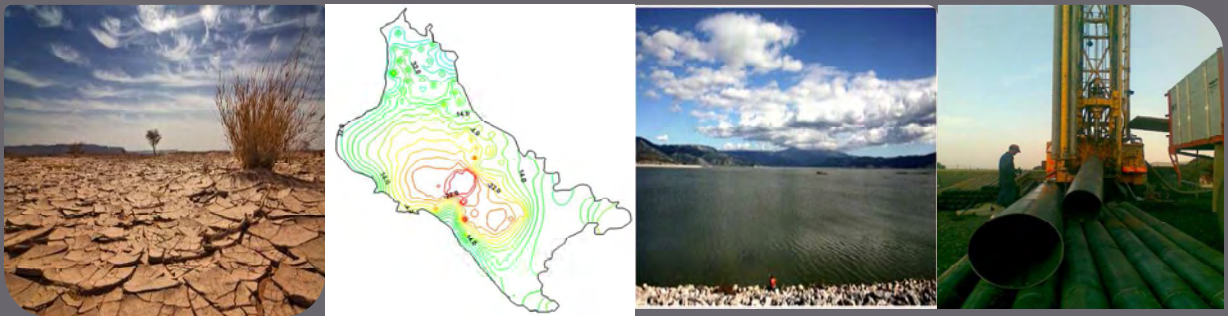


ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ :

«ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ
ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ ΚΑΡΛΑΣ ΣΤΗΝ
ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΤΗΤΑ, ΑΛΛΑΓΗ ΚΑΙ
ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΗ ΠΑΡΕΜΒΑΣΗ»



Ζαγορίτη Αικατερίνη

Διπλ. Μηχανικός Περιβάλλοντος

Βόλος, 2012



Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών (Π.Μ.Σ.)
«ΜΔΕ στην Εφαρμοσμένη Μηχανική και Προσομοίωση Συστημάτων»
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών (Π.Μ.Σ.)
«ΜΔΕ στην Εφαρμοσμένη Μηχανική και Προσομοίωση Συστημάτων»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ :

**«Απόκριση του υδροφορέα της λεκάνης απορροής της
λίμνης Κάρλας στην κλιματική μεταβλητότητα, αλλαγή και
ανθρωπογενή παρέμβαση»**

Μεταπτυχιακή Φοιτήτρια : Ζαγορίτη Αικατερίνη

Επιβλέπων : Λουκάς Αθανάσιος

Εξεταστική Επιτροπή : Μυλόπουλος Νικήτας

Λάμπρος Βασιλειάδης

Ευχαριστίες

Στον επιβλέποντα κ. Αθανάσιο Λουκά, Καθηγητή του τμήματος πολιτικών μηχανικών Π.Θ., εκφράζω τις θερμές ευχαριστίες μου για τη συνεχή επιστημονική καθοδήγηση και υποστήριξή του στην εκπόνηση της μεταπτυχιακής διπλωματικής μου εργασίας και την πολύτιμη συμβολή του καθ' όλη τη διάρκειά της.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Νικήτα Μυλόπουλο Αναπληρωτή Καθηγητή του τμήματος πολιτικών μηχανικών Π.Θ. και τον κ. Λάμπρο Βασιλειάδη, Διδάσκων Π.Δ.407/80 του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Π.Θ., για την συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή.

Επιπλέον ευχαριστώ θερμά τον Πολ. Μηχανικό Π.Θ. και Υπ. Διδάκτορα κ. Σιδηρόπουλο Παντελή, εργαζόμενο στο Φορέα Διαχείρισης της Κάρλας, για την ουσιαστική συμβολή του στην διεκπεραίωση της εργασίας μου.

Τέλος, αισθάνομαι την ανάγκη να αναφερθώ στην ηθική υποστήριξη και συμπαράσταση της οικογένειάς μου και των φίλων μου σε όλο το διάστημα διεκπεραίωσης αυτής της εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της παρούσας εργασίας αποτελεί η εκτίμηση της επίδρασης της κλιματικής μεταβλητότητας, καθώς και της ανθρώπινης παρέμβασης, στον υπόγειο υδροφορέα της Κάρλας.

Δεδομένα αποτελούν οι μηνιαίες τιμές υετόπτωσης από 12 βροχομετρικούς σταθμούς της ευρύτερης περιοχής για τη περίοδο Οκτώβριος 1960 έως Σεπτέμβριος 2002 (42 υδρολογικά έτη) και οι τιμές μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας από 26 μετεωρολογικούς σταθμούς για την ίδια περίοδο. Επίσης χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα μηνιαίας παροχής από τον υδρομετρικό σταθμό της λίμνης Κάρλας για τη βαθμονόμηση και την πιστοποίηση του υδρολογικού μοντέλου. Στη συνέχεια αναπτύχθηκε μεθοδολογία προσδιορισμού 100 χρονοσειρών βροχόπτωσης και θερμοκρασίας που προσδιορίστηκαν για την περίοδο 2009-2058 για τα κλιματικά σενάρια εκπομπών A2 και B2 (SRES).

Για την υδρολογική προσομοίωση εφαρμόστηκε το υδρολογικό μοντέλο UTHBAL με δεδομένα βελτιστοποίησης από την περίοδο 1960-2009. Το υδρολογικό μοντέλο UTHBAL εφαρμόστηκε ημι-κατανεμημένα (semi) στην υδρολογική λεκάνη της Κάρλας και εκτιμήθηκε η κατείσδυση στον υπόγειο υδροφορέα από την πεδινή υποπεριοχή της λεκάνης της Κάρλας.

Για την προσομοίωση του υπόγειου υδροφορέα της λίμνης Κάρλας χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας MODFLOW 2000. Οι μηνιαίες κατεισδύσεις που προέκυψαν από το μοντέλο UTHBAL αποτελούν 100 χάρτες απορροής οι οποίοι εισήχθησαν στοχαστικά στο πρόγραμμα MODFLOW και έδωσαν 100 χρονοσειρές απεικονίσεων των υδραυλικών υψών.

Με την παραπάνω μεθοδολογία εκτιμούμε την επίδραση της κλιματικής αλλαγής και μεταβλητότητας στον υπόγειο φυσικό υδροφορέα της Κάρλας. Επίσης εξετάστηκε η περίπτωση του υδροφορέα υπό συνθήκες εκμετάλλευσης. Η κατάσταση αυτή εξετάστηκε προσθέτοντας γεωτρήσεις άντλησης κατά την υπόγεια προσομοίωση, διεξάγοντας συμπεράσματα για την επιβάρυνση του υπόγειου υδατικού πόρου της Κάρλας, λόγω της ανθρώπινης επέμβασης.

Αξιολογώντας τα αποτελέσματα της μελέτης, η κλιματική αλλαγή δεν επηρεάζει με ταπείνωση τον φυσικό υδροφορέα της Κάρλας. Ο βαθμός όμως της ανθρώπινης εκμετάλλευσης του υδροφορέα είναι αρκετά έντονος και αυτό απαιτεί άμεσο επαναπροσδιορισμό των υδατικών απαιτήσεων σε νερό, πριν γίνει η

κατάσταση μη αναστρέψιμη για την λεκάνη και τον υπόγειο υδροφορέα της περιοχής.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Ευχαριστίες	3
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	6
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	8
1. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	10
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	10
1.2 ΚΛΙΜΑΤΙΚΕΣ - ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	11
1.3 ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΔΟΜΗ	11
1.3.1 Γεωμορφολογία	11
1.3.2 Στρωματογραφία και Τεκτονική	12
1.4 ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΥΔΡΟΦΟΡΙΩΝ	15
1.4.1 Υδροφόροι Σχηματισμοί	15
1.4.2 Υδροφορία Προσχωματικού και Πεδινού Τμήματος της Κάρλας	16
1.4.3 Τροφοδοσία – Πιεζομετρία	17
1.4.4 Εκμετάλλευση – Απόδοση των υδροφορέων	21
1.4.5 Αρδευτική – Υδρευτική Εκμετάλλευση του Υπόγειου Υδροφορέα	24
1.5 ΑΠΟΞΗΡΑΝΣΗ ΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ	24
1.6 ΈΡΓΑ ΑΝΑΣΥΣΤΑΣΗΣ ΛΙΜΝΗΣ ΚΑΡΛΑΣ	27
1.6.1 Στόχοι του Έργου Επανασύστασης	27
1.6.2 Περιγραφή Λειτουργίας του Έργου	29
1.6.3 Κατασκευαζόμενα Έργα	32
1.6.4 Σημερινή Κατάσταση Λίμνης Κάρλας	32
2. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ	36
2.1 ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ	36
2.2 ΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ	39
2.3 ΣΕΝΑΡΙΑ ΕΚΠΟΜΠΩΝ	41

2.4 ΚΑΤΑΒΙΒΑΣΜΟΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ.....	44
2.4.1 Στατιστικός Καταβιβασμός Κλίμακας.....	44
2.4.2 Καταστάσεις που απαιτούν στατιστικό καταβιβασμό κλίμακας.....	46
2.4.3 Θεωρητική Προσέγγιση Μεθοδολογίας Στατιστικού Καταβιβασμού.....	47
3. ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΡΟΗΣ.....	53
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	53
3.2 ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ UTHBAL.....	54
3.3 ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΡΟΩΝ (GROUNDWATER MODELING SYSTEM – GMS 6.0).....	59
3.3.1 Γενικά.....	59
3.3.2 Ο Κώδικας Modflow	60
3.4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΤΗΝ ΛΕΚΑΝΗ ΑΠΟΡΡΟΗΣ	74
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ	79
4.1 ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΑ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ	79
4.2 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΩΝ	81
4.2.2 Θερμοκρασία.....	81
4.2.3 Βροχόπτωση	84
4.3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑΣ	95
4.4 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ.....	103
4.4.1 Προσομοίωση Φυσικού Υδροφορέα.....	108
4.4.2 Εκτίμηση κλιματική αλλαγής σε ένα σημείο του Υδροφορέα	112
4.4.3 Προσομοίωση Υδροφορέα υπό συνθήκες εκμετάλλευσης.....	119
4.4.3.1 Σύγκριση Προσομοίωσης φυσικού και υπό άντληση Υδροφορέα.....	130
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	140
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	142
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	147

Στις μέρες μας όλο και εμφανέστερη γίνεται η καταστροφή που συντελείται από τον άνθρωπο στους υδάτινους πόρους. Η εντατική εκμετάλλευση των υπόγειων νερών λειτουργούν αποστραγγιστικά, αφαιρώντας συχνά από τους υδροφορείς ποσότητες νερών μεγαλύτερες των ετήσια ανανεώσιμων υπογείων υδατικών αποθεμάτων. Εξαιτίας αυτού προκαλείται συνεχής πτώση της υδροστατικής στάθμης και της πιεζομετρικής επιφάνειας, κατάσταση που οδηγεί σε ελαττώσεις των υδραυλικών φορτίων των υπόγειων νερών. Το ανθρωπογενούς προέλευσης φαινόμενο αυτό οδηγεί συχνά σε ποιοτική υποβάθμιση της θάλασσάς στους υδροφορείς και σε καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους.

Επίσης, η κλιματική αλλαγή επιφέρει κι αυτή αλλαγές στους υπόγειους υδροφορείς, σύμφωνα με μελέτες που έχουν γίνει (Μαλλιαρός, 2010, Τσελέπη 2009). Η σοβαρότητα των αναμενόμενων επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής κυμαίνεται ανάλογα με την περιφέρεια. Τα στοιχεία, από τις πλέον πρόσφατες επιστημονικές διαπιστώσεις στις οποίες προέβη η Διακυβερνητική Ομάδα για την Κλιματική Αλλαγή (Intergovernmental Panel for Climate Change - IPCC) στο πλαίσιο της 4ης έκθεσης αξιολόγησης (4th Assessment report - AR4), επιβεβαιώνουν πέραν πάσης αμφιβολίας τις αρνητικές επιπτώσεις της αλλαγής του κλίματος.

Στο πλαίσιο των κλιματικών αλλαγών που έχουν καταγραφεί κατά τη διάρκεια του 20ου αιώνα, είναι σημαντική η εκτίμηση της ανθρώπινης παρέμβασης στους υπόγειους υδροφορείς, με σκοπό την ολοκληρωμένη διαχείριση των υδατικών πόρων.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση και η εκτίμηση της επίδρασης που έχει η κλιματική αλλαγή καθώς και η λειτουργία γεωτρήσεων άντλησης στον υπόγειο υδροφορέα της Κάρλας.

Στο **1ο Κεφάλαιο** παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά της Υδρολογικής Λεκάνης της Κάρλας, μέσα στην οποία βρίσκεται και η περιοχή μελέτης. Η ευρύτερη αυτή Λεκάνη καταλαμβάνει έκταση 1.663.000 στρεμμάτων, ενώ η περιοχή του υπό προσομοίωση Υπόγειου Υδροφορέα καταλαμβάνει 500.000 στρέμματα. Γίνεται αναφορά στη γεωλογική της σύσταση – τόσο του ανάγλυφου, όσο και του υπόβαθρου - στους τύπους των Υδροφορέων που συναντώνται καθώς και στις πιεζομετρικές συνθήκες της στάθμης της περιοχής. Επίσης παρουσιάζονται οι αρδευτικές και υδρευτικές απαιτήσεις της ευρύτερης Λεκάνης. Τέλος γίνεται

αναφορά στην αποστράγγιση της λίμνης πριν από χρόνια, στα έργα και στους λόγους ανασύστασής της σήμερα.

Στο **2° Κεφάλαιο** παραθέτονται γενικές πληροφορίες για την κλιματική αλλαγή, καθώς και για τα κλιματικά μοντέλα και τα σενάρια τα οποία χρησιμοποιήθηκαν. Στη συνέχεια περιγράφεται ο στατιστικός καταβιβασμός κλίμακας ο οποίος χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, και η θεωρητική προσέγγιση μεθοδολογίας του.

Στο **3° Κεφάλαιο** περιγράφεται το σύστημα μοντέλων προσομοίωσης που εφαρμόστηκε στην παρούσα εργασία. Γίνεται λεπτομερής αναφορά στο υδρολογικό μοντέλο UTHBAL που προσομοιώνει την μετατροπή της βροχόπτωσης σε απορροή και στο μοντέλο *MODFLOW*, το οποίο χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της υπόγειας ροής του υδροφορέα. Στο τέλος του κεφαλαίου το ενδιαφέρον εστιάζεται στη συνδεσμολογία των δύο αυτών μοντέλων.

