το πρόγραμμα ως προεπιλογή. Επιπλέον, οι τιμές της δυναμικής εξατμισοδιαπνοής έχουν προκύψει με υπολογιστικές μεθόδους και μπορεί να διαφέρουν από εκείνες που θα είχαν μετρηθεί με τη βοήθεια εξατμισόμετρου.

Η τιμή της κατεΐσδυσης για τους περισσότερους τύπους εδαφών συνήθως μεταφράζεται σε ένα ποσοστό της τάξης του 10% της ετήσιας βροχόπτωσης ως μέγιστη τιμή. Σε ηφαιστειακά εδάφη το ποσοστό αυτό συνήθως δεν υπερβαίνει το 8%. Με βάση τα μετεωρολογικά δεδομένα που παρουσιάσθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, η μέση ετήσια τιμή της βροχόπτωσης για τη νήσο Μήλο βρέθηκε 416,4mm. Αυτό σημαίνει πως θεωρητικά η κατεΐσδυση θα πρέπει να κυμαίνεται περίπου στα 35 με 40mm ετησίως. Κοντά σε αυτήν την τιμή της κατεΐσδυσης βρίσκεται, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του CLASS U3M-1D, ο εδαφικός τύπος Silty Clay Loam, ο οποίος θα θεωρηθεί και ως επικρατέστερος.

Η κατεΐσδυση για την έκταση (E) του υδροφορέα που εξετάζουμε για αντίστοιχο έδαφος silty clay loam θα είναι λοιπόν ίση με:

$$\begin{aligned}
 RCH (m^3) &= RCH (m) * E (m^2) \Rightarrow \\
 RCH (m^3) &= 0,0429 m * 7839986 m^2 \Rightarrow \\
 RCH &= 336649m^3/έτος \approx 0,34*10^6 m^3/έτος
 \end{aligned}$$

Οι αντίστοιχες τιμές για τους υπόλοιπους τύπους εδαφών είναι:

- **$RCH = 555776,6m^3/έτος \approx 0,56*10^6 m^3/έτος$** για εδαφικό τύπο sandy clay loam
- **$RCH = 905596.8m^3/έτος \approx 0,91*10^6 m^3/έτος$** για εδαφικό τύπο sandy loam και
- **$RCH = 210974m^3/έτος \approx 0,21*10^6 m^3/έτος$** για εδαφικό τύπο silty loam

Τέλος στους παρακάτω πίνακες εμφανίζονται οι ετήσιες τιμές για την πραγματική εξατμισοδιαπνοή ΑΕ, για τους διαφορετικούς τύπους εδαφών.

ΕΤΟΣ	ΑΕ
1974	366,7
1975	381,0
1976	417,7
1977	299,7
1978	389,9
1979	312,0
1980	387,4
1981	307,8
1982	374,1
1983	287,5
1984	312,1
1985	391,6
1986	318,5
1987	366,9
1988	352,6
1989	321,3
1990	254,6
1991	371,3
1992	302,5
1993	401,6
1994	376,6
1995	357,0
1996	410,1
1997	420,1
1998	322,2
1999	325,6
2000	364,4
2001	287,3
2002	466,0
2003	480,7
ΜΕΣΗ ΕΤΗΣΙΑ	357,6

Πίνακας 6.5: Μέση ετήσια πραγματική εξατμισοδιαπνοή τύπο εδάφους Sandy Clay Loam (mm)

ΕΤΟΣ	ΑΕ
1974	322,9
1975	372,2
1976	362,7
1977	262,2
1978	345,1
1979	286,1
1980	341,0
1981	275,3
1982	320,0
1983	271,8
1984	272,5
1985	349,6
1986	291,1
1987	353,4
1988	311,0
1989	243,5
1990	236,4
1991	328,4
1992	280,9
1993	333,8
1994	332,8
1995	307,0
1996	373,1
1997	379,9
1998	273,7
1999	286,1
2000	331,1
2001	261,5
2002	426,8
2003	426,2
ΜΕΣΗ ΕΤΗΣΙΑ	318,6

Πίνακας 6.6: Μέση ετήσια πραγματική εξατμισοδιαπνοή για τύπο εδάφους Sandy Loam (mm)

ΕΤΟΣ	ΑΕ
1974	428,5
1975	397,9
1976	472,3
1977	356,9
1978	448,7
1979	333,4
1980	431,7
1981	380,6
1982	431,5
1983	305,6
1984	359,6
1985	441,7
1986	339,2
1987	375,2
1988	403,2
1989	419,8
1990	254,0
1991	399,5
1992	320,0
1993	450,2
1994	412,0
1995	397,5
1996	483,2
1997	477,3
1998	347,1
1999	370,1
2000	386,5
2001	298,7
2002	534,9
2003	557,0
ΜΕΣΗ ΕΤΗΣΙΑ	400,5

Πίνακας 1: Μέση ετήσια πραγματική εξατμισοδιαπνοή για τύπο εδάφους Silty Clay Loam (mm)

ΕΤΟΣ	ΑΕ
1974	404,1
1975	388,5
1976	454,8
1977	333,7
1978	426,9
1979	326,8
1980	419,7
1981	342,9
1982	410,4
1983	298,3
1984	343,5
1985	422,0
1986	333,7
1987	371,6
1988	386,4
1989	386,6
1990	251,1
1991	392,2
1992	316,8
1993	441,9
1994	405,5
1995	389,7
1996	456,2
1997	453,8
1998	340,7
1999	356,6
2000	383,5
2001	296,1
2002	501,1
2003	521,8
ΜΕΣΗ ΕΤΗΣΙΑ	385,2

Πίνακας 2: Μέση ετήσια πραγματική εξατμισοδιαπνοή για τύπο εδάφους Silty Loam (mm)

6.4 Συμπεράσματα

Από την εφαρμογή των δύο μεθόδων, της εμπειρικής Thornthwaite – Mather που αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, και την υπολογιστική που αναλύθηκε στο παρόν κεφάλαιο, παρατηρούμε πως υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των εξαγόμενων αποτελεσμάτων. Εξ' άλλου αυτό είναι κάτι που περιμέναμε να συμβεί αφού οι μέθοδοι αυτές δεν χρησιμοποιούν ίδιες πρακτικές και μεθοδολογίες για τους υπολογισμούς των διαφόρων παραμέτρων.

Μια αβεβαιότητα για τα αποτελέσματα που μας έδωσε η εμπειρική μέθοδος Thornthwaite – Mather οφείλεται πιθανώς στο γεγονός ότι δεν ήταν δυνατό να διαθέτουμε πιο ακριβή στοιχεία για την εξάτμιση και τη διαπνοή (από εξατμισίμετρα), μετρήσεις για την επιφανειακή απορροή, η οποία θεωρήθηκε ως το 10% της βροχόπτωσης και πιθανότατα να υπερεκτιμήθηκε, ή για το συντελεστή φυτοκάλυψης. Από την άλλη πλευρά το μοντέλο CLASS χρησιμοποιεί μαθηματικές εξισώσεις που προσομοιώνουν τη ροή στην ακόρεστη ζώνη και βασίζεται στην εξίσωση *Richards* η οποία εφαρμόζεται για οποιονδήποτε συνδυασμό κλιματικών συνθηκών, εδαφικής χρήσης και εδαφολογικού τύπου. Επομένως τα αποτελέσματα της υπολογιστικής μεθόδου για την εκτίμηση του υδατικού ισοζυγίου θεωρούνται πιο αξιόπιστα και πιο κοντά στην πραγματική εικόνα του φυσικού συστήματος. Για το λόγο αυτό, οι τιμές της τροφοδοσίας όπως προέκυψαν από τη μέθοδο αυτή, θα χρησιμοποιηθούν στην προσομοίωση του παράκτιου υδροφορέα που θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7
ΠΑΡΑΚΤΙΟΙ ΥΔΡΟΦΟΡΕΙΣ

7. ΠΑΡΑΚΤΙΟΙ ΥΔΡΟΦΟΡΕΙΣ

7.1 Γενικά

Οι ανάγκες για νερό στις παράκτιες περιοχές και τα νησιά αυξάνονται συνεχώς λόγω της βελτίωσης του βιοτικού επιπέδου και της μεγάλης αύξησης του πληθυσμού κατά τους θερινούς μήνες λόγω του τουρισμού. Οι αντλήσεις των υδροφορέων κατά τους θερινούς μήνες είναι εντατικές, πολλές φορές πάνω από τα όρια βιωσιμότητας, με αποτέλεσμα την υφαλμύρωση των παράκτιων υδροφορέων. Επίσης η τροφοδοσία των υδροφορέων μεταβάλλεται ανάλογα με τις βροχοπτώσεις και σε περιόδους παρατεταμένης ξηρασίας δεν επαρκεί για την επαναπλήρωση τους (Μαντόγλου & Γιαννουλόπουλος,2001).

Λόγω των περιορισμένων διαθέσιμων υδατικών πόρων στις παράκτιες περιοχές και τα νησιά, οι υπάρχοντες υδατικοί πόροι είναι πολύτιμοι και θα πρέπει να χρησιμοποιούνται όσο το δυνατό καλύτερα ώστε να προστατευτούν και να συνεχίσουν να καλύπτουν και στο μέλλον τις ανάγκες με βιώσιμο τρόπο. Η χρήση και αποκατάσταση παράκτιων υδροφορέων πρέπει να αποτελεί μέρος ενός γενικότερου πλαισίου ολοκληρωμένης διαχείρισης των υδατικών πόρων του νησιού ή της παράκτιας περιοχής η οποία περιλαμβάνει τα επιφανειακά καθώς και τα υπόγεια νερά, εξετάζει τα ποσοτικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά των υδάτινων πόρων και θεωρώντας τις υπάρχουσες αλλά και τις μελλοντικές ανάγκες καθώς και τη μεταβλητότητα και διαρκή αύξηση των αναγκών ιδιαίτερα κατά τους θερινούς μήνες. Αυτού του είδους η διαχείριση απαιτεί επιστημονική έρευνα, ανάλυση, μελέτες και σχεδιασμό, κατάλληλη νομοθεσία και διατάξεις, καθώς και καλή πληροφόρηση και συνεργασία φορέων και πληθυσμού. (Μαντόγλου & Γιαννουλόπουλος,2001).

Μια ολοκληρωμένη μεθοδολογία στη διαχείριση των διαθέσιμων υδατικών πόρων, αποσκοπεί στον καθορισμό των βέλτιστων ποσοτήτων που μπορούν να αντληθούν από τον υδροφόρα, ιδιαίτερα σε περιόδους ξηρασίας όπου η

επαναπλήρωση των ποσοτήτων που αντλούνται δεν είναι εφικτή. Σε συνάρτηση των γεωμετρικών και υδραυλικών χαρακτηριστικών και παραμέτρων του υδροφορέα καθώς και της κατείσδυσης, σκοπός είναι να υπολογισθεί η μέγιστη βιώσιμη άντληση σαν ποσοστό της τροφοδοσίας του υδροφορέα. Ωστόσο κάτι τέτοιο απαιτεί άριστη γνώση της λειτουργίας του φυσικού συστήματος. Διάφορα μαθηματικά μοντέλα έχουν δημιουργηθεί για να παρέχουν τη γνώση εκείνη που απαιτείται για τη μεθοδική διαχείριση των υδατικών πόρων. Τα μοντέλα αυτά στην ουσία προσομοιώνουν το φυσικό σύστημα του υδροφορέα χρησιμοποιώντας τα γεωμετρικά και υδραυλικά χαρακτηριστικά του, ωστόσο οι διαδικασίες που στην πραγματικότητα πραγματοποιούνται είναι πολύ δύσκολο να κατανοηθούν και να περιγραφούν με απλές μαθηματικές σχέσεις. Για το λόγο αυτό τα μοντέλα προσομοίωσης μπορούν να παρέχουν απλά μια σχετική εικόνα για το τι πραγματικά συμβαίνει στον υδροφορέα.

7.2 Υφαλμύρωση Παράκτιων Υδροφορέων

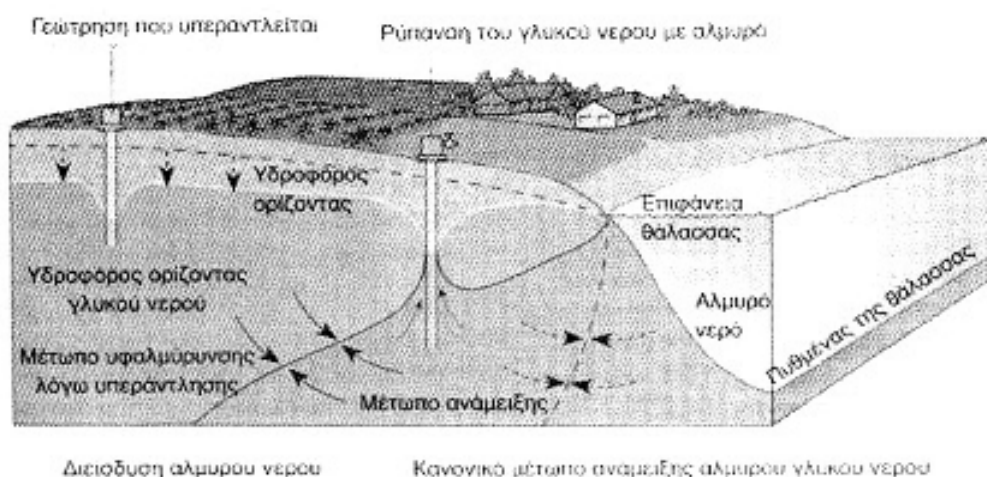
7.2.1 Γενικά

Η εκμετάλλευση και διαχείριση των υπόγειων νερών παράκτιων υδροφορέων είναι άμεσα συνδεδεμένη με το φαινόμενο της διείσδυσης της θάλασσας σε αυτούς, δηλαδή της εισροής θαλάσσιου νερού στο σύστημα των εν λόγω υδροφορέων. Η εισροή αυτή μπορεί να είναι μόνιμη ή συνηθέστερα μη μόνιμη ροή. Έτσι το αλμυρό νερό αντικαθιστά ίσες ποσότητες γλυκού νερού. Αποτέλεσμα της διείσδυσης αυτής της θάλασσας είναι η υφαλμύρωση των υδροφορέων αυτών. (Νάνου – Γιάνναρου,2006)

Στην ουσία δηλαδή η πολυπλοκότητα του προβλήματος της διαχείρισης των διαθέσιμων υδατικών πόρων ενός παράκτιου υδροφορέα έγγυται στην ύπαρξη στην ύπαρξη δύο φάσεων ρευστών καθώς και μιας ευρείας ζώνης ανάμιξης (ζώνη υφαλμύρωσης) μεταξύ των δύο υγρών φάσεων, του γλυκού και του θαλασσινού νερού. Η κίνηση και η διασπορά του ενός ρευστού στο άλλο εξαρτάται από την πυκνότητα των ρευστών στην ζώνη υφαλμύρωσης η οποία μεταβάλλεται σαν συνάρτηση του χώρου και χρόνου και εξαρτάται από

τις συνθήκες ροής. Αυτή η αλληλεξάρτηση κάνει τις αντίστοιχες εξισώσεις μη γραμμικές και είναι πολύ δύσκολο να επιλυθούν με αριθμητικές μεθόδους αφού απαιτούνται διαδοχικές προσεγγίσεις και επαναλήψεις.

Επιπλέον η περιγραφή του φυσικού φαινομένου περιπλέκεται ακόμα περισσότερο λόγω της ανομοιογένειας των υδραυλικών παραμέτρων του υδροφορέα. Ιδιαίτερα σε καρστικούς υδροφορείς η ανάμιξη του γλυκού και αλμυρού νερού είναι εντελώς διαφορετικής φύσης από αυτήν σε ομογενείς και ιστροπικούς πορώδεις υδροφορείς. Η ροή σε καρστ συχνά δεν ακολουθεί το νόμο του Darcy αφού γίνεται σε κοιλότητες και σε ανοίγματα που είναι συχνά μεγάλων διαστάσεων με αποτέλεσμα να είναι πολύπλοκη και να μην μπορεί να περιγραφεί με γενικές διαφορικές εξισώσεις ροής αφού κάθε ιδιαίτερο σύστημα έχει τη δική του ιδιότυπη συμπεριφορά.



Εικόνα 7.1: Υφαλμύρωση παράκτιου υδροφορέα

Το πρόβλημα της υφαλμύρωσης στις περισσότερες περιπτώσεις αναγνωρίζεται από τους υπεύθυνους υδρογεωλόγους και μηχανικούς. Συνήθως όμως είναι άγνωστη η έκτασή του, λόγω έλλειψης στοιχείων. Δεν είναι δηλαδή εύκολη η ποσοτικοποίηση του προβλήματος. Κατά την εισροή της θάλασσας σε έναν υδροφορέα συνθήκες μόνιμης ροής στην πραγματικότητα δεν αποκαθίστανται εύκολα. Επιπλέον τις περισσότερες φορές το πρόβλημα φθάνει σε ανεπίτρεπτα όρια και τα κατάλληλα μέτρα δεν παίρνονται εγκαίρως.

Η μαθηματική προσομοίωση αποτελεί για τον μελετητή ένα δυναμικό εργαλείο που διευκολύνει την εξαγωγή συμπερασμάτων για την ορθή διαχείριση υπόγειων υδροφορέων και επιτρέπει την πρόβλεψη της συμπεριφοράς τους για διάφορες υποθετικές καταστάσεις (σενάρια). Οι εφαρμοσμένες αυτές μαθηματικές προσομοιώσεις είναι χρήσιμες επίσης στις αναγνωριστικές έρευνες, σε φάσεις προκαταρκτικής μελέτης ή προμελέτης ενός έργου, για την ερμηνεία της συμπεριφοράς υδροφορέα μετά από μετρήσεις πεδίου. (Νάνου – Γιάνναρου, 2006)

7.2.2 Αίτια της υφαλμύρωσης

Αιτία υφαλμύρωσης μπορεί να είναι γεωλογικοί παράγοντες, συνήθως όμως το φαινόμενο παρατηρείται, όπως αναφέραμε, κατά τη διείσδυση θαλάσσιου νερού στους παράκτιους υδροφορείς. Η διείσδυση αυτή σε παράκτιους υδροφορείς μπορεί να οφείλεται τόσο σε ανθρωπογενείς παράγοντες (υπεραντλήσεις), όσο και σε φυσικούς (π.χ. κλιματικές αλλαγές, ανύψωση της στάθμης της θάλασσας) και συνηθέστερα σε συνδυασμό των δύο.

Όταν η πτώση της πίεσης του γλυκού νερού και η επερχόμενη επίδραση της θάλασσας στις παράκτιες γεωτρήσεις οφείλεται σε ανθρωπογενείς επιδράσεις, δηλαδή το ποσοστό άντλησης ενός υδροφόρου ορίζοντα ξεπερνά το ποσοστό φυσικής ή τεχνητής αναπλήρωσης (υπεράντληση), το επίπεδο του υδροφόρου στην γύρω περιοχή πέφτει. Συγκεκριμένα δημιουργείται ένας κώνος πτώσης γύρω από τη θέση υπεράντλησης. Εφόσον δεν παρεμβάλλονται άλλα φυσικά εμπόδια (σκληρά πετρώματα, υψομετρική διαφορά, κατάλληλος προσανατολισμός των γεωλογικών στρωμάτων) μεταξύ των γλυκών υδάτων και της θάλασσας, ευνοείται η εισροή αλμυρού νερού, λόγω διαφοράς πιέσεων. Στην περίπτωση αυτή οι υδροφορείς καταστρέφονται ποιοτικά. Το φαινόμενο αυτό συνήθως παρατηρείται σε περιοχές όπου η πληθυσμιακή πυκνότητα είναι μεγάλη και λαμβάνουν χώρα πολλές ανθρώπινες δραστηριότητες (Bear, 1999).

7.2.3 Επιπτώσεις της υφαλμύρωσης

Γενικά το υφάλμυρο νερό χαρακτηρίζεται ακατάλληλο τόσο για άρδευση όσο και για ύδρευση ενώ αρνητικές είναι και οι επιπτώσεις του στην υγεία των καταναλωτών.

Από υδρευτικής άποψης, για τις περιοχές που είναι τουριστικές, με μεγάλο αριθμό εποχικών επισκεπτών και αυξημένες υδρευτικές απαιτήσεις, που καλύπτονται από τα υπόγεια νερά, το φαινόμενο της ποιοτικής υποβάθμισης των υδροφορέων καθιστά προβληματική και ελλειμματική την ύδρευση. Η έλλειψη αυτή οδηγεί στην αύξηση του κόστους ζωής λόγω των δαπανηρών λύσεων (εμφιαλωμένο νερό, έργα υδροδότησης κ.α.) ή στην υποβάθμιση του βιοτικού επιπέδου των μόνιμων κατοίκων. Αύξηση του κόστους ζωής αλλά και των εγγενών δυσκολιών παρατηρείται και για τους τουρίστες με αποτέλεσμα τη μείωση της δυναμικής οικονομικής εκμετάλλευσης της περιοχής, μείωση της εισροής νέων επενδυτικών κεφαλαίων και του αριθμού των τουριστών αφού καθίσταται λιγότερο ανταγωνιστική συγκρινόμενη με άλλες τουριστικές περιοχές.

Από αρδευτικής άποψης, τα προβλήματα που προκαλούνται είναι πολλαπλά διότι παρουσιάζεται έλλειψη επαρκούς ποσότητας νερού, λόγω της έλλειψης έργων υποδομής αρδευτικής ανάπτυξης, όπως τα έργα εκμετάλλευσης των επιφανειακών υδατικών πόρων, γεγονός που οδηγεί στην ποσοτικά ελλειμματική άρδευση και στην κάλυψη των αρδευτικών αναγκών με υφάλμυρο ή ακάθαρτο νερό, με αποτέλεσμα την αύξηση της αλατότητας των εδαφών. Το γεγονός αυτό ευθύνεται για τη μείωση της δυναμικότητάς τους, την πτώση της αξίας της γης, την αύξηση του κόστους των παραγόμενων προϊόντων, τη μείωση της ανταγωνιστικότητάς τους, τη μείωση του αριθμού των πωλήσεων, τη μείωση των εισοδημάτων των αγροτών και την υποβάθμιση του βιοτικού τους επιπέδου.

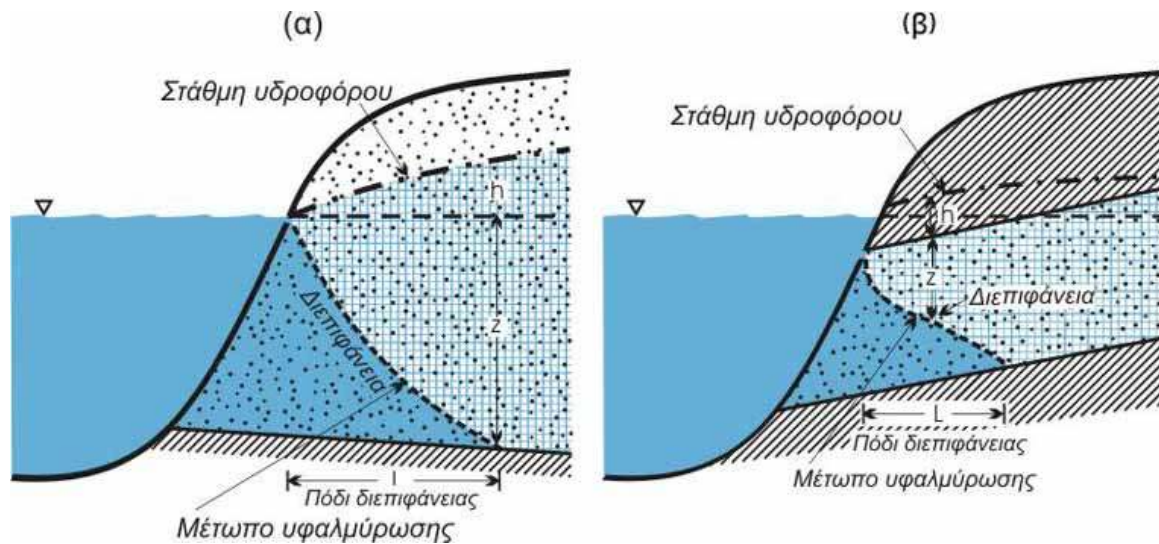
Η μείωση της παραγωγικότητας των εδαφών αναγκάζει τους καλλιεργητές είτε να αντισταθμίζουν ποσοτικά (χρησιμοποιώντας περισσότερο νερό) την ποιοτική υποβάθμιση του νερού είτε να χρησιμοποιούν μεγαλύτερα και

δραστικότερα βελτιωτικά λιπάσματα. Το γεγονός της αύξησης των εξόδων έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση του εισοδήματός τους ή στην προσπάθεια αποκατάστασης των εσόδων τους, την αύξηση της τιμής των προϊόντων που μειώνει την ανταγωνιστικότητά τους. Η εξέλιξη αυτή μπορεί να οδηγήσει τους κατοίκους να επιλέξουν για απασχόλησή τους την τουριστική ανάπτυξη του τόπου τους, η οποία είναι και άμεσα αποδοτική, παρά τα προβλήματα που προαναφέρθηκαν και όχι την παραδοσιακή γεωργική ανάπτυξη, η οποία και επισφαλής είναι αλλά και απαιτεί μεγάλης κλίμακας έργα για την εξασφάλιση ικανών ποσοτήτων αρδευτικού νερού. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την ολοένα μεγαλύτερη συρρίκνωση της καλλιεργούμενης γης (περίπου 15% την τελευταία δεκαετία) και την επικράτηση εποχικού χαρακτήρα απασχόλησης.

Τέλος, στις περιπτώσεις όπου στα δίκτυα μεταφοράς το νερό είναι υφάλμυρο, λόγω της μεγάλης διαβρωτικής ικανότητας, προκαλεί σημαντικά προβλήματα στα διάφορα στοιχεία του δικτύου, όπως αύξηση των ρυθμών εμφάνισης βλαβών με επακόλουθη μείωση του χρόνου ζωής τους, αύξηση των απωλειών λόγω διαρροής, μείωση της παροχетеυτικής ικανότητας των αγωγών, αύξηση του λειτουργικού κόστους συντήρησης του δικτύου και του βαθμού αξιοπιστίας και διαθεσιμότητάς του.

7.3 Τρόποι προσομοίωσης διεπιφάνειας αλμυρού – γλυκού νερού

Το γλυκό νερό, εμφανίζει μικρότερη πυκνότητα σε σχέση με το αλμυρό και επιπλέει πάνω σε αυτό σχηματίζοντας μια διεπιφάνεια ανάμεσά τους. Η διεπιφάνεια γλυκού – αλμυρού νερού, έχει τη μορφή μιας κυρτής καμπύλης, η οποία σχηματίζεται λόγω της υποκείμενης αλάτινης σφήνας και της ροής του γλυκού νερού. Χαρακτηριστικά σημεία είναι το χείλος, δηλαδή το σημείο τομής της διεπιφάνειας με την επιφάνεια της θάλασσας και το πόδι της αλάτινης σφήνας, δηλαδή το σημείο τομής της διεπιφάνειας με τον πυθμένα του υδροφορέα.