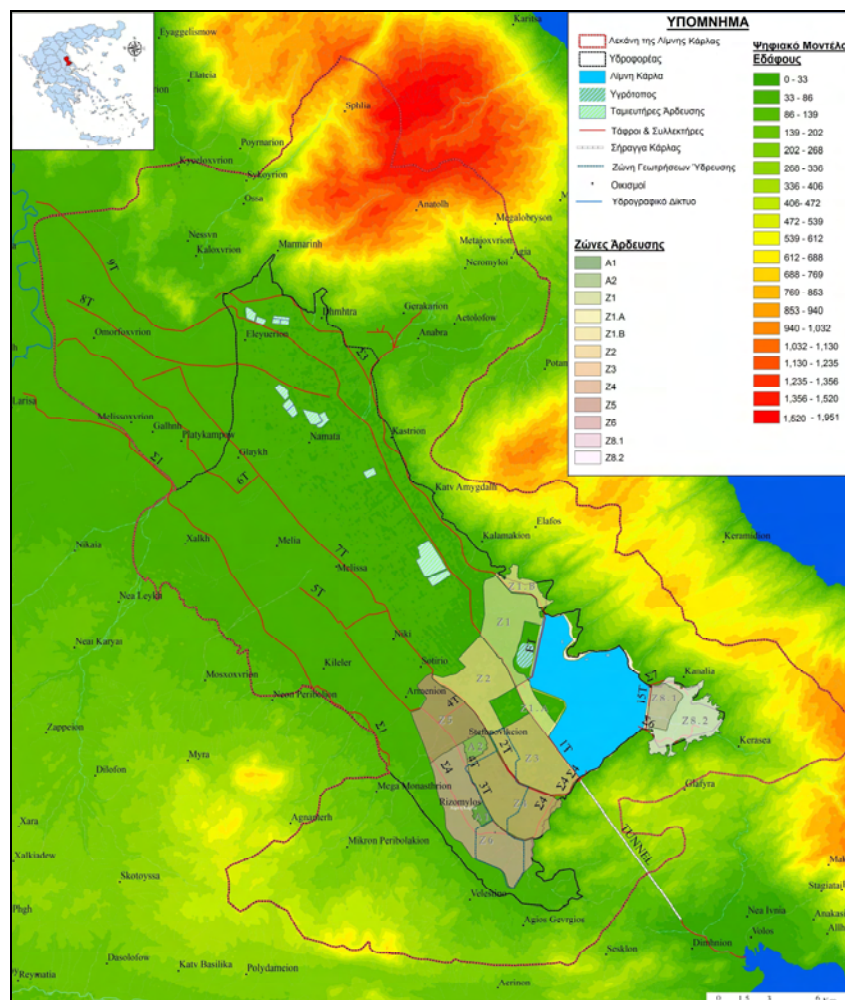
Στο **4° Κεφάλαιο** περιγράφεται αναλυτικά η μεθοδολογία του ακολουθήθηκε στην μελέτη αυτή καθώς και τα αποτελέσματα της. Αρχικά περιγράφονται τα παγκόσμια και χωρικά κλιματικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για τον καταβιβασμό κλίμακας. Στη συνέχεια αναλύεται η βαθμονόμηση και η πιστοποίηση του υδρολογικού μοντέλου για την ιστορική περίοδο καθώς και ο προσδιορισμός χρονοσειρών βροχόπτωσης και θερμοκρασίας για την περίοδο 2009-2058 για τα κλιματικά σενάρια A2 και B2. Έπειτα αναλύεται η υδρολογική προσομοίωση με την οποία εκτιμήθηκε η κατείσδυση στον υπόγειο υδροφορέα από την πεδινή υποπεριοχή της λεκάνης της Κάρλας. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η προσομοίωση του υπόγειου υδροφορέα της λεκάνης απορροής της Κάρλας και εξετάστηκε η απόκριση του υπόγειου φυσικού υδροφορέα υπό συνθήκες κλιματικής αλλαγής. Στο τέλος μελετάται το σενάριο της ύπαρξης των γεωτρήσεων άντλησης και διερευνάται η επίδρασή τους στον υπόγειο υδροφορέα. Παράλληλα προβάλλονται και τα αντίστοιχα αποτελέσματα.

Τέλος, στο **5° Κεφάλαιο** παρουσιάζονται αναλυτικά τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας.

1. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

1.1 Εισαγωγή

Η λεκάνη της Κάρλας βρίσκεται στο ΝΑ άκρο της πεδιάδας της Λάρισας και παρουσιάζει μορφή κλειστής, επιμήκους λεκάνης, μήκους 35 χλμ. και πλάτους 9 - 15 χλμ. Η λεκάνη έχει όρια στο Βορρά τον ποταμό Πηνειό και τον ορεινό όγκο της Όσας, στην Ανατολή τους ορεινούς όγκους του Μαυροβουνίου και του Πηλίου, στο Νότο το Μακεδόνιο όρος και το Μεγαβούνι και στη Δύση το Φυλλήιον όρος. Στο μέσο της λεκάνης αυτής βρίσκεται το βαθύτερο τμήμα της Θεσσαλικής πεδιάδας, τα χαμηλότερα τμήματα της οποίας μέχρι το 1961, καλύπτονταν από τα νερά της λίμνης, που αποτελούσε πριν από την εκτέλεση των έργων και τον κύριο αποδέκτη της. Διοικητικά η περιοχή υπάγεται στους νομούς Λαρίσης και Μαγνησίας.



Σχήμα 1.1: Λεκάνη απορροής της λίμνης Κάρλας

Η φυσική λεκάνη της Κάρλας έχει συνολική έκταση 1663 km² ή 1.663.000 στρεμμάτων. Μετά το 1950 με την κατασκευή του Συλλεκτήρα Σ1 αποκόπηκε τμήμα της λεκάνης και η έκταση της λεκάνης απορροής της Κάρλας είναι πλέον 1100 km². Το 1960 περατώθηκε η διάνοιξη της σήραγγας Κάρλας, ως πρώτο στάδιο έργων για την κατασκευή στην συνέχεια και του ταμιευτήρα της Κάρλας. Με τη σήραγγα αποχετεύεται η κλειστή λεκάνη Κάρλας προς τον Παγασητικό. Την ίδια περίπου εποχή κατασκευάστηκαν οι τάφροι 1Τ, 2Τ και διάφορες άλλες δευτερεύουσες τάφροι που αποχετεύουν την πεδιάδα προς τη σήραγγα. Πλέον έχουν ολοκληρωθεί και τα έργα κατασκευής του ταμιευτήρα, εκτάσεως 38 km², και έτσι έκλεισε η μεγάλη σε χρόνο περίοδος των έργων υποδομής της περιοχής.

1.2 Κλιματικές - Υδρολογικές Συνθήκες

Το μικροκλίμα της περιοχής κατατάσσεται στο Μεσογειακό, ηπειρωτικού χαρακτήρα, που χαρακτηρίζεται από ζεστό και ξηρό καλοκαίρι και από ψυχρό και υγρό χειμώνα. Τα στοιχεία από τους βροχομετρικούς σταθμούς της περιοχής δείχνουν αυξημένες βροχοπτώσεις πριν από την αποξήρανση της λίμνης.

Το μέσο ετήσιο ύψος βροχής της περιοχής ανέρχεται στα 450 mm. Αναλυτικότερη όμως παρουσίαση της Υδρολογικής Κατάστασης της περιοχής γίνεται στο 4^ο Κεφάλαιο, όπου τα στοιχεία προέρχονται από τη μελέτη του Υδατικού Ισοζυγίου της Υδρολογικής Λεκάνης της Κάρλας. Η μέση θερμοκρασία είναι πάντα πάνω από το μηδέν, αλλά η χαμηλότερη θερμοκρασία που παρατηρήθηκε κατά το χειμώνα είναι -21,6° C. Η μέγιστη θερμοκρασία που παρατηρήθηκε το καλοκαίρι ήταν 45,2° C. Επίσης, στην περιοχή παρατηρούνται παγετοί κατά την περίοδο Δεκεμβρίου- Μαρτίου και σπανιότερα κατά τους μήνες Νοέμβριο και Απρίλιο. Η μέση σχετική υγρασία στην περιοχή είναι 66%.

1.3 Γεωλογική Δομή

1.3.1 Γεωμορφολογία

Η ανατολική Θεσσαλία αποτελεί μία κλειστή πεδινή λεκάνη. Στην νοτιοανατολική της πλευρά, η οροσειρά του Μαυροβουνίου, με υψόμετρο 800 μ. περίπου,

σχηματίζει το φυσικό εμπόδιο προς τη θάλασσα του Αιγαίου Πελάγους. Βορειότερα, η οροσειρά αυτή προεκτείνεται και συνδέεται με τον Ορεινό όγκο της Όσσας και του Ολύμπου, που απομονώνουν το βορειοανατολικό τμήμα της λεκάνης από τη θάλασσα. Υδρογραφικώς η ανατολική Θεσσαλία διαθέτει σήμερα μία μόνο έξοδο προς τη θάλασσα, την κοιλάδα των Τεμπών, μεταξύ Ολύμπου και Όσσας, από την οποία διέρχεται ο Πηνειός ποταμός. Σε παλαιότερους γεωλογικούς χρόνους, φαίνεται ότι από την κοιλάδα των Τεμπών διέφυγαν προς τη θάλασσα όλα τα νερά της ανατολικής Θεσσαλίας.

Μεταγενέστερα η περιοχή υπέστη μία γενική καθίζηση, που είναι πιθανό να συνεχίζεται και σήμερα, με αποτέλεσμα η επιφάνεια του εδάφους στο ΝΑ τμήμα της λεκάνης να βρεθεί σε χαμηλότερο υψόμετρο απ' ότι στη ΒΔ πλευρά της. Έτσι η ροή των επιφανειακών υδάτων δεν γινόταν πλέον προς την κοιλάδα των Τεμπών. Το ΝΑ τμήμα της ανατολικής Θεσσαλίας κατακλύσθηκε από τα νερά, που σχημάτισαν τη λίμνη της Κάρλας. Κατά καιρούς η λεκάνη δεχόταν όχι μόνο τα νερά των χειμάρρων των γύρω ορεινών περιοχών που συγκλίνουν προς αυτήν, αλλά και τα νερά του Πηνειού ποταμού, που πλημμύριζαν την περιοχή της Λάρισας.

Η συνολική έκταση της φυσικής υδρολογικής λεκάνης της Κάρλας ανερχόταν παλαιότερα σε 1661,2 τετ. χλμ. Σήμερα, όμως, μεγάλα τμήματά της έχουν αποκοπεί με τεχνητό τρόπο και η επιφανειακή απορροή τους οδηγείται στον Πηνειό. Με τον τρόπο αυτόν διευκολύνθηκε η αποξήρανση της λίμνης.

Η αρχική φυσική λεκάνη υποδιαιρείται από γεωμορφολογική και υδρολογική άποψη σε έξι υδρολογικές υπολεκάνες. Δεν αποκλείεται μελλοντικά ορισμένες από αυτές τις υπολεκάνες να χρησιμοποιηθούν για τον τεχνητό εμπλουτισμό των υπόγειων υδροφόρων οριζόντων (Μουστάκα, 2003).

1.3.2 Στρωματογραφία και Τεκτονική

Η ανατολική Θεσσαλία ανήκει κυρίως στην γεωτεκτονική ενότητα της Πελαγονικής ζώνης, ενώ ένα μικρό τμήμα της, στην περιοχή του Πηλίου, είναι πιθανόν να ανήκει στην Αττικοκυκλαδική Μάζα.

Η Πελαγονική ζώνη συγκροτείται από δύο μεγάλες ενότητες:

Το υπόβαθρο, που σχηματίζεται από τα ημιμεταμορφωμένα πέρμο- τριαδικά πετρώματα (φυλλίτες) και τη σχιστοκερατολιθική διάπλαση με οφιόλιθους.

Τα ανθρακικά καλύμματα που αποτελούνται από ελαφρά μεταμορφωμένους ασβεστόλιθους Τριαδικού, Ιουραστικού και Κρητιδικού, που είναι επωθημένοι επάνω στους φυλλίτες και στους οφιόλιθους.

Η Αττικοκυκλαδική Μάζα αντιπροσωπεύεται από ισχυρώς μεταμορφωμένα πετρώματα (-γνεύσιους και μάρμαρα-), τα οποία βρίσκονται επωθημένα επάνω στους σχηματισμούς της Πελαγονικής ζώνης. Συχνά είναι δύσκολο να διαχωριστούν τα μάρμαρα της Αττικοκυκλαδικής από τους μεσοζωικούς ασβεστόλιθους της Πελαγονικής, που είναι επίσης ελαφρά μεταμορφωμένοι.

Η λεκάνη της Κάρλας σχηματίστηκε από ένα τεκτονικό βύθισμα, που συνέβη κατά το Πλειόκαινο ή Πλειστόκαινο, στην περιοχή μεταξύ Λάρισας και Βελεστίου. Το βύθισμα αυτό πληρώθηκε αργότερα με λιμναία ιζήματα και προσχώσεις που προήλθαν από την αποσάθρωση των γύρω οροσειρών. Μέσα στο βύθισμα σχηματίστηκε και η λίμνη Κάρλα. Φαίνεται ότι η απόθεση των προσχώσεων έγινε συγχρόνως με την καταβύθιση της περιοχής, με αποτέλεσμα τα πάχη των ιζημάτων να είναι αρκετά μεγάλο και σε ορισμένα σημεία να ξεπερνά τα 300 μ. Η πεδιάδα, σήμερα, έχει υψόμετρο 44 – 65 m περίπου.

Το υπόβαθρο της λεκάνης αποτελείται από σχιστόλιθους και μάρμαρα. Τα μάρμαρα βρίσκονται κατά κανόνα εναπωθημένα επάνω στους σχιστόλιθους. Έτσι, η λεκάνη έχει σχηματισθεί επάνω σε αδιαπέραστους σχηματισμούς και είναι σχεδόν απομονωμένη από την θάλασσα του Παγασητικού κόλπου ή του Αιγαίου πελάγους. Όμως, η παρουσία καταβόθρων στην ανατολική πλευρά της λίμνης, από την οποία διέφευγαν τα νερά της προς γειτονικές περιοχές και πιθανότατα προς το Αιγαίο, δείχνει ότι υπάρχει επικοινωνία (-έστω και μικρή-) μεταξύ θάλασσας και περιοχής της λίμνης.

Το πάχος των τεταρτογενών αποθέσεων της πεδιάδας της Κάρλας όπως προκύπτει από γεωφυσικές έρευνες (SOGREAH, 1974) ποικίλλει από τόπο σε τόπο και ξεπερνά κατά θέσεις τα 300 μ. (περιοχή Χάλκης – Αγιάς >550 μ.) εξαρτώμενο από την σύνθετη γεωμετρία του υποβάθρου εξαιτίας του τεκτονισμού.

Σήμερα στη λεκάνη της Κάρλας υπάρχουν γεωτρήσεις με γλυκά ή υφάλμυρα νερά. Φαίνεται ότι η υφαλμύρυνση δεν προέρχεται από σύγχρονες (σημερινές) εισροές θαλασσινού νερού, αλλά οφείλονται σε νερά της λίμνης, εμπλουτισμένα σε άλατα λόγω της συνεχούς εξάτμισης, τα οποία συγκεντρώθηκαν στον πυθμένα της λίμνης και εγκλωβίστηκαν μέσα στα μάρμαρα και στις προσχώσεις που τα κάλυψαν. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται κυρίως στο νότιο τμήμα της λεκάνης. Πολλές από τις υφιστάμενες γεωτρήσεις έχουν διαπεράσει τόσο τις προσχώσεις, όσο και τα υποκείμενα μάρμαρα, με αποτέλεσμα να υπάρχει επικοινωνία σήμερα μεταξύ των προσχωσιγενών σχηματισμών και των καρστικών υδροφόρων οριζόντων. Έτσι είναι πολύ δύσκολο να εξακριβωθεί εάν υπάρχει ποιοτική διαφορά μεταξύ των νερών των δύο τύπων υδροφόρων οριζόντων.

1.4 Εκμετάλλευση Υπόγειων Υδάτων και Συμπεριφορά Υδροφοριών

1.4.1 Υδροφόροι Σχηματισμοί

Στην περιοχή της Κάρλας διακρίνουμε τρεις κυρίως υδροφόρους σχηματισμούς: τις αργιλοαμμώδεις λιμναίες αποθέσεις, τις αδρομερείς προσχώσεις και κορήματα και τα μάρμαρα (Μπεζές 2004, Υποστηρικτική Υδρογεωλογική Μελέτη 1999). Συνήθως οι σχηματισμοί αυτοί διατάσσονται στον χώρο με την σειρά που αναφέρθηκαν, από την επιφάνεια του εδάφους προς τα μεγαλύτερα βάθη.

Μέσα στους υδροφόρους σχηματισμούς, που αναφέρθηκαν παραπάνω, σχηματίζονται αντίστοιχα οι τρεις βασικοί υδροφόροι ορίζοντες:

- α) Ο υδροφόρος ορίζοντας των αργιλοαμμωδών λιμναίων αποθέσεων.
- β) Ο υδροφόρος ορίζοντας των αδρομερών κροκαλολατυποπαγών και
- γ) ο υδροφόρος ορίζοντας των μαρμάρων (καρστικός).

Οι τρεις παραπάνω υδροφόροι ορίζοντες είναι τοποθετημένοι ο ένας επάνω στον άλλο (επάλληλοι ορίζοντες). Δεν συναντώνται σε όλες τις περιοχές της Κάρλας, αλλά από ορισμένες περιοχές είναι δυνατόν να απουσιάζει κάποιος ορίζοντας (όπως π.χ. ο καρστικός).

Η έκταση των τριών υδροφόρων οριζόντων, το πάχος των υδροφόρων στρωμάτων και το βάθος τους από την επιφάνεια του εδάφους δεν είναι ομοιόμορφα σε όλη την έκταση του πεδινού τμήματος της Κάρλας. Παρατηρούνται, κατά την οριζόντια και κατακόρυφη έννοια μεγάλες

διαφοροποιήσεις από περιοχή σε περιοχή, οι οποίες μας υποχρεώνουν να υποδιαιρέσουμε την ευρύτερη περιοχή σε ζώνες, όπως περιγράφεται παρακάτω.

1.4.2 Υδροφορία Προσχωματικού και Πεδινού Τμήματος της Κάρλας

Στην περιοχή, κυρίως της παλιάς λίμνης, αναπτύσσεται ένας συνεχής ανώτερος ορίζοντας αργίλων και λεπτών άμμων κυμαινόμενου πάχους από 50-100 μ., που επικάθεται πάνω σε πλέον αδρόκοκκα υλικά. Στα νότια τμήματα του ταμιευτήρα, κοντά στα κράσπεδα των μαρμάρων, το πάχος αυτό είναι σχετικά μικρότερο και φθάνει μέχρι τα 60μ. Κάτω από το επιφανειακό αυτό στρώμα αναπτύσσονται εναλλαγές αδρομερών με λεπτόκοκκους ορίζοντες υλικών και δημιουργούνται έτσι συνθήκες υπό πίεση στις εκεί συναντώμενες υδροφορίες. Στο νοτιοανατολικό τμήμα της πεδινής έκτασης, οι αδρομερείς αυτοί ορίζοντες ελαττώνονται σε πάχος και εδώ (παλιά λίμνη Κάρλας) κυριαρχούν, με μικρές εξαιρέσεις, τα αργιλοϊλυώδη στρώμα.

Στα νότια περιθώρια της λίμνης Κάρλας, κοντά στην περιοχή διάνοιξης της αποστραγγιστικής σήραγγας, οι γεωτρήσεις κάτω από τα αργιλοϊλυώδη επιφανειακά υλικά έχουν εντοπίσει μεγάλου πάχους κροκαλολατυποπαγείς αποθέσεις, η υδροφορία των οποίων δεν πρέπει να βρίσκεται σε άμεση επικοινωνία με αυτή των μαρμάρων, όπως προκύπτει από τα παλιότερα γεωτρητικά δεδομένα. Η εκεί απόθεση των αδρομερών αυτών υλικών πρέπει να συνδέεται με τα πρώτα στάδια πλήρωσης της τεκτονικής τάφρου από τους περιβάλλοντες ορεινούς όγκους. Κατά τη φάση διάνοιξης της γεώτρησης SR79 (περί τα 2km BA της εισόδου της σήραγγας) συναντήθηκαν οι αδρομερείς αυτές αποθέσεις και παρατηρήθηκε αρτεσιανισμός, που υποδηλώνει τη δυσκολία αποστράγγισης των προσχωματικών υδροφοριών στους διπλανούς ευρισκόμενους καρστικούς, η στάθμη στους οποίους ήταν πολύ χαμηλότερη όπως προκύπτει από παρατηρήσεις στην γεώτρηση 8K64 που διέτρησε το καρστ (10/73 SR79: +44,24, SR64: +14,64).

Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των αλλούβιων της ευρύτερης περιοχής της Κάρλας είναι η ύπαρξη κατά θέσεις, αλατούχων αργίλων και λεπτόκοκκων άμμων, οι οποίοι επιβαρύνουν τα υπόγεια νερά με χλωριόντα. Η αυξημένη αυτή αλατότητα των υπογείων νερών δεν έχει σχέση με τη θάλασσα, αλλά οφείλεται στη διάλυση των αλατούχων εδαφών της παλιάς λίμνης.

Στο τμήμα αυτό της πεδιάδας δύο είναι οι κύριες ζώνες όπου εντοπίζεται σχετικό υδρογεωλογικό ενδιαφέρον : οι περιοχές Χάλκης και Αρμενίου –Στεφανοβίκειου - Ριζόμυλου. Στις περιοχές αυτές, οι οποίες βρίσκονται πλησιέστερα προς την κύρια πηγή τροφοδοσίας των πλέον αδρομερών αποθέσεων (κώνοι χειμάρρων - κορήματα), συναντώνται υδροφόρα στρώματα που αποτελούνται από άμμους και χαλίκια εντός των αργιλικών αποθέσεων. Στις ζώνες επίσης αυτές αναπτύσσεται και το μεγαλύτερο πάχος των συγχρόνων αποθέσεων που στη μεν Χάλκη ξεπερνά τα 550μ., στη δε ζώνη Αρμενίου - Στεφανοβίκειου Ριζόμυλου τα 280μ. Στη συνέχεια εξετάζεται η υδροφορία Αρμενίου - Στεφανοβίκειου - Ριζόμυλου που βρίσκεται στην άμεση επιρροή των έργων επαναδημιουργίας της λίμνης Κάρλας.

1.4.3 Τροφοδοσία – Πιεζομετρία

Η τροφοδοσία των βαθιών αυτών υπό πίεση υδροφορέων της ευρύτερης περιοχής Κάρλας είναι μικρή και πραγματοποιείται με δυσκολία από:

την πλευρική τροφοδοσία των πλειοκαινικών λόφων και τους κώνους που σχηματίζουν οι μικροί χείμαρροι στα δυτικά και ανατολικά για το υπόλοιπο της πεδιάδας (Κουσμπασανιώτης, Ξεριάς, κλπ.).

Η τροφοδοσία από τη βροχή που πέφτει κατ' ευθείαν στο επιφανειακό ανάπτυγμα είναι πολύ μικρή εξαιτίας του μικρού συντελεστή κατείσδυσης στα λεπτόκοκκα επιφανειακά αλλούβια.

Οι ανεπτυγμένοι καρστικοί σχηματισμοί που περιβάλλουν τα νοτιοανατολικά περιθώρια της πεδιάδας, δεν τροφοδοτούν τις υδροφορίες των αλλούβιων. Εδώ, ένα μέρος των νερών των σύγχρονων αποθέσεων μεταγγίζεται με υπερχειλίση (βραδέως) μέσα στην ακόρεστη ζώνη του καρστ, το οποίο κανονικά έχει εδώ χαμηλότερη πιεζομετρία και συνεπώς αποστραγγίζεται μαζί με τα καρστικά νερά προς τη θάλασσα.

Οι υπόγειες προσχωματικές υδροφορίες που αναπτύσσονται στην ευρύτερη πεδινή περιοχή της Κάρλας βρίσκονται κάτω από καθεστώς υπερεκμετάλλευσης. Στην ευρύτερη περιοχή Αγ. Γεωργίου - Βελεστίνου - Ριζόμυλου και Στεφανοβίκειου έχει αναπτυχθεί μεγάλος αριθμός γεωτρήσεων που κατασκευάστηκαν κατά το παρελθόν. Η εικόνα της παρουσίας πλούσιας υπόγειας υδροφορίας στην περιοχή είναι όμως πλασματική. Όπως προκύπτει από την επεξεργασία όλων των πιεζομέτρων των προσχωματικών υδροφοριών, με εξαίρεση αυτών που είναι τοποθετημένα στα επιφανειακά στρώματα, υπάρχει συνεχής συστηματική και έντονη ταπείνωση της υπόγειας στάθμης χρόνο με το

χρόνο. Η ταπείνωση αυτή οφείλεται στις μεγάλες ποσότητες αντλούμενων νερών έναντι της ελλιπούς τροφοδοσίας και επαναπλήρωσης των υδροφορέων στο σύνολό τους. Η κατάσταση αυτή δεν επιτρέπει περαιτέρω αύξηση των εκμεταλλεύσεων, αλλά αντίθετα απαιτεί μεγάλη μείωση αυτών.

Η εκτίμηση αυτή βασίσθηκε στην επεξεργασία των υπαρχουσών περιοδικών -και αξιόπιστων γενικά μετρήσεων της πιεζομετρικής στάθμης των υδροφορέων που πραγματοποιεί η Υ.Ε.Β. κάθε μήνα σε 40 γεωτρήσεις και πιεζόμετρα στο χώρο της ευρύτερης πεδινής περιοχής της Κάρλας.

Εξαιτίας της έντονης πτώσης στάθμης που παρατηρείται στα πιεζόμετρα του προσχωματικού πεδίου, υπάρχει το ενδεχόμενο τοπικά η γενική αυτή κίνηση του υπόγειου νερού να αντιστραφεί και να προκύψει ροή κατά θέσεις του νερού του καρστ προς τις προσχώσεις. Η άποψη αυτή που διατυπώνεται τελευταία δεν είναι δυνατόν σήμερα να τεκμηριωθεί αξιόπιστα. Στο θέμα αυτό παραθέτουμε τις παρακάτω παρατηρήσεις (Μελέτη Επαναδημιουργίας Λίμνης Κάρλας – Υποστηρικτική Υδρογεωλογική Μελέτη, 1999).

Στην περιοχή των νοτίων καρστικών κρασπέδων της ευρύτερης πεδινής ζώνης της Κάρλας (περιοχή σήραγγας - Ριζόμυλου - Αγ. Γεωργίου) δεν υπάρχουν συνεχείς πιεζομετρικές παρατηρήσεις της διακύμανσης στάθμης των καρστικών υδροφοριών σε αντίθεση με τα βορειοανατολικά όρια της téως λίμνης (περιοχή Καναλιών - Καλαμακίου). Στα νότια κράσπεδα, υπάρχουν μόνο στοιχεία κατά τη διάνοιξη των γεωτρήσεων κατά το παρελθόν, που έχουν διατηρήσει τα εκεί αναπτυσσόμενα μάρμαρα.

Οι αρδευτικές γεωτρήσεις SR63 και SR64 (περιοχή σήραγγας), που κατασκευάστηκαν το 1973-74 και έχουν διατηρήσει μάρμαρα, είχαν συναντήσει την υπόγεια υδροφορία σε απόλυτα υψόμετρα +17,07 (3/74) και +14,64 (10/73) αντίστοιχα. Αντίθετα, η γεώτρηση SR79 (2km ΒΑ στομίου σήραγγας), που συνάντησε κάτω από τις αργιλοϊλυώδεις αποθέσεις της λίμνης και σε βάθος από 100-283 κροκαλοπαγή, παρουσίαζε αρτεσιανισμό και απόλυτο υψόμετρο στάθμης +44,24. Το γεγονός αυτό, της τόσο μεγάλης υψομετρικής διαφοράς της υπόγειας στάθμης σε κοντινή θέση από τα καρστικοποιημένα μάρμαρα, υποδεικνύει ανεξαρτησία μεταξύ των υπογείων υδροφοριών των σύγχρονων αποθέσεων και των μαρμάρων. Η υψηλή αυτή στάθμη υποδηλώνει δυσκολία και παρεμπόδιση αποστράγγισης της υδροφορίας των σύγχρονων αποθέσεων στο καρστ.

Πίνακας 1.1: Πιεζόμετρα ευρύτερης περιοχής Κάρλας.

A/A	Πιεζόμετρο	Δήμος ή Κοινότητα	Περίοδος αντλήσεων	Συνολική ** Πτώση στάθμης (m)
1.	E3	Βελεστίνο	4/72 – 8/90	19,12
2.	AG12	Γλαύκη	9/79 – 12/97	
3.	AG12α	Γλαύκη	9/79 – 12/97	0,31
4.	Π6Λ	Ελευθέριο	6/74 – 11/98	-0,42
5.	SR35	Ελευθέριο	11/72 – 11/98	0,27
6.	402	Καλαμάκι	5/72 – 7/94	5,4
7.	PZ64*	Καλαμάκι	2/80 – 4/98	6,55
8.	SR68*	Καλαμάκι	9/76 – 11/98	2,23
9.	LB202*	Καλαμάκι	8/79 – 11/98	3,95
10.	PZ65*	Καλαμάκι	11/80 – 11/98	8,32
11.	PZ45*	Καστρί	4/80 – 11/98	7,43
12.	SR32	Κυψέλη	12/72 – 11/98	75,13
13.	SR43	Κυψέλη	10/73 – 11/98	50,82
14.	PZ68	Μ. Μοναστήρι	2/80 – 4/94	18,07
15.	SR77	Μελισσώρι	6/74 – 11/98	22,26
16.	SR31	Μέλισσα	5/73 – 11/98	34,94
17.	PZ67	Μέλισσα	3/80 – 11/98	10,58
18.	AD11	Μοδεστός	12/72 – 11/98	37,43
19.	PZ50	Νάματα	3/80 – 11/98	0,93
20.	SR66	Νίκη	10/73 – 12/98	16,51
21.	AG14	Νίκη	12/11/98	21
22.	SR72	Ομορφοχώρι	1/74 – 11/98	27,63
23.	SR60	Ομορφοχώρι	5/84 – 10/97	20,73
24.	PZ7	Πλασιά	Σταθμηγράφος	7,29
25.	PZ7α	Πλασιά	3/84 – 11/98	2,97
26.	SR29	Πλατύκαμπος	12/72 – 11/98	34,7

27.	SR63a	Ριζόμυλος	10/73 – 11/98	21,68
28.	SR63b	Ριζόμυλος	10/73 – 11/98	18,65
29.	AG17	Ριζόμυλος	9/93 – 11/98	
30.	AG17a	Ριζόμυλος	12/72 – 8/96	49,69
31.	PZ15	Στεφανοβίκειο	1/74 – 11/98	44,78
32.	AD15a	Στεφανοβίκειο	12/72 – 4/94	
33.	LB310	Στεφανοβίκειο	8/80 – 12/97	31,13
34.	AD13	Στεφανοβίκειο	6/84 – 8/90	18,34
35.	AD13a	Στεφανοβίκειο	12/72 – 11/98	6,03
36.	AD15	Στεφανοβίκειο	6/84 – 4/90 και 12/97	4,79
37.	AD16	Χάλκη	12/92 – 11/98	18,38
38.	AD16a	Χάλκη	12/72 – 6/89	
39.	Π17Λ	Χάλκη	10/73 – 5/96	20,17
40.	SR30	Χάλκη	12/72 – 11/98	37,81

* Πιεζόμετρα που αναφέρονται σε καρστικούς σχηματισμούς.

** Η πτώση στάθμης αναφέρεται στο μήνα Νοέμβριο της αρχικής μέτρησης μέχρι το Νοέμβριο της τελικής. Λαμβάνεται ο Νοέμβριος όπου η υπόγεια πιεζομετρία δεν βρίσκεται υπό την επήρεια των αντλήσεων και δεν έχει αρχίσει ακόμα η τροφοδοσία των υδροφοριών. APT(-), APT(+). Στη γεώτρηση υπήρχε αρτεσιανισμός που δεν παρατηρείται σήμερα APT(-) ή συνεχίζεται περιοδικά APT(+).