Εικόνα 7.2: Ζώνη διεπιφάνειας αλμυρού – γλυκού νερού σε (α) ελεύθερο και (β) υπό πίεση υδροφόρο στρώμα

Για την αντιμετώπιση ενός τέτοιου προβλήματος χρησιμοποιούνται δύο προσεγγίσεις. Η μια έχει να κάνει με το να θεωρηθεί η διεπιφάνεια αλμυρού και γλυκού νερού ως πεπερασμένου πάχους λόγω υδροδυναμικής διασποράς. Η δεύτερη ονομάζεται θεώρηση απότομης διεπιφάνειας, που χρησιμοποιείται όταν το πάχος της διεπιφάνειας είναι μικρό σε σύγκριση με εκείνο του υδροφορέα.

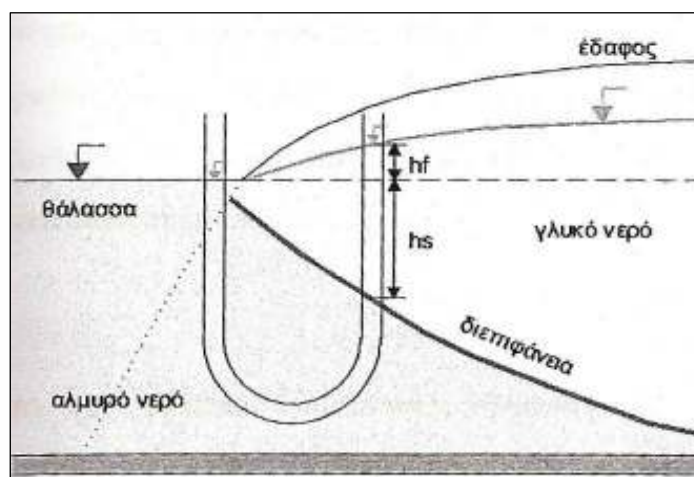
Στην πρώτη περίπτωση, όπου θεωρείται η διεπιφάνεια πεπερασμένου πάχους, η διεξόδωση του αλμυρού νερού αντιμετωπίζεται σαν ένα είδος ρύπανσης περιβαλλοντικής προέλευσης (Α. Νάνου – Γιάνναρου). Λόγω της ανάμιξης δύο υγρών επιλύεται πρόβλημα υδροδυναμικής διασποράς, με τη βοήθεια των εξισώσεων κίνησης του Darcy, διατήρησης μάζας και υδροδυναμικής διασποράς.

Στη δεύτερη περίπτωση όπου θεωρείται απότομη διεπιφάνεια, το πρόβλημα έχει δύο διαστάσεις που εξαρτώνται από τις συνθήκες ροής. Σε αδιατάρακτες συνθήκες, η ροή θεωρείται μόνιμη, ενώ σε περίπτωση μη μόνιμης ροής λόγω άντλησης, γίνεται η παραδοχή της οριζόντιας κίνησης των υδάτων. Και στις δύο περιπτώσεις εφαρμόζονται οι εξισώσεις συνέχειας και Darcy. Σε κάθε μια από τις περιπτώσεις αυτές όμως γίνεται η παραδοχή πως το μέτωπο του αλμυρού νερού έχει πρακτικά σταθεροποιηθεί και δεν μετακινείται. Η προσέγγιση αυτή ισχύει σε συνθήκες που προσεγγίζουν συνθήκες μόνιμης

ροής ή μετά από μεγάλους χρόνους από την έναρξη μιας μεταβολής. Σε τέτοιες συνθήκες μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση των *Ghyben – Herzberg* η οποία περιγράφεται παρακάτω.

7.3.1 Η προσέγγιση Ghyben – Herzberg

Το πρόβλημα της υφαλμύρωσης εξετάστηκε για πρώτη φορά 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 7.3: Προσέγγιση Ghyben – Herzberg

Σύμφωνα με την έρευνα που πραγματοποίησαν, κατέληξαν στο συμπέρασμα πως η στάθμη του θαλάσσιου νερού στο έδαφος δεν βρίσκεται στο επίπεδο της θάλασσας, αλλά κάτω από αυτό 40 περίπου φορές τη διαφορά στάθμης του γλυκού νερού από το επίπεδο της θάλασσας. Η σχέση αυτή προκύπτει από την υδροστατική ισορροπία μεταξύ 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 γνωστή παραδοχή Dupuit. Ορίζοντας h_f το ύψος γλυκού νερού πάνω από τη στάθμη της θάλασσας και h_s τη θέση της διεπιφάνειας αλμυρού-γλυκού νερού κάτω από αυτήν και γ_f, γ_s τα ειδικά βάρη γλυκού και αλμυρού νερού αντίστοιχα και δ το λόγο $\gamma_f/(\gamma_s-\gamma_f)$, ισχύει:

$$h_s = \frac{\gamma_f}{\gamma_s - \gamma_f} \cdot h_f \equiv \delta h_f$$

όπου

$$h_s = \frac{P}{\rho_s g} + z \quad \text{και} \quad h_f = \frac{P}{\rho_f g} + z$$

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 χρήση της εξίσωσης Ghyben - Herzberg επιτρέπει την εύρεση της θέσης της διεπιφάνειας αλμυρού-γλυκού νερού, ως εξής:

- Με βάση παρατηρήσεις από φρέατα της περιοχής, κατασκευάζεται ο πιεζομετρικός χάρτης του υδροφορέα για το γλυκό νερό.
- Τα πιθανά βάθη της διεπιφάνειας υπολογίζονται από την προαναφερθείσα εξίσωση, άρα ισχύει ο ίδιος πιεζομετρικός χάρτης πολλαπλασιασμένος με διαφορετικό συντελεστή.
- Από τη γεωλογική μελέτη είναι γνωστή η θέση του πυθμένα του υδροφορέα.
- Η τομή των δύο επιφανειών, της διεπιφάνειας αλμυρού-γλυκού νερού και της βάσης του υδροφορέα, αποτελεί το πόδι της αλάτινης σφήνας.
- Η μέθοδος μπορεί να εφαρμοσθεί για περιοσμένους και φρεάτιους υδροφορείς.

Η πραγματική εικόνα της διεπιφάνειας ωστόσο είναι διαφορετική από αυτή που παρουσιάζεται στην προσέγγιση Ghyben – Herzberg, αφού:

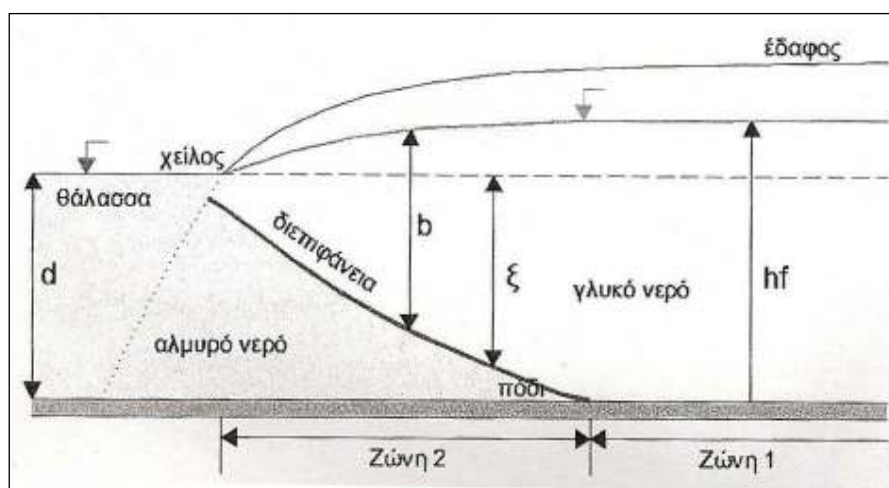
- Δεν ισχύει η παραδοχή της οριζόντιας ροής. Υπάρχουν σημαντικές κατακόρυφες συνιστώσες ταχυτήτων.
- Η προσέγγιση Ghyben-Herzberg δεν επιτρέπει τον υπολογισμό επιφάνειας από την οποία πραγματοποιείται διέξοδος γλυκού νερού προς τη θάλασσα.

- Η διεπιφάνεια αλμυρού-γλυκού νερού συνήθως δεν είναι ακίνητη, αλλά κινείται προς το εσωτερικό του υδροφορέα.
- Η προσέγγιση Ghyben-Herzberg δεν μπορεί να προβλέψει στην περίπτωση φρεατίων υδροφορέων την επιφάνεια διήθησης (*Νάνου – Γιάνναρου, 2006*).

7.3.2 Ανάλυση κατά Strack

Με βάση την ανάλυση *Ghyben-Herzberg* μπορούμε να πούμε πως ένας υδροφορέας, είτε είναι φρεάτιος, είτε περιορισμένος, χωρίζεται σε δύο ζώνες. Η μια ζώνη αφορά το τμήμα εκείνο στο εσωτερικό του υδροφορέα που καλύπτεται από γλυκό νερό και συμπεριφέρεται σαν ένας τυπικός υδροφόρος, ενώ στη δεύτερη ζώνη, αυτή στο εξωτερικό του υδροφορέα, το γλυκό νερό βρίσκεται πάνω από το αλμυρό λόγω της διαφοράς στην πυκνότητά τους.

Γίνεται επομένως αντιληπτό πως το πρόβλημα της υφαλμύρωσης παρουσιάζεται στη δεύτερη ζώνη, όταν λόγω της υπεράντλησης, το θαλασσινό νερό αρχίζει να εισχωρεί στο εσωτερικό του υδροφορέα. Οι εξισώσεις όμως που διέπουν τις δύο αυτές ζώνες είναι διαφορετικές.



Εικόνα 7.4: Ζώνες φρεατίου υδροφορέα, όπως αυτές χωρίζονται από τη διεπιφάνεια αλμυρού και γλυκού νερού.

Ο Strack (1976) εισήγαγε την έννοια ενιαίου δυναμικού ϕ και για τις δύο ζώνες, ώστε να απαιτείται η επίλυση μιας μόνο εξίσωσης που ισχύει και για τις δύο ζώνες. Για το σχηματισμό της ενιαίας αυτής εξίσωσης αφενός υιοθετείται η παραδοχή *Duruit* για την περίπτωση της ροής του γλυκού νερού και αφετέρου χρησιμοποιείται η σχέση *Ghyben – Herzberg* για να προσδιοριστεί το βάθος της διεπιφάνειας. Το φορτίο του γλυκού νερού εκφράζεται έτσι συναρτήσει μόνο των οριζόντιων συντεταγμένων, $h_f = h_f(x, y)$. Θεωρώντας ότι ο υδροφορέας είναι ομογενής, μπορεί τελικά να προκύψει μια εξίσωση που ισχύει και στις δύο ζώνες, σε περιορισμένους αλλά και ελεύθερους υδροφόρους:

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

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

$$b = h_f, \text{ για τη ζώνη 1 και}$$

$$b = h_f - d + \xi, \text{ για τη ζώνη 2}$$

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:

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

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

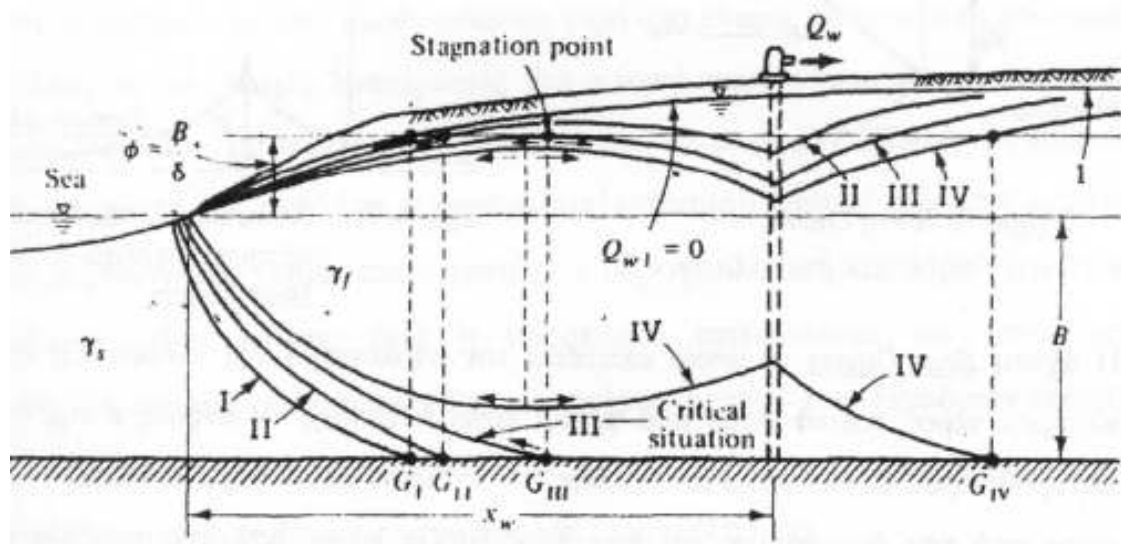
ενώ η τιμή του δυναμικού στο πόδι της αλάτινης σφήνας προκύπτει:

$$\phi_{loe} = \frac{\delta \cdot (1 + \delta)}{2} \cdot d^2$$

Γενικά το δυναμικό όπως προκύπτει από την ανάλυση κατά Strack ικανοποιεί και την εξίσωση Laplace κατά τις διευθύνσεις x και y .

$$\nabla^2 \phi = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0$$

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 7.5: Φάσεις της διεπιφάνειας γλυκού – αλμυρού νερού σε υδροφορέα

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

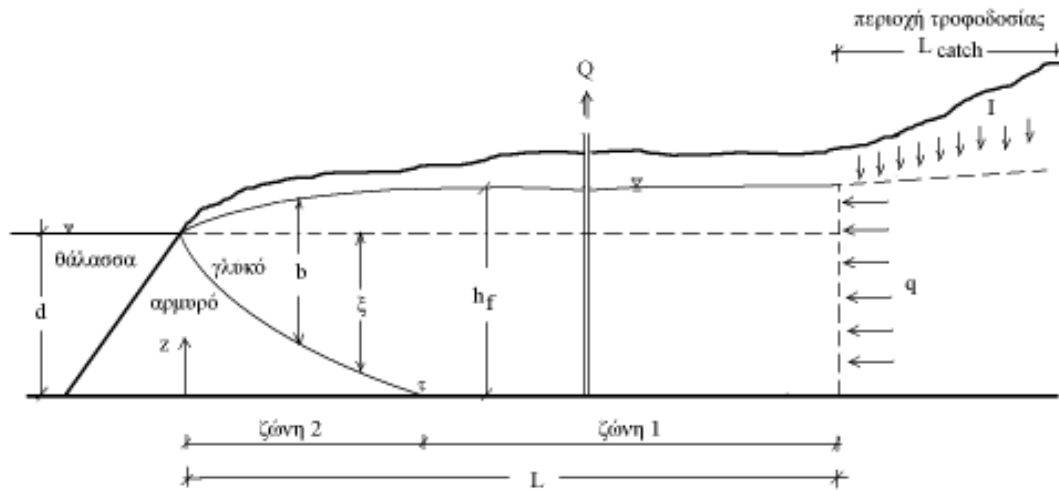
III όταν η άντληση αυξηθεί. Η θέση αυτή είναι οριακή, γιατί από το σημείο αυτό και έπειτα και εφόσον υπάρξει αυξημένη άντληση, το θαλασσινό νερό εισχωρεί στο εσωτερικό του υδροφορέα και παρουσιάζεται το φαινόμενο της υφαλμύρωσης (θέση IV). Σε αυτήν την περίπτωση στη βάση του φρέατος δημιουργείται ο χαρακτηριστικός κώνος και ο κίνδυνος άντλησης αλμυρού νερού είναι πολύ μεγάλος. Στη θέση αυτή, ο υδροφορέας έχει πρακτικά καταστραφεί.

7.3.3 Το μοντέλο Mantoglou et al (2004)

Το μοντέλο Mantoglou et al αποτελεί μια μεθοδολογία για μεγιστοποίηση του τελικού ποσοστού άντλησης από παράκτια υδροφόρα στρώματα, χρησιμοποιώντας μη γραμμική βελτιστοποίηση και εξελικτικούς αλγόριθμους. Στόχος είναι η βελτιστοποίηση των παροχών άντλησης σε συγκεκριμένες θέσεις του υδροφορέα, ώστε ταυτόχρονα τα σημεία άντλησης να προστατεύονται από την διείσδυση θαλασσινού νερού. Το μοντέλο αυτό στηρίζεται στις αναλύσεις που παρουσιάστηκαν παραπάνω, δηλαδή:

- στην προσέγγιση *Ghyben – Herzberg*
- στην ανάλυση κατά *Strack* και
- στη θεώρηση ύπαρξης απότομης διεπιφάνειας γλυκού – αλμυρού νερού

Το μοντέλο αυτό εφαρμόζεται στην περίπτωση παράκτιου φρεάτιου υδροφορέα, σε συνθήκες μόνιμης ροής και επιλέχθηκε για την προσομοίωση του παράκτιου φρεάτιου υδροφορέα της νήσου Μήλου που εξετάζεται στην παρούσα εργασία, ως προς την εύρεση της θέσης της διεπιφάνειας στον υδροφορέα. Όπως αναφέρθηκε σε συνθήκες μόνιμης ροής σύμφωνα με τη θεώρηση *Ghyben – Herzberg* η θέση της διεπιφάνειας παραμένει σταθερή στον υδροφορέα.



Σχήμα 1: Σχηματική παράσταση φρεατίου υδροφορέα (Μαντόγλου & Γιαννουλόπουλος, 2001)

Στο παραπάνω σχήμα φαίνονται χαρακτηριστικά οι δύο ζώνες που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, καθώς επίσης και το σημείο τ στη διατομή, που συμβολίζει την τομή της διεπιφάνειας με τη βάση του υδροφορέα. Η σχέση Ghyben – Herzberg συνδέει το υδραυλικό φορτίο h_f με το βάθος ξ με τη σχέση

$$h_f - d = \delta \xi$$

Σύμφωνα με την ανάλυση κατά Strack που περιγράφηκε πιο πάνω και εισάγει την έννοια του δυναμικού ϕ , συντελεί στη δημιουργία μιας γενικής εξίσωσης συνέχειας που ισχύει και για τις δύο ζώνες και συμπίπτει με την εξίσωση Laplace. Η εξίσωση αυτή για τον υδροφορέα του σχήματος παίρνει τη μορφή

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

Όπου N η επιφανειακή τροφοδοσία του υδροφορέα και K η υδραυλική αγωγιμότητα.

Σύμφωνα με τους Mantoglou et al (2004), η σχέση αυτή 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:

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

όπου T είναι η μεταφορικότητα και ϕ το πιεζομετρικό φορτίο.

Τελικά οι δύο εξισώσεις, είναι όμοιες με τη διαφορά πως αντί του πιεζομετρικού φορτίου ϕ και της μεταφορικότητας T, χρησιμοποιούνται το δυναμικό ϕ και η υδραυλική αγωγιμότητα K ως παράμετροι. Βάση της ομοιότητας των εξισώσεων αυτών βγαίνει το συμπέρασμα πως ο παράκτιος φρεάτιος υδροφορέας που εξετάζεται μπορεί να μελετηθεί απλοποιημένα ως ένας τυπικός περιορισμένος υδροφορέας με μεταφορικότητα T_a ίση με την τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας K του φρεάτιου υδροφορέα.

Παρά τις απλοποιήσεις αυτές πάντως, η τιμή του δυναμικού εξακολουθεί να παραμένει ερωτηματικό, αφού η γεωμετρία του υδροφορέα δεν είναι απλή και επομένως δεν είναι εύκολο να γνωρίζουμε την γνωρίζουμε σε κάθε θέση. Για το λόγο αυτό απαιτείται η εφαρμογή αριθμητικών μεθόδων που θα αναφερθούν ενδελεχώς στο επόμενο κεφάλαιο.

Αν επιλυθεί η εξίσωση $\phi = \frac{(1+\delta)}{2\delta} \cdot (h_f - d)^2$ που αναφέρεται στην εξωτερική ζώνη (ζώνη 2), του υδροφορέα ως προς το φορτίο γλυκού νερού h_f

καταλήγουμε στη σχέση $h_f = \sqrt{\frac{2\delta}{(1+\delta)}} \cdot \phi + d$ όπου $\delta = \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} = 0,025$ και d

το βάθος της θάλασσας με επίπεδο αναφοράς τον πυθμένα του υδροφορέα. Εφαρμόζοντας την εξίσωση Ghyben – Herzberg καταλήγουμε πως

$$\xi = \frac{h_f - d}{0,025} = 40 \cdot (h_f - d)$$

Και αν θέσουμε $\xi = -z$ καταλήγουμε να υπολογίσουμε το βάθος κάτω από το επίπεδο της θάλασσας στο οποίο βρίσκεται η διεπιφάνεια

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

Εδώ αξίζει να σημειωθεί πως η ποσότητα d που αναφέρεται στο βάθος της θάλασσας διαφέρει σε κάθε παράκτιο υδροφόρα και συνήθως είναι μετρήσιμη. Στην παρούσα διπλωματική εργασία ωστόσο λόγω έλλειψης του στοιχείου αυτού, θεωρήθηκε ένα τυπικό βάθος $d = 50\text{m}$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

8. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

8.1 Γενικά

Η προσομοίωση ενός παράκτιου υδροφορέα είναι μια σύνθετη υπόθεση και αυτό οφείλεται στην ύπαρξη της διεπιφάνειας αλμυρού – γλυκού νερού όπως αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Υπάρχουν μοντέλα που ειδικεύονται στις προσομοιώσεις παράκτιων υδροφορέων όπως το *SWAT*, το *SWI* και το μοντέλο *Mantoglou et al (2004)*. (Βογιατζή, 2006).

Για την προσομοίωση του παράκτιου υδροφορέα της νήσου Μήλου 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 όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο χρησιμοποιεί την εξίσωση *Ghyben – Herzberg* για να υπολογίσει τη θέση και τη μορφή της διεπιφάνειας. Στη συνέχεια η θέση αυτή απεικονίζεται γραφικά με τη βοήθεια του λογισμικού *Matlab*.

8.2 Ο Κώδικας *Modflow*

Ο κώδικας *Modflow (A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model)* αναπτύχθηκε από τον φορέα Γεωλογικών Ερευνών των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής (*United States Geological Survey – USGS*), από τους *McDonald* και *Harbaugh* (1988) και αποτελεί ένα μαθηματικό ντετερμινιστικό αριθμητικό μοντέλο πεπερασμένων διαφορών. Χρησιμοποιεί δηλαδή μαθηματικές εξισώσεις για την περιγραφή των στοιχείων της υπόγειας ροής, οι οποίες σχηματίζονται βάσει των φυσικών νόμων που διέπουν την υπόγεια ροή και εφαρμόζονται ταυτόχρονα σε όλο το σύστημα που εξετάζεται. (Βογιατζή, 2006).

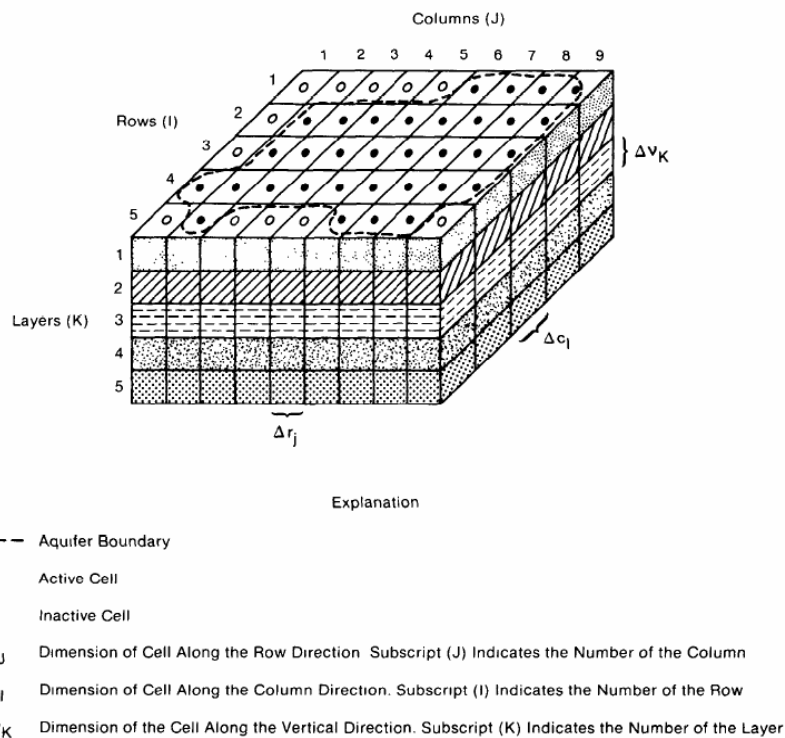
Η υπόγεια ροή περιγράφεται από σύνθετες μη γραμμικές διαφορικές εξισώσεις. Στόχος του κώδικα είναι η απλοποίηση των εξισώσεων αυτών και η τροποποίησή τους σε όσο το δυνατόν απλούστερες γραμμικές αλγεβρικές εξισώσεις. Για το λόγο αυτό η περιοχή ενδιαφέροντος χωρίζεται σε στοιχειώδη τμήματα (κελιά) και μια βασική εξίσωση υπόγειας ροής επιλύεται για κάθε ένα από αυτά τα κελιά. Είναι προφανές πως όσο μεγαλύτερος ο αριθμός των κελιών (μικρότερα στοιχειώδη τμήματα), τόσο ακριβέστερη η διαδικασία της προσομοίωσης. Σε κάθε κελί λαμβάνεται υπόψη η υδάτινη ισορροπία εισροών και εκροών. Το εξαγόμενο αποτέλεσμα μετά το πέρας των υπολογισμών που πραγματοποιούνται, είναι η κατανομή των υδραυλικών φορτίων σε αντιπροσωπευτικά σημεία του κάθε κελιού. Ολόκληρο το πεδίο εφαρμογής αντιπροσωπεύεται από τόσες εξισώσεις, με τόσους αγνώστους, όσοι το πλήθος των κελιών.

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* που 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).

Η δομή του *Modflow* αποτελείται από ανεξάρτητες υπορουτίνες (modules), οι οποίες έχουν ομαδοποιηθεί σε πακέτα που προσομοιώνουν συγκεκριμένα υδρολογικά – υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά. Όπως προαναφέρθηκε, στόχος του *Modflow* είναι η προσέγγιση των σύνθετων διαφορικών εξισώσεων και η μετατροπή τους σε απλούστερες αλγεβρικές. Για την προσομοίωση ενός παράκτιου υδροφορέα προσεγγίζονται οι εξισώσεις που περιγράφουν την υπόγεια ροή εντός του πορώδους μέσου

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

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, h είναι το υδραυλικό φορτίο σε μονάδες μήκους, W είναι ο όγκος της ροής ανά μονάδα όγκου και αντιπροσωπεύει εισροές ή εκροές νερού προς ή από το σύστημα, S_s είναι η ειδική αποθηκευτικότητα (specific storage) του πορώδους υλικού και t είναι ο χρόνος. Η υδραυλική αγωγιμότητα και η ειδική αποθηκευτικότητα εξαρτώνται από τον χώρο, ενώ ο όγκος των εισροών ή εκροών από το χώρο και το χρόνο.

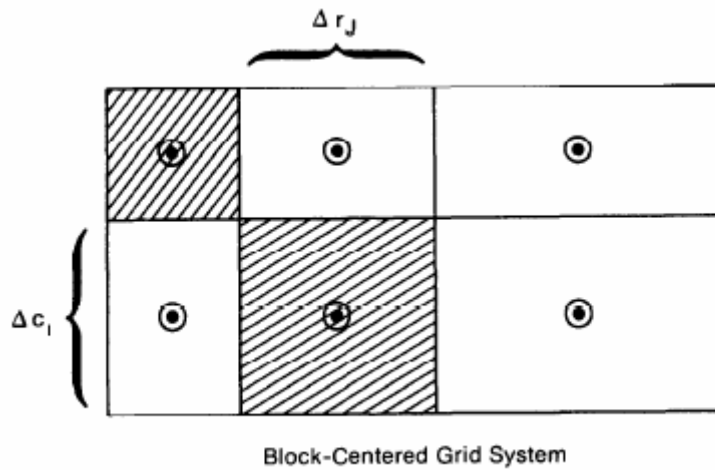


Εικόνα 8.1: Διακριτοποίηση υποθετικού υδροφορέα (McDonald & Harbaugh, 1988, “A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground Water Flow Model”, USGS)

Ο υδροφορέας όπως τον επεξεργάζεται το πρόγραμμα έχει την μορφή του παραπάνω σχήματος. Παρατηρούμε τη διακριτοποίηση που υφίσταται ο υδροφόρος σε ένα δίκτυο κελιών, οι θέσεις των οποίων καθορίζονται από τη γραμμή (*row*), τη στήλη (*column*) και το επίπεδο (*layer*) που βρίσκονται. Έτσι

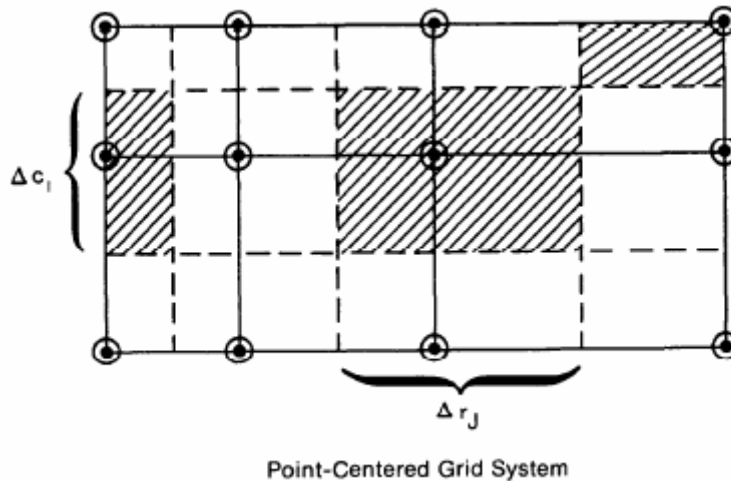
τα κελιά τα οποία βρίσκονται εντός του περιγράμματος του υδροφορέα αποτελούν τα ενεργά κελιά κυμαινόμενου δυναμικού, το οποίο θα υπολογιστεί από το μοντέλο. Όσα κελιά βρίσκονται εκτός του περιγράμματος του υδροφορέα, ονομάζονται ανενεργά και είναι κελιά σταθερού δυναμικού που περιγράφουν τα όρια του μοντέλου, με τιμές που προεπιλέγονται της προσομοίωσης και διατηρούνται σταθερές κατά τη διάρκειά της.

Εντός κάθε κελιού υπάρχει ένα σημείο που ονομάζεται κόμβος. Σε αυτό το σημείο αναφέρεται η τιμή του υδραυλικού φορτίου που υπολογίζεται από το πρόγραμμα.



Εικόνα 8.2: Κόμβοι σε σχηματισμό στο κέντρο του κελιού (McDonald & Harbaugh, 1988, “A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground Water Flow Model”, USGS)

Για τον προσδιορισμό της θέσης των κόμβων υπάρχουν δύο παραδοχές. Η πρώτη περιγράφεται σχηματικά στην παραπάνω εικόνα στην οποία φαίνεται ο σχηματισμός με κέντρο το κελί. Η δεύτερη παραδοχή περιγράφεται σχηματικά παρακάτω με κέντρο το σημείο.



Εικόνα 8.3: Κόμβοι σε σχηματισμό με κέντρο το σημείο (McDonald & Harbaugh, 1988, “A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground Water Flow Model”, USGS)

Και οι δύο παραδοχές ξεκινούν διαιρώντας τον υδροφορέα με δύο συστήματα παράλληλων γραμμών, κάθετων μεταξύ τους. Το Modflow χρησιμοποιεί τη δομή με κέντρο το κελί, όπου οι κόμβοι βρίσκονται στο κέντρο του κάθε κελιού. Η απόσταση των κόμβων θα πρέπει να επιλέγεται έτσι ώστε τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του συστήματος να είναι όμοια κατά μήκος ενός κελιού.

Η ανάπτυξη της εξίσωσης υπόγειας ροής στην περίπτωση της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών, στηρίζεται στην εξίσωση της συνέχειας δηλαδή το άθροισμα όλων των ροών προς και από το κελί πρέπει να ισούται με το ρυθμό μεταβολής της αποθηκευτικότητας εντός του κελιού. Θεωρώντας την πυκνότητα σταθερή, η εξίσωση συνέχειας που εκφράζει την ισορροπία ροής για κάθε κελί δίνεται από τη σχέση:

$$\Sigma Q_i = SS \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta V$$

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, η οποία ορίζεται όμοια με την ειδική αποθηκευτικότητα S_s της διαφορικής εξίσωσης που περιγράφει την υπόγεια ροή, ως ο όγκος νερού που μπορεί να

εισέλθει ανά μονάδα όγκου του υλικού του υδροφορέα για κάθε μεταβολή του υδραυλικού φορτίου. ΔV είναι ο όγκος του κελιού και Δh η μεταβολή του φορτίου για πάροδο χρόνου Δt .

Ο όρος $SS \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta V$ ισούται με τον όγκο νερού που αποθηκεύεται μέσα σε ένα χρονικό διάστημα Δt , δεδομένης της μεταβολής του φορτίου Δh . Για την απλοποίηση της διαδικασίας, οι εκροές αντιμετωπίζονται ως αρνητικές εισροές, ενώ οι ροές που εισέρχονται στα κελιά θετικές. Με τη βοήθεια του νόμου του Darcy υπολογίζεται η ροή σε κάθε κελί.

Στην ουσία 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 εκείνες 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 υπόγειας ροής. Η εξίσωση αυτή δεν μπορεί να επιλυθεί ανεξάρτητα μιας και 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.

Στις παραπάνω παραγράφους περιγράφηκε με λίγα λόγια ο τρόπος λειτουργίας του κώδικα Modflow. Υπάρχουν πολλά πακέτα λογισμικού και διάφοροι αλγόριθμοι για το Modflow, τα προγράμματα GUI (Graphic User Interface Programs), τα οποία βοηθούν στην εισαγωγή δεδομένων στο μοντέλο και την γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων. Για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα *PMWINPro (Processing Modflow Pro)* (Wen – Hsing Chiang & Wolfgang Kinzelbach, 2001).

8.3 Εφαρμογή Μοντέλου Mantoglou et al (2004) στον Παράκτιο Υδροφορέα της Νήσου Μήλου

8.3.1 Γενικά

Για την προσομοίωση του παράκτιου υδροφορέα της νήσου Μήλου και τον προσδιορισμό της διεπιφάνειας αλμυρού – γλυκού νερού επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί το μοντέλο Mantoglou et al (2004). Με βάση το μοντέλο, η λειτουργία του οποίου περιγράφηκε στην παράγραφο 7.3.3, υπολογίζεται η κατανομή δυναμικού σε όλα τα κελιά του υδροφορέα και στη συνέχεια υπολογίζεται σε αυτά το υδραυλικό φορτίο και έπειτα το βάθος κάτω από το επίπεδο της θάλασσας στο οποίο βρίσκεται η θέση της αλάτινης σφήνας.

Για τη λειτουργία του μοντέλου χρειάζεται να οριοθετηθεί ο υδροφορέας, να προσδιοριστούν διάφορες παράμετροι που αφορούν τη γεωμετρία του μοντέλου και να οριστούν αρχικές και οριακές συνθήκες. Παρακάτω περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία προετοιμασίας του μοντέλου για την προσομοίωση.

8.3.2 Οριοθέτηση υδροφορέα

Σύμφωνα με τη γεωλογική και υδρογεωλογική σύσταση η οποία περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3, ο υδροφορέας οριοθετείται βόρεια, ανατολικά και νότια από αδιαπέρατα πλευρικά όρια, ενώ δυτικά από τη θάλασσα .

8.3.3 Προσδιορισμός της γεωμετρίας του μοντέλου

➤ *Διαστασιολόγηση κανάβου (Mesh Grid)*

Η δημιουργία του κανάβου είναι η πρωταρχική ενέργεια κατά το σχεδιασμό του μοντέλου στον υπολογιστή.

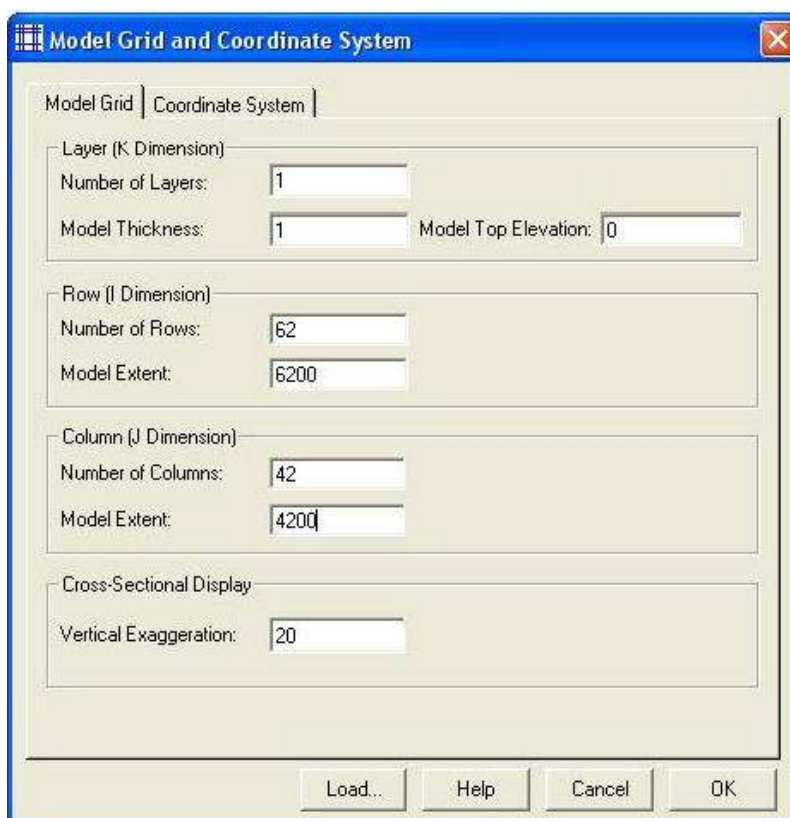
Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, ο κανάβος σχηματίζεται από δύο ζεύγη παραλλήλων γραμμών κάθετα μεταξύ τους, σχηματίζοντας τα αντίστοιχα κελιά. Οι στήλες του κανάβου αντιστοιχούν στον άξονα των τετμημένων X , οι γραμμές, στον άξονα των τεταγμένων Y , ενώ τα επίπεδα του κανάβου αντιστοιχούν στον άξονα των υψομέτρων Z . Αυτό συμβαίνει ώστε ο κανάβος του Modflow να σχετίζεται με τις καρτεσιανές συντεταγμένες.

Για να οριστεί σωστά ο κανάβος θα πρέπει να ληφθούν υπόψη δύο σημαντικές διαφορές. Η αρχή των αξόνων στο σύστημα αναφοράς του κανάβου βρίσκεται στην πάνω αριστερή του γωνία και όχι στην κάτω αριστερή όπως συμβαίνει στο σύστημα των καρτεσιανών συντεταγμένων. Επιπλέον η k των επιπέδων του κανάβου του Modflow αντιστοιχεί σε μείωση του υψομέτρου z , διότι τα επίπεδα αριθμούνται από πάνω προς τα κάτω.

Η μορφή του κανάβου μπορεί να είναι ομοιόμορφη (uniform), όταν τα κελιά που τον αποτελούν είναι ίδιων διαστάσεων, είτε ανομοιόμορφη (custom) όταν το μέγεθος των κελιών ποικίλει. Ο ομοιόμορφος κανάβος προτιμάται και από μαθηματικής άποψης ως προς την αρτιότητα 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. Σε αντίθεση με τα παραπάνω, ανομοιόμορφος κανάβος επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί όταν τα δεδομένα που υπάρχουν αφορούν συγκεκριμένα τμήματα, ενώ για άλλα μέρη της περιοχής τα αντίστοιχα δεδομένα απουσιάζουν όπως συμβαίνει αν ενδιαφέρουν κάποιες συγκεκριμένες θέσεις της περιοχής και συγκεκριμένα σε περιπτώσεις μεταφοράς ρύπων. Καταλήγοντας πρέπει να τονιστεί ότι σε περίπτωση που θα χρησιμοποιηθεί ανομοιόμορφος κανάβος, πρέπει να ακολουθείται ένας σημαντικός κανόνας για τη σωστή μαθηματική επίλυση από το μοντέλο. Το μέγεθος του κελιού και στις τρεις διαστάσεις (στήλη, γραμμή, επίπεδο) δεν μπορεί να διαφέρει (να είναι μεγαλύτερο ή μικρότερο) πάνω από 1,5 φορά του μεγέθους των γειτονικών κελιών. Για τις ανάγκες της προσομοίωσης του παράκτιου υδροφορέα της νήσου Μήλου, εφαρμόζεται ομοιόμορφος κανάβος, διότι τα δεδομένα εισαγωγής θεωρούνται καλώς κατανεμημένα και δεν υπάρχει συγκεκριμένο τοπικό ενδιαφέρον.

Ο υδροφορέας περικλείεται από μια περιοχή πραγματικών διαστάσεων 4,2x6,2 km. Επομένως ο κανάβος θα έχει διαστάσεις 4200x6200 m. Λόγω του περιορισμού στη συγκεκριμένη φοιτητική έκδοση του PMWINPro, τα κελιά του κανάβου δεν μπορούν να έχουν μικρότερες διαστάσεις από 100x100m, κάτι που σημαίνει πως το πλήθος των γραμμών θα είναι 42 και το πλήθος των στηλών θα είναι 62 αφού ο υδροφορέας εκτείνεται κατά την κατακόρυφη διάσταση.

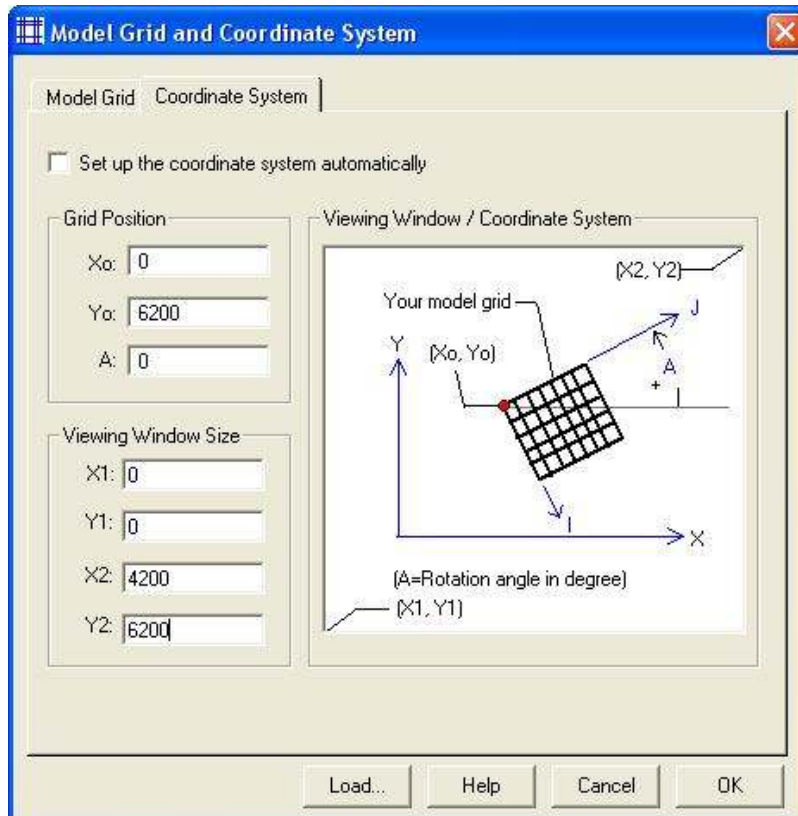
Τέλος ο φρεάτιος υδροφορέας που εξετάζεται θα προσομοιωθεί με ένα επίπεδο (layer), συνολικού πάχους 1m, ώστε η τιμή της μεταφορικότητας T που θα υπολογίζεται από το μοντέλο ($T = b \times K$), να είναι ίση με την υδραυλική αγωγιμότητα K του υδροφορέα.



Εικόνα 8.4: Ορισμός διαστάσεων κανάβου (Mesh Grid)

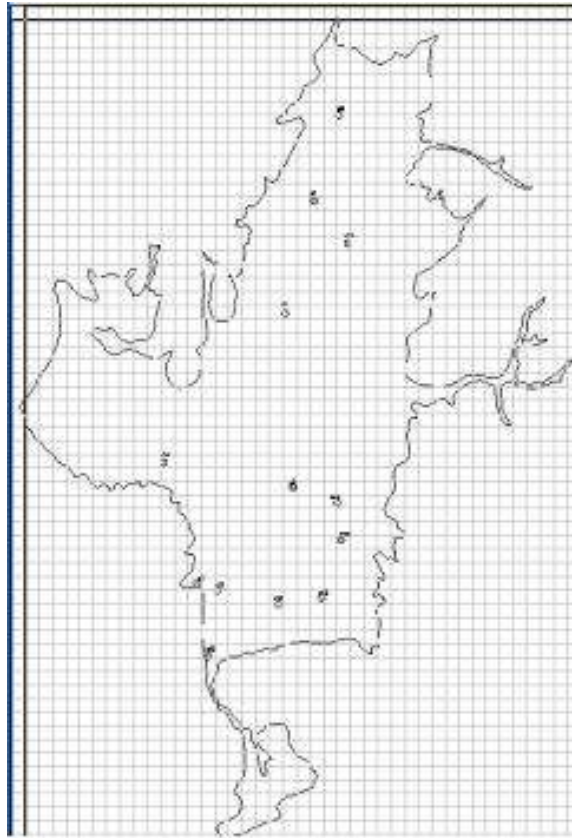
Επειδή οι γεωδαιτικές συντεταγμένες στο Modflow δεν παίζουν κανέναν ρόλο, για την απλοποίηση της διαδικασίας μπορούμε να μεταφέρουμε την κάτω αριστερή γωνία του πλαισίου που περικλείει τον υδροφορέα, στην αρχή του

συστήματος των καρτεσιανών συντεταγμένων (0,0), έτσι ώστε η αρχή των αξόνων του κανάβου (X_0, Y_0) να αποκτήσει τιμή (0,6200).



Εικόνα 8.5: Σύστημα και ορισμός συντεταγμένων του κανάβου

Στη συνέχεια εισάγουμε τον αντίστοιχο χάρτη μορφής .dxf έτσι ώστε να εμφανιστεί γραφικά ο υδροφορέας στο περιβάλλον του προγράμματος. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το περίγραμμα του υδροφορέα και η θέση των γεωτρήσεων και των φρεάτων.



Εικόνα 8.6: Εισαγωγή περιγράμματος υδροφορέα στο περιβάλλον του PMWINPro

➤ *Τύπος Υδροφορέα (Layer Property)*

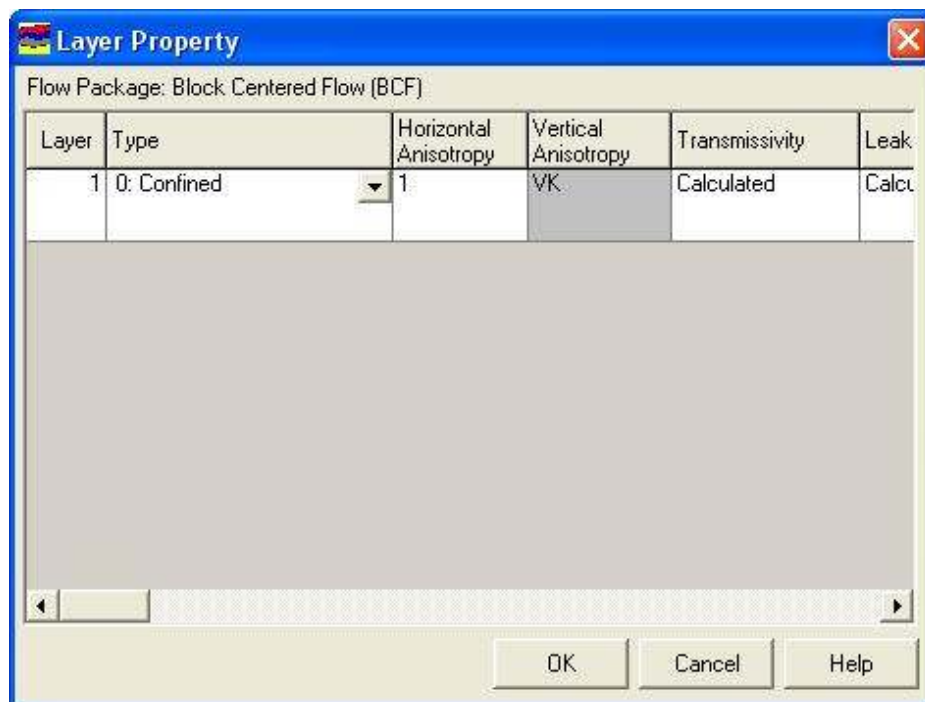
Στο πρόγραμμα Modflow διακρίνονται τέσσερις τύποι επιπέδων, ώστε να χαρακτηριστούν αντιπροσωπευτικότερα οι υδροφορείς που εξετάζονται σε κάθε περίπτωση.

- Ο τύπος 0, χρησιμοποιείται για περιορισμένους ή υπό πίεση υδροφορείς, όπου η διαβιβαστικότητα κάθε κελιού παραμένει σταθερή σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης.
- Ο τύπος 1, χρησιμοποιείται στην περίπτωση ελεύθερων ή φρεάτιων υδροφορέων και ισχύει μόνο για το ανώτερο επίπεδο.
- Ο τύπος 2, χρησιμοποιείται στην περίπτωση που ο υδροφόρος σχηματισμός εναλλάσσεται ανάμεσα σε περιορισμένο και φρεάτιο. Ωστόσο γίνεται υπόθεση ότι το κορεσμένο πάχος διατηρείται παντού το ίδιο, ώστε η μεταβιβαστικότητα να παραμένει σταθερή σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης.

- Ο τύπος 3, τέλος, εφαρμόζεται στην ίδια περίπτωση υδροφορέα του τύπου 2, αλλά περιλαμβάνει κυμαινόμενη μεταβιβαστικότητα, η οποία επανυπολογίζεται σε κάθε επανάληψη επίλυσης, βάσει του ισχύοντος πάχους του υδροφορέα.

Στην περίπτωση της παρούσας εργασίας τονίζεται ότι θα χρησιμοποιηθεί ο τύπος 0, αφού η αντιμετώπιση του παράκτιου υδροφόρου μας έχει αναχθεί σε επίλυση προβλήματος ροής περιορισμένου υδροφορέα (ο οποίος έχει τιμή μεταφορικότητας T ίση με την υδραυλική αγωγιμότητα K του φρεάτιου υδροφορέα).

Από την γραμμή εργαλείων του προγράμματος επιλέγουμε *Grid/Layer Property* και ορίζουμε τον τύπο του υδροφορέα.



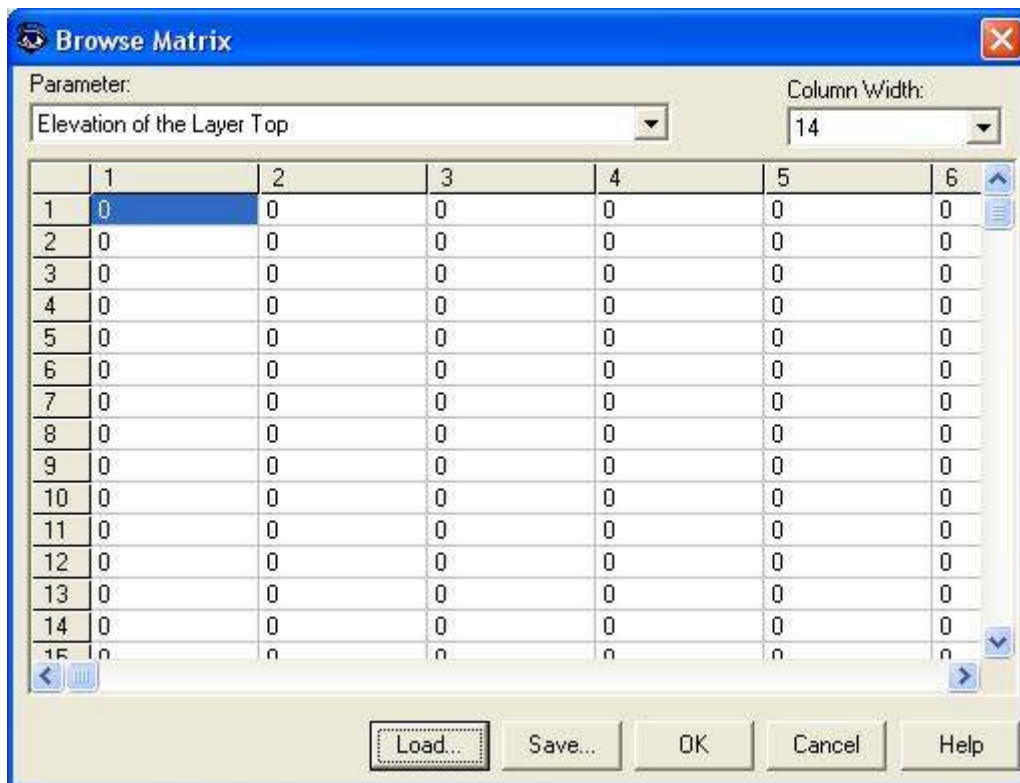
Εικόνα 8.7: Προσδιορισμός τύπου υδροφορέα

- *Οροφή και βάση υδροφορέα (Layer Top and Bottom)*

Το βήμα αυτό αποσκοπεί στον υπολογισμό ίσης μεταβιβαστικότητας T (*transmissivity*) σε κάθε θέση του υδροφορέα, έπειτα και από την εισαγωγή

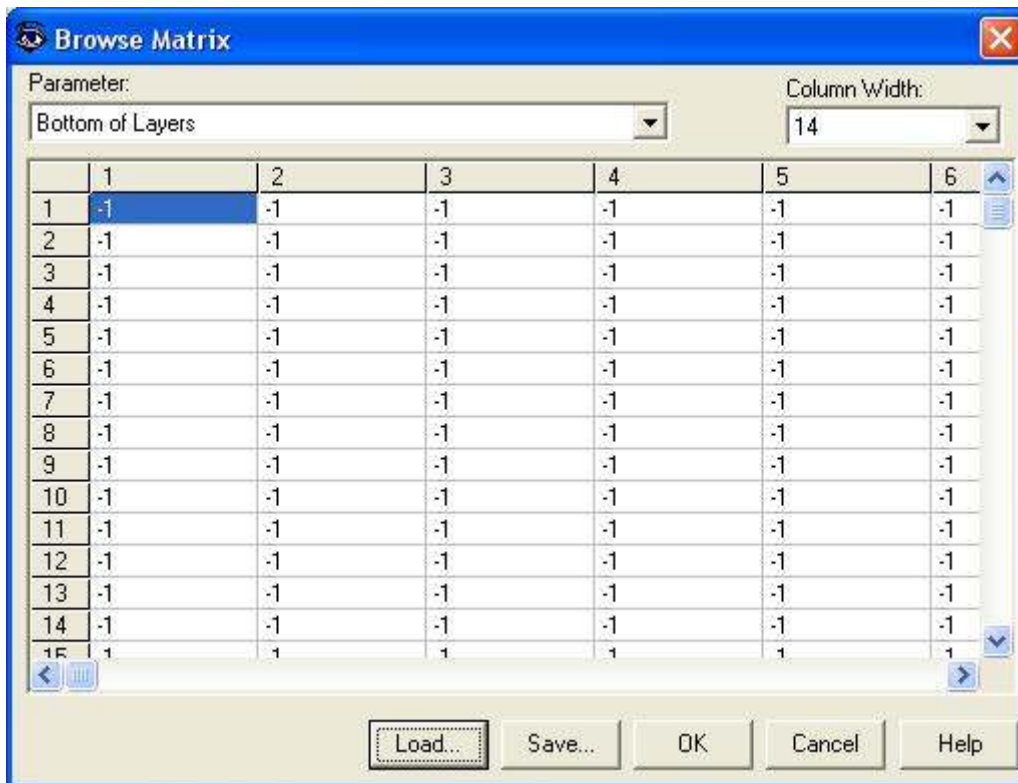
της υδραυλικής αγωγιμότητας K. Ως οροφή (*Layer Top*) τίθεται η τιμή 0 και ως βάση (*Layer Bottom*) θέτουμε την τιμή -1 σε όλα τα κελιά του υδροφορέα.