Ακόμα και στην περίπτωση που σήμερα αυτή η σχέση έχει διαταραχθεί σε θέσεις κοντά στην επαφή των ανεξάρτητων υδροφοριών, η αντιστροφή της κατεύθυνσης της ροής του υπογείου νερού, από τα μάρμαρα προς τις σύγχρονες αποθέσεις, είναι πολύ δύσκολη και θα έχει μόνο τοπικό χαρακτήρα εξαιτίας της πολύ μεγάλης διαφοράς στη διαπερατότητα των δύο μέσων.

Εξετάζοντας τις απόλυτες τιμές στάθμης των πιεζομέτρων των υδροφοριών των σύγχρονων αποθέσεων, παρατηρούμε ότι κατά την τελευταία κυρίως δεκαετία αυτές είναι χαμηλότερες κατά την περίοδο των αντλήσεων του +10 m, στη δε περίπτωση του πιεζόμετρου PZ15 η υπόγεια στάθμη λαμβάνει και αρνητικές τιμές. Στη συνέχεια οι τιμές αυτές επανέρχονται περίπου στο +15. Αν δεχθούμε ότι η στάθμη στο καρστ του νότιου κρασπέδου είναι περίπου στο +15 με βάση

παλιότερες παρατηρήσεις, προκύπτει ότι υπάρχουν χρονικές περίοδοι που η καρστική υδροφορία βρίσκεται ψηλότερα αυτής των σύγχρονων αποθέσεων. Στην περίπτωση όμως αυτή, η ροή νερού από το καρστ προς το εσωτερικό της πεδιάδας θα επηρεάσει μια πολύ μικρή ζώνη των αποθέσεων, λόγω της δυσκολίας πραγματοποίησης της εξαιτίας της μεγάλης διαφοράς διαπερατότητας μεταξύ των δύο διακριτών υδροφορέων.

Η μεγάλη τέλος πτώση στάθμης δεν παρατηρείται κυρίως στα περιθώρια της λεκάνης των σύγχρονων αποθέσεων, αλλά στα δυτικά όρια αυτής, όπου και τοποθετούνται οι κύριες ζώνες εντατικής εκμετάλλευσης.

1.4.4 Εκμετάλλευση – Απόδοση των υδροφορέων

Από την επεξεργασία των μακροχρόνιων πιεζομετρικών παρατηρήσεων, (25 χρόνια περίπου) που πραγματοποίησε το ΥΠΕΧΩΔΕ (Μελέτη Επαναδημιουργίας Λίμνης Κάρλας – Υποστηρικτική Υδρογεωλογική Μελέτη, 1999) προκύπτει, ότι ο υπόγειος υδροφορέας του ευρύτερου πεδινού τμήματος βρίσκονται υπό καθεστώς εντατικής υπέρ-εκμετάλλευσης.

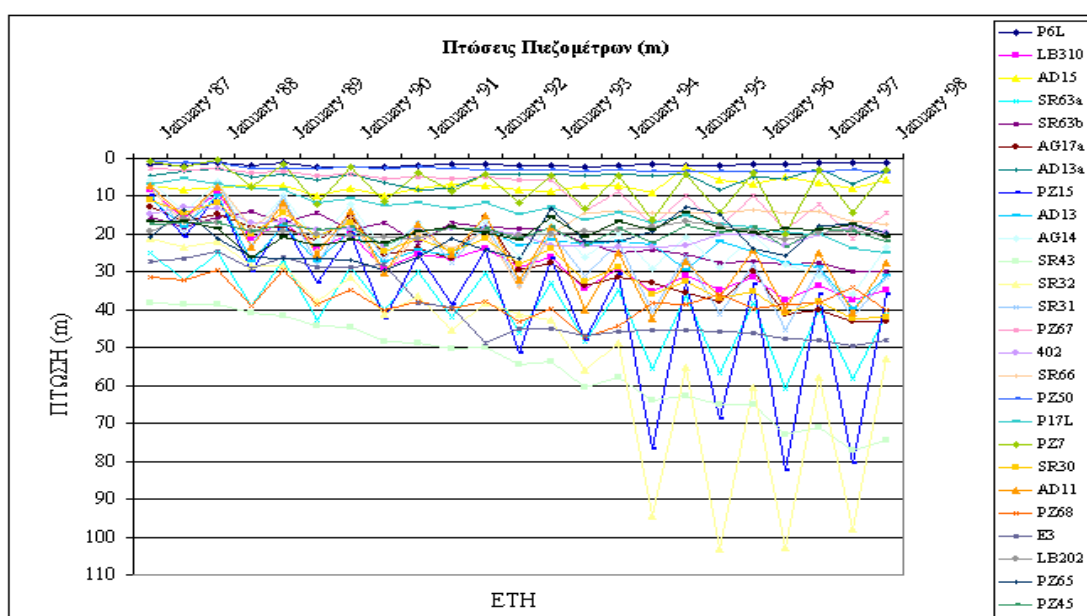
Διακρίνονται τρεις κύριες ομάδες πιεζόμετρων, ως προς τη μορφή ταπείνωσης της υπόγειας στάθμης:

Στην πρώτη ομάδα πιεζόμετρων η ταπείνωση είναι μικρή έως σχεδόν μηδενική, με τάσεις της σταθεροποίησης. Σε αυτή ανήκουν τα πιεζόμετρα AD13A, AD15, PZ7a, AG12a, PZ50, PZ7, AD9a, Π6Λ, SR35, PZ67. Της περιοχής τοποθέτησης των παραπάνω πιεζομέτρων (Βόρειο τμήμα Κάρλας) δεν υπάρχουν προοπτικές αύξησης των αντλήσεων γιατί δεν αναπτύσσονται αξιόλογες υδροφορίες.

Στη δεύτερη ομάδα πιεζομέτρων η ταπείνωση είναι μεγάλη, όχι τόσο έντονη και κατά θέσεις παρατηρούνται τάσεις σταθεροποίησης της υπόγειας στάθμης, στα χαμηλά της σημερινά επίπεδα. Στην ομάδα αυτή ανήκουν τα πιεζόμετρα SR66, AG14, SR63β, Π17Λ, AD9, LB230 69Λ, Π16Λ, SR72, LB232, SR60, SR77. Τα πιεζόμετρα αυτά τοποθετούνται στο βορειοδυτικό τμήμα της Κάρλας (περιοχή Μέλισσα-Λάρισα στην κεντρική και δυτική ζώνη) κυρίως στο ανατολικό όριο ανάπτυξης των αξιόλογων υδροφοριών της περιοχής. Στις περιοχές αυτές οι υπόγειες υδροφορίες βρίσκονται υπό καθεστώς υπερεκμετάλλευσης. Στην ευρύτερη αυτή περιοχή όπου και τοποθετούνται τα πιεζόμετρα της κατηγορίας αναμένεται να αντικατασταθούν τα υπόγεια νερά των αρδεύσεων, από τα επιφανειακά νερά του Πηνειού της εκτροπής του Αχελώου.

Στην τρίτη ομάδα πιεζομέτρων η ταπείνωση είναι μεγάλη και έντονη, χωρίς τάσεις σταθεροποίησης. Στην ομάδα αυτή ανήκουν τα πιεζόμετρα SR32, SR43, LB310, PZ15, AG17a, SR63A, SR30, AD16, PZ68, E3 AD11, SR29. Τα πιεζόμετρα αυτά τοποθετούνται στο δυτικό τμήμα της πεδινής έκτασης, όπου και αναπτύσσονται και οι κύριες αξιόλογες υδροφορίες της Χάλκης και της περιοχής Αρμενίου – Στεφανοβίκειου – Ριζόμυλου – Βελεστίνου – Αγ. Γεωργίου.

Στο Σχήμα 1.3 ως παρουσιάζονται οι πτώσεις στάθμης των πιεζομέτρων από το 1972 ως το 1998 και στο Σχήμα 1.4 απεικονίζεται η θέση της κάθε ομάδας.



Σχήμα: 1.3 Διαγράμματα πτώσης στάθμης πιεζομέτρων 87-97



Σχήμα 1.4: Ομάδες πιεζόμετρων ανάλογα με την πτώση στάθμης του υπόγειου υδροφορέα και όριο του υδροφορέα της υδρολογικής λεκάνης της Κάρλας

1.4.5 Αρδευτική – Υδρευτική Εκμετάλλευση του Υπόγειου Υδροφορέα

Στη λεκάνη της Κάρλας αρδεύονται σήμερα από επιφανειακά και υπόγεια νερά 375,394 Km². Οι εκτάσεις και τα ποσοστά καλλιεργειών παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.2 (Μουστάκα 2002).

Το μεγαλύτερο ποσοστό των καλλιεργούμενων εκτάσεων αρδεύεται από τον υπόγειο υδροφορέα και είναι της τάξεως των 305 km². Για την περίοδο μελέτης 1/1/1987-1/1/1997 οι ανάγκες σε νερό λόγω άρδευσης κυμαίνονται από 147*106 m³ έως και 192*106 m³. Το ποσό βέβαια αυτό δεν αντλείται όλο από τον υπόγειο υδροφορέα. Στην περιοχή υπάρχουν το Τ.Ο.Ε.Β. Πηνειού που εξυπηρετεί ένα τμήμα της λεκάνης που ανήκει στο Νομό Λαρίσης εκτάσεως 140 km² και το Τ.Ο.Ε.Β. Κάρλας που εξυπηρετεί ένα τμήμα της λεκάνης που ανήκει στο Νομό Μαγνησίας εκτάσεως 18,5 km².

Από τον υπόγειο υδροφορέα καλύπτονται και οι ανάγκες ύδρευσης των γύρω οικισμών. Βέβαια το ποσοστό αυτό είναι αισθητά πιο μικρό από αυτό της άρδευσης. Η περιοχή μελέτης του υπόγειου υδροφορέα, όπως παρουσιάζεται στο επόμενο κεφάλαιο χωρίστηκε σε επτά ζώνες άντλησης εκ των οποίων οι πέντε ανήκουν στο Νομό Μαγνησίας και οι δύο στο Νομό Λαρίσης.

1.5 Αποξήρανση της Λίμνης

Η λίμνη Κάρλα, η αρχαία Βοιβήϊς, υπήρξε μία από τις μεγαλύτερες και οικολογικά σημαντικότερες λίμνες της Ελλάδας. Σχηματίζονταν από τα ποτάμια που πήγαζαν κυρίως από την Όσσα. Βρίσκονταν στους πρόποδες της βόρειας προέκτασης της οροσειράς του Πηλίου που λέγεται Μαυροβούνι. Καταλάμβανε μία έκταση 200.000 στρεμμάτων (περίπου 52.000 τχμ.). Η λίμνη οριοθετούνταν βορειοανατολικά από τις λοφώδεις εξάρσεις της οροσειράς Μαυροβουνίου, νότια από τις λοφώδεις εξάρσεις της οροσειράς του Πηλίου, ενώ βορειοδυτικά, δυτικά έως νοτιοδυτικά δεν ήταν σαφή τα όρια. Καταλάμβανε το χαμηλότερο σημείο του βαθύτερου τμήματος της θεσσαλικής πεδιάδας.

Το εμβαδόν που καταλάμβανε η λίμνη Κάρλα κυμαινόταν μεταξύ ευρέων ορίων ανάλογα με τις διακυμάνσεις στάθμης που καθορίζονταν από τις εισροές και τις αντίστοιχες εκροές υδάτων. Οι τακτικές εισροές υδάτων προέρχονταν από τις

βροχοπτώσεις και οι έκτακτες στα υπερχειλίζοντα ύδατα του Πηνειού ποταμού κατά τις μεγάλες πλημμύρες του. Εισροές στη λίμνη υπήρχαν και από πηγές, κύρια από αυτήν του Βελεστίνου και άλλες μικρότερες στο Β. τμήμα της λίμνης που αποστραγγίζονταν με το ρεύμα Ασμάκι. Οι εκροές υδάτων από τη λίμνη οφείλονταν αποκλειστικά σχεδόν στην εξάτμιση και ένα μικρό ποσοστό στις υπόγειες διαφυγές του πυθμένα.

Η μικρή κλίση του πυθμένα της λίμνης είχε ως αποτέλεσμα, ανάλογα με τη σχέση εισροών-εκροών, το εμβαδόν της να κυμαίνεται μεταξύ 40 και 180 km². Αυτό είχε ως αποτέλεσμα, η παγίδευση πλημμυρικών υδάτων στη λίμνη να συνοδεύεται από την κατάκλυση μεγάλων γεωργικών εκτάσεων γύρω από αυτή, ενώ παράλληλα δημιουργούσε προβλήματα στράγγισης και αύξησης της συγκέντρωσης αλάτων στα εδάφη της γύρω περιοχής.

Η ανάγκη για την αντιπλημμυρική προστασία της περιοχής και την απόκτηση γεωργικών εκτάσεων, αποτέλεσε την αιτία για την εκπόνηση διαφόρων μελετών που πραγματοποιήθηκαν μετά την απελευθέρωση της Θεσσαλίας, το 1881. Σύμφωνα με τις μελέτες, η αξιοποίηση της περιοχής συνδεόταν με την κατασκευή αντιπλημμυρικών και αποστραγγιστικών έργων, την αποξήρανση της λίμνης μέσω σήραγγας προς τον Παγασητικό Κόλπο και την κατασκευή ενός ταμιευτήρα σε τμήμα της παλιάς λίμνης. Ο ταμιευτήρας θα χρησίμευε για την ανάσχεση πλημμυρών και την αποταμίευση μέρους της χειμερινής παροχής του Πηνειού για άρδευση. Με την ολοκλήρωση των πρώτων έργων αντιπλημμυρικής προστασίας το 1949, που περιελάμβαναν τους ορεινούς συλλεκτήριους αγωγούς και τα αναχώματα του Πηνειού, περιορίστηκε η λεκάνη απορροής της κατά το 1/3 και αποκόπηκε η τροφοδοσία της από τον ποταμό, με συνέπεια τη μείωση των εισροών και την υποβάθμιση του υγρότοπου της λίμνης.

Η τελική αποστράγγιση της λίμνης ολοκληρώθηκε το 1962, με την κατασκευή της σήραγγας αποστράγγισης και μέρους του αποστραγγιστικού δικτύου, ωστόσο όμως δεν έλυσε πλήρως τα προβλήματα, διότι δεν κατασκευάστηκαν: 1) ο προβλεπόμενος από τις μελέτες ταμιευτήρας και 2) τα έργα που συνδεόνταν με αυτόν. Τα δυσμενή αποτελέσματα της αποξήρανσης άρχισαν να παρουσιάζονται σταδιακά αρκετά χρόνια αργότερα.

Βασικοί λόγοι που οδήγησαν στην αποξήρανση της λίμνης Κάρλας ήταν η ανάγκη για αντιπλημμυρική προστασία, η απόκτηση περισσότερων γεωργικών εκτάσεων και η αντιμετώπιση προβλημάτων υγείας όπως ελονοσία που προερχόταν από το πλήθος των κουνουπιών της λίμνης.