Από την εντολή *Grid/Top of layers* και *Bottom of layers* και την εντολή *Value/Reset Matrix* ορίζουμε τις προαναφερθείσες τιμές οι οποίες εμφανίζονται στους παρακάτω πίνακες.



	1	2	3	4	5	6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0

Εικόνα 8.8: Ορισμός τιμής οροφής του υδροφορέα σε όλα τα κελιά



Εικόνα 8.9: Ορισμός τιμής βάσης του υδροφορέα σε όλα τα κελιά

8.3.4 Οριακές συνθήκες (Boundary Conditions)

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα στην κατάστρωση των μαθηματικών μοντέλων ροών σε υπόγειους υδροφορείς είναι ο καθορισμός των ορίων και οι αντίστοιχες συνθήκες που ισχύουν κατά μήκος του (Λατινόπουλος, 1986).

Συνηθέστερες κατηγορίες από πλευρά μαθηματικής φυσικής είναι οι συνθήκες για τη μεταβλητή του προβλήματος (όρια δεδομένου πιεζομετρικού φορτίου) ή συνθήκες *Dirichlet*, οι συνθήκες για την παράγωγο της μεταβλητής (όρια δεδομένων εισροών ή εκροών) ή συνθήκες *Neumann* και οι συνθήκες συνδυασμού της μεταβλητής και της παραγώγου της (μικτού τύπου), ή συνθήκη *Cauchy*. Επίσης μπορούν να οριστούν οριακές συνθήκες για την ελεύθερη επιφάνεια ή την επιφάνεια και τη γραμμή διήθησης.

Στο Modflow για την περιγραφή των οριακών συνθηκών, διακρίνονται τρεις βασικοί τύποι κελιών οι οποίοι ορίζονται βάση της εντολής *grid/boundary*

condition/ IBOUND. Οι τύποι αυτοί αφορούν κελιά σταθερού υδραυλικού φορτίου, ενεργά και ανενεργά κελιά.

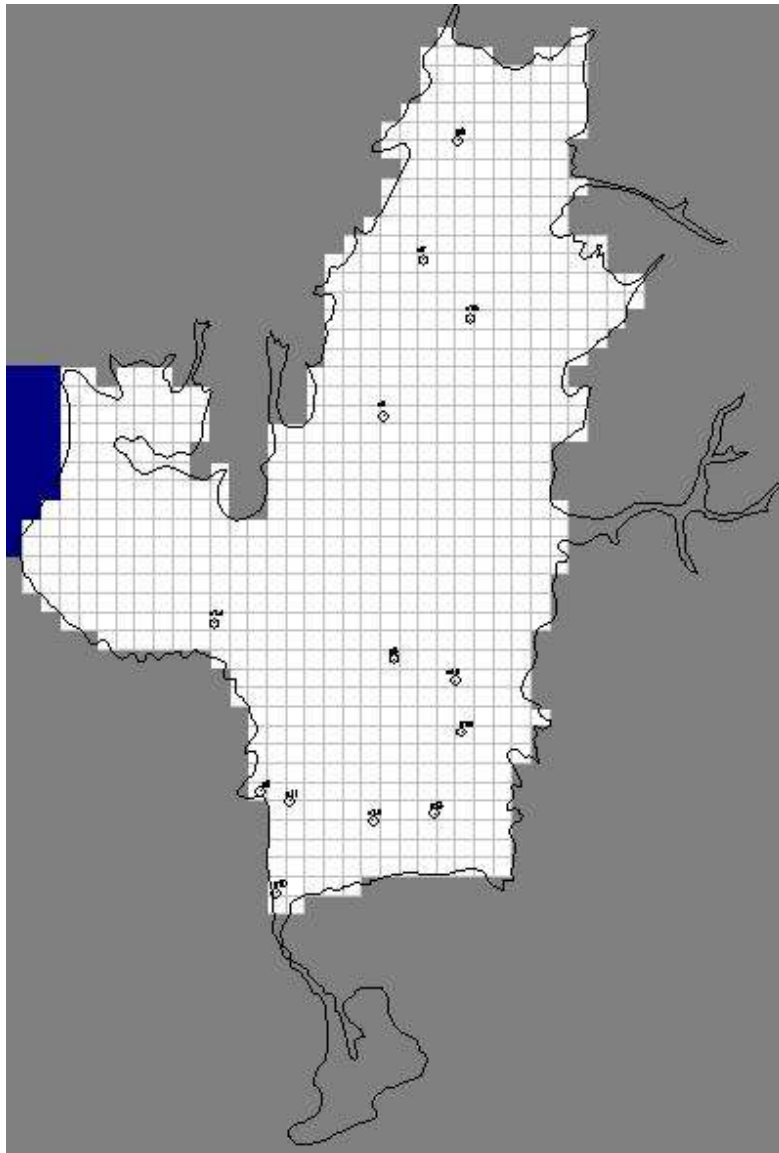
Τα κελιά σταθερού φορτίου χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τα όρια του μοντέλου που έχουν γνωστά υδραυλικά φορτία, όπως στις θέσεις που ο υδροφορέας έρχεται σε επαφή με υδάτινες επιφάνειες. Η τιμή του υδραυλικού φορτίου στα κελιά αυτά ορίζεται από την αρχή στο μοντέλο και δεν αλλάζει κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Στον υδροφορέα που εξετάζουμε ως κελιά σταθερού δυναμικού ϕ , όπως αυτό ορίζεται από τον Strack, λαμβάνονται της θάλασσας τα οποία παίρνουν την τιμή **-1** στο *IBOUND* του προγράμματος.

Αν ο παράκτιος φρεάτιος υδροφορέας δεν αντιμετωπιζόταν με βάση το μοντέλο Mantoglou et al (2004), η χρήση κελιών σταθερού υδραυλικού φορτίου στη θάλασσα θα ήταν λανθασμένη επιλογή, αφού αυτή θα αντιμετωπιζόταν ως ταμιευτήρας γλυκού νερού, αγνοώντας τη δυσκολία που εμφανίζεται κατά την κίνηση του γλυκού νερού του υπόγειου υδροφορέα, όταν κινείται προς τη θάλασσα (Βογιατζή, 2006).

Τα ενεργά κελιά λαμβάνουν την τιμή **1** στο *IBOUND* του προγράμματος. Πρόκειται για τα κελιά των οποίων το υδραυλικό φορτίο θα υπολογιστεί κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Επομένως ως ενεργά λαμβάνονται τα κελιά εκείνα του κανάβου εντός του περιγράμματος του υδροφορέα.

Αντίστοιχα ανενεργά θεωρούνται εκείνα τα κελιά στα οποία η ροή κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης είναι μηδενική και λαμβάνουν την τιμή **0** στο *IBOUND* του προγράμματος. Τέτοια κελιά αντιστοιχούν στους αδιαπέρατους σχηματισμούς που πρακτικά οριοθετούν τον υδροφορέα μας.



Εικόνα 8.10: Οριακές συνθήκες υδροφορέα. Με μπλε απεικονίζονται τα κελιά σταθερού φορτίου (θάλασσα), με γκρίζο τα ανενεργά (αδιαπέρατοι σχηματισμοί) και λευκά τα ενεργά κελιά (υδροφορέας)

Όπως φαίνεται από την παραπάνω εικόνα, έχουν θεωρηθεί ως ανενεργά, κελιά που ανήκουν στην περιοχή του υδροφορέα. Αυτό συμβαίνει διότι οι περιοχές αυτές είναι πολύ μικρές σε διαστάσεις με αποτέλεσμα το μοντέλο προσομοίωσης να μην μπορεί να τις αξιοποιήσει πρακτικά στον υπολογισμό των ισοδυναμικών επιφανειών.

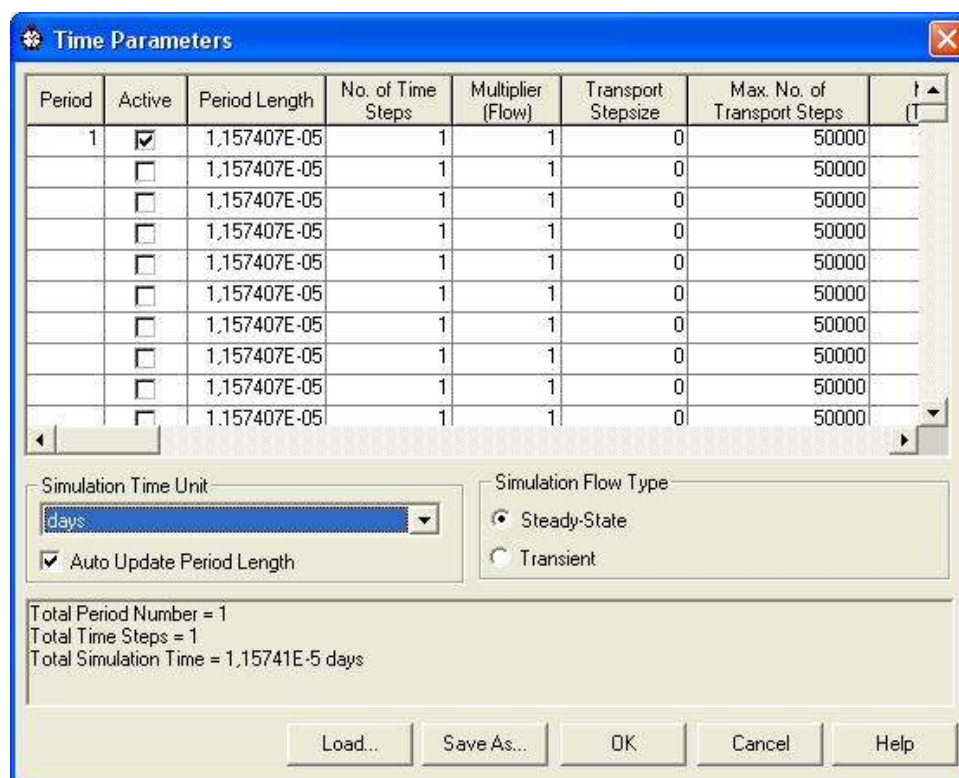
Για την καλύτερη διακριτοποίηση του υδροφορέα μια μικρότερη τιμή των κελιών θα ήταν επιβεβλημένη, αφού βάση της παραπάνω εικόνας, κάποια κελιά λόγω των διαστάσεών τους και της μορφής του υδροφορέα περικλείουν περισσότερες από μια περιοχές με διαφορετική τιμή του υδραυλικού φορτίου.

Για το λόγο αυτό η τιμή που επιλέχθηκε να δοθεί στα συγκεκριμένα κελιά, αποφασίστηκε με γνώμονα το εύρος της αντίστοιχης περιοχής που καταλαμβάνει μέσα στο κελί.

8.3.5 Εισαγωγή παραμέτρων

➤ Χρόνος

Οι μονάδες του χρόνου (*time units*), επιλέγονται σε ημέρες, έτσι ώστε όλες οι παράμετροι στο μοντέλο να αναφέρονται σε m/day. Για την εφαρμογή του μοντέλου Mantoglou et al (2004) χρειάζεται να επιλεχθούν συνθήκες μόνιμης ροής, ενώ η χρονική διακριτοποίηση δεν είναι απαραίτητη. Μέσω της εντολής *Parameters/time*, ορίζουμε τις χρονικές παραμέτρους.

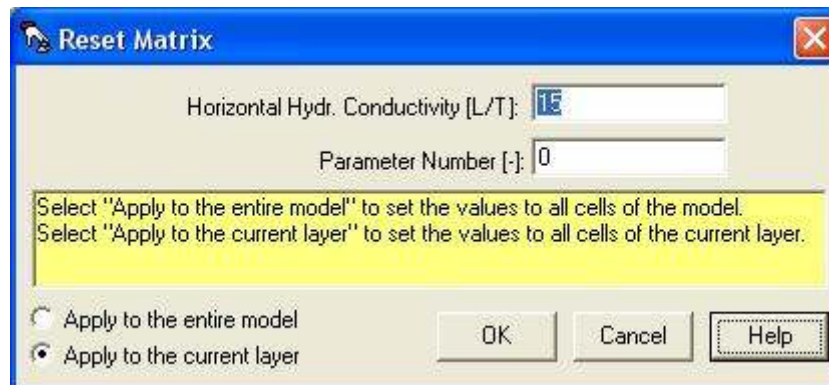


Εικόνα 8.11: Ορισμός χρονικού βήματος σε συνθήκες μόνιμης ροής

➤ Οριζόντια υδραυλική αγωγιμότητα (Horizontal Hydraulic Conductivity)

Η υδραυλική αγωγιμότητα εξαρτάται από τις ιδιότητες του πορώδους και του ρευστού μέσου και αποτελεί την κρίσιμότερη παράμετρο για το μοντέλο. Ο καθορισμός της ακριβούς τιμής της υδραυλικής αγωγιμότητας πραγματοποιείται με εργαστηριακές μεθόδους, ωστόσο στην περίπτωση που εξετάζεται τέτοια δεδομένα δεν υπήρχαν στη διάθεσή μας. Επομένως για την τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας μπορεί να γίνει μόνο μια εκτίμηση. Η εκτίμηση αυτή πραγματοποιείται μέσω διαρκών δοκιμών διαφορετικών τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας και συνεχών προσομοιώσεων, με παράλληλη σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις αντίστοιχες στάθμες από τον πιεζομετρικό χάρτη (Κεφάλαιο 4). Η μέθοδος αυτή ονομάζεται *trial and error*.

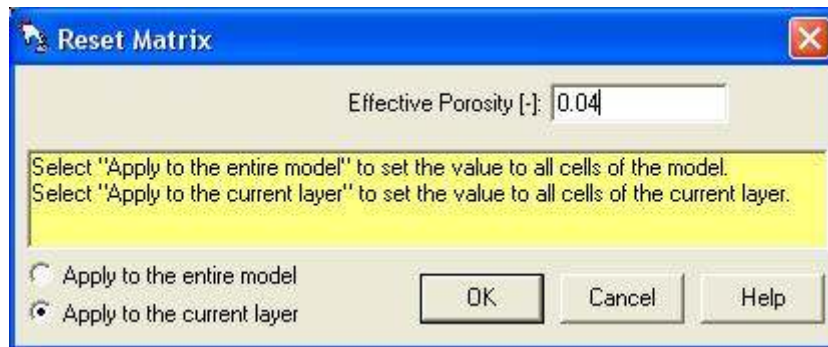
Έτσι δοκιμάσθηκαν τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας από 5m/day η οποία γενικά θεωρείται χαμηλή, έως 50m/day που θεωρείται μέτρια. Μετά τις δοκιμές *trial and error* καταλήξαμε στην τιμή 15m/day.



Εικόνα 8.12: Ορισμός τιμής της οριζόντιας υδραυλικής αγωγιμότητας

➤ Ενεργό πορώδες (Effective Porosity)

Βάση της επικρατούσας κοκκομετρίας των υλικών του υδροφορέα, η τιμή του ενεργού πορώδους κυμαίνεται από 0,03 έως 0,05. Επομένως επιλέχθηκε η μέση τιμή 0,04. Από την εντολή *Parameters/effective porosity* ορίζω την παραπάνω τιμή.

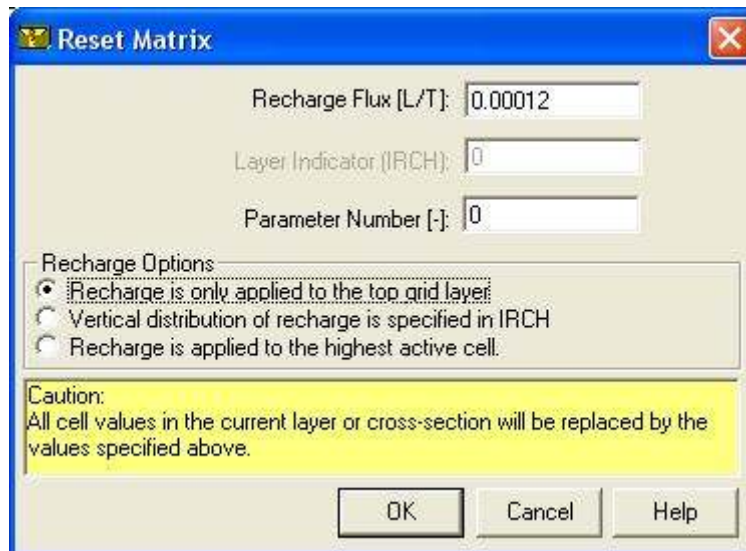


Εικόνα 8.13: Ορισμός τιμής για το ενεργό πορώδες

➤ Τροφοδοσία υδροφορέα (Recharge)

Σύμφωνα με τα στοιχεία που παρουσιάσθηκαν στο κεφάλαιο 6, η τιμή της τροφοδοσίας υπολογίσθηκε στα 42,9mm. Αυτή η τιμή προέκυψε θεωρώντας ως επικρατέστερο τύπο εδάφους Silty Clay Loam. Ωστόσο για να καλυφθούν όλα τα σενάρια, η διαδικασία της προσομοίωσης θα εφαρμοσθεί επιπλέον και για την τιμή της κατείσδυσης που προέκυψε θεωρώντας ως επικρατέστερο τύπο εδάφους Sandy Clay Loam και η οποία ανέρχεται στα 70,9mm ετησίως. Έτσι στην περίπτωση που εδαφικός τύπος θεωρηθεί ως Silty Clay Loam η ημερήσια τροφοδοσία του υδροφορέα θα αντιστοιχεί στην τιμή 0,00012m/day, ενώ στην περίπτωση που ως επικρατέστερος τύπος θεωρηθεί ο Sandy Clay Loam, η τιμή αυτή θα ανέρχεται στα 0,0002m/day. Αρχικά εισάγεται η τιμή 0,00012 m/day για την τροφοδοσία του υδροφορέα.

Από την εντολή *models/Modflow/flow packages/recharge* ορίζουμε την τιμή της τροφοδοσίας.

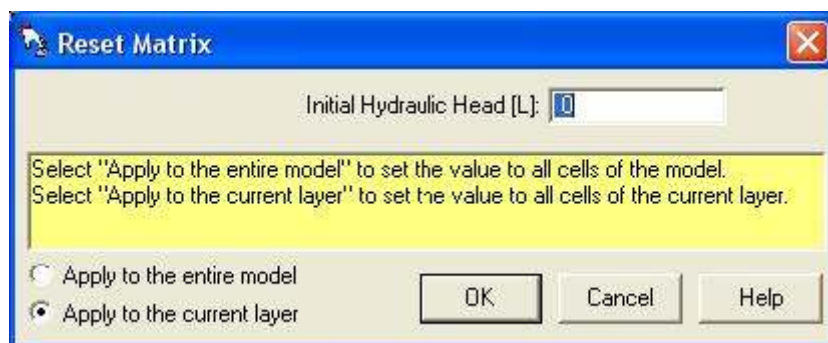


Εικόνα 8.14: Εισαγωγή τροφοδοσίας υδροφορέα

8.3.6 Αρχικές συνθήκες (Initial conditions)

Με τον όρο αρχικές συνθήκες εννοούνται τιμές υδραυλικών φορτίων, στην περίπτωση όμως που εξετάζουμε τιμές δυναμικού, για κάθε ενεργό κελί και για κάθε κελί σταθερού φορτίου, οι οποίες καθορίζονται για κάποια ορισμένη χρονική στιγμή – αφετηρία. Έτσι λοιπόν δόθηκε ως αρχική συνθήκη, τιμή δυναμικού μηδέν $\phi = 0$, σε όλα τα κελιά σταθερού φορτίου της θάλασσας αλλά και στα ενεργά κελιά του υδροφορέα.

Από την επιλογή *Initial & Prescribed Hydraulic Heads* δίνουμε την τιμή του δυναμικού που επιθυμούμε.



Εικόνα 8.15: Ορισμός της τιμής του δυναμικού

8.3.7 Εκτέλεση (Run)

Όταν εκτελέσουμε την εφαρμογή του μοντέλου παράγεται πλήθος αρχείων δεδομένων (data files ή .dat), εισόδου (input data files) και εξόδου (output data files).

Ως αρχεία εισόδου χαρακτηρίζονται τα:

- bas.dat (basic package) : αρχικές και οριακές συνθήκες
- bcf.dat (block centered flow package) : διαστάσεις κελιών και παράμετροι υδροφορέα
- oc.dat (output control package)
- pcg2.dat (preconditioned conjugate gradient 2 package)
- rch.dat (recharge package) : τροφοδοσία υδροφορέα

Ενώ ως αρχεία εξόδου χαρακτηρίζονται τα:

- 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

Τελικά το αρχείο heads.dat, περιλαμβάνει τις υπολογισμένες τιμές δυναμικού ϕ και αποτελεί αυτό που θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια για την εκτίμηση της θέσης της αλάτινης σφήνας, που θα πραγματοποιηθεί με τη βοήθεια του προγράμματος Matlab.

8.3.8 Εξαγόμενα προσομοίωσης

Με τη βοήθεια του προγράμματος Matlab μετατρέπονται οι υπολογισμένες τιμές δυναμικού ϕ στις αντίστοιχες τιμές του υδραυλικού φορτίου με βάση τις εξισώσεις που αντιστοιχούν στις δύο ζώνες του υδροφορέα. Για τη ζώνη 1 που αφορά το τμήμα στο εσωτερικό του υδροφορέα ισχύει

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

ενώ για τη ζώνη 2 που αφορά το εξωτερικό τμήμα του υδροφορέα ισχύει

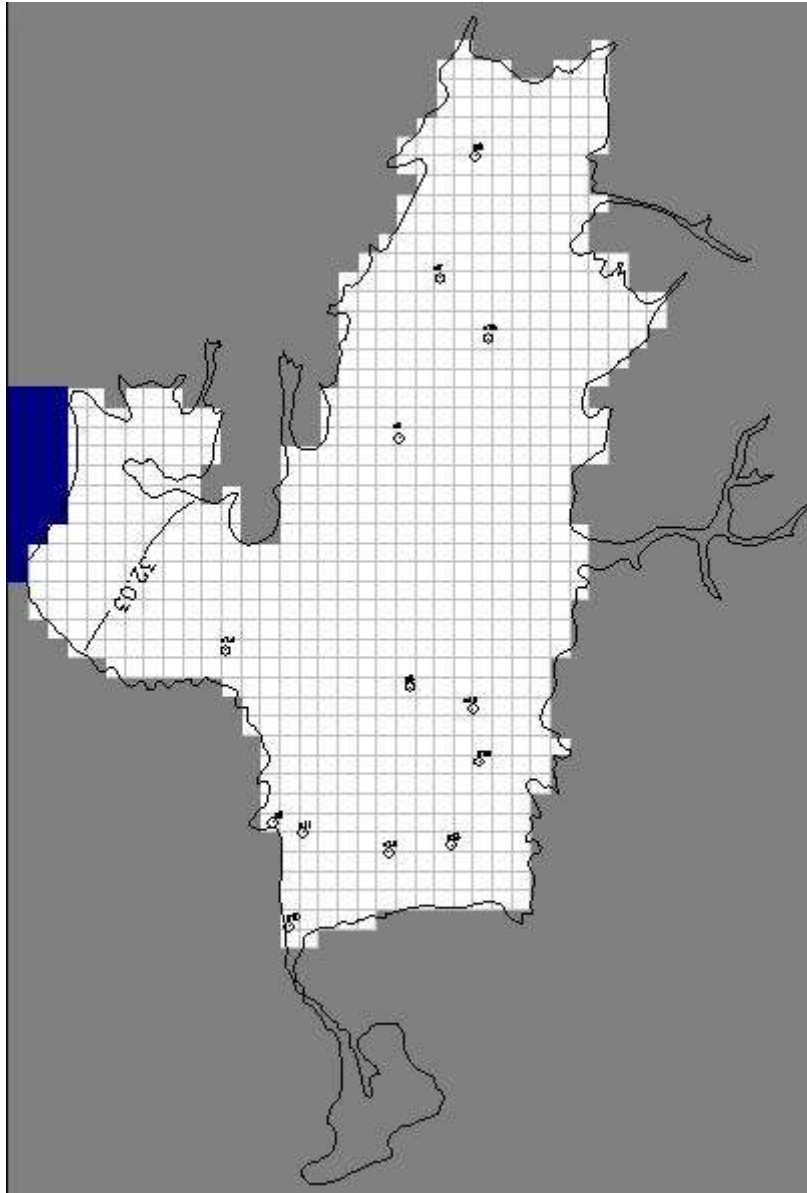
$$\phi = \frac{(1+\delta)}{2\delta} \cdot (h_f - d)^2 \Rightarrow h_f = \sqrt{\frac{2\delta}{(1+\delta)}\phi} + d$$

Οι δύο ζώνες οριοθετούνται από τη θέση της αλάτινης σφήνας το δυναμικό στο πόδι της οποίας υπολογίζεται από τη σχέση

$$\phi = \frac{(1+\delta)}{2\delta} \cdot d^2$$

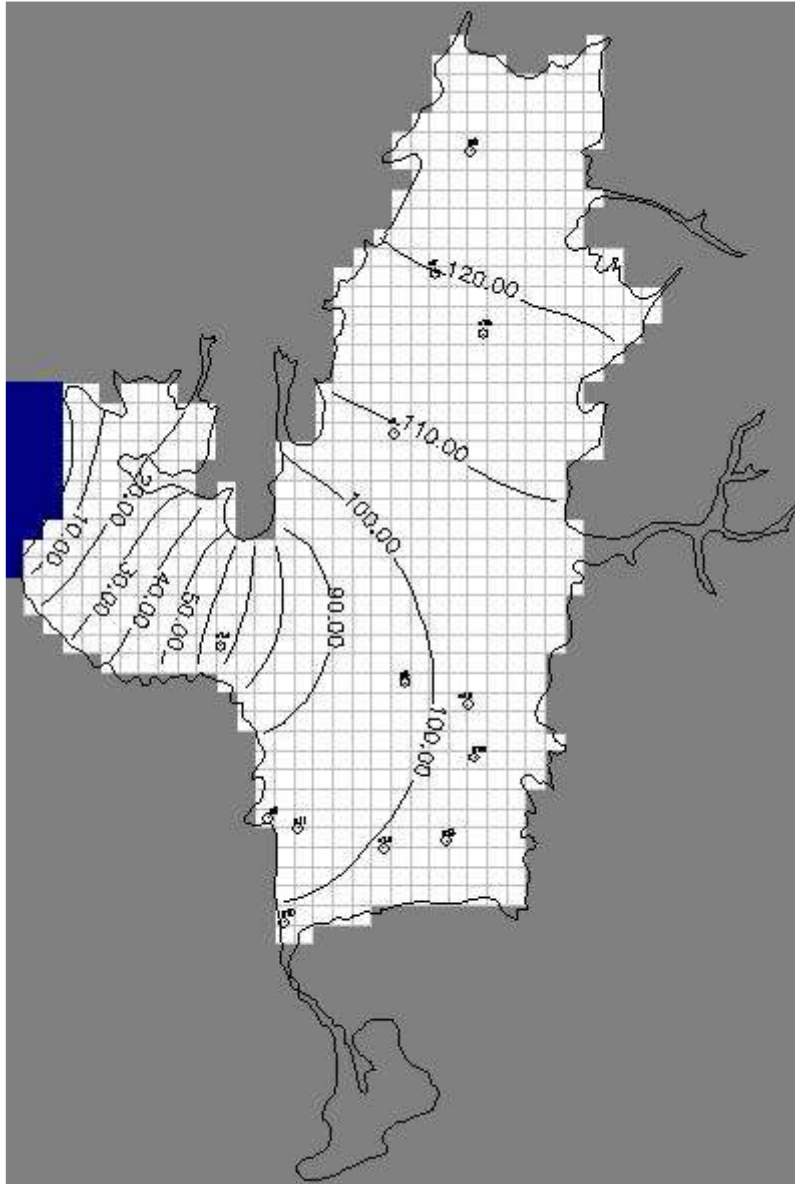
και που για $d=50\text{m}$ παίρνει την τιμή $\phi = 32.03$

Αρχικά η προσομοίωση του υδροφορέα έγινε χωρίς στοιχεία άντλησης από τα φρέατα και τις γεωτρήσεις που υπάρχουν στην περιοχή του υδροφορέα, λόγω έλλειψης των δεδομένων αυτών. Χρησιμοποιώντας επομένως τα διαθέσιμα στοιχεία η θέση της αλάτινης σφήνας εμφανίζεται κοντά στην ακτογραμμή, όπως απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 8.16: Θέση αλάτινης σφήνας σε κατάσταση ισορροπίας στον υδροφόρα

Αντίστοιχα οι ισοδυναμικές καμπύλες θα παρουσιάζονται με την παρακάτω μορφή

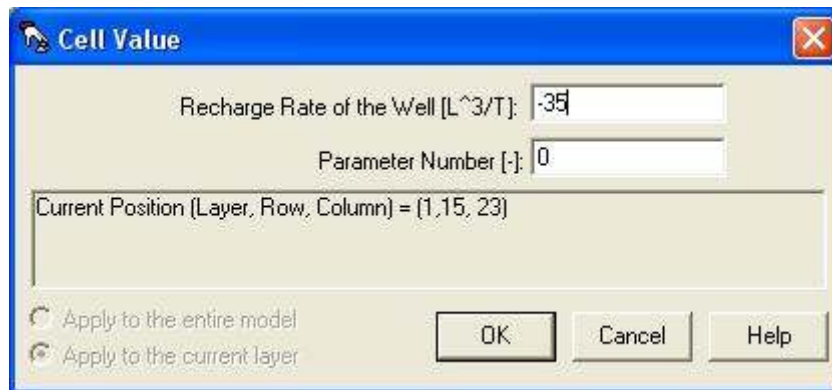


Εικόνα 8.17: Ισοδυναμικές καμπύλες μετά την προσομοίωση χωρίς δεδομένα αντλήσεων

8.3.9 Εισαγωγή φρεάτων άντλησης

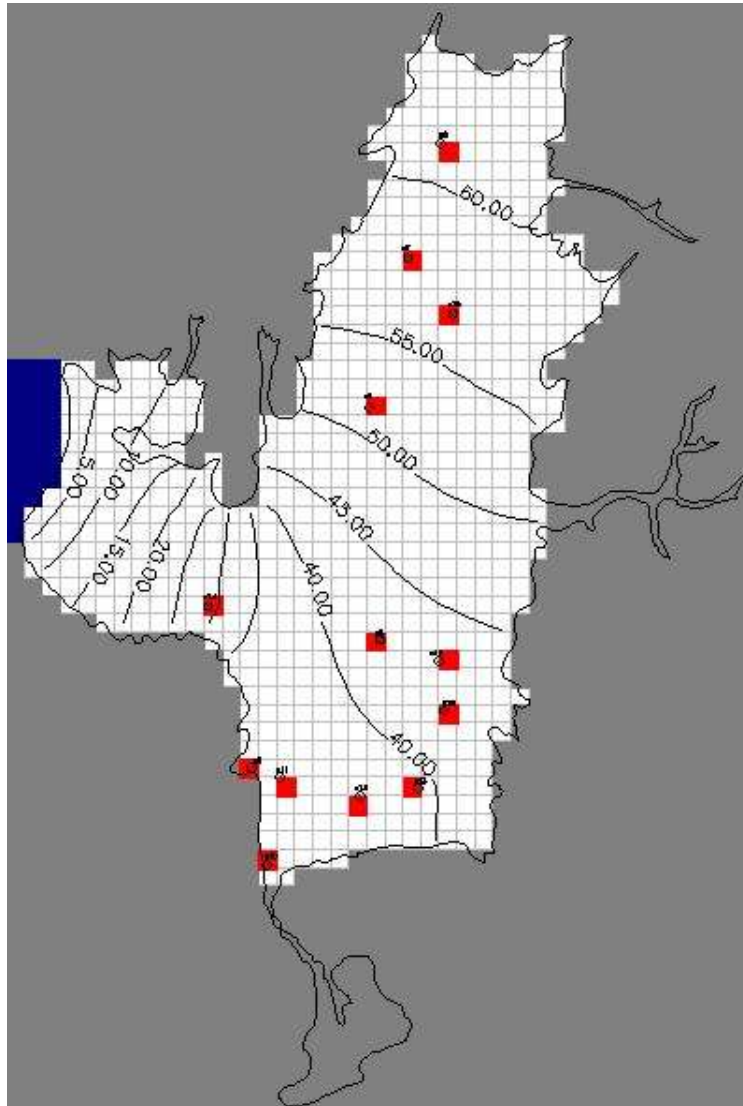
Αν θεωρηθεί πως σε περιόδους υψηλής ζήτησης νερού, πως αντλείται το 50% του συνολικού υδατικού αποθέματος που εισρέει στον υδροφόρα τότε αυτό αντιστοιχεί σε περίπου 168500 m^3 , εφόσον το συνολικό ποσό αγγίζει τα 337000 m^3 ετησίως. Βέβαια αυτά τα ποσά αντιστοιχούν σε δυσμενείς για τον υδροφόρα συνθήκες άντλησης, αφού τους χειμερινούς μήνες το ποσοστό άντλησης είναι αρκετά κάτω από το 50%.

Με επιπλέον δεδομένο ότι στην περιοχή του υδροφορέα υπάρχουν 7 γεωτρήσεις και 6 φρέατα άντλησης, θεωρείται πως σε κάθε ένα από αυτά αντιστοιχεί μια παροχή άντλησης της τάξης των 35 m^3 ανά ημέρα. Η τιμή αυτή εισάγεται στο περιβάλλον του προγράμματος από την εντολή *Models / MODFLOW / Flow Packages/ Well*, όπου επιλέγεται το κελί στο οποίο βρίσκεται το πηγάδι ή η γεώτρηση και αντιστοιχίζεται η τιμή των 35 m^3 , η οποία εισάγεται με αρνητικό πρόσημο, αφού το ποσό αυτό αφαιρείται από το υδατικό απόθεμα του υδροφορέα.



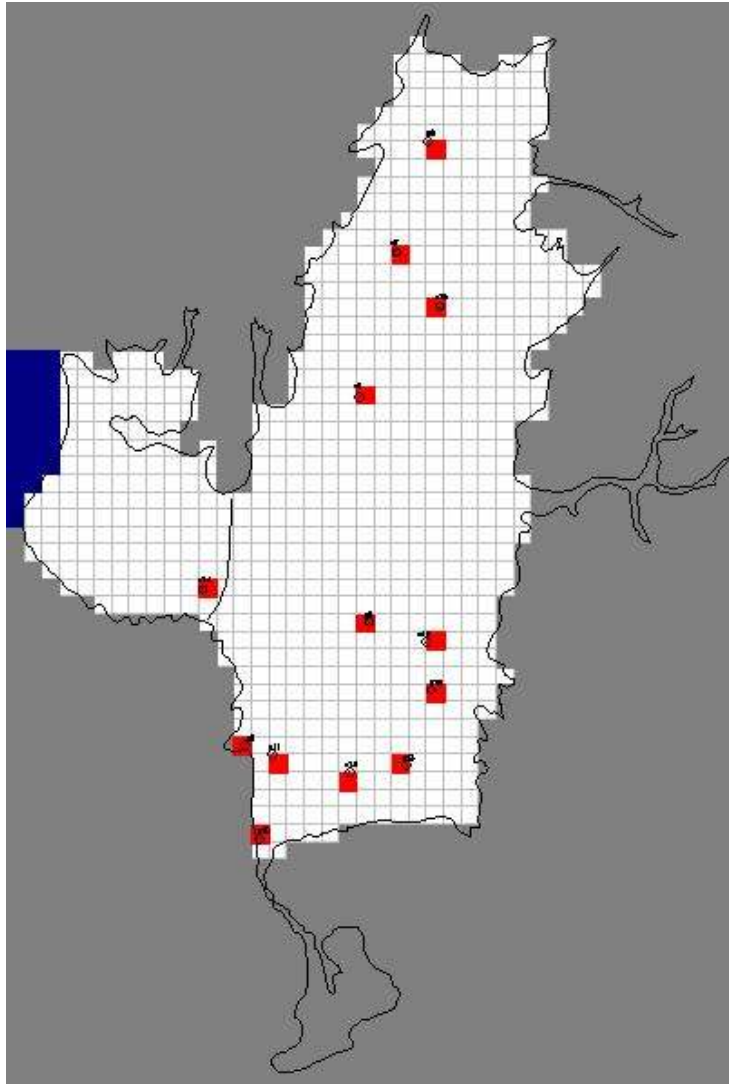
Εικόνα 8.18: Εισαγωγή παροχών άντλησης

Μετά από τον ορισμό των τιμών αυτών εκτελούμε πάλι την εντολή *Run* για να υπολογίσουμε τις καινούριες ισοδυναμικές καμπύλες, αλλά κυρίως την μετακίνηση της αλάτινης σφήνας. Στα παρακάτω σχήματα, όπου τα κόκκινα κελιά αντιπροσωπεύουν τις θέσεις των γεωτρήσεων και των φρεάτων άντλησης, εμφανίζονται γραφικά στο περιβάλλον του προγράμματος τα αποτελέσματα αυτά.



Εικόνα 8.19: Ισοδυναμικές καμπύλες μετά την προσομοίωση με παροχές αντλήσεων

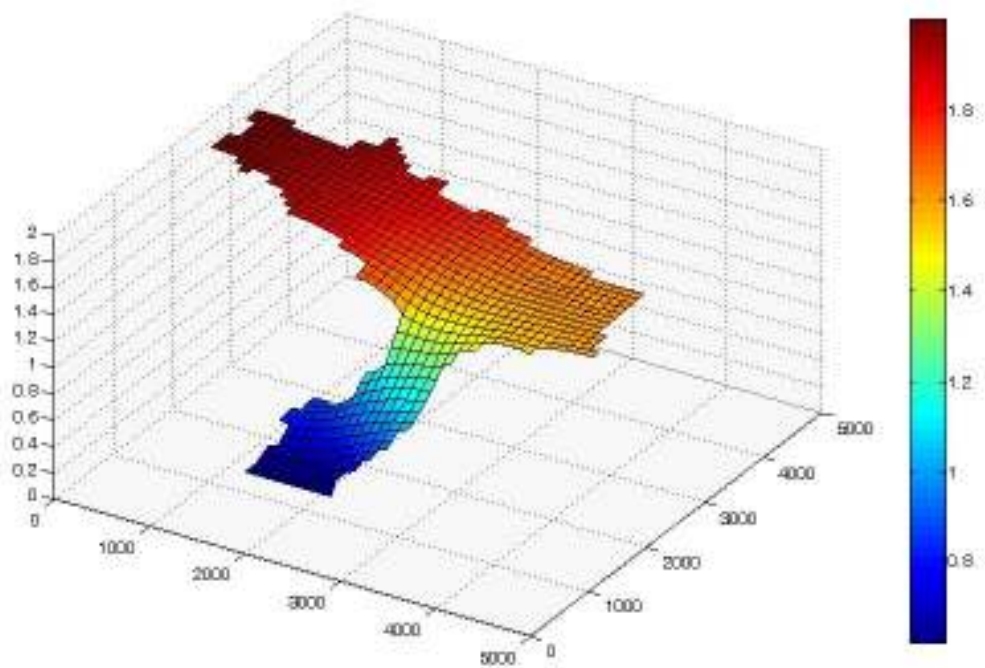
Όπως φαίνεται και από την εικόνα που ακολουθεί, η αλάτινη σφήνα εμφανίζεται στην περιοχή εκείνη που υπάρχουν αρνητικές τιμές του υδραυλικού φορτίου, όπως αυτές προέκυψαν στο κεφάλαιο 4, αποτέλεσμα που κρίνεται λογικό.



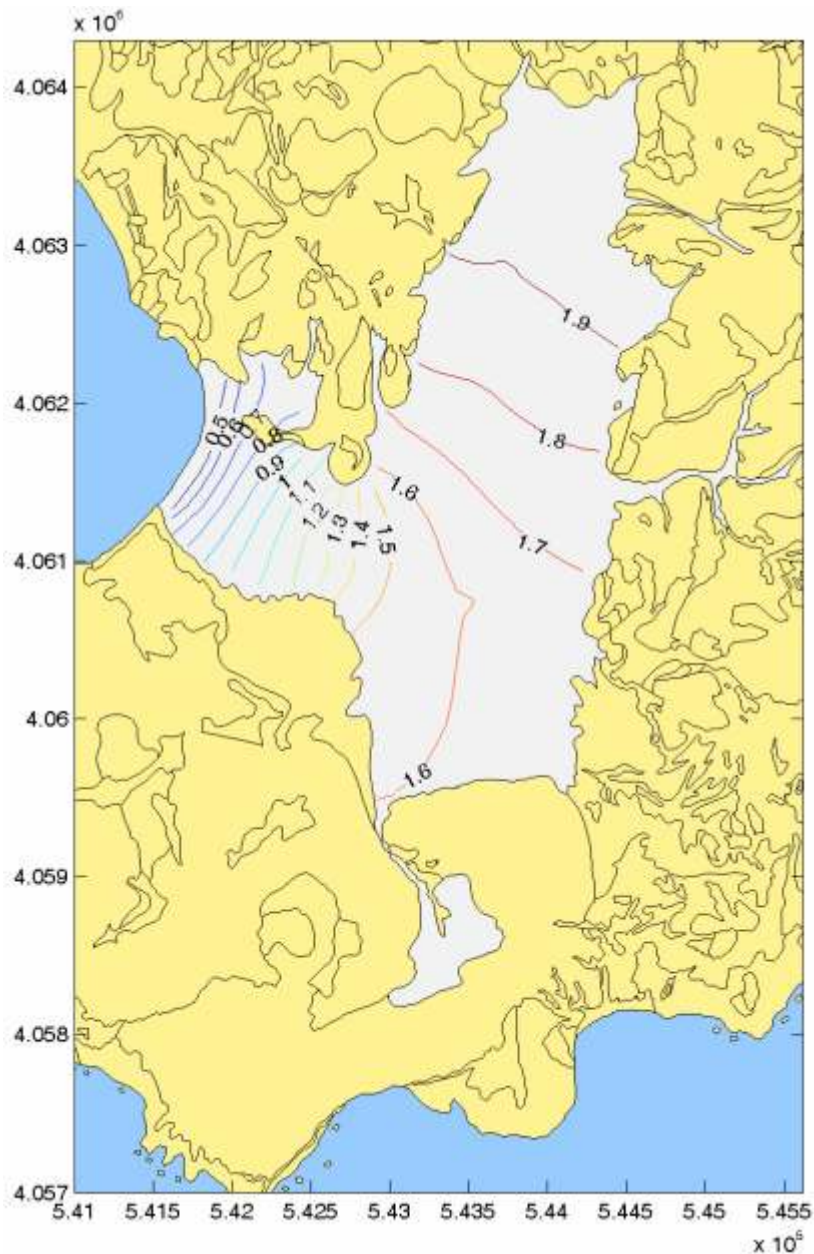
Εικόνα 8.20: Θέση αλάτινης σφήνας μετά την προσομοίωση με παροχές αντλήσεων

Είναι εμφανές πως επηρεάζουν τις τιμές του δυναμικού οι παροχές αντλήσεων, καθώς και την κατανομή των ισοδυναμικών καμπύλων στο χώρο. Όπως παρατηρούμε είναι φανερή η μετακίνηση της αλάτινης σφήνας προς το εσωτερικό του υδροφορέα, σε σχέση με τη θέση που είχε σε κατάσταση ισορροπίας. Όπως παρατηρείται, το ποσοστό του 50% της συνολικής κατείδυσης που χρησιμοποιήθηκε ως παροχή άντλησης, αποδεικνύεται κρίσιμο, αφού η αλάτινη σφήνα εισέρχεται στο εσωτερικό του υδροφορέα. Στην περιοχή του υδροφορέα που υφαλμυρώνεται βρίσκεται το φρέαρ Φ14, από το οποίο πλέον είναι πολύ πιθανό να αντληθούν υφάλμυρες ποσότητες νερού.

Κατόπιν, με την ίδια λογική που χρησιμοποιήθηκε στην εφαρμογή της προσομοίωσης χωρίς παροχές άντλησης, με τη βοήθεια του προγράμματος Matlab μετατρέπονται οι υπολογισμένες τιμές δυναμικού ϕ στις αντίστοιχες τιμές του υδραυλικού φορτίου με βάση τις εξισώσεις που αντιστοιχούν στις δύο ζώνες του υδροφορέα. Το αποτέλεσμα παρουσιάζεται γραφικά στο παρακάτω σχήμα.



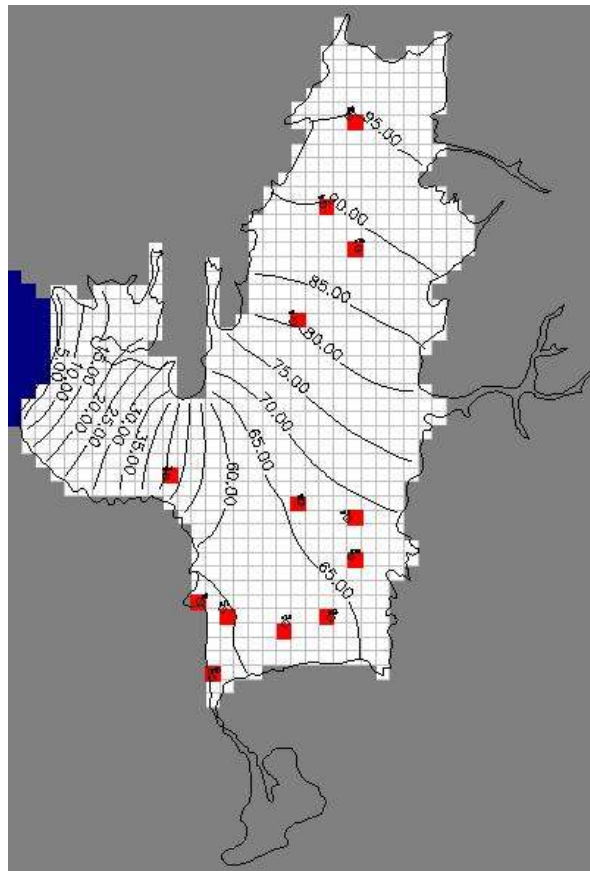
Εικόνα 8.21: Τρισδιάστατη απεικόνιση τιμών υδραυλικού φορτίου h_f σε όλη την έκταση του υδροφορέα μελέτης (Σενέριο 1)



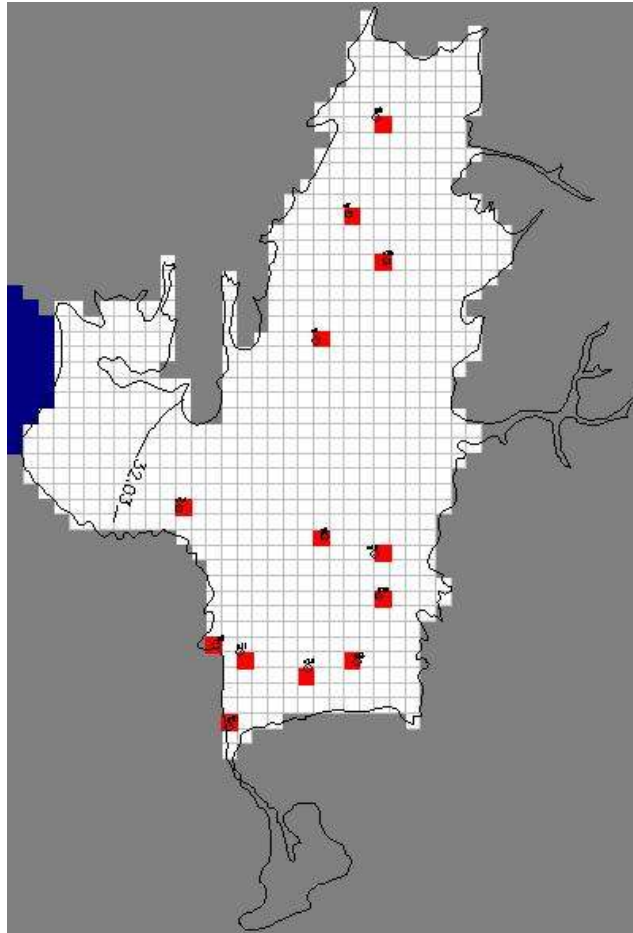
Εικόνα 8.22: Δισδιάστατη απεικόνιση τιμών υδραυλικού φορτίου h_f σε όλη την έκταση του υδροφορέα μελέτης (Σενάριο 1)

Όπως παρατηρούμε οι τιμές του υδραυλικού φορτίου προσομοιώνονται ικανοποιητικά στο μεγαλύτερο μέρος του υδροφορέα, όχι όμως και στο παράκτιο τμήμα του, όπου οι τιμές του υδραυλικού φορτίου θα έπρεπε να είναι αρκετά μικρότερες. Η αστοχία αυτή πιθανώς να οφείλεται στην απουσία πραγματικών δεδομένων άντλησης για κάθε γεώτρηση, καθώς επίσης και στην απουσία εργαστηριακών μετρήσεων της υδραυλικής αγωγιμότητας, η οποία απλώς εκτιμήθηκε στην παρούσα εργασία.

Στη συνέχεια με διαφορετική τιμή κατείδυσης που αντιστοιχεί σε 0,0002 m/day, και με νέα εκτίμηση της υδραυλικής αγωγιμότητας στα 17m/day (με τη μεθοδολογία trial and error), έγινε νέα προσπάθεια προσομοίωσης του υδροφορέα. Σε αυτήν την προσπάθεια οι παροχές αντλήσεως αυξήθηκαν από 35 σε 55m³ ανά ημέρα, αφού το ποσό του νερού που αποθηκεύεται στον υδροφορέα είναι μεγαλύτερο λόγω της μεγαλύτερης τιμής της κατείδυσης. Με βάση τα παραπάνω δεδομένα υπολογίσθηκαν οι ισοδυναμικές γραμμές και η θέση της αλάτινης σφήνας, με τη μεθοδολογία που περιγράφηκε πιο πάνω.