Η αποξήρανση της Κάρλας οδήγησε στην αύξηση του εισοδήματος από την παραγωγή στην πεδιάδα της Κάρλας, όχι μόνο λόγω της αύξησης στις καλλιεργούμενες περιοχές και της μείωσης στη ζημία πλημμυρών αλλά και λόγω ακόμα της υψηλότερης ενδυνάμωσης των αγροοικοσυστημάτων. Η αύξηση αυτή όμως δεν κράτησε για αρκετό χρονικό διάστημα. Η άρδευση επεκτάθηκε σχεδόν σε όλες τις καλλιεργούμενες εκτάσεις. Το νερό άρδευσης προήλθε από τις βαθιές γεωτρήσεις. Όλοι οι ψαράδες έχασαν τις εργασίες τους. Τα λιγοστά ψάρια που παραμένουν θεωρούνται ακατάλληλα για την ανθρώπινη κατανάλωση λόγω της ρύπανσης των νερών. Οι σταθερές πτώσεις της στάθμης των υπόγειων νερών, είχαν ως αποτέλεσμα το υψηλής ποιότητας νερό άρδευσης που προέρχονταν από τις γεωτρήσεις να συμπληρώνεται από χαμηλής ποιότητας νερό που προέρχονταν από υδραντλίες που το απορροφούσαν από το μικρό υγρότοπο και από τις διάφορες τάφρους κατά την περίοδο του καλοκαιριού. Η άντληση ήταν ανεξέλεγκτη. Τα αγροοικοσυστήματα έχασαν την ποικιλία καλλιεργειών. Τα προβλήματα αλατότητας των εδαφών θέτουν δυσκολίες λόγω της έλλειψης νερού. Η ζημία λόγω παγετού στις καλλιέργειες αυξάνεται και οι βιομηχανικές εγκαταστάσεις στη Λάρισα διοχετεύουν μεγάλους όγκους των μη επεξεργασμένων αποβλήτων στις αποχετευτικές τάφρους (Zalidis and Gerakis 1999).

Μεγάλο μέρος των προβλημάτων που υφίστανται σήμερα στην περιοχή προήλθαν από την απώλεια των πολύτιμων λειτουργιών του υγροτόπου όπως:

η απομάκρυνση και η μετατροπή των θρεπτικών στοιχείων
η παγίδευση των πλημμυρικών νερών
ο εμπλουτισμός των υπόγειων υδροφορέων
η αποθήκευση του νερού στην επιφάνεια της λίμνης και υπογείως για άρδευση
η κατακράτηση των ιζημάτων και των τοξικών ουσιών
η αποθήκευση και ελευθέρωση της θερμότητας
η δέσμευση της ηλιακής ακτινοβολίας
η στήριξη των τροφικών αλυσίδων (Gerakis. 1992, Ζαλίδης και συν. 1995, Μουστάκα 2002)

Οι αλλαγές των λειτουργιών του υγροτόπου οδήγησαν α) στην πτώση στα επίπεδα των υπόγειων νερών, β) στην παρείσφρηση νερού της θάλασσας στα στρώματα του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, γ) στην έλλειψη του νερού άρδευσης, δ) στις συχνές πλημμύρες των πεδινών εκτάσεων, ε) στα προβλήματα αλατότητας και αλκαλικότητας στα χώματα, ε) στην ακαθάριστη ρύπανση των τάφρων και των υδάτινων πόρων από τα βιομηχανικά απόβλητα αποχέτευσης και από τα αγροχημικά, στ) στην διοχετευτικότητα του μολυσμένου νερού στο Κόλπο του Παγασητικού, ζ) στην απώλεια των βιοτόπων του υγροτόπου και η) στη

μείωση της βιοποικιλότητας (Zalidis et al. 2005). Λόγω της σωρευτικής επίδρασης των παραπάνω παραγόντων (υποβάθμιση της ποιότητας των εδαφών, υποβιβασμός της στάθμης του υπόγειου υδροφορέα, ανεξέλεγκτες πλημμύρες κλπ) οι δείκτες κοινωνικής ευμάρειας της περιοχής βρίσκονταν σε διαρκή πτωτική πορεία, η οποία οδηγεί σε τάσεις εγκατάλειψης της περιοχής. (ΤΕΧΝΙΚΟ ΔΕΛΤΙΟ ΜΕΤΡΟΥ 8.2- Μελέτη Επαναδημιουργίας λίμνης Κάρλας 2000)

1.6 Έργα ανασύστασης Λίμνης Κάρλας

1.6.1 Στόχοι του Έργου Επανασύστασης

Το έργο της επαναδημιουργίας της λίμνης Κάρλας έχει κυρίως περιβαλλοντικό χαρακτήρα και είναι το μεγαλύτερο που έχει κατασκευαστεί μέχρι σήμερα στην περιοχή των Βαλκανίων.

Στόχος του είναι :

Η περιβαλλοντική αναβάθμιση της ευρύτερης περιοχής, της χλωρίδας και της πανίδας. Με το έργο επιτυγχάνεται η υποστήριξη της άγριας ζωής και ιδιαίτερα της ορνιθοπανίδας μεταναστευτικών πτηνών.

Η αποτελεσματική αντιπλημμυρική θωράκιση της ευρύτερης περιοχής με δεδομένο ότι ευρίσκεται υψομετρικά στο χαμηλότερο σημείο του Θεσσαλικού κάμπου.

Η βαθμιαία βελτίωση της ποιότητας και η αύξηση της αξιοποιήσιμης ποσότητας των επιφανειακών νερών. Με την κατασκευή του ταμιευτήρα αυξάνονται τα αποθέματα των επιφανειακών νερών και δίνονται δυνατότητες για την κατακράτηση και τον καθαρισμό των στραγγισμάτων από την άρδευση των καλλιεργειών με φυσικές διαδικασίες.

Τη βαθμιαία ανάταση του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα των παρακάρλιων περιοχών. Τα νερά του ταμιευτήρα θα υποκαταστήσουν την χρήση των υπογείων νερών για άρδευση που σήμερα πραγματοποιείται μέσω ιδιωτικών γεωτρήσεων (7.000 χιλ. περίπου) που οι περισσότερες εξ αυτών προβλέπεται να καταργηθούν αμέσως μετά την ολοκλήρωση των έργων άρδευσης.

Την εξεύρεση επαρκών ποσοτήτων πόσιμου νερού από γεωτρήσεις για την ενίσχυση της ύδρευσης του πολεοδομικού συγκροτήματος μείζονος περιοχής Βόλου. Η παράμετρος αυτή είναι η σπουδαιότερη διότι έχει το μεγαλύτερο δείκτη

ωφελιμότητας για τους κύκλους της Ε.Ε. και τη μεγαλύτερη συμμετοχή ώστε το έργο αυτό να έχει κριθεί ως αμιγώς περιβαλλοντικό.

Την αναμενόμενη αλλαγή του μικροκλίματος της περιοχής (χαμηλότερες το θέρος, υψηλότερες το χειμώνα)

Την ήπια αγροτουριστική ανάπτυξη της περιοχής και την συνακόλουθη ελάττωση ανεργίας.

Την αναβάθμιση της αισθητικής του τοπίου.

Το έργο Επαναδημιουργίας της λίμνης Κάρλας αφορά στη δημιουργία μιας μεγάλης υδροτοπικής έκτασης (λίμνης περιβαλλόμενης από ζώνες ειδικής διαχείρισης) και περιλαμβάνει συνοπτικά :

Τη δημιουργία τεχνητής λίμνης, μέσου βάθους 4,5m, έκτασης 3.800 ha, στο χαμηλότερο τμήμα της άλλοτε λίμνης Κάρλας, τροφοδοτούμενης από τις απορροές των πέριξ λεκανών και από τα χειμερινά νερά του Πηνειού.

Κατασκευή συλλεκτήρων με τους οποίους επιτυγχάνεται η τροφοδοσία της λίμνης με νερά των πέριξ ορεινών λεκανών και η αντιπλημμυρική προστασία των πεδινών περιοχών.

Αντλιοστάσια για την άντληση των ομβρίων νερών των χαμηλών περιοχών γύρω από την λίμνη με στόχο την περαιτέρω τροφοδοσία της λίμνης και την αντιπλημμυρική προστασία των περιοχών αυτών.

Έργα υδροδότησης της λίμνης από τα χειμερινά νερά του Πηνειού, με αντλιοστάσιο για την ανύψωση των νερών πάνω από τα αναχώματα αντιπλημμυρικής προστασίας του ποταμού.

Έργα βελτιστοποίησης των λειτουργιών της λίμνης ως υδροβιότοπου (3 νησίδες, αβαθή υγρά τοπο καθαρισμού νερών αποστράγγισης, έκτασης περίπου 45ha, υγρά τοπο στήριξης της φυσικής αναπαραγωγής ψαριών και αναπαράστασης του παραδοσιακού τρόπου διαβίωσης και αλιείας, παρόχθια φυτικά οικοσυστήματα), όπως καθορίζονται στους εγκεκριμένους Περιβαλλοντικούς Όρους του έργου.

Έργα υποδομών οικοτουριστικής ανάπτυξης με σκοπό την προσέλκυση επισκεπτών για περιβαλλοντική εκπαίδευση και ήπιες τουριστικές δραστηριότητες καθώς και την προβολή ενός προτύπου έργου πολλαπλού χαρακτήρα με ισχυρή περιβαλλοντική διάσταση), όπως καθορίζονται στους εγκεκριμένους Περιβαλλοντικούς Όρους του έργου.

Έργα ορεινής υδρονομίας για την ανάσχεση των επιφανειακών διαβρώσεων των ορεινών πέριξ της λίμνης λεκανών με στόχο τον περιορισμό της μεταφοράς φερτών υλικών που καταλήγουν στο σύστημα συλλεκτήρες-λίμνη), όπως καθορίζονται στους εγκεκριμένους Περιβαλλοντικούς Όρους του έργου.

Δημιουργία φυτικών οικοσυστημάτων στην εξωτερική πλευρά του δυτικού αναχώματος και στο περιμετρικό όριο των ανατολικών και νότιων ακτών της λίμνης σε σημεία που προσφέρονται για την ανάπτυξη της βλάστησης με στόχο την ολοκλήρωση της διαμόρφωσης του υγροτόπου.

Έργα μεταφοράς νερού από τη λίμνη στις γειτνιάζουσες πεδινές περιοχές με σκοπό αφ' ενός την αξιοποίηση του για άρδευση υποκαθιστώντας τις αντλήσεις από τον υπόγειο υδροφόρα, αφ' ετέρου την ανανέωση των υδάτων της λίμνης.

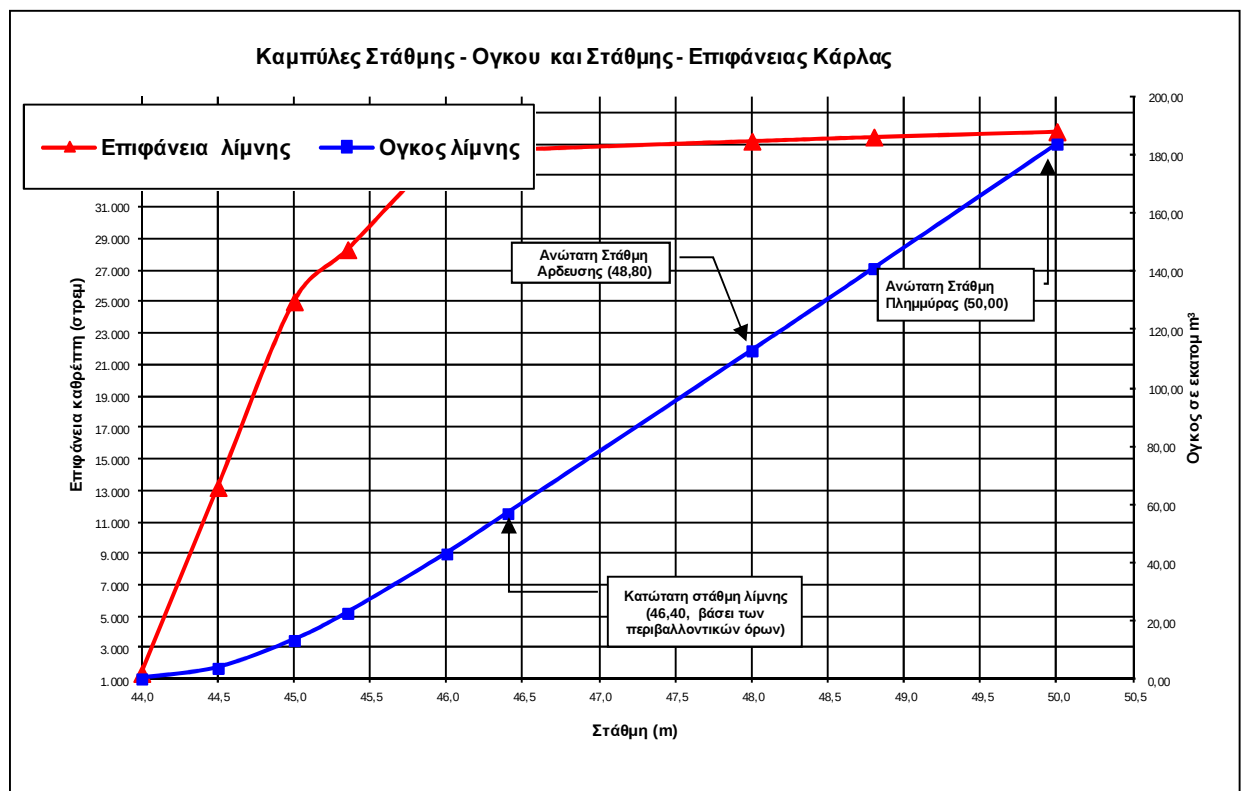
Αρδευτικά δίκτυα στις γύρω από τη λίμνη περιοχές συνολικής έκτασης περί τα 9.250 ha, που σήμερα αρδεύονται ως επί το πλείστον με υπόγεια νερά

Έργα ενίσχυσης της ύδρευσης μείζονος περιοχής Βόλου από τα εξοικονομούμενα νερά του υπόγειου υδροφόρα.

1.6.2 Περιγραφή Λειτουργίας του Έργου

Σύμφωνα με τα προβλεπόμενα στους Περιβαλλοντικούς Όρους του έργου η ανώτατη στάθμη λειτουργίας της λίμνης ορίζεται στο +48,80m, που αντιστοιχεί σε όγκο νερού 135 εκατ. m³ περίπου. Η κατώτατη στάθμη λειτουργίας της λίμνης, σύμφωνα και με τους περιβαλλοντικούς όρους, ορίζεται στο +46,60m, που αντιστοιχεί σε όγκο νερού 75 εκατ. m³ περίπου. Με τις στάθμες αυτές λειτουργίας είναι δυνατή η απόληψη ποσότητας νερού 60εκατ.m³ ετησίως από τη λίμνη.

Η Ανώτατη στάθμη πλημμύρας καθορίζεται στο +50,00m (σχήμα 1.5)μέσω του προβλεπόμενου έργου ασφαλείας στον κόμβο Πέτρας. Το έργο αυτό θα λειτουργεί σε περιπτώσεις εξαιρετικά έντονων βροχοπτώσεων, οπότε τα υπερχειλίζοντα νερά θα κατακλύζουν τη χαμηλή περιοχή και θα απάγονται μέσω της υφιστάμενης σήραγγας προς τον Παγασητικό κόλπο με το ρυθμό που επιτρέπει η διοχετευτικότητά της.



Σχήμα 1.5 : Καμπύλες στάθμης-όγκου-επιφάνειας (Γ.Γ.Δ.Ε./ Γ.Δ.Υ.Ε. 2006)

Η λίμνη που θα δημιουργηθεί θα τροφοδοτείται με:

τα όμβρια νερά της λεκάνης απορροής της λίμνης. Τα νερά των υψηλότερων περιοχών της λεκάνης θα συλλέγονται με φυσική ροή μέσω των συλλεκτήρων Σ3, Σ4, Σ6 και Σ7 και τα νερά των χαμηλών περιοχών της λεκάνης θα αντλούνται στη λίμνη με τα αντλιοστάσια αποχέτευσης DPI στον κόμβο Πέτρας και DP2 στον κόμβο Καναλιών. Συνολική ετήσια απορροή : 20-35 εκατ m³

την απ' ευθείας βροχόπτωση μέσα στη λίμνη. Ετήσια απορροή : 15-19 εκατ m³.

τα χειμερινά νερά του π. Πηνειού, που θα αντλούνται από τον ποταμό και θα μεταφέρονται με φυσική ροή στη λίμνη, μέσω της υφιστάμενης διώρυγας 2Δ, των υφιστάμενων τάφρων 6Τ, 7Τ και 2Τ και του προβλεπόμενου συλλεκτήρα Σ4. Προβλέπεται ετήσια απόληψη νερών από Πηνειό 80-110 εκατ. m³.