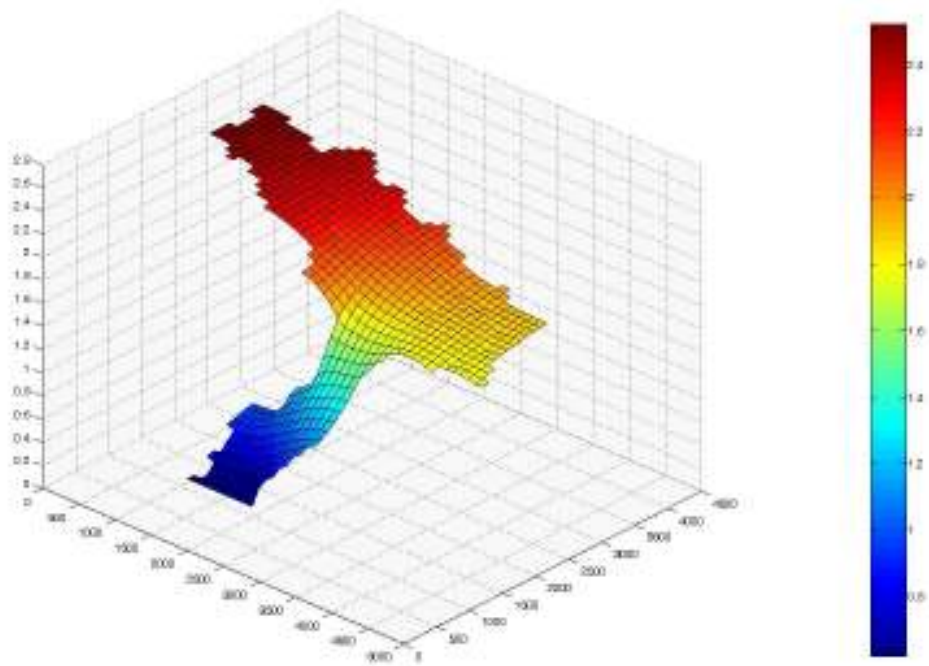


Εικόνα 8.23: Ισοδυναμικές γραμμές για τιμή κατείδυσης 0,0002m³/day και παροχής άντλησης 55m³/day για κάθε φρεάτιο άντλησης

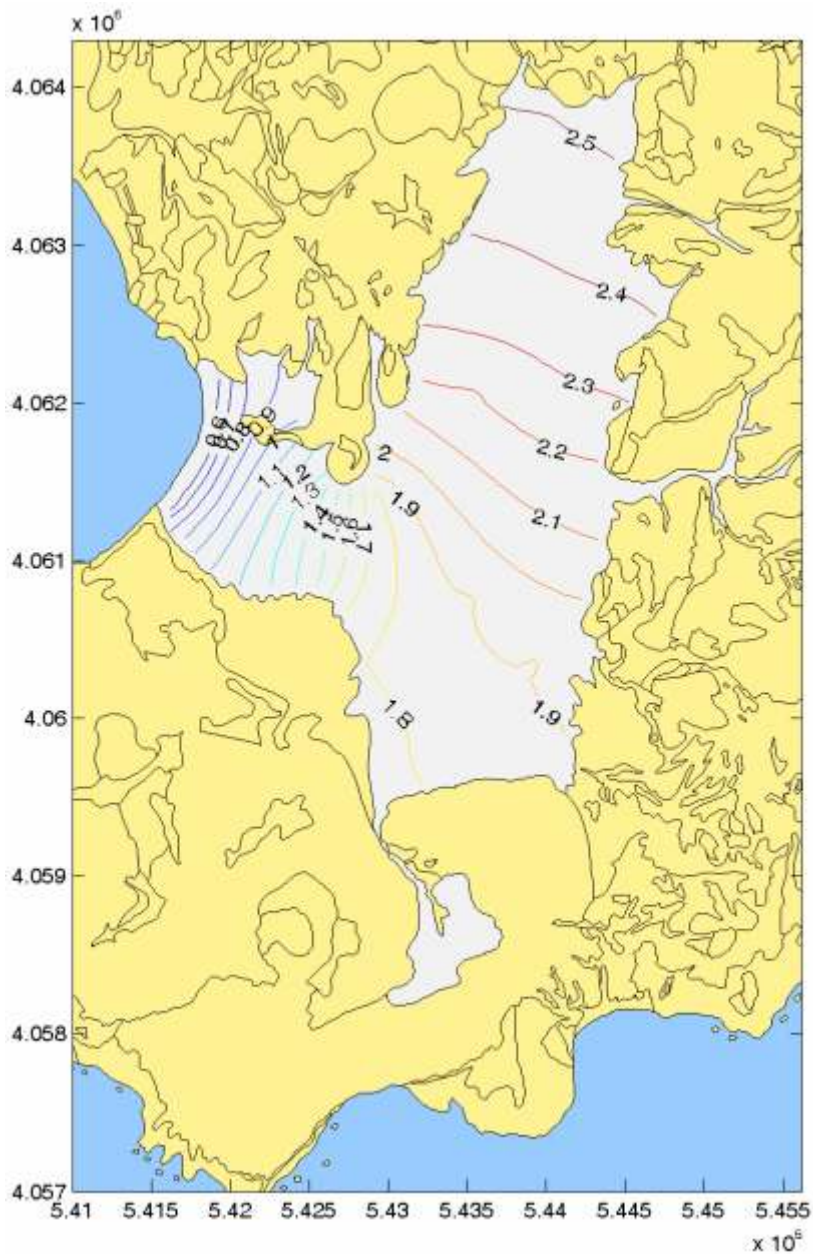


Εικόνα 8.24: Θέση αλάτινης σφήνας για τιμή κατείδυσης $0,0002\text{m}^3/\text{day}$ και παροχής άντλησης $55\text{m}^3/\text{day}$ για κάθε φρεάτιο άντλησης

Όπως φαίνεται από τα σχήματα αυτά, για μεγαλύτερες τιμές κατείδυσης η θέση της αλάτινης σφήνας εισέρχεται λιγότερο στο εσωτερικό του υδροφορέα και εντοπίζεται 200m περίπου από το φρέαρ Φ14. Η περίπτωση αυτή είναι σαφώς πιο ευνοϊκή, αφού λόγω της μεγαλύτερης τροφοδοσίας του υδροφορέα διατηρούνται πιο υψηλές τιμές δυναμικού και το πόδι της αλάτινης σφήνας περιορίζεται σε ανεκτό, σε ότι αφορά την υφαλμύρωση του υδροφορέα, επίπεδο, κάτι που φαίνεται και από τις υψηλότερες τιμές του υδραυλικού φορτίου στο διάγραμμα που ακολουθεί.



Εικόνα 8.25: Τρισδιάστατη απεικόνιση τιμών υδραυλικού φορτίου h_f σε όλη την έκταση του υδροφορέα μελέτης (Σενέριο 2)



Εικόνα 8.26: Δισδιάστατη απεικόνιση τιμών υδραυλικού φορτίου h_1 σε όλη την έκταση του υδροφορέα μελέτης (Σενάριο 2)

Ο περιορισμός του ποσοστού υπαλμύρωσης σε δυσμενές συνθήκες άντλησης οφείλεται σε μεγάλο ποσοστό στη γεωμετρία του υδροφορέα και κυρίως στο γεγονός πως παρουσιάζει μικρό μέτωπο προς τη θάλασσα, με αποτέλεσμα να εμποδίζει μεγάλες ποσότητες θαλασσινού νερού να εισχωρήσουν στο εσωτερικό του υδροφορέα, εκεί όπου βρίσκονται τα περισσότερα φρέατα άντλησης και οι γεωτρήσεις.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κρίνονται ικανοποιητικά, διατηρώντας μια επιφύλαξη όσο αφορά τις υπολογισμένες μέσες στάθμες του υδραυλικού φορτίου, οι οποίες προσδιορίστηκαν με εκτίμηση των υψομέτρων των γεωτρήσεων από τους χάρτες της Γ.Υ.Σ. και ενδεχομένως να επηρέασαν την τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας. Σε γενικές γραμμές παρατηρείται υφαλμύρωση του υδροφορέα στα δυτικά που εκτείνεται από 500m έως και 1km από την ακτογραμμή, σε θερινές περιόδους και συνθήκες εντατικής άντλησης.

8.4 Εκτίμηση Αναγκών σε Νερό

Σύμφωνα με πρόσφατη μελέτη που πραγματοποιήθηκε από την Κοινοπραξία Υδατοσυστημάτων Αιγαίου, η νήσος Μήλος αντιμετωπίζει ελλειμματικότητα κυρίως σε ότι αφορά την ύδρευση. Το κύριο πρόβλημα εντοπίζεται στο ανατολικό τμήμα, όπου εντοπίζεται η περιοχή μελέτης μας, λόγω των αυξημένων απαιτήσεων. Οι εκτεταμένες αντλήσεις έχουν επιφέρει ως αποτέλεσμα την υφαλμύριση των υδροφορέων και ως εκ τούτου την ακαταλληλότητά τους για υδρευτική χρήση.

Πιο συγκεκριμένα, οι ανάγκες της νήσου διαχωρίζονται σε υδρευτικές, αρδευτικές, κτηνοτροφίας και βιομηχανίας. Οι ανάγκες της βιομηχανίας και κτηνοτροφίας ομαδοποιούνται με τις ανάγκες ύδρευσης, καθώς η εξυπηρέτησή τους γίνεται από το δίκτυο ύδρευσης. Οι αρδευτικές ανάγκες αποτελούν ανεξάρτητο κόμβο ζήτησης.

ΔΗΜΟΣ ΜΗΛΟΥ	
ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΑΝΑΓΚΩΝ	ΕΤΗΣΙΕΣ ΑΝΑΓΚΕΣ (m³)
ΥΔΡΕΥΣΗ	381480
ΚΤΗΝΟΤΡΟΦΙΑ	45817
ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ	11310
ΑΡΔΕΥΣΗ	628867
ΣΥΝΟΛΟ	1067474

Πίνακας 9.1: Ετήσιες ανάγκες σε νερό ανά κατηγορία για τη νήσο Μήλο (Στοιχεία από μελέτη Κ/Ξ Υδατοσυστημάτων Αιγαίου – Ι.Γ.Μ.Ε.)

Είναι προφανές πως πάνω από το 50% των συνολικών αντιστοιχεί στις αρδευτικές ανάγκες, ενώ μαζί με τις ανάγκες ύδρευσης το ποσοστό αυτό αγγίζει το 95%. Εδώ αξίζει να σημειωθεί πως οι ανάγκες ύδρευσης υπολογίζονται μαζί με τις εκτιμώμενες απώλειες του δικτύου, που φτάνουν σε ποσοστό το 30%. Οι εκτιμώμενες μέσες ετήσιες απολήψεις, οι μετρημένες καταναλώσεις και οι μεταφερόμενες ποσότητες σύμφωνα με τα διατιθέμενα στοιχεία των Δήμων της Μήλου δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

ΔΗΜΟΣ ΜΗΛΟΥ		
ΑΠΟΛΗΨΕΙΣ ΕΡΓΩΝ ΥΔΡΟΔΟΤΗΣΗΣ (m³)	ΜΕΤΡΗΜΕΝΕΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΕΙΣ ΥΔΡΕΥΣΗΣ (m³)	ΜΕΤΑΦΕΡΟΜΕΝΕΣ ΠΟΣΟΤΗΤΕΣ (m³)
345600	198106	159800

Πίνακας 9.2: Διαθέσιμα δεδομένα απολήψεων έργων υδροδότησης, κατανάλωσης ύδρευσης και μεταφερόμενων ποσοτήτων (Στοιχεία από μελέτη Κ/Ξ Υδατοσυστημάτων Αιγαίου – Ι.Γ.Μ.Ε.)

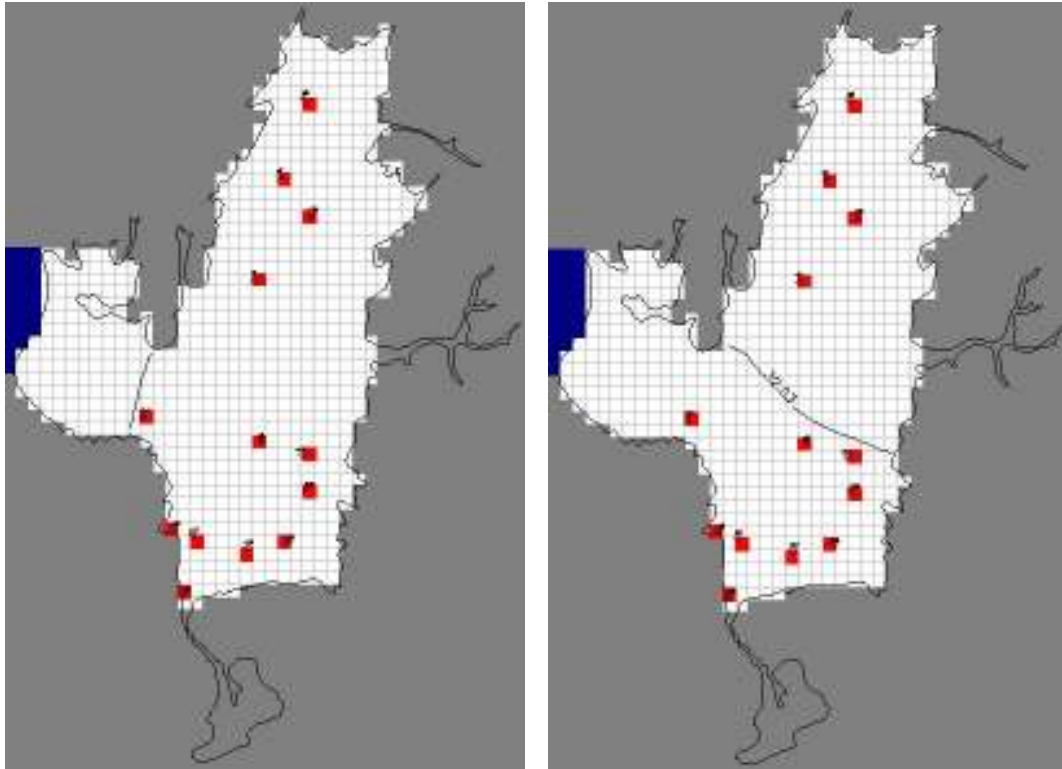
Η κάλυψη των αναγκών αυτών εξυπηρετείται κατά κύριο λόγο από τους υπόγειους υδροφορείς της νήσου. Η κατανομή της προσφοράς του υπόγειου υδροφορέα της προσχωματικής λεκάνης Ζεφυρίας που εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική εργασία, σύμφωνα πάντα με τα στοιχεία της μελέτης και την ανάλογη ζήτηση, θα πρέπει να καλύπτει το 6,1% των ετησίων αναγκών ύδρευσης και το 60% των αντίστοιχων αναγκών άρδευσης. Τα ποσοστά αυτά μεταφράζονται σε ένα συνολικό ποσό 400590m³ νερού ετησίως, 377320m³ για την άρδευση και 23270m³ για την ύδρευση.

Βέβαια το φυσικό σύστημα το οποίο εξετάζεται αδυνατεί να καλύψει τις ποσότητες αυτές, αφού η ετήσια τροφοδοσία του υδροφορέα έχει εκτιμηθεί στις 337000m³. Ακόμα και στο ευνοϊκό σενάριο που εξετάστηκε στο κεφάλαιο 5 όπου η ετήσια τιμή της τροφοδοσίας του υδροφορέα ανέρχεται στα 70,9m³ ανά ημέρα, το συνολικό ποσό αντιστοιχεί σε 555000m³ για όλη την έκτασή του. Οι τροφοδοσίες αυτές ωστόσο δεν είναι πλήρως εκμεταλλεύσιμες αφού μεγάλο μέρος των ποσών αυτών καταλήγουν στη θάλασσα και χάνονται.

Βάσει των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν στο παρών κεφάλαιο, για την προστασία και σωστή λειτουργία του υδροφορέα που εξετάζεται, και σύμφωνα με τα δεδομένα της μελέτης που παρουσιάστηκαν στην παρούσα παράγραφο, το φυσικό σύστημα πρέπει να ρυθμιστεί ώστε οι αντλήσεις να περιοριστούν σε ποσοστό 40 -50% της συνολικής ετήσιας κατείσδυσης, ώστε το θαλασσινό νερό να μην εισχωρήσει περαιτέρω στο εσωτερικό του υδροφορέα, όπου υπάρχουν οι περισσότερες γεωτρήσεις και φρέατα άντλησης και δημιουργηθούν δυσμενείς συνθήκες, πιθανότατα μη αναστρέψιμες. Επομένως οι ετήσιες αντλήσεις δεν θα πρέπει να υπερβαίνουν τα 160000m³ ετησίως. Αυτό σημαίνει πως ο υδροφορέας θα μπορεί να εξυπηρετεί περίπου το 50% των αναγκών σε ύδρευση και άρδευση. Το υπόλοιπο ποσοστό θα μπορεί να καλυφθεί από μεταφερόμενες ποσότητες νερού. Στη Μήλο μεταφέρονται από το 2001 ποσότητες ύδατος από το Λαύριο για την κάλυψη του ελλειμματικού ισοζυγίου.

ΕΤΟΣ	ΜΗΝΑΣ												ΣΥΝΟΛΟ
	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΙΑ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ	
2001			10520								16254		26774
2002	13800	10750	14800	11200	14950	18750	19700	18240	21980	17850	14700	12550	189090
2003	9210	8250	11200	15450	16550	2000	23500	17690	26220	17558	10492	8362	184482
2004	8300	6000	4260	11306	12368	22760	20330	18710	17560	16590	10816	10800	159800
2005	7966	5054	14050	20170	23562	29630							100432

Πίνακας 9.3: Μεταφερόμενες ποσότητες ύδατος σε m³ στη νήσο Μήλο για τα έτη 2001 – 2005
(Στοιχεία από μελέτη Κ/Ξ Υδατοσυστημάτων Αιγαίου – Ι.Γ.Μ.Ε.)



Εικόνα 8.27: Μετακίνηση αλάτινης σφήνας στον υδροφορέα για ποσοστά άντλησης 40 και 60% της ετήσιας κατεΐσδυσης

Από το παραπάνω σχήμα είναι προφανές πως ο υδροφορέας “αντέχει” παροχές άντλησης που αντιστοιχούν στο 40% της αντίστοιχης ετήσιας τροφοδοσίας και αντιστοιχούν σε 130000m^3 . Για τιμές που αγγίζουν το 60% (200000m^3) της ετήσιας κατεΐσδυσης φαίνεται καθαρά πως η αλάτινη σφήνα μετακινείται πολύ στο εσωτερικό του υδροφορέα και δημιουργείται μεγάλο πρόβλημα υφαλμύρωσης σε όλο το νότιο τμήμα του. Επομένως τέτοια ποσοστά εκμετάλλευσης των υδάτων του υδροφορέα είναι απαγορευτικά για την σωστή λειτουργία του φυσικού συστήματος. Η μεγάλη συγκέντρωση γεωτρήσεων και φρεάτων άντλησης στο νότιο τμήμα επιδεινώνουν σημαντικά την κατάσταση σε συνθήκες υπεράντλησης και αν ο υδροφορέας παρουσίαζε μεγαλύτερο μέτωπο ως προς τη θάλασσα, τότε πρακτικά θα είχε καταστραφεί αφού το θαλασσινό νερό θα εισχωρούσε με ακόμη μεγαλύτερη ευκολία στο εσωτερικό του.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

9.1 Συνοπτικά

Για τη διερεύνηση ενός υπόγειου και παράκτιου υδροφορέα με σκοπό τον υπολογισμό του υδατικού ισοζυγίου του και τη συμπεριφορά του σε συνθήκες υπεράντλησης των υδατικών αποθεμάτων του, χρειάζεται μια σειρά εργασιών και εφαρμογή επιστημονικών μεθόδων που θα προσομοιώσουν διάφορα σενάρια για τον υπό μελέτη υδροφορέα. Αρχικά ωστόσο θα πρέπει να γνωρίζουμε τον ίδιο τον υδροφορέα και κατ' επέκταση την ευρύτερη περιοχή μελέτης.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία η περιοχή μελέτης είναι ο υπόγειος και παράκτιος φρεάτιος υδροφορέας της νήσου Μήλου, που εκτείνεται σε μια περιοχή 7,8 km² κεντρικά του νησιού και περιβάλλεται από πρακτικά αδιαπέρατους σχηματισμούς. Η νήσος Μήλος ανήκει στο νησιωτικό σύμπλεγμα των Κυκλάδων και βρίσκεται νοτιοδυτικά αυτού, 120 km ανατολικά των λακωνικών ακτών με κλίμα ήπιο μεσογειακό, με λίγες βροχοπτώσεις και αρκετούς ανέμους.

Όπως και τα περισσότερα νησιά των Κυκλάδων, έτσι και η Μήλος είναι ξερή και άγονη γενικά και για το λόγο αυτό η ενασχόληση με τη γεωργία είναι αρκετά περιορισμένη. Έτσι κατά τους χειμερινούς μήνες οι απαιτούμενες ποσότητες νερού είναι μικρές και επαρκούν για τις ανάγκες των κατοίκων. Τους θερινούς μήνες ωστόσο το νησί κατακλύζεται από παραθεριστές και οι απαιτήσεις σε νερό αυξάνονται κατακόρυφα.

Η Μήλος είναι γνωστή από την αρχαιότητα κυρίως για την ηφαιστειακή δραστηριότητά της, η οποία έπαψε να υφίσταται όμως αρκετούς αιώνες πριν. Η ηφαιστειακή αυτή δράση έχει μείνει χαραγμένη στο έδαφος και υπέδαφος της νήσου, αφού σχεδόν εξολοκλήρου η γεωλογική της σύσταση αποτελείται από ηφαιστειακούς σχηματισμούς, όπως οι τοφφίτες. Εκτός από ηφαιστειακά

πετρώματα ωστόσο, στη Μήλο συναντάμε και πολλά ιζηματογενή. Γενικά, στη γεωλογική διαμόρφωση της νήσου Μήλου συμβάλλουν σειρές γεωλογικών σχηματισμών που απαντώνται σε τρεις διαφορετικές γεωλογικές περιόδους, το Τεταρτογενές, όπου συναντούμε και τους περισσότερους ηφαιστειακούς σχηματισμούς, το Νεογενές και το Μεσοζωικό.

Με βάση τη λιθολογική και υδρογεωλογική σύσταση της νήσου Μήλου, έγινε και η πλευρική οριοθέτηση του υδροφορέα ο οποίος εδαφικά αποτελείται από αλλουβιακές και παράκτιες αποθέσεις. Η ακριβής εδαφική σύσταση ωστόσο δεν ήταν αρκούντως γνωστή, με αποτέλεσμα να γίνουν διάφορες υποθέσεις έως ότου καταλήξουμε στον πιθανότερο εδαφικό τύπο.

Με την επεξεργασία των απαραίτητων μετρητικών δεδομένων, που παραχωρήθηκαν από το Ι.Γ.Μ.Ε., κατέστη δυνατός ο υπολογισμός της πιεζομετρίας της περιοχής ενδιαφέροντος, και η κατασκευή του αντίστοιχου πιεζομετρικού χάρτη.

Επίσης, κατόπιν συλλογής των απαραίτητων μετεωρολογικών δεδομένων που καταγράφηκαν από τον μετεωρολογικό σταθμό της Μήλου και παραχωρήθηκαν από την Ε.Μ.Υ. για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας, κατέστη δυνατή η εκτίμηση του υδατικού ισοζυγίου.

Τα παραπάνω δεδομένα, σε συνδυασμό με την εκτίμηση των υδραυλικών παραμέτρων του υδροφορέα, χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωσή του, η οποία πραγματοποιήθηκε με τη χρήση αντίστοιχων μοντέλων και τη βοήθεια κατάλληλου λογισμικού. Βέβαια, όπως αναφέρθηκε, πολλά από τα απαιτούμενα δεδομένα απλώς εκτιμήθηκαν, καθώς ήταν αδύνατον να μετρηθούν ή να υπολογισθούν, λόγω ελλειμματικών δεδομένων.

9.2 Συμπεράσματα

9.2.1 Συμπεράσματα από την πιεζομετρία του υδροφορέα

Στην περιοχή του υδροφορέα υπάρχουν έξι φρέατα άντλησης και επτά γεωτρήσεις. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός πως μόνο σε τέσσερις από τις επτά γεωτρήσεις παρουσιάζεται αρνητικό μέσο υδραυλικό φορτίο, σε σχέση με την επιφάνεια της θάλασσας. Τα έξι φρέατα άντλησης βρίσκονται σταθερά πάνω από το επίπεδο της θάλασσας με τιμές από 3,86m έως 10,70m.

9.2.2 Συμπεράσματα από την εκτίμηση του υδατικού ισοζυγίου

Η εκτίμηση του υδατικού ισοζυγίου πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια της εμπειρικής μεθόδου Thornthwaite – Mather και με τη χρήση του υπολογιστικού μοντέλου CLASS U3M-1. Για τον υπολογισμό του υδατικού ισοζυγίου με χρήση της εμπειρικής μεθόδου Thornthwaite – Mather, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα δυνητικής εξατμισοδιαπνοής που υπολογίσθηκαν με τη μέθοδο Thornthwaite και την αντίστοιχη του Hargreaves, τα οποία προέκυψαν με τη βοήθεια του λογισμικού “Υδρογνώμων”. Από τα αποτελέσματα της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής, παρατηρούμε μεγάλες διαφορές μεταξύ των δύο μεθόδων, αφού η μέθοδος Hargreaves έδωσε σχεδόν διπλάσια τιμή από την αντίστοιχη της μεθόδου Thornthwaite (1674mm έναντι 883mm ανά έτος). Μεταξύ των δύο μεθόδων αυτή του Hargreaves συνήθως δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα με ένα σφάλμα της τάξης του 10 με 15%. Η μέθοδος Thornthwaite είναι πιο παλιά και έχει εφαρμοσθεί κατά κόρον, όμως δεν θεωρείται γενικά τόσο αξιόπιστη.

Με επιπλέον δεδομένα τη διαθέσιμη υδατοϊκανότητα της εδαφικής κατατομής (σε mm), τις μηνιαίες τιμές ύψους βροχής (σε mm), την επιφανειακή απορροή (%) και το συντελεστή βλάστησης (Kc), έγινε η εκτίμηση του υδατικού ισοζυγίου. Εδώ αξίζει να σημειωθεί πως λόγω έλλειψης των συγκεκριμένων

στοιχείων, η επιφανειακή απορροή θεωρήθηκε το 10% της αντίστοιχης βροχόπτωσης και ο συντελεστής βλάστησης εκτιμήθηκε με την τιμή 0,35.

Οι διαφορές των δύο μεθόδων ήταν παραπάνω από εμφανείς, αφού χρησιμοποιώντας τα εξαγόμενα αποτελέσματα της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής κατά Hargreaves, προέκυψε τιμή 53,8mm για την κατείσδυση και 360,5mm για την πραγματική εξατμισοδιαπνοή, ενώ με δεδομένα δυνητικής εξατμισοδιαπνοής κατά Thornthwaite, οι τιμές αυτές υπολογίσθηκαν 189,4mm και 226mm για την κατείσδυση και πραγματική εξατμισοδιαπνοή αντίστοιχα.

Η τιμή της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής ωστόσο υπολογίσθηκε και με τις μεθόδους Penmann και Penmann – Monteith, που χρησιμοποιούν συνδυασμό εξισώσεων και υπολογισμούς πληθώρας παραμέτρων. Γενικά οι μέθοδοι αυτοί είναι πιο επίπονες και χρονοβόρες, αλλά προσφέρουν καλύτερα αποτελέσματα.

Χρησιμοποιώντας τις ημερήσιες τιμές των διαθέσιμων μετεωρολογικών δεδομένων (βροχόπτωση, θερμοκρασία, ταχύτητα ανέμου, σχετική υγρασία και ηλιακή ακτινοβολία) και με τη βοήθεια των εξισώσεων Penmann υπολογίσθηκε η τιμή της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής στα 1653,5mm ανά έτος. Με τη βοήθεια των εξισώσεων Penmann – Monteith η τιμή αυτή ανέρχεται στα 1556,2mm ανά έτος.