Οι απώλειες - απολήψεις νερού από τη λίμνη θα είναι :

οι υπόγειες διαφυγές που εκτιμώνται σε 20-25 εκατ m³ το έτος

η εξάτμιση του νερού της λίμνης που υπολογίζεται σε 38 εκατ m³ το έτος

η απόληψη νερού για άρδευση και κάλυψη των αναγκών των έργων περιβαλλοντικής ανάδειξης. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, με τις καθορισμένες στάθμες λειτουργίας της λίμνης είναι δυνατή η απόληψη ποσότητας νερού 60 εκατ. m³ ετησίως.

Σήμερα στην μείζονα περιοχή Κάρλας αντλούνται από τον Υπόγειο Υδροφόρο Ορίζοντα περί τα 40,80 εκατ. m³ το χρόνο, 37,00 εκατ. m³ για άρδευση και 3,80 εκατ. m³ για ύδρευση (της πόλης του Βόλου και των οικισμών Βελεστίνο, Αγ.Γεώργιος, Ριζόμυλος και Στεφανοβίκειο γύρω από τη λίμνη). Με βάση την εκπονηθείσα υδρογεωλογική μελέτη, για την αειφόρο εκμετάλλευση του Υ.Υ.Ο οι απολήψεις θα πρέπει να μειωθούν σε 23,00 εκατ. m³ περίπου το χρόνο.

Έτσι, προβλέπεται:

Μείωση των απολήψεων υπογείων νερών σε 23,00 εκατ. m³ συνολικά το χρόνο. Κάλυψη των αναγκών άρδευσης της περιοχής κυρίως με επιφανειακά νερά της λίμνης. Οι συνολικές ανάγκες άρδευσης ανέρχονται σε 60,40 εκατ. m³ το χρόνο. Προβλέπεται τα 53 εκατ. m³ να καλύπτονται από νερά της λίμνης και τα 7,40 εκατ. m³ από υπόγεια νερά.

Αξιοποίηση της υπόλοιπης διαθέσιμης ποσότητας υπογείων νερών (15,50 εκατ. m³) για ενίσχυση της ύδρευσης της πόλης του Βόλου και των οικισμών γύρω από τη λίμνη (13,50 εκατ. m³ για το Βόλο και 2,00 εκατ. m³ για τους οικισμούς Βελεστίνο, Αγ. Γεώργιος, Ριζόμυλος, Στεφανοβίκειο). Η άντληση των νερών αυτών εκτιμάται ότι απαιτεί 35 γεωτρήσεις συνολικά. Θα χρησιμοποιηθούν όσες υφιστάμενες γεωτρήσεις κριθούν κατάλληλες (οι 8 γεωτρήσεις που χρησιμοποιούνται ήδη σήμερα για την ύδρευση του Βόλου και όσες αρδευτικές κριθούν κατάλληλες) και θα κατασκευαστούν και νέες εφ' όσον απαιτηθεί .

Η επιλογή της χρήσης των υπογείων νερών για ύδρευση καθορίστηκε από την ποιότητα των διαθέσιμων νερών, δεδομένου ότι, η πόλη του Βόλου αντιμετωπίζει σήμερα σημαντικό έλλειμμα νερού καλής ποιότητας. Τα νερά της λίμνης Κάρλας, κυρίως την καλοκαιρινή περίοδο, αναμένεται να είναι σοβαρά υποβαθμισμένα από ποιοτικής πλευράς. Από τη μαθηματική προσομοίωση της τροφικής κατάστασης της λίμνης, που έγινε στα πλαίσια ειδικής Υποστηρικτικής μελέτης «Επαναδημιουργία λίμνης Κάρλας : Περιβαλλοντική Τεχνική Έκθεση, Μελέτη Κόστους-Οφέλους και Υποστηρικτικές Μελέτες», προκύπτει ότι, ακόμα και εάν εφαρμοστεί πρόγραμμα μείωσης των αζωτούχων λιπασμάτων και επεξεργασία των απορροών στη λίμνη για απομάκρυνση οργανικού φορτίου και θρεπτικών, η λίμνη θα είναι μεσοτροφική έως ευτροφική. Αντίθετα, η ποιότητα των υπογείων νερών, που ήδη σήμερα χρησιμοποιούνται για την ύδρευση των οικισμών και του Βόλου είναι καλή.

1.6.3 Κατασκευαζόμενα Έργα

Έχουν ήδη κατασκευαστεί ή βρίσκονται υπό κατασκευήν τα παρακάτω έργα σχετικά με τα μελετηθέντα:

α) Ταμιευτήρας χωρητικότητας 184 εκατ. μ^3 στο χαμηλότερο τμήμα της παλιάς λίμνης Κάρλας, έκτασης περίπου 38.000 στρεμμάτων με την κατασκευή αναχωμάτων (ανατολικού, μήκους 2700μ. και του δυτικού, μήκους 13.000μ.). Προστατευτικά αναχώματα κατασκευάζονται και στο βόρειο τμήμα της λίμνης για τον έλεγχο των διαφυγών στα καρστικά μάρμαρα (συνολικού μήκους περίπου 6.900μ.).

Η στέψη των αναχωμάτων προσδιορίστηκε στα +52,50μ. και το μέσο ύψος τους είναι 9,00μ.

Οι στάθμες λειτουργίας του ταμιευτήρα έχουν καθορισθεί ως εξής :

Κατώτατη στάθμη άρδευσης (ΚΣΑ) : +46,40 μ.

Ανώτατη στάθμη άρδευσης (ΑΣΑ) : +48,80 μ.

Ανώτατη στάθμη πλημμύρας (ΑΣΠ) : +50,00 μ.

β) Έργα ασφαλείας υπερχειλίσης της λίμνης στον κόμβο Πέτρας παροχής $Q=500 \mu^3/\delta\lambda$ για την περίπτωση που υπερβεί η στάθμη της λίμνης το +50μ. Τα νερά που θα υπερχειλίσουν θα κατακλύζουν την χαμηλή περιοχή και θα απάγονται μέσω της υφιστάμενης αποστραγγιστικής σήραγγας Κάρλας προς τον Παγασητικό με τον ρυθμό που επιτρέπει η διοχετευτικότητά της ($8,5 \mu^3/\delta\lambda$).

γ) Περιφερειακοί συλλεκτές Σ3, Σ4, Σ6 και Σ7 για την εκτροπή των επιφανειακών απορροών ομβρίων προς τον ταμιευτήρα.

δ) Δύο (2) αποχετευτικά αντλιοστάσια των χαμηλών περιοχών, DP1 παροχής $Q=24 \mu^3/\delta\lambda$ στον κόμβο Πέτρας (δυτικά της λίμνης) και DP2, παροχής $Q=3,6 \mu^3/\delta\lambda$ στον κόμβο Καναλίων (ανατολικά της λίμνης).

ε) Αποκατάσταση των επαρχιακών οδών Καλαμακίου – Καναλίων και Βελεστίνου – Καναλίων με την κατασκευή τμημάτων οδών μήκους περίπου 12,5 χλμ.

στ) Ενωτική τάφρος ET στο ανατολικό όριο του ταμιευτήρα για την προσαγωγή των αποχετευόμενων νερών προς το αντλιοστάσιο DP1 και για την απαγωγή των πλημμυρικών παροχών προς την τάφρο 1Τ.

ζ) Κτιριακά των αντλιοστασίων άρδευσης Α0 στον κόμβο Πέτρας και Α2 στον κόμβο Καναλίων, πλησίον των αντίστοιχων αντλιοστασίων αποχέτευσης.

1.6.4 Σημερινή Κατάσταση Λίμνης Κάρλας

Στις 22 Δεκεμβρίου 2010 τέθηκαν σε λειτουργία τα πέντε αντλιοστάσια του Πηνειού για την τροφοδότης της Λίμνης Κάρλας από τα νερά του Πηνειού. Στην πλήρη τους λειτουργία μπορούν να παρέχουν $14 \text{ m}^3/\text{s}$. Η λειτουργία των

αντλιοστασίων θα γίνεται κατά τους χειμερινούς και εαρινούς μήνες, έτσι ώστε να παροχετεύονται στη λίμνη οι χειμερινές και εαρινές απορροές του Πηνειού.

Οι κύριες εισόδους τροφοδοσίας από τον Πηνειό είναι η είσοδος από αντλιοστάσιο στην τοποθεσία Καραούλι στη Λάρισα και η είσοδος από τον ποταμό Ασμάκι ή Τάφρος Τ8.

Μέσω λοιπόν αυτών των 2 κύριων εισόδων συνεχίζεται η επαναπλήρωση της λίμνης Κάρλας με στόχο τα 141.14 hm^3 , τα οποία αντιστοιχούν στην Ανώτατη Στάθμη Άρδευσης υψομέτρου 48.8 m, όπου και θα μπορεί πλέον να ξεκινήσει η λειτουργία της άρδευσης. Στις 25/5/2011 το ύψος στάθμης ήταν στα 46.17 όπου αντιστοιχούσε σε 50 hm^3 περίπου.

Στην παρούσα φάση αφού έχουν ολοκληρωθεί τα Έργα για την Κατασκευή του Ταμιευτήρα και τα αντίστοιχα για την τροφοδοσία του από τον Πηνειό, τα υπό κατασκευή έργα είναι:

Η ολοκλήρωση κατασκευής των Συλλεκτήρων Σ3, Σ4, Σ6 και Σ7, ύστερα από κάποια προβλήματα που προέκυψαν όσον αφορά την Αρχαιολογία, την εξεύρεση πόρων. Ιδιαίτερης σημασίας χρήζει η μείωση του μήκους του συλλεκτήρα Σ4. Ο λόγος είναι ότι πλέον τα απορρέοντα ύδατα από τον ορεινό όγκο του Χαλκοδόνιου Όρους όπως αυτά καταλήγουν μέσω του υδροκρίτη στην ΝΔ κάμφο δεν θα συγκεντρώνονται στο Συλλεκτήρα Σ6 για την επαναπλήρωση του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, αφού σε αυτήν την περιοχή προβλέπεται η εγκατάσταση των νέων γεωτρήσεων ύδρευσης της ΔΕΥΑΜΒ.

Η κατασκευή έργων μεταφοράς και διανομής νερού Λίμνης Κάρλας «Α' Φάση» και αφορά ουσιαστικά την κατασκευή του δικτύου άρδευσης για 92.500 στρέμματα. Με τα προβλεπόμενα έργα μεταφοράς και διανομής νερού θα εξυπηρετηθούν 84.400στρ. συνολικά και σύμφωνα με του περιβαλλοντικούς όρους των συγκεκριμένων έργων η ποσότητα νερού που θα διατίθεται ετησίως από τη λίμνη Κάρλα για άρδευση δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 46 εκ. m³.

Η κατασκευή έργων ενίσχυσης της ύδρευσης της μείζονος περιοχής Βόλου «Α' Φάση», όπου αφορά τη διάνοιξη των πρώτων 28 νέων γεωτρήσεων από τις 40 προβλεπόμενες και την αντικατάσταση των 5 παλαιών που ήδη υπήρχαν.

Καθαρισμός Τάφρων 7Τ και 2Τ.

Η κατασκευή των έργων ανάδειξης περιβάλλοντος της Λίμνης Κάρλας, που αφορούν τις αναγκαίες υποδομές ήπιας τουριστικής ανάδειξης και τις απαραίτητες φυτοτεχνικές παρεμβάσεις.

Τα έργα που ακόμη δεν έχουν ξεκινήσει είναι:

Η κατασκευή έργων μεταφοράς και διανομής νερού Λίμνης Κάρλας «Β' Φάση» και αφορά ουσιαστικά την επέκταση του δικτύου άρδευσης της «Α' Φάσης» για 15500 στρέμματα.

Η κατασκευή έργων ενίσχυσης της ύδρευση της μείζονος περιοχής Βόλου «Β' Φάση», όπου αφορά τη διάνοιξη των υπολειπόμενων 17 νέων γεωτρήσεων. Τονίζεται δε πως η πλήρης εκμετάλλευση όλων των γεωτρήσεων θα γίνει μετά από δέκα περίπου χρόνια λειτουργίας του δικτύου άρδευσης, όπου θα αναμένεται η ανόρθωση του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα να πιάσει τα επιθυμητά επίπεδα.

Η κατασκευή συμπληρωματικών αντιπλημμυρικών έργων και έργων ορεινής υδρονομίας στο πεδινό και ημιπεδινό των λεκανών της Αγιάς, του Καλαμακίου, των Καναλιών και της Κερασιάς.

Στις 23 Μαρτίου 2011 ο Φορέας Διαχείρισης της Περιοχής Οικοανάπτυξης Κάρλας-Μαυροβουνίου-Κεφαλόβρυσου-Βελεστίνου στελεχώθηκε με επιστημονικό προσωπικό και προσωπικό φύλαξης. Σκοπός της δημιουργίας του Φορέα είναι η προστασία, διατήρηση και διαχείριση της φύσης και του τοπίου, ως φυσικής κληρονομιάς και πολύτιμου εθνικού φυσικού πόρου σε τμήματα της περιοχής φύσης της περιοχής Κάρλας – Μαυροβουνίου – Κεφαλόβρυσου.

Η περιοχή παρέμβασης του Φορέα φαίνεται στην εικόνα 8 με τις εξής ζώνες:

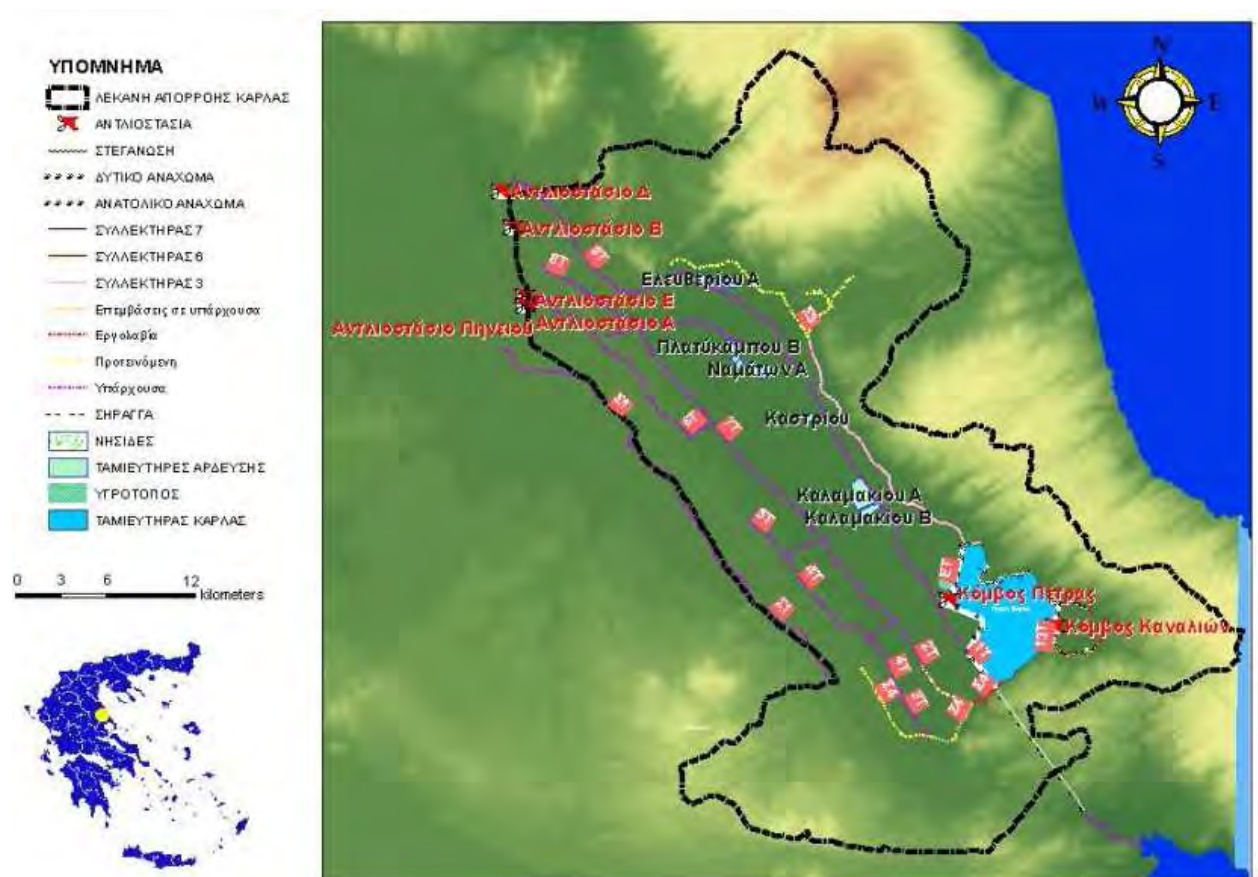
Ζώνη Α: Περιοχή Προστασίας της Φύσης

Ζώνη Β1: Ορεινού Όγκου Οικοσυστήματος και Θαλάσσιας Ζώνης

Ζώνη Β2: Λιμναίων και Παραλιμναίων Οικοσυστημάτων

Ζώνη Γ: Ελεγχόμενων Δραστηριοτήτων

Στη Περιοχή **Προστασίας Οικοτόπων και Ειδών Κα.Μα.ΚεΒε** περιλαμβάνονται και οι περιοχές με την επωνυμία «Κάρλα – Μαυροβούνι – Κεφαλόβρυσος Βελεστίνου - Νεοχώρι» με κωδικό GR 1420004 (SCI), «Όρος Μαυροβούνι», με κωδικό GR 1420006 (SPA), «Περιοχή ταμιευτήρων πρώην Λιμν. Κάρλας», με κωδικό GR 1430007 (SPA) & «Περιοχή Θεσσαλικού Κάμπου» με κωδικό GR 1420011 (SPA), του Ευρωπαϊκού Οικολογικού Δικτύου NATURA 2000 και οι οποίες έχουν ενταχθεί και στον εθνικό μας κατάλογο (άρθρο 9, παρ. 6 ν. 3937/2011).



Σχήμα 1.7: Χάρτης τεχνικών κυρίων έργων

2. Εκτίμηση Κλιματικής Αλλαγής

2.1 Κλιματική Αλλαγή

Το κλιματικό σύστημα είναι ένα σύνθετο σύστημα αλληλεπιδράσεων, που αποτελείται από την ατμόσφαιρα, την επιφάνεια της γης, τα χιόνια και τους πάγους, τους ωκεανούς, τα λοιπά επιφανειακά και υπόγεια νερά των ηπείρων και τους ζωντανούς οργανισμούς. (IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change)

Το κλίμα συνήθως περιγράφεται με τη χρήση του μέσου όρου και της μεταβλητότητας της θερμοκρασίας, των βροχοπτώσεων και των ανέμων για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο που κυμαίνεται από λίγους μήνες έως εκατομμύρια χρόνια (μια συνηθισμένη περίοδος είναι τα 30 χρόνια). (IPCC)

Η εξέλιξη του κλιματικού συστήματος γίνεται κάτω από την επίδραση της εσωτερικής του δυναμικής και των αλλαγών σε διάφορους εξωτερικούς παράγοντες που επηρεάζουν το κλίμα. *Κλιματική αλλαγή* ορίζεται ως η αλλαγή στην κατάσταση του κλίματος που μπορεί να προσδιοριστεί (π.χ. με τη χρήση στατιστικών δοκιμών) από τις αλλαγές στο μέσο όρο ή/και τη μεταβλητότητα των ιδιοτήτων του, και που εμφανίζεται για μια εκτεταμένη περίοδο η οποία συνήθως διαρκεί δεκαετίες ή και περισσότερο. Η κλιματική αλλαγή αναφέρεται σε οποιαδήποτε αλλαγή συμβαίνει στο κλίμα με την πάροδο του χρόνου και που οφείλεται είτε στην φυσική μεταβλητότητα είτε στις ανθρώπινες δραστηριότητες.

Η μεγάλη αιτία της κλιματικής αλλαγής είναι το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Αέρια του θερμοκηπίου θεωρούνται τα αέρια τα οποία απορροφώντας μερικώς την ακτινοβολία μεγάλων μηκών κύματος που προέρχεται από την επιφάνεια της Γης, συμβάλλουν στη διατήρηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας της Γης (φυσικό φαινόμενο του θερμοκηπίου), με μέση θερμοκρασία τους 14 °C. Τα σημαντικότερα αέρια του θερμοκηπίου είναι οι υδρατμοί και το διοξείδιο του άνθρακα. Τα κύρια συστατικά της γήινης ατμόσφαιρας, το άζωτο και το οξυγόνο, δεν έχουν καμία τέτοια ιδιότητα. (IPCC)

Εξαιτίας όμως, των ανθρώπινων δραστηριοτήτων, το φυσικό φαινόμενο του θερμοκηπίου εντείνεται με την απελευθέρωση αερίων του θερμοκηπίου, όπως CO₂, CH₄, N₂O και αλογονωμένων υδρογονανθράκων, με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας τη Γης. Είναι ενδεικτικό το γεγονός ότι η ποσότητα του

διοξειδίου του άνθρακα έχει αυξηθεί κατά περίπου 70% μόνο κατά την περίοδο 1970-2004. Αυτή η απότομη αύξηση οφείλεται στις ανθρώπινες δραστηριότητες και κυρίως από την καύση ορυκτών καυσίμων και την καταστροφή των δασών. Κατά συνέπεια, η ανθρωπότητα έχει προκαλέσει δραματική αλλαγή της χημικής σύνθεσης της γήινης ατμόσφαιρας με ουσιαστικές επιπτώσεις στο κλίμα. (IPCC)

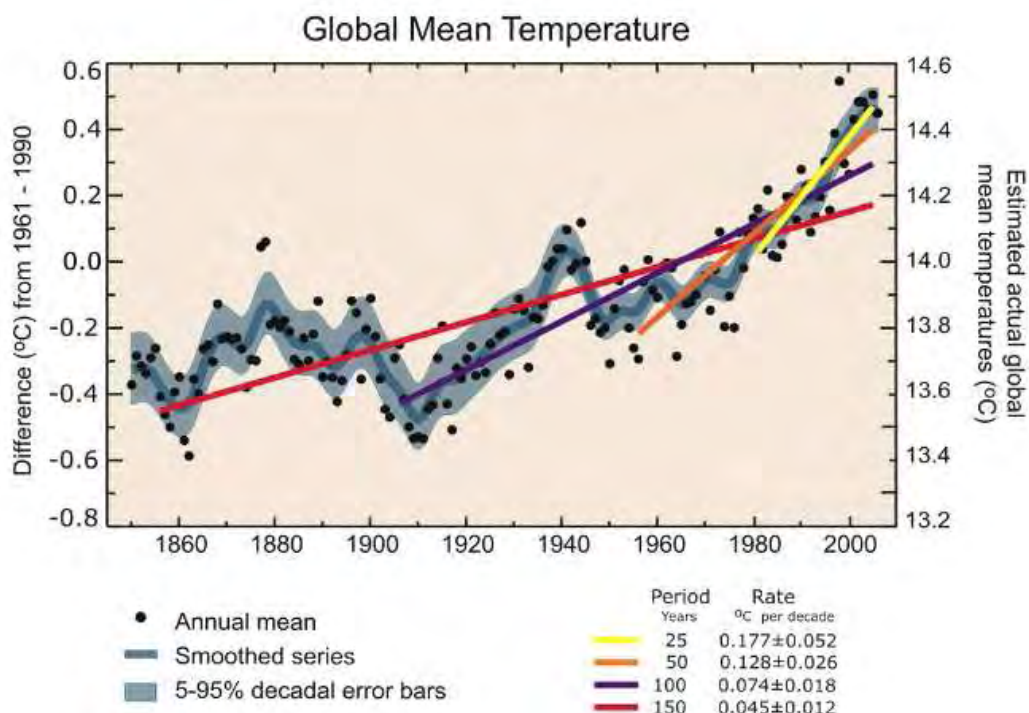
Η αύξηση των θερμοκηπικών αερίων και των αερολυμάτων, οι αλλαγές στην κάλυψη του εδάφους και την ηλιακή ακτινοβολία, αλλάζουν την ισορροπία της ενέργειας του κλιματικού συστήματος και είναι παράγοντες που προκαλούν την κλιματική αλλαγή. Έχουν επιπτώσεις στην απορρόφηση, τη διάχυση και την εκπομπή της ακτινοβολίας μέσα στην ατμόσφαιρα και την επιφάνεια της Γης. Οι προκύπτουσες θετικές ή αρνητικές αλλαγές στην ισορροπία της ενέργειας εξαιτίας ενός τέτοιου εξωτερικού παράγοντα εκφράζονται ως "Radiative Forcing" (RF). Το RF αποτελεί ένα δείκτη σημαντικότητας του παράγοντα αυτού στο μηχανισμό μιας πιθανής κλιματικής αλλαγής. (IPCC)

Παρόλο που πολλοί παράγοντες συνεχίζουν να επηρεάζουν το κλίμα, σύμφωνα με τους επιστήμονες, οι ανθρώπινες δραστηριότητες είναι ο σημαντικότερος παράγοντας και είναι υπαίτιες για το μεγαλύτερο μέρος της θέρμανσης που παρατηρήθηκε κατά τη διάρκεια των τελευταίων 50 ετών, με Radiative Forcing +1.6 (+0.6 μέχρι +2.4) W/m⁻². (IPCC)

Αποτελεί πλέον γεγονός το ότι βιώνουμε μια σαφή θέρμανση του κλιματικού συστήματος. Αυτό είναι εμφανές από τις συνολικές καταγραφές που έχει δημοσιεύσει η IPCC στην Τέταρτη Έκθεση Αξιολόγησης (4AR) σχετικά με την αύξηση της μέσης πλανητικής ατμοσφαιρικής και ωκεάνιας θερμοκρασίας, την εκτεταμένη τήξη του χιονιού και του πάγου και την αύξηση της παγκόσμιας μέσης στάθμης της θάλασσας. Η αύξηση της θερμοκρασίας είναι διαδεδομένη σε όλον τον πλανήτη και μάλιστα οι χερσαίες περιοχές έχουν θερμανθεί με ταχύτερο ρυθμό από ότι οι ωκεανοί. (IPCC)

Γενικά, η αύξηση της μέσης πλανητικής θερμοκρασίας τον τελευταίο αιώνα έχει λάβει χώρα σε δυο φάσεις, από το 1910 έως το 1949 (0,35°C) και πιο έντονα από το 1970 μέχρι σήμερα (0,55 °C). Τα τελευταία 25 χρόνια σημειώθηκε ανοδικός ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας, ενώ 11 από τα 12 θερμότερα καταγεγραμμένα έτη έχουν σημειωθεί τα τελευταία 12 χρόνια, κατά την περίοδο 1995-2006. Οι παρατηρήσεις από τα τέλη της δεκαετίας του 1950 δείχνουν ότι η τροπόσφαιρα (περίπου μέχρι τα 10 km) έχει θερμανθεί με ελαφρά μεγαλύτερο

ρυθμό από ότι η επιφάνεια ενώ η στρατόσφαιρα (περίπου 10-30 km) έχει ψυχθεί αισθητά από το 1979 (IPCC).



Σχήμα 2.1: Ετήσιες παγκόσμιες μέσες παρατηρούμενες θερμοκρασίες. (IPCC WGI)

Η αύξηση των παγκόσμιων μέσων τιμών των επιφανειακών θερμοκρασιών, υπολογίζεται μέχρι και τους 0,74 °C για τα τελευταία εκατό χρόνια (περίοδος μεταξύ 1906-2005). Παρ' όλα αυτά, η αύξηση της θερμοκρασίας διαφέρει στις διάφορες εποχές ή περιοχές. Από το σχήμα 2.1 φαίνεται ότι δεν υπήρχε μεγάλη αλλαγή στην αύξηση της θερμοκρασίας από το 1850 έως και το 1915 κάτι το οποίο μπορεί να οφείλεται είτε στη φυσική μεταβλητότητα είτε στη φτωχή δειγματοληψία. Οι τελείες αποτελούν την μέση ετήσια παρατηρηθείσα θερμοκρασία (μαύρα σημεία). Ο αριστερός άξονας παρουσιάζει τις θερμοκρασιακές μεταβολές από το 1961 ως το 1990 και ο δεξιός άξονας παρουσιάζει την εκτιμώμενη πραγματική θερμοκρασία (°C). Οι χρωματιστές γραμμές παρουσιάζουν τις τάσεις της θερμοκρασίας τα τελευταία 25, 50, 100 και 150 έτη και αντιστοιχούν στις περιόδους από το 1981 ως το 2005, το 1956 ως το 2005, το 1906 ως το 2005 και το 1856 έως το 2005, αντίστοιχα. Να σημειωθεί ότι για τις πρόσφατες χρονικές περιόδους, η κλίση είναι μεγαλύτερη, πράγμα που επισημαίνει την επιταχυνόμενη θέρμανση του πλανήτη και την απότομη αύξηση της θερμοκρασίας.

2.2 Κλιματικά Μοντέλα

Οι αλλαγές που έχουν παρατηρηθεί στο κλίμα, σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο για τις επιπτώσεις τους στο οικοσύστημα και στον άνθρωπο, έχουν δημιουργήσει την ανάγκη για μια πιο εμπεριστατωμένη μελέτη των χαρακτηριστικών του κλίματος.

Τα κλιματικά μοντέλα αποτελούν μια προσπάθεια αναπαράστασης του φυσικού κλίματος και είναι σήμερα το σημαντικότερο εργαλείο για την εκτίμηση των κλιματικών αλλαγών. Στις μέρες μας τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη των αλλαγών του κλίματος θεωρούνται αξιόπιστα, ιδιαίτερα για τις προβλέψεις μεγάλης κλίμακας (ηπειρωτικής και πάνω). Η αξιοπιστία τους προκύπτει από το ότι στηρίζονται στις θεμελιώδεις αρχές της φυσικής, καθώς και από το ότι αναπαράγουν με ακρίβεια αλλαγές του κλίματος που αφορούν στο παρελθόν και στο παρόν. Η αξιοπιστία είναι μεγαλύτερη για κάποιες μεταβλητές (πχ θερμοκρασία) και μικρότερη για άλλες (πχ βροχοπτώσεις). Το γεγονός ότι τα μοντέλα πρόβλεψης αναπτύσσονται εδώ και αρκετές δεκαετίες ενισχύει την αξιοπιστία τους στην πρόβλεψη της αντίδρασης του κλίματος στην αύξηση των αερίων του θερμοκηπίου.

Τα κλιματικά μοντέλα είναι μαθηματικές αναπαραστάσεις του κλίματος, γραμμένα με τη μορφή προγραμμάτων, τα οποία εκτελούνται από ισχυρούς υπολογιστές. Προκειμένου να είναι αξιόπιστα, τα προγράμματα αυτά βασίζονται σε νόμους της φυσικής, όπως είναι η διατήρηση της μάζας, της ενέργειας και της ορμής, καθώς και σε πληθώρα πειραματικών μετρήσεων και εμπειρικών παρατηρήσεων. Μια μορφή επαλήθευσης για να εκτιμηθεί η αξιοπιστία των μοντέλων είναι η προσομοίωση των κλιματικών συνθηκών του παρόντος. Τα μοντέλα ελέγχονται περιοδικά με το να συγκρίνονται οι προσομοιώσεις που παράγονται με πειραματικές μετρήσεις που λαμβάνονται από τους ωκεανούς, την ατμόσφαιρα και την επιφάνεια της γης.