Μετά τη σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτών παρατηρούμε πως η μοναδική που αποκλίνει είναι η Thornthwaite, αφού οι μέθοδοι Penmann, Penmann – Monteith και Hargreaves, υπολογίζουν παραπλήσιες τιμές της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής. Η μέθοδος Hargreaves γενικά υπερεκτιμά την τιμή της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής, ενώ οι μέθοδοι Penmann και Penmann – Monteith θεωρούνται γενικά οι πιο έγκυρες και αξιόπιστες αφού χρησιμοποιούν τις εξισώσεις μεταφοράς και ενεργειακού ισοζυγίου. Ωστόσο λόγω της καλύτερης περιγραφής του φαινομένου της εξατμισοδιαπνοής, η μέθοδος Penmann – Monteith θεωρείται ακριβέστερη και για το λόγο αυτό τα αποτελέσματά της επιλέχθηκαν για την συνέχεια της εργασίας.

Παρά ταύτα η παραπάνω σύγκριση μόνο ενδεικτική μπορεί να είναι και όχι ουσιαστική, διότι πρόκειται για τον υπολογισμό τιμών δυνητικής εξατμισοδιαπνοής με τη χρήση δύο μεθόδων που χρησιμοποιούν διαφορετικά εργαλεία. Η υπολογιστική μέθοδος που εφαρμόστηκε είχε σκοπό να δώσει μια πληρέστερη εικόνα της λειτουργίας του μηχανισμού της τροφοδοσίας του υδροφορέα και όχι επί της ουσίας να συγκριθεί με την εμπειρική μέθοδο. Οι λόγοι για την απόκλιση των δύο μεθόδων είναι εμφανής καθώς η υπολογιστική μέθοδος λαμβάνει υπόψη της ημερήσια δεδομένα και για το λόγο αυτό είναι πιο λεπτομερής και πιο ακριβής από την εμπειρική μέθοδο, που χρειάζεται μηνιαίες τιμές και ελάχιστες παραμέτρους για το σύστημα του υδροφορέα.

Στη συνέχεια εκτιμήθηκε το υδατικό ισοζύγιο με τη χρήση του μοντέλου *CLASS* χρησιμοποιώντας τα δεδομένα των ημερήσιων τιμών της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής, όπως αυτά υπολογίσθηκαν με τη μέθοδο Penmann – Monteith. Το μοντέλο χρησιμοποιεί την εξίσωση Richards και ημερήσιο χρονικό βήμα, προσομοιώνοντας τις διάφορες διακυμάνσεις που παρουσιάζουν οι διάφορες συνιστώσες του, έτσι ώστε τα σφάλματα κατά την εκτίμηση αυτή, να ποσοτικοποιούνται και να περιγράφονται με απλές αριθμητικές προσεγγίσεις.

Ο καθορισμός των παραμέτρων και η διάκριση του εδαφικού προφίλ είναι μερικά από τα κυριότερα χαρακτηριστικά που εισάγονται στο περιβάλλον του προγράμματος. Για την εδαφική σύσταση του υδροφορέα έγιναν διαφορετικές εκτιμήσεις και προσομοιώθηκαν διαφορετικά σενάρια, λόγω έλλειψης περαιτέρω στοιχείων. Έτσι χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις διαφορετικοί τύποι εδάφους που θεωρήθηκε ότι είναι πιο πιθανοί για τον συγκεκριμένο τύπο υδροφορέα, αμμοπηλώδες (*Sandy Loam*), ιλλυοπηλώδες (*Silty Loam*), αμμώδες – πηλώδες – αργιλώδες σε ίση ποσοστιαία σύσταση (*Sandy Clay Loam*) και ιλλυώδες – αργιλώδες – πηλώδες σε ίση ποσοστιαία σύσταση (*Silty Clay Loam*).

Μετά τη διαδικασία προσομοίωσης υπολογίζονται οι διαφορετικές τιμές της κατείδυσης για τους διαφορετικούς τύπους εδάφους. Σύμφωνα με τα

αποτελέσματα, οι υψηλότερες τιμές κατείσδυσης παρουσιάζονται στους εδαφικούς τύπους Sandy Loam και Sandy Clay Loam και αγγίζουν τα 70,9mm και 115,5mm ετησίως. Αντίθετα οι χαμηλότερες τιμές αντιστοιχούν στους εδαφικούς τύπους Silty Loam (26,9mm/έτος) και Silty Clay Loam (42,9mm/έτος). Όπως ήταν αναμενόμενο οι υψηλότερες τιμές της κατείσδυσης παρουσιάζονται στα εδάφη με αμμώδη σύσταση, αφού η άμμος επιτρέπει ευκολότερα τη διήθηση του νερού σε σχέση με τα υπόλοιπα εδαφικά υλικά.

Με βάση τα δεδομένα της βροχόπτωσης ωστόσο, η οποία για τη νήσο Μήλο σύμφωνα με τα μετεωρολογικά δεδομένα ανέρχεται στα 416 mm ετησίως, η κατείσδυση θα πρέπει εμπειρικά να αντιστοιχεί σε ένα ποσοστό της τάξης του 10% αυτής. Κάνοντας αυτήν την εκτίμηση καταλήγουμε σε επικρατέστερο εδαφικό τύπο Silty Clay Loam που επιτρέπει να κατεισδύουν 42,9mm νερού ετησίως στον υδροφόρα, χωρίς ωστόσο με βεβαιότητα να μπορούν να απορριφθούν οι υπόλοιποι εδαφικοί τύποι.

Εδώ θα πρέπει να αναφερθεί πως στους υπολογισμούς δεν συμπεριλήφθηκαν και άλλες επιμέρους συνιστώσες του υδατικού ισοζυγίου, λόγω έλλειψης στοιχείων, όπως οι επιστρεφόμενες αρδευτικές ροές, οι διηθήσεις χειμαρρικών υδάτων, οι απώλειες αρδευτικών δικτύων και η εκροή του νερού προς τη θάλασσα αφού αποτελεί ένα δυναμικό φαινόμενο και λαμβάνει χώρα μόνο όταν και εκεί που επικρατούν ευνοϊκές υδραυλικές κλίσεις. Κατά συνέπεια οι τιμές στις οποίες καταλήξαμε αποτελούν μια απλή εκτίμηση με βάση τα διαθέσιμα στοιχεία.

9.2.3 Συμπεράσματα από την προσομοίωση του υδροφόρου σχηματισμού

Το τελικό στάδιο της εργασίας αφορούσε την προσομοίωση του υδροφόρα με την εφαρμογή ενός απλού μοντέλου που στηρίζεται στον προσδιορισμό διαφόρων υδρολογικών και υδραυλικών παραμέτρων για την όσο το δυνατόν καλύτερη απεικόνιση του φυσικού συστήματος. Όπως είναι αντιληπτό, οι περισσότερες από αυτές τις παραμέτρους εκτιμήθηκαν κατά το δυνατόν βάσει

των διαθέσιμων στοιχείων, ωστόσο η εκτίμηση είναι μόνο προσεγγιστική και μπορεί να απέχει από τις πραγματικές τιμές των παραμέτρων. Για τον ακριβή προσδιορισμό των τιμών αυτών χρειάζονται εργαστηριακές μετρήσεις οι οποίες στην παρούσα φάση δεν ήταν διαθέσιμες. Ακόμα όμως και αν υπήρχαν προσδιορισμένες τιμές των υδραυλικών παραμέτρων του συστήματος του υδροφορέα, οι φυσικές συνθήκες και διεργασίες είναι πάντα δύσκολο να προσομοιωθούν λόγω της πολυπλοκότητάς τους. Επομένως σε κάθε περίπτωση μπορούμε απλώς να προσεγγίσουμε τη λειτουργία του υδροφορέα εκτιμώντας τις πιθανές διεργασίες που πραγματοποιούνται σε αυτό το φυσικό σύστημα.

Τέτοιες παραδοχές είναι η εκτίμηση του πάχους του υδροφορέα, η εκτίμηση της υδραυλικής αγωγιμότητας εφόσον απουσιάζουν εργαστηριακές μετρήσεις, η ύπαρξη άνισων χωρικά μετρήσεων της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα και η απουσία δεδομένων αντλήσεων στα σημεία που υπάρχουν καταγεγραμμένες γεωτρήσεις και πηγάδια παρατήρησης καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Επομένως οι ανάγκες σε νερό, οι οποίες διαφέρουν από μήνα σε μήνα, μπορούν απλά να εκτιμηθούν και να θεωρηθούν ίδιες για όλη τη διάρκεια του έτους, κάτι που πρακτικά δεν είναι σωστό και μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένα αποτελέσματα, ιδιαίτερα αν οι τιμές αυτές υποεκτιμηθούν.

Η συλλογή τέτοιων δεδομένων θα βοηθούσε στη βελτιστοποίηση του μοντέλου προσομοίωσης και θα μπορούσε να περιγράψει με αρκετή ακρίβεια τις διαδικασίες της υπόγειας ροής ενός υδροφορέα επιτυγχάνοντας το στόχο του, που δεν είναι άλλος από την πρόγνωση και έγκαιρη πρόληψη πιθανών μελλοντικών καταστάσεων που θα οδηγούσαν σε ποιοτική και ποσοτική υποβάθμιση των αποθεμάτων του υδροφορέα.

Για τα διάφορα σενάρια που προσομοιώθηκαν, με βάση πάντα τις παραδοχές και τα στοιχεία που είχαμε στη διάθεσή μας, οι παροχές άντλησης από τις γεωτρήσεις δεν θα πρέπει να ξεπερνούν σε ποσοστό το 50% της ετήσιας τροφοδοσίας του υδροφορέα, αφού για μεγαλύτερες τιμές άντλησης το πόδι της αλάτινης σφήνας εισχωρεί κατά πολύ στο εσωτερικό του υδροφορέα υφαλμυρώνοντας μεγάλο μέρος του. Σε μικρότερα ποσά άντλησης η αλάτινη

σφήνα περιορίζεται σημαντικά. Σε αυτό βοηθά η γεωμετρία του υδροφορέα ο οποίος είναι στενός στο δυτικό τμήμα του και παρουσιάζει μικρό μέτωπο προς τη θάλασσα, κάτι που εμποδίζει το θαλασσινό νερό να εισχωρήσει στο εσωτερικό του. Ωστόσο λόγω της έλλειψης εργαστηριακών δεδομένων η τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας απλά εκτιμήθηκε, και μπορεί να διαφοροποιήσει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, αφού μια μικρότερη τιμή της θα βοηθούσε στον περιορισμό της αλάτινης σφήνας, ενώ μια μεγαλύτερη θα δημιουργούσε πιο ανησυχητικές καταστάσεις. Σε κάθε περίπτωση ωστόσο δεν πώς πρέπει να εφησυχάζουμε καθώς η σημασία του υδροφορέα για τη βιωσιμότητα του νησιού είναι σπουδαία και θα πρέπει να διαφυλαχθεί η ποιότητα των υδάτων του.

Εν κατακλείδι, το υδατικό ισοζύγιο του υπόγειου και παράκτιου υδροφορέα της προσχωματικής λεκάνης Ζεφυρίας στη νήσο Μήλο, χαρακτηρίζεται ως ελλειμματικό, κυρίως ως προς τις ανάγκες της ύδρευσης, αφού μπορεί να καλυφθεί μόλις το 50% αυτών. Ωστόσο είναι σημαντική η εύρεση λύσεων, ώστε ο υδροφορέας να διατηρηθεί ποιοτικά σε ικανοποιητικό επίπεδο, ώστε να μπορεί να τροφοδοτεί την περιοχή συνεχώς έστω και με αυτά τα ποσά ύδατος, που μπορεί ποσοτικά να μην επαρκούν, αλλά ποιοτικά να καλύπτουν τις υπάρχουσες ανάγκες.

9.3 Προτάσεις – Μέτρα Προστασίας

Το νησιωτικό σύμπλεγμα των Κυκλάδων παρουσιάζει γενικά προβληματικά υδατικά αποθέματα όχι τόσο ποσοτικά αλλά κυρίως ποιοτικά. Τα προβλήματα αυτά διογκώνονται κυρίως κατά τη θερινή περίοδο, καθώς οι ανάγκες σε νερό είναι αυξημένες και οι εντατικές αντλήσεις οδηγούν σε κρίσιμες καταστάσεις τα τόσο ζωτικής σημασίας φυσικά συστήματα.

Αιτία δημιουργίας αυτών των προβλημάτων δεν είναι άλλη από την έλλειψη σωστής διαχείρισης των διαθέσιμων αποθεμάτων και της ορθολογικής τους χρήση. Ιδιαίτερα οι υπόγειοι υδροφορείς είναι ευάλωτοι σε λάθος συνθήκες

διαχείρισης, αφού η ποιοτική υποβάθμιση των διαθέσιμων αποθεμάτων τους οδηγεί πρακτικά στην καταστροφή ολόκληρου του υδροφορέα.

Συγκριτικά με άλλες χώρες της ευρωπαϊκής ένωσης, η χώρα μας έχει αρκετούς διαθέσιμους υδατικούς πόρους, τόσο επιφανειακούς όσο και υπόγειους, που ποσοτικά επαρκούν για την κάλυψη των αναγκών του συνολικού πληθυσμού. Ωστόσο χωρίς ορθολογική διαχείριση και την κατασπατάλησή των διαθέσιμων πόρων δημιουργούνται προβλήματα υποβάθμισής του υδατικού δυναμικού που μπορούν να οδηγήσουν σε μη αναστρέψιμες καταστάσεις.

Οι υπόγειοι υδατικοί πόροι είναι πεπερασμένοι, τρωτοί σε εξωτερική ρύπανση, ανομοιόμορφα κατανεμημένοι, στενά εξαρτώμενοι από ακραίες συχνά μεταβολές του υδρολογικού καθεστώτος αλλά και απολύτως απαραίτητοι για την συντήρηση της ζωής και της ανάπτυξης του περιβάλλοντος. Η υπερεκμετάλλευση τους έχει προκαλέσει σε πολλές παράκτιες περιοχές και νησιά σημαντική ταπείνωση στάθμης, καθιζήσεις εδαφών, υφαλμύρωση και γενικότερα ποιοτική υποβάθμιση του νερού. Αυτές οι περιοχές παρουσιάζονται και πιο ευάλωτες λόγω του μεγάλου αναπτύγματος ακτών, με αποτέλεσμα η εντατική εκμετάλλευση των παράκτιων υπόγειων υδροφορέων να οδηγεί στην υφαλμύρωσή τους.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω χρειάζεται η εφαρμογή μέτρων και στρατηγικός σχεδιασμός για μια ορθολογική διαχείριση. Θα μπορούσαν επομένως να εφαρμοσθούν μέτρα όπως:

- Η λήψη αποφάσεων για συνολική διαχείρισή των επιφανειακών με τους υπόγειους υδροφορείς, λαμβάνοντας υπόψη τα συνολικά υδατικά αποθέματα, καθώς και ακριβή και αδιάκοπη γνώση των παραμέτρων εκείνων που έχουν άμεση σχέση με την χωροχρονική κατανομή της ποσότητας και της ποιότητας των υπόγειων νερών μέσα από την συνεχή συλλογή πρωτογενών στοιχείων,

- Η εφαρμογή συστηματικών υδρογεωλογικών μελετών, που να καθορίζουν το υδατικό ισοζύγιο και το υδατικό δυναμικό κάθε υπόγειου υδροφορέα,
- Η εφαρμογή μέτρων προστασίας των υδροφόρων συστημάτων τα οποία συνδέονται με τα υδροληπτικά έργα ύδρευσης. Τα μέτρα αυτά πρέπει να διασφαλίζουν τόσο την ποιότητα όσο και την ποσότητα των υπόγειων νερών,
- Η απαγόρευση ιδιωτικών γεωτρήσεων και φρεάτων άντλησης μέσα στη γεωγραφική περιοχή της λεκάνης του υδροφόρου συστήματος και αποτροπή εγκατάστασης ρυπογόνων για τα υπόγεια νερά δραστηριοτήτων μέσα σ' αυτή τη ζώνη,
- Η εφαρμογή μέτρων μείωσης των σημειακών πηγών ρύπανσης, όπως βόθροι, αλλά και διάχυτων, γεωργικής κυρίως προέλευσης, πηγών ρύπανσης (φυτοφάρμακα, νιτρικά) με την υιοθέτηση ορθών γεωργικών πρακτικών,
- Ο περιορισμός των απωλειών ύδατος με την κατασκευή νέων υδρευτικών δικτύων και αντικατάσταση των παλαιότερων κατασκευών με νέες που θα πληρούν τις σύγχρονες προϋποθέσεις υγιεινής,
- Ο τεχνητός εμπλουτισμός των υδροφορέων με παράλληλη αξιοποίηση των παράκτιων υφάλμυρων υδροφόρων με την εγκατάσταση μικρών μονάδων αφαλάτωσης τα οποία θα χρησιμοποιούν υφάλμυρο νερό, μέσω κατάλληλων υδροληπτικών έργων,
- Αξιοποίηση της επιφανειακής απορροής με έργα συλλογής και αποθήκευσης του νερού σε χωμάτινα φράγματα και λιμνοδεξαμενές. Αν είναι αυτά δε και σωστά κατανομημένα στο χώρο έπειτα από τεχνικοοικονομικές μελέτες για τον καθορισμό του μεγέθους τους, λαμβάνεται το καλύτερο αποτέλεσμα.
- Απαγόρευση μπαζώματος ρεμάτων και μετατροπή τους σε οδούς προσπέλασης ή ανοικοδόμηση κτιρίων στις θέσεις αυτές, καθώς διευκολύνεται η επιφανειακή απορροή σε βάρος της καείσδυσης άρα και επανατροφοδосίας των υπόγειων υδροφορέων.
- Εφαρμογή της στάγδην άρδευσης εφόσον είναι η μέθοδος με τη μικρότερη σπατάλη νερού, αφού τα φυτά εφοδιάζονται με νερό που

παρέχεται με τη μορφή σταγόνων, από σωλήνες που «απλώνονται» κατά μήκος των γραμμών φύτευσης και δεν υπάρχει καθόλου εξάτμιση.

- Πλήρης ενσωμάτωση της Οδηγίας 2000 / 60 / ΕΚ, που καθορίζει τα μέτρα, τις χρήσεις και διαδικασίες για την ολοκληρωμένη προστασία των υδάτων.

Η εφαρμογή των παραπάνω ενδεικτικών μέτρων έγκειται κυρίως στη δραστηριοποίηση κρατικών μηχανισμών και δημόσιων φορέων. Ωστόσο με σωστή ενημέρωση του κοινού και την ευαισθητοποίησή του μπορούν να αποκομισθούν επιπρόσθετα οφέλη αφού ο κάθε ένας από εμάς μπορεί να προσφέρει στη διασφάλιση των υδατικών πόρων αποκτώντας τη σωστή νοοτροπία και σταματώντας την κατασπατάληση τους.

Τα δεδομένα όπως παρουσιάζονται στη νήσο Μήλο είναι σαφώς ευνοϊκότερα από άλλα νησιά των Κυκλάδων, ωστόσο εξακολουθούν να είναι κρίσιμα και χρειάζεται σε κάθε περίπτωση συνολικά επαγρύπνηση. Εξ' άλλου η πρόληψη αποδεικνύεται συχνά η καλύτερη προστασία. Έτσι, με την εφαρμογή των παραπάνω μέτρων μπορεί να επιτευχθεί μείωση απωλειών νερού, ελάττωση συνολικών ποσοτήτων χρήσης, αύξηση των διαθέσιμων αποθεμάτων, αποτελεσματική άρδευση υψηλής απόδοσης και χαμηλής κατανάλωσης νερού και κυρίως έλεγχος και αποκατάσταση της ζώνης υπαλμύρωσης του υδροφορέα πριν το φαινόμενο αποκτήσει ανησυχητικές διαστάσεις. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται η ορθολογική διαχείριση των υδατικών πόρων και συνεπώς η βιωσιμότητα του νησιού.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Π.1 Υπολογισμος Δυνητικής Εξατμισοδιαπνοής με τη Μέθοδο Penmann

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 5 η εξίσωση Penman εφαρμόζεται για την εκτίμηση της εξατμησης από υδάτινη επιφάνεια χρησιμοποιώντας μετεωρολογικά δεδομένα. Εδώ αναφέρονται αναλυτικά οι εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των απαιτούμενων μεγεθών για την ολοκλήρωση της μεθόδου.

- Πίεση κορεσμένων υδρατμών: $e^* = 0.611 \exp\left(\frac{17.27T}{237.3 + T}\right)$ όπου T η θερμοκρασία του αέρα σε °C.
- Πίεση υδρατμών (kPa): $e = (U/100) e^*$ όπου U η σχετική υγρασία του αέρα σε ποσοστό επί τοις εκατό (%).
- Κλίση καμπύλης κορεσμού (kPa/K): $\Delta = \frac{4098e^*}{(237.3 + T)^2}$
- Έλλειμμα κορεσμού υδρατμών (kPa): $D = e^* - e$
- Ψυχομετρικός συντελεστής (kPa/K): $\gamma = 0,067$
- Λανθάνουσα θερμότητα εξατμησης (MJ/kg): $\lambda = 2,45$
- Ηλιακή απόκλιση (rad): $\delta = -0,409 \cos\left(\frac{2\pi J}{365} + 0.16\right)$ όπου J ο ημερολογιακός αριθμός της ημέρας
- Γωνία ώρας δύσης (rad): $\omega_s = \arccos(-\tan\phi \tan\delta)$ όπου ϕ το γεωγραφικό πλάτος του μετεωρολογικού σταθμού σε rad.
- Αστρονομική διάρκεια ημέρας (h): $N = \frac{24\omega_s}{\pi}$
- Ηλιακή σταθερά (kW/m²): $I_s = 1.367$
- Εκκεντρότητα (rad): $d_r = 1 + 0.0034 \cos\left(\frac{2\pi J}{365} - 0.05\right)$

- Εξωγήινη ηλιακή ακτινοβολία (MJ/m^2d):

$$S_o = \left(\frac{86.4 I_s d_r}{\pi} \right) (\omega_s \sin \phi \sin \delta + \sin \omega \cos \phi \cos \delta)$$

- Συντελεστής απορρόφησης της ατμόσφαιρας: $f_s = 0,22 + 0,52(n/N)$ όπου n οι ώρες πραγματικής ηλιοφάνειας και N οι ώρες δυνατής ηλιοφάνειας (αστρονομική διάρκεια ημέρας αριθμός ημερών)
- Λευκάγεια: $\alpha = 0,35$
- Καθαρή ακτινοβολία βραχέων κυμάτων (MJ/m^2d): $S_n = S_o f_s (1 - \alpha)$
- Ικανότητα καθαρής εκπομπής: $\epsilon_n = 0,34 - 0,14 \sqrt{e}$
- Συντελεστής επίδρασης νέφωσης: $f_L = 0,10 + 0,90(n/N)$
- Καθαρή ακτινοβολία μακρών κυμάτων (MJ/m^2d): $L_n = \epsilon_n f_L \sigma (273 + T)^4$ όπου σ η σταθερά Stefan – Boltzman ($\sigma = 4.9 \times 10^{-9} MJ/m^2 d K^4$)
- Καθαρή ακτινοβολία (MJ/m^2d): $R_n = S_n - L_n$
- Συνάρτηση ανέμου ($kg/kPa m^2d$): $F(u) = \left(\frac{436}{(273 + T)^u} \right)$ όπου u η μέση ταχύτητα ανέμου σε m/sec
- Εξίσωση Penmann για εξάτμιση από ελεύθερη επιφάνεια νερού (mm):

$$E = \left(\frac{\Delta R_n}{\Delta + \gamma \lambda} \right) + \left(\frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \right) F(u) D$$

Παρακάτω παρουσιάζεται ενδεικτικά ο πίνακας υπολογισμών για τον μήνα Οκτώβριο του έτους 1973. Ολόκληρο το τεύχος των υπολογισμών παρατίθεται σε ψηφιακή μορφή λόγω μεγάλου εύρους των υπολογισμών.

T	e*	e	Δ	D	Y	λ	J	δ	ωξ	N	n	Is	dr	So	fs	Sn	εn	fL	Ln	Rn	F(u)	E
21,2	2,5185	2,0316	0,1545	0,4869	0,067	2,45	274	0,067	1,5209	11,62	10,16	1,367	0,9984	27,724	0,675	14,403	0,14	0,887	4,573	9,83025	3,02E-08	4,7656
20,1	2,3536	1,8907	0,1456	0,4629	0,067	2,45	275	0,074	1,5157	11,58	10,16	1,367	0,999	27,4899	0,676	13,943	0,147	0,89	4,746	9,19747	1,06E-16	4,3229
20	2,339	1,6919	0,1448	0,6471	0,067	2,45	276	0,081	1,5105	11,54	10,16	1,367	0,9996	27,2559	0,678	13,856	0,158	0,892	5,089	8,76762	1,52E-17	4,1091
20,75	2,4499	1,8129	0,1508	0,637	0,067	2,45	277	0,088	1,5053	11,5	10,16	1,367	1,0002	27,0219	0,679	13,769	0,151	0,895	4,948	8,82157	2,14E-07	4,2233
16,7	1,9018	1,42	0,1208	0,4818	0,067	2,45	278	0,095	1,5002	11,46	10,16	1,367	1,0008	26,7881	0,681	13,682	0,173	0,898	5,366	8,31561	1,1E-05	3,5253
18	2,0647	1,4315	0,1298	0,6332	0,067	2,45	279	0,101	1,495	11,42	10,16	1,367	1,0014	26,5546	0,683	13,594	0,172	0,901	5,459	8,13557	2,69E-13	3,5926
18,8	2,1708	1,4906	0,1356	0,6802	0,067	2,45	280	0,108	1,4899	11,38	10,16	1,367	1,002	26,3214	0,684	13,506	0,169	0,903	5,426	8,08042	4,46E-09	3,6559
19,2	2,2257	1,6544	0,1386	0,5713	0,067	2,45	281	0,115	1,4847	11,34	10,16	1,367	1,0025	26,0887	0,686	13,418	0,16	0,906	5,177	8,24182	1,29E-11	3,7736
18,15	2,0842	1,5493	0,1309	0,5349	0,067	2,45	282	0,122	1,4796	11,3	10,16	1,367	1,0031	25,8565	0,687	13,33	0,166	0,909	5,304	8,02575	5,48E-15	3,5605
16	1,8189	1,5521	0,1162	0,2668	0,067	2,45	283	0,128	1,4745	11,26	10,16	1,367	1,0037	25,6249	0,689	13,242	0,166	0,912	5,16	8,08149	2,6E-29	3,3492
16,65	1,8958	1,5735	0,1205	0,3223	0,067	2,45	284	0,135	1,4695	11,23	10,16	1,367	1,0043	25,3941	0,691	13,153	0,164	0,915	5,185	7,96823	1,06E-32	3,3726
19,7	2,296	1,8062	0,1425	0,4898	0,067	2,45	285	0,142	1,4644	11,19	10,16	1,367	1,0049	25,164	0,692	13,065	0,152	0,917	5,01	8,05483	1,55E-28	3,7424
20,55	2,4199	1,9762	0,1492	0,4436	0,067	2,45	286	0,148	1,4594	11,15	10,16	1,367	1,0054	24,9348	0,694	12,976	0,143	0,92	4,794	8,18222	3,02E-41	3,8953
21,7	2,5968	2,0515	0,1586	0,5453	0,067	2,45	287	0,155	1,4544	11,11	10,16	1,367	1,006	24,7067	0,696	12,888	0,139	0,923	4,758	8,12985	1,68E-34	3,9955
21,75	2,6048	2,023	0,1591	0,5817	0,067	2,45	288	0,161	1,4494	11,07	10,16	1,367	1,0066	24,4796	0,697	12,799	0,141	0,926	4,824	7,97583	1,23E-11	3,9252
21,75	2,6048	1,8667	0,1591	0,738	0,067	2,45	289	0,168	1,4444	11,03	10,16	1,367	1,0072	24,2536	0,699	12,711	0,149	0,929	5,108	7,60327	1,48E-06	3,7418
22,3	2,6935	1,8406	0,1638	0,853	0,067	2,45	290	0,174	1,4395	11	10,16	1,367	1,0077	24,029	0,7	12,623	0,15	0,932	5,209	7,41448	4,23E-09	3,7032
24,25	3,03	1,5756	0,1815	1,4544	0,067	2,45	291	-0,18	1,4345	10,96	10,16	1,367	1,0083	23,8057	0,702	12,535	0,164	0,934	5,872	6,66354	1,01E-05	3,4991
22,35	2,7017	1,7561	0,1642	0,9456	0,067	2,45	292	0,187	1,4296	10,92	10,16	1,367	1,0089	23,5838	0,704	12,448	0,154	0,937	5,398	7,0494	1,43E-17	3,5255
20,3	2,3828	1,8586	0,1472	0,5242	0,067	2,45	293	0,193	1,4248	10,88	10,16	1,367	1,0094	23,3634	0,705	12,36	0,149	0,94	5,084	7,27625	0,067909	3,4506
21,85	2,6207	1,6773	0,1599	0,9435	0,067	2,45	294	0,199	1,4199	10,85	10,16	1,367	1,01	23,1447	0,707	12,273	0,159	0,943	5,542	6,73156	2,76E-05	3,3218

T	e*	e	Δ	D	γ	λ	J	δ	ως	N	n	Is	dr	So	fs	Sn	εn	fL	Ln	Rn	F(u)	E
24,65	3,1033	1,3138	0,1853	1,7896	0,067	2,45	295	0,205	1,4151	10,81	10,16	1,367	1,0106	22,9276	0,709	12,186	0,18	0,946	6,531	5,6556	1,65E-12	2,9992
18,85	2,1776	1,7348	0,136	0,4428	0,067	2,45	296	0,211	1,4104	10,77	10,16	1,367	1,0111	22,7123	0,71	12,1	0,156	0,949	5,248	6,85256	1,12E-27	3,1051
16,25	1,8481	1,2814	0,1178	0,5668	0,067	2,45	297	0,217	1,4056	10,74	10,16	1,367	1,0117	22,499	0,712	12,014	0,182	0,952	5,924	6,08999	1,45E-22	2,5445
15,15	1,7224	1,2689	0,1108	0,4536	0,067	2,45	298	0,223	1,4009	10,7	10,16	1,367	1,0122	22,2875	0,714	11,929	0,182	0,954	5,877	6,0518	2,3E-07	2,4382
14,25	1,6253	1,1268	0,1053	0,4984	0,067	2,45	299	0,229	1,3963	10,67	10,16	1,367	1,0128	22,0782	0,715	11,844	0,191	0,957	6,112	5,73255	1,289521	2,4897
14,2	1,62	1,134	0,105	0,486	0,067	2,45	300	0,235	1,3916	10,63	10,16	1,367	1,0133	21,8709	0,717	11,76	0,191	0,96	6,111	5,64954	0,003815	2,2042
14,65	1,6678	1,1564	0,1077	0,5115	0,067	2,45	301	0,241	1,387	10,6	10,16	1,367	1,0138	21,6659	0,719	11,677	0,189	0,963	6,12	5,55666	8,76E-08	2,201
14,7	1,6732	1,1657	0,108	0,5075	0,067	2,45	302	0,246	1,3825	10,56	10,16	1,367	1,0144	21,4631	0,72	11,594	0,189	0,966	6,123	5,4711	1,515468	2,4654
13,95	1,5939	1,0361	0,1035	0,5579	0,067	2,45	303	0,252	1,378	10,53	10,16	1,367	1,0149	21,2627	0,722	11,512	0,197	0,969	6,355	5,15638	0,000208	1,9937
15,25	1,7336	1,0575	0,1114	0,6761	0,067	2,45	304	0,257	1,3735	10,49	10,16	1,367	1,0154	21,0648	0,724	11,43	0,196	0,971	6,442	4,9883	7,31E-21	2,0165

Πίνακας Π.1: Υπολογισμός δυναμικής εξισμοδιαπνοής με τη μέθοδο Penmann για το μήνα Οκτώβριο του έτους 1973

Π.2 Υπολογισμός Δυνητικής Εξατμισοδιαπνοής με τη Μέθοδο Penmann – Monteith

Λόγω της ακριβέστερης περιγραφής του φαινομένου ο Monteith τροποποίησε τις εξισώσεις Penmann εισάγοντας την επιφανειακή αντίσταση των στομάτων (r_s) των φυλλωμάτων στην εξατμηση. Οι κύριες διαφορές μεταξύ των δύο μεθόδων αφορούν τις διαφορετικές εξισώσεις που εφαρμόζονται για τον υπολογισμό του ψυχομετρικού συντελεστή γ' και της ταχύτητας ανέμου. Επίσης εισάγεται ο συντελεστής ροής εδαφικής θερμότητας G , ο οποίος ωστόσο για ημερήσια δεδομένα παίρνει μηδενικές τιμές.

- Ψυχομετρικός συντελεστής (kPa/K): $\gamma' = \gamma(1+0,34u)$ όπου u η ταχύτητα ανέμου σε m/sec και γ ο ψυχομετρικός συντελεστής κατά Penmann
- Συντελεστής ροής εδαφικής θερμότητας (MJ/m^2d): $G=0,38(T_{dayi} - T_{dayi-1})$ για ημερήσια δεδομένα, και μπορεί να προσεγγιστεί με μηδενική τιμή.
- Η τελική εξίσωση υπολογισμού της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής δίνεται από τη σχέση

$$E = \left(\frac{0.408(R_n - G)}{\Delta + \gamma'} \right) * \left(\frac{\gamma' \frac{900}{(T + 273)} u (e_* - e)}{\Delta + \gamma'} \right)$$

Παρακάτω παρατίθεται πίνακας υπολογισμού της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής για το μήνα Οκτώβριο του έτους 1973

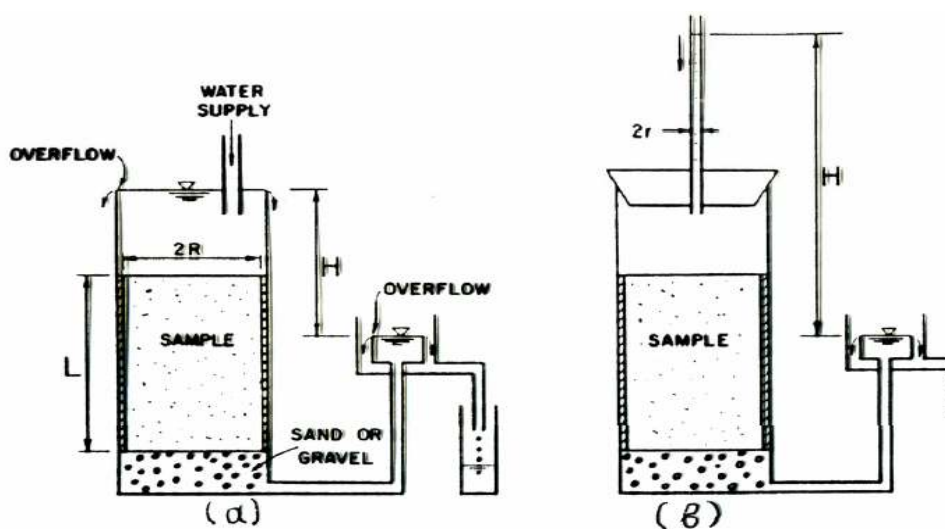
e*	e	Δ	D	Y	Y'	λ	Is	dr	δ	ως	N	n	So	fs	Sn	εn	fL	Ln	Rn	G	F(u)	E
2,5185	2,032	0,1545	0,4869	0,067	0,1607	2,45	1,367	0,9984	0,0669	1,5209	11,619	10,16	27,724	0,6747	14,029	0,1405	0,887	4,5732	9,456	0	1,007	3,1935
2,3536	1,891	0,1456	0,4629	0,067	0,2389	2,45	1,367	0,999	0,0738	1,5157	11,579	10,16	27,49	0,6763	13,943	0,1475	0,8897	4,7455	9,197	0	1,265	3,2898
2,339	1,692	0,1448	0,6471	0,067	0,2467	2,45	1,367	0,9996	0,0807	1,5105	11,539	10,16	27,256	0,6778	13,856	0,1579	0,8924	5,0887	8,768	0	1,568	4,0065
2,4499	1,813	0,1508	0,637	0,067	0,1529	2,45	1,367	1,0002	0,0876	1,5053	11,5	10,16	27,022	0,6794	13,769	0,1515	0,8951	4,9477	8,822	0	1,036	3,4109
1,9018	1,42	0,1208	0,4818	0,067	0,1373	2,45	1,367	1,0008	0,0945	1,5002	11,46	10,16	26,788	0,681	13,682	0,1732	0,8979	5,3663	8,316	0	0,719	2,7871
2,0647	1,432	0,1298	0,6332	0,067	0,2076	2,45	1,367	1,0014	0,1013	1,495	11,421	10,16	26,555	0,6826	13,594	0,1725	0,9006	5,4587	8,136	0	1,241	3,6771
2,1708	1,491	0,1356	0,6802	0,067	0,1686	2,45	1,367	1,002	0,1081	1,4899	11,382	10,16	26,321	0,6842	13,506	0,1691	0,9034	5,426	8,08	0	1,074	3,53
2,2257	1,654	0,1386	0,5713	0,067	0,192	2,45	1,367	1,0025	0,1149	1,4847	11,343	10,16	26,089	0,6858	13,418	0,1599	0,9062	5,1765	8,242	0	1,113	3,3664
2,0842	1,549	0,1309	0,5349	0,067	0,2232	2,45	1,367	1,0031	0,1217	1,4796	11,304	10,16	25,857	0,6874	13,33	0,1657	0,9089	5,3044	8,026	0	1,188	3,3561
1,8189	1,552	0,1162	0,2668	0,067	0,356	2,45	1,367	1,0037	0,1284	1,4745	11,265	10,16	25,625	0,689	13,242	0,1656	0,9117	5,1603	8,081	0	1,089	2,3068
1,8958	1,574	0,1205	0,3223	0,067	0,3873	2,45	1,367	1,0043	-0,135	1,4695	11,226	10,16	25,394	0,6906	13,153	0,1644	0,9145	5,1851	7,968	0	1,335	2,6292
2,296	1,806	0,1425	0,4898	0,067	0,3482	2,45	1,367	1,0049	0,1417	1,4644	11,187	10,16	25,164	0,6922	13,065	0,1518	0,9174	5,01	8,055	0	1,714	3,4929
2,4199	1,976	0,1492	0,4436	0,067	0,4654	2,45	1,367	1,0054	0,1482	1,4594	11,149	10,16	24,935	0,6939	12,976	0,1432	0,9202	4,7941	8,182	0	2,092	3,4037
2,5968	2,051	0,1586	0,5453	0,067	0,4029	2,45	1,367	1,006	0,1548	1,4544	11,111	10,16	24,707	0,6955	12,888	0,1395	0,923	4,758	8,13	0	2,172	3,8671
2,6048	2,023	0,1591	0,5817	0,067	0,192	2,45	1,367	1,0066	0,1613	1,4494	11,072	10,16	24,48	0,6972	12,799	0,1409	0,9258	4,8236	7,976	0	1,171	3,3346
2,6048	1,867	0,1591	0,738	0,067	0,1451	2,45	1,367	1,0072	0,1677	1,4444	11,034	10,16	24,254	0,6988	12,711	0,1487	0,9287	5,1079	7,603	0	1,011	3,3243
2,6935	1,841	0,1638	0,853	0,067	0,1686	2,45	1,367	1,0077	0,1741	1,4395	10,997	10,16	24,029	0,7004	12,623	0,1501	0,9315	5,2086	7,414	0	1,272	3,8272
3,03	1,576	0,1815	1,4544	0,067	0,1373	2,45	1,367	1,0083	0,1805	1,4345	10,959	10,16	23,806	0,7021	12,535	0,1643	0,9344	5,8717	6,664	0	1,404	4,404
2,7017	1,756	0,1642	0,9456	0,067	0,2467	2,45	1,367	1,0089	0,1867	1,4296	10,922	10,16	23,584	0,7037	12,448	0,1545	0,9372	5,3981	7,049	0	1,995	4,8554
2,3828	1,859	0,1472	0,5242	0,067	0,1022	2,45	1,367	1,0094	-0,193	1,4248	10,885	10,16	23,363	0,7054	12,36	0,1491	0,9401	5,0839	7,276	0	0,603	2,4194

e*	e	Δ	D	Y	Y'	λ	Is	dr	δ	ως	N	n	So	fs	Sn	εn	fL	Ln	Rn	G	F(u)	E
2,6207	1,677	0,1599	0,9435	0,067	0,1334	2,45	1,367	1,01	0,1992	1,4199	10,848	10,16	23,145	0,707	12,273	0,1587	0,943	5,5416	6,732	0	1,002	3,4148
3,1033	1,314	0,1853	1,7896	0,067	0,1998	2,45	1,367	1,0106	0,2053	1,4151	10,811	10,16	22,928	0,7087	12,186	0,1795	0,9458	6,5309	5,656	0	2,541	6,5983
2,1776	1,735	0,136	0,4428	0,067	0,3404	2,45	1,367	1,0111	0,2113	1,4104	10,774	10,16	22,712	0,7103	12,1	0,1556	0,9487	5,2477	6,853	0	1,478	3,1029
1,8481	1,281	0,1178	0,5668	0,067	0,2935	2,45	1,367	1,0117	0,2173	1,4056	10,738	10,16	22,499	0,712	12,014	0,1815	0,9515	5,9244	6,09	0	1,468	3,5681
1,7224	1,269	0,1108	0,4536	0,067	0,1529	2,45	1,367	1,0122	0,2233	1,4009	10,702	10,16	22,288	0,7137	11,929	0,1823	0,9544	5,8774	6,052	0	0,632	2,395
1,6253	1,127	0,1053	0,4984	0,067	0,0904	2,45	1,367	1,0128	0,2291	1,3963	10,667	10,16	22,078	0,7153	11,844	0,1914	0,9573	6,1119	5,733	0	0,354	1,8081
1,62	1,134	0,105	0,486	0,067	0,1139	2,45	1,367	1,0133	0,2349	1,3916	10,631	10,16	21,871	0,7169	11,76	0,1909	0,9601	6,1107	5,65	0	0,452	2,065
1,6678	1,156	0,1077	0,5115	0,067	0,1568	2,45	1,367	1,0138	0,2407	1,387	10,596	10,16	21,666	0,7186	11,677	0,1895	0,963	6,1201	5,557	0	0,667	2,5215
1,6732	1,166	0,108	0,5075	0,067	0,0898	2,45	1,367	1,0144	0,2463	1,3825	10,561	10,16	21,463	0,7202	11,594	0,1888	0,9658	6,1228	5,471	0	0,347	1,7567
1,5939	1,036	0,1035	0,5579	0,067	0,1256	2,45	1,367	1,0149	0,2519	1,378	10,527	10,16	21,263	0,7219	11,512	0,1975	0,9686	6,3553	5,156	0	0,519	2,2667
1,7336	1,057	0,1114	0,6761	0,067	0,2779	2,45	1,367	1,0154	0,2574	1,3735	10,493	10,16	21,065	0,7235	11,43	0,196	0,9714	6,442	4,988	0	1,536	3,9461

Πίνακας Π.2: Υπολογισμός δυναμικής εξημεροδιαπονοής με τη μέθοδο Penman – Monteith για το μήνα Οκτώβριο του έτους 1973

Π.3 Εργαστηριακοί Τρόποι Υπολογισμού Υδραυλικής Αγωγιμότητας

Η παράμετρος υδραυλική αγωγιμότητα είναι πολύ κρίσιμη και ταυτόχρονα πολύ δύσκολο να προσδιοριστεί λόγω του ότι μεταβάλλεται εύκολα. Για πιο ακριβή αποτελέσματα ο προσδιορισμός της τιμής της υδραυλικής αγωγιμότητας γίνεται με εργαστηριακές μεθόδους.



Σχήμα 2: Διαπερατόμετρα σταθερού (α) και μεταβλητού (β) υδραυλικού φορτίου

Οι δοκιμές εισπίεσης νερού (Pumping in tests), αποτελούν τον καταλληλότερο τρόπο εκτίμησης του K και κυρίως για το τμήμα του υπεδάφους που βρίσκεται πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα, δηλαδή στην ακόρεστη ζώνη και χαρακτηρίζονται από την ταχύτητα εκτέλεσης, τη δυνατότητα συχνής επανάληψης αυτών κατά τη διάρκεια της διάτρησης, αλλά και για την καλή αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Κατά τις δοκιμές αυτές, είτε εισάγεται μέσα στη δειγματοληπτική γεώτρηση ποσότητα νερού και μετράται το επιβαλλόμενο φορτίο κάτω από δεδομένη πίεση, είτε η στάθμη του νερού ανυψώνεται και καταγράφεται ο βαθμός πτώσης μέχρι τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα. Στη πρώτη περίπτωση πρόκειται για δοκιμές σταθερού φορτίου (Constant head test), ενώ στη δεύτερη για δοκιμές μεταβλητού φορτίου (Falling head test).

Γενικά υπάρχουν οι εξής κατηγορίες δοκιμών:

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

Βάσει βιβλιογραφίας η τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας χαρακτηρίζεται σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα:

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

Πίνακας 3: Χαρακτηρισμός τιμών υδραυλικής αγωγιμότητας (Terzaghi & Peck - 1967)

Βιβλιογραφία

- Anderson M. and Woessner W., (1992), Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport, Academic Press.
- Bakker M., (2005), The Sea Water Intrusion (SWI) Package Manual, Artesia – The University of Georgia.
- Bear J., (1979), Hydraulics of Groundwater, Edition of 2007, Dover Publications Inc., Mineola, New York.
- Bear J., (1972), Dynamics of Fluids in Porous Media, Dover Publications Inc., Mineola, New York.
- Bear J. and Verruijt A., (1987), Modeling Groundwater Flow and Pollution, D. Reidel Publishing Company.
- Bear J. et al., (1999), Seawater Intrusion in Coastal Aquifers – Concepts, Methods and Practices, Kluwer Academic Publishers, p. 163 – 191.
- Chiang W. and Kinzelbach W., (2001), 3D – Groundwater Modeling with PMWIN, Springer - Verlag Berlin Heidelberg New York.
- Chiang W., (2005), Processing Modflow Pro, WebTech360.
- Hiscock K., (2005), Hydrogeology Principles and Practice, Blackwell Publishing, 2nd Edition.
- Kresic N., (2006), Hydrogeology and Groundwater Modeling, 2nd Edition 2007.
- Mc Donald M. and Harbaugh A., (1988), A Modular Three – Dimensional Finite – Difference Ground Water Flow Model, U.S. Geological Survey.

- Mantoglou A., Papantoniou M., & Giannouloupoulos P., (2004), “Management of coastal Aquifers based on nonlinear optimization and evolutionary algorithms”, *Journal of Hydrology* 297, p. 209 – 228.
- Mantoglou A., (2003), “Pumping Management of coastal Aquifers using Analytical Models of Saltwater Intrusion”, *Water Resources Research* 39 (12).
- Mantoglou A. and P. Giannouloupoulos, «Sustainable Yield of Coastal Aquifers Using Simulation and Optimization: Application to Santorini Island», International Conference “Protection and Restoration of the Environment VII”, Mykonos, Greece, 2004.
- Reilly T. & A. Goodman, (1985), «Quantitative analysis of saltwater – freshwater relationships in groundwater systems – a historical perspective», U.S. Geological Survey, Polytechnic Institute of New York, Brooklyn.
- Morris & Johnson, (1967), “Summary of Hydrologic and Physical Properties of Rock and Soil materials, as analyzed by the Hydrologic Laboratory of the U.S. Geological Survey, 1948 – 60, U.S.G.S. Water Supply paper, 1839 – D.
- Νάνου – Γιάνναρου Α., (2006), Εισαγωγή στα Υπόγεια Νερά, Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- Παπανικολάου Δ., (1986), Γεωλογία της Ελλάδας, σελ. 219.
- Παπαντωνίου Μ., (2003), «Διαχείριση Παράκτιων Υδροφορέων – Βελτιστοποίηση Αντλήσεων», Διπλωματική Εργασία Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων».
- Todd D., (1980), *Groundwater Hydrology*, Second Edition, John Wiley & Sons Inc, New York.
- Γιαννουλόπουλος Π., «Υπόγεια Υδραυλική και Μαθηματικά Μοντέλα στο Αργολικό πεδίο», Διδακτορική διατριβή, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα

Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής, Τομέας Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, Αθήνα, 2000.

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

Κουτσογιάννης Δ., «*Υδρομετεωρολογία - Εξάτμιση και διαπνοή*» Τομέας Υδατικών Πόρων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2000.

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

Τσακίρης Γ., (2006), «*Υδραυλικά Έργα, Σχεδιασμός και Διαχείριση – Τόμος II: Εγχειοβελτιωτικά Έργα*», Αθήνα.

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

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

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

Νικολή Ρ., Διπλωματική εργασία, «*Διερεύνηση Υδάτινου Δυναμικού Υπόγειου Υδροφορέα Εμπορείου – Περίσσας Ν. Θήρας*», ΕΜΠ, Αθήνα 2007.

Richard G. Allen & Luis S. Pereira & Dirk Raes & Martin Smith, FAO Irrigation and Drainage Paper, No 56, 2000.

Μαντόγλου Α., Κουράκος Γ., «*Θεωρητική τεκμηρίωση μοντέλου ανάλυσης παράκτιων υδροφορέων*», Γ' Κοινοτικό Πλαίσιο Στήριξης 2000-2006: Επιχειρησιακό

Πρόγραμμα Ανταγωνιστικότητα, Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Συστημάτων σε Σύζευξη με Εξελιγμένο Υπολογιστικό Σύστημα, Τεύχος 4β, Αθήνα, 2005.

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

Watermark Computing, Groundwater Data Utilities, Part A: Overview, 1999a

Watermark Computing, Groundwater Data Utilities, Part B: Program Descriptions, 1999b

Carrera Jesus & Neuman P. Shlomo, Estimation of Aquifer Parameters Under Transient and Steady State Conditions: 1. Maximum Likelihood Method Incorporating Prior Information, Water Resources Research, Vol. 22, No. 2, Pages 199 – 210, February 1986a.

Carrera Jesus & Neuman P. Shlomo, Estimation of Aquifer Parameters Under Transient and Steady State Conditions: 2. Uniqueness, Stability and Solution Algorithms, Water Resources Research, Vol. 22, No. 2, Pages 211 – 227, February 1986b.

Gelhar W. Lynn & Axness L. Carl, Three – Dimensional Stochastic Analysis of Macrodispersion in Aquifers, Water Resources Research, Vol. 19, No. 1, Pages 161 – 180, February 1983.

Παπουτσή Σ., Διπλωματική Εργασία, «Μοντέλα Προσομοίωσης Κίνησης Νερού και Ρύπων στους Υπόγειους Υδροφορείς και Ρύθμιση Παραμέτρων», ΕΜΠ, Αθήνα 2001.

Golden Software Inc, Surfer User's Guide – Contouring and 3D Surface Mapping for Scientists and Engineers, Colorado, 2002.

B. Booth & A. Mitchell, Getting Started with ArcGis, ESRI, USA, 2001.

Κ/Ε Υδατοσυστημάτων Αιγαίου: ΤΕΜ ΑΕ, ΛΔΚ ΕΠΕ, ΥΔΡΟΕΞΥΓΙΑΝΤΙΚΗ ΕΕ, TERRAMENTOR ΕΟΟΣ (Σεπτέμβριος 2007), «ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑΤΟΣ ΝΗΣΩΝ ΑΙΓΙΑΟΥ» , ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ – ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ – ΓΕΝΙΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΦΥΣΙΚΟΥ ΠΛΟΥΤΟΥ – Δ/ΝΣΗ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ.

Φαντίδης Θεοδόσιος – «ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΝΟΜΟΥ ΔΩΔΕΚΑΝΗΣΟΥ – ΤΕΥΧΟΣ Α'», ΡΟΔΟΣ ΑΠΡΙΛΙΟΣ 1997, ΕΚΔΟΣΗ ΤΕΧΝΙΚΟΥ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟΥ ΕΛΛΑΔΟΣ

W. Nicholaichuk, Chief, Hydrological Sciences Division National Hydrology Research Institute Saskaton, Saskatchewan, Canada – «ICID BULLETIN, IRRIGATION, DRAINAGE AND FLOOD CONTROL IRRIGATION, 1994 – Volume 43/Number 2»

Διαδικτυακές Πηγές

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Γεωλογίας, Εκμετάλλευση & Διαχείριση Υπογείου Νερού, Σούλιος Γ., www.geo.auth.gr/763/

Agricultural Bureau of South Australia, «*Managing Soil Moisture*», Module 5, Better Soils, <http://www.agbureau.com.au/home.shtml>, <http://www.bettersoils.com.au/index.htm>

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

<http://oikoen.gr/selides-groundwater.htm>

<http://www.milos.gr>

Stormwater Management Planning and Design Manual 2003: http://www.ene.gov.on.ca/envision/gp/4329e_3.htm

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Γεωλογίας, Υδρογεωλογικές Μελέτες Λεκανών και Γεωλογικές Μελέτες Τεχνικών Έργων, Δημόπουλος Γ., <http://www.geo.auth.gr/881/>

ΤΕΕ, Τεύχος 2039: Η Υφαλμύρωση των Υπόγειων Υδάτων, 15 Φεβρουαρίου 1999 <http://www.tee.gr/online/epikaira/1999/2039/pg014.shtml>

Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία, Τμήμα Μεταλλειολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Μεταλλείων, Ε.Μ.Π., Κυρούσης Ι., (http://www.metal.ntua.gr/index.pl/7d3d07d8_gr)

<http://www.itia.ntua.gr/el/>

<http://www.merck.com/mmhe/sec12/ch158/ch158a.html>

<http://openarchives.gr/view/274993>

http://www.itia.ntua.gr/getfile/281/1/documents/er1_5-4.pdf

<http://www.itia.ntua.gr/el/docinfo/115/>

<http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9C%CE%AE%CE%BB%CE%BF%CF%82>

<http://www.milos-island.gr/geography/geography.gr.html>

<http://www.milos-island.gr/geography/milosmap.gr.html>

<http://www.milos-island.gr/geology/geology.gr.html>

<http://maps.google.com/maps?ll=36.71027,24.43222&spn=0.14312,0.207024&t=k&z=12&key=ABQIAAAAOV>