Την τελευταία δεκαετία τα μοντέλα δείχνουν μεγάλη εξέλιξη στην ακρίβεια των εκτιμήσεων, ενώ η χρήση περισσότερων από ενός μοντέλων βοηθά στο να γίνονται ακριβείς εκτιμήσεις. Αυξάνεται συνεχώς η δυνατότητα ακριβούς πρόβλεψης της μέσης τιμής φαινομένων μεγάλης χωρικής κλίμακας. Τέτοια φαινόμενα είναι η παγκόσμια κατανομή της ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας, των βροχοπτώσεων και των ανέμων, των ωκεάνιων ρευμάτων και θερμοκρασιών, καθώς και της θαλάσσιας παγοκάλυψης. Τα μοντέλα μπορούν επίσης να προσομοιώσουν την εξέλιξη στο χρόνο για συγκεκριμένα κλιματικά φαινόμενα, όπως οι μουσώνες και οι ζώνες βροχοπτώσεων. Οι προσομοιώσεις περιλαμβάνουν

τόσο εποχιακές αλλαγές για συγκεκριμένο έτος όσο και μεταβολές με την πάροδο των ετών. Η αύξηση της ακρίβειας με την οποία τα φαινόμενα αυτά προσομοιώνονται ενισχύει και την πεποίθηση ότι η προσέγγιση των διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα στα φυσικά συστήματα είναι αρκετά ακριβής ώστε να μπορούν να γίνουν ακριβείς προβλέψεις για τις μελλοντικές κλιματικές αλλαγές.

Παρόλα αυτά, τα μοντέλα εξακολουθούν να παρουσιάζουν σημαντικά σφάλματα. Αν και τα περισσότερα από αυτά αφορούν στις προβλέψεις μικρής κλίμακας, υπάρχουν αρκετά προβλήματα και στις προβλέψεις μεγάλης κλίμακας. Για παράδειγμα, η αναπαράσταση των τροπικών βροχοπτώσεων δεν έχει ακόμα προσομοιωθεί με αρκετή ακρίβεια, ούτε και το φαινόμενο El Niño. Η πηγή των περισσότερων από τα σφάλματα αυτά έγκειται στο ότι πολλές από τις κλιματικές διαδικασίες μικρής κλίμακας, αν και παίζουν σημαντικό ρόλο, δεν μπορούν να αναπαρασταθούν με πολλές λεπτομέρειες οπότε για αναπαραστάσεις μεγάλης κλίμακας εισέρχονται στα μοντέλα προσεγγιστικά. Το γεγονός αυτό οφείλεται σε περιορισμούς στις δυνατότητες των υπολογιστών, αλλά και σε περιορισμούς στο βαθμό που κατανοούμε τα φυσικά φαινόμενα ή στην έλλειψη πειραματικών δεδομένων για κάποιες φυσικές διεργασίες. Ιδιαίτερα σημαντικές είναι οι ελλείψεις που υπάρχουν στην αναπαράσταση των νεφώσεων και στον τρόπο που αντιδρούν αυτές στις κλιματικές αλλαγές. Ως αποτέλεσμα, υπάρχει ακόμα και σήμερα σημαντική διακύμανση στις τιμές αύξησης της θερμοκρασίας που δίνουν διάφορα μοντέλα για προσθήκη συγκεκριμένης ποσότητας αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα. Παρόλα αυτά, η ακρίβεια των προσομοιώσεων μικρής κλίμακας αυξάνεται σταδιακά, καθώς εξελίσσεται η ακρίβεια και η ευκρίνεια των μοντέλων, αυξάνεται το επίπεδο κατανόησης του φυσικού περιβάλλοντος από τους επιστήμονες και αυξάνεται η υπολογιστική ισχύς.

Σε γενικές γραμμές λοιπόν, η αξιοπιστία των μοντέλων προέρχεται από το φυσικό τους υπόβαθρο και την επαλήθευσή τους μέσω της επιτυχημένης αναπαράστασης παρατηρούμενων κλιματικών αλλαγών του παρόντος και του παρελθόντος. Τα μοντέλα αποτελούν εξαιρετικά σημαντικά εργαλεία για την προσομοίωση και την κατανόηση των μηχανισμών του κλίματος, ενώ υπάρχει εμπιστοσύνη στην ικανότητά τους να προβλέπουν ποσοτικές εκτιμήσεις για μελλοντικές κλιματικές αλλαγές, ιδιαίτερα σε μεγάλη κλίμακα. Τα μοντέλα έχουν όμως ακόμα σημαντικούς περιορισμούς, όπως η αναπαράσταση των νεφώσεων, οι οποίοι οδηγούν σε μεγάλη αβεβαιότητα στην πρόβλεψη του μεγέθους και του χρόνου εκδήλωσης καιρικών φαινομένων, καθώς και στις προβλέψεις των κλιματικών αλλαγών σε τοπική κλίμακα.

Η μελέτη των πιθανών αλλαγών στο κλίμα στα κλιματικά μοντέλα γίνεται με τη βοήθεια σεναρίων εκπομπών. Η κατασκευή των σεναρίων βασίζεται στην τεκμηριωμένη από την IPCC επιστημονική άποψη ότι οι αλλαγές που έχουν παρατηρηθεί στο κλίμα, όπως η αύξηση της θερμοκρασίας, οφείλονται στην αύξηση των εκπομπών των θερμοκηπικών αερίων και κυρίως το διοξείδιο του άνθρακα. Τα σενάρια εκπομπών αποτελούν μια αληθοφανή αναπαράσταση της μελλοντικής εξέλιξης των εκπομπών των αερίων που ενεργοποιούνται μέσω φωτοχημικών αντιδράσεων και βασίζονται σε ένα σύνολο υποθέσεων για τις αιτίες αυτών των εκπομπών (όπως η κοινωνικοοικονομική και τεχνολογική εξέλιξη και οι δημογραφικές αλλαγές) (IPCC, 4AR).

2.3 Σενάρια εκπομπών

Το 1996 το IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) ξεκίνησε την ανάπτυξη ενός καινούργιου σετ σεναρίων εκπομπής, για να αντικαταστήσει αποτελεσματικά τα γνωστά σενάρια IS92. Το εγκεκριμένο καινούργιο σετ σεναρίων περιγράφεται στην ειδική αναφορά του IPCC (IPCC, 2001) για τα σενάρια εκπομπής Special Report on Emission Scenario (SRES, 2000). Τέσσερα διαφορετικά αφηγηματικά πλάνα εργασίας αναπτύχθηκαν για να περιγράψουν με συνέπεια τις σχέσεις μεταξύ των δυνάμεων που κατευθύνουν τις εκπομπές και την εξέλιξή τους και να προσθέσουν περιεχόμενο για την ποσοτικοποίηση των σεναρίων. Το τελικό σετ των 40 σεναρίων (35 από τα οποία περιέχουν δεδομένα για όλο το εύρος των αερίων που απαιτούνται για την εκκίνηση των κλιματικών μοντέλων) καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος των κυριότερων δημογραφικών, οικονομικών και τεχνολογικών δυνάμεων κατεύθυνσης των αερίων του θερμοκηπίου και των εκπομπών θείου. Κάθε σενάριο αντιπροσωπεύει μια συγκεκριμένη ποσοτικοποίηση ενός από τα τέσσερα πλάνα εργασίας. Όλα τα σενάρια που βασίζονται στο ίδιο πλάνο εργασίας απαρτίζουν ένα οικογενειακό σενάριο. Τα σενάρια (SRES, 2000) δεν περιλαμβάνουν επιπρόσθετες κλιματικές πρωτοβουλίες γεγονός που σημαίνει ότι κανένα από τα σενάρια που περιλαμβάνονται υποθέτει ρητά την υλοποίηση του πλαισίου εργασίας του Ο.Η.Ε. στο συνέδριο για την κλιματική αλλαγή ή τους στόχους εκπομπής του Πρωτοκόλλου του Κυότο. Ωστόσο, οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου επηρεάζονται άμεσα από πολιτικές που δεν αφορούν την κλιματική αλλαγή και σχεδιάστηκαν για ένα μεγάλο εύρος άλλων σκοπών (π.χ. ποιότητα του αέρα). Επιπλέον, οι κυβερνητικές πολιτικές μπορούν να επηρεάσουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου με διάφορους τρόπους, όπως η δημογραφική αλλαγή, κοινωνική και οικονομική ανάπτυξη, τεχνολογική αλλαγή, χρήση των πόρων και διαχείριση

της μόλυνσης. Η επιρροή ανακλάται ευρέως στα πλάνα εργασίας και τα τελικά σενάρια. Δεδομένου ότι τα σενάρια (SRES) εγκρίθηκαν μόλις στις 15 Μαρτίου του 2000, ήταν πολύ αργά για την κοινότητα των μοντέλων να ενσωματώσει τα τελικά εγκεκριμένα σενάρια στα μοντέλα της και να έχει τα αποτελέσματα διαθέσιμα για την Τρίτη Αναφορά Εκτίμησης σε συνδυασμό με μια απόφαση του IPCC το 1998. Εκείνη τη χρονική στιγμή, ένα σενάριο επιλέχθηκε από καθένα από τα τέσσερα γκρουπ σεναρίων που βασίζονται άμεσα στα πλάνα εργασίας (A1B, A2, B1, και B2). Η επιλογή των σημειωμένων σεναρίων βασίστηκε στο ποια από τις αρχικές ποσοτικοποιήσεις ανακλούσε καλύτερα το πλάνο εργασίας και τα χαρακτηριστικά συγκεκριμένων μοντέλων. Τα σημειωμένα σενάρια είναι πάνω κάτω παρόμοια με οποιοδήποτε άλλο σενάριο, αλλά θεωρούνται ενδεικτικά ενός συγκεκριμένου πλάνου εργασίας. Κάποια σενάρια επιλέχθηκαν επίσης τελευταία για να εμφανίσουν τα άλλα δύο γκρουπ (A1F1 και A1T) μέσα στην οικογένεια A1, η οποία εξετάζει ειδικά εναλλακτικές τεχνολογικές αναπτύξεις, κρατώντας τις άλλες δυνάμεις κατεύθυνσης σταθερές. Έτσι, υπάρχει ένα ενδεικτικό σενάριο για καθένα από τα έξι γκρουπ σεναρίων και όλα είναι το ίδιο αληθοφανή. Δεδομένου ότι τα δύο τελευταία ενδεικτικά σενάρια επιλέχθηκαν σε ένα τελευταίο στάδιο της διαδικασίας, τα αποτελέσματα του AOGCM, που παρουσιάζονται εδώ χρησιμοποιούν μόνο δύο από τα σημειωμένα σενάρια. Προς το παρόν, μόνο τα σενάρια A2 και B2 αναμιγνύονται σταδιακά από περισσότερα από ένα AOGCM. Τα αποτελέσματα του AOGCM αυξήθηκαν με αποτελέσματα από απλά κλιματικά μοντέλα που καλύπτουν και τα έξι ενδεικτικά σενάρια.

Τα τελικά τέσσερα σημειωμένα σενάρια που περιέχονται στο SRES διαφέρουν με πολλούς τρόπους από τα αρχικά σενάρια που χρησιμοποιούνται για τα πειράματα του AOGCM που περιγράφονται στην αναφορά. Για να εξακριβωθεί η πιθανή επίδραση των διαφορών στα αρχικά και τελικά σενάρια SRES, καθένα από τα τέσσερα αρχικά και σημειωμένα τελικά σενάρια μελετήθηκαν χρησιμοποιώντας ένα απλό κλιματικό μοντέλο. Για τα τρία από τα τέσσερα επιλεγμένα σενάρια (A1B, A2, και B2) η θερμοκρασιακή μεταβολή από τα αρχικά στα επιλεγμένα είναι παρόμοια. Η κύρια διαφορά είναι μια μεταβολή στις κανονικοποιημένες τιμές από το 1990 ως το 2000, η οποία είναι κοινή σε όλα αυτά τα σενάρια. Αυτό καταλήγει σε μια μεγαλύτερη αλλαγή αρκετά νωρίς στην περίοδο. Υπάρχουν κάποιες ακόμη διαφορές στο δίκτυο δυνάμεων, αλλά αυτές μειώνονται μέχρι το 2100, διαφορές στην θερμοκρασιακή μεταβολή στις δύο εκδοχές αυτών των σεναρίων βρίσκονται στο επίπεδο του 1% ή 2%. Για το σενάριο B1 ωστόσο, η θερμοκρασιακή μεταβολή είναι πολύ μικρή στην τελική εκδοχή, οδηγώντας σε μια διαφορά στη θερμοκρασιακή μεταβολή το 2100 της τάξης του 20%, ως αποτέλεσμα των γενικά χαμηλότερων εκπομπών σε όλο το πεδίο των αερίων του θερμοκηπίου. Οι ανθρωπογενείς εκπομπές των τριών κύριων αερίων του θερμοκηπίου, CO₂, CH₄,

και N₂O, μαζί με τις ανθρωπογενείς εκπομπές θείου, φαίνονται για τα έξι ενδεικτικά σενάρια εκπομπής SRES στο Σχήμα 2.5. Είναι γνωστό ότι τα σενάρια αυτά περικλείουν ένα μεγάλο εύρος των εκπομπών. Για σύγκριση οι εκπομπές φαίνονται και για το IS92. Ιδιαίτερης αναφοράς χρίζουν οι πολύ χαμηλότερες εκπομπές διοξειδίου του θείου για τα έξι σενάρια SRES, σε σύγκριση με τα σενάρια IS92, λόγω των δομικών αλλαγών στο ενεργειακό σύστημα και ενδιαφέροντος για την τοπική και χωρική μόλυνση του αέρα.

Στη συνέχεια, περιγράφονται τα βασικά χαρακτηριστικά των τεσσάρων σεναρίων:

Η οικογένεια πλοκής και σεναρίου **A1** περιγράφει έναν μελλοντικό κόσμο πολύ γρήγορης οικονομικής ανάπτυξης, με παγκόσμιο πληθυσμό που κορυφώνεται στα μέσα του αιώνα και παρουσιάζει μείωση έκτοτε, και με ταχεία εισαγωγή νέων και αποδοτικότερων τεχνολογιών. Σημαντικά ελλοχεύοντα θέματα είναι η σύγκλιση μεταξύ των περιοχών, η δυνατότητα κατασκευής υποδομών και οι αυξανόμενες πολιτιστικές και κοινωνικές αλληλεπιδράσεις, με μια ουσιαστική μείωση των τοπικών διαφορών στο κατά κεφαλήν εισόδημα. Η οικογένεια σεναρίου A1 αναπτύσσεται σε τρεις ομάδες που περιγράφουν τις εναλλακτικές κατευθύνσεις της τεχνολογικής αλλαγής στο ενεργειακό σύστημα. Οι τρεις ομάδες A1 διακρίνονται από την τεχνολογική έμφασή τους: εντατική χρήση ορυκτών (A1FI), πηγές ενέργειας άλλων ορυκτών (A1T) ή μια ισορροπία μεταξύ όλων των πηγών (A1B).

Η οικογένεια πλοκής και σεναρίου **A2** περιγράφει έναν πολύ ετερογενή κόσμο. Το ελλοχεύον θέμα είναι η αυτάρκεια και η συντήρηση των τοπικών ταυτοτήτων. Οι δομές σχετικές με τη γονιμότητα στις διάφορες περιοχές συγκλίνουν πολύ αργά, κάτι που οδηγεί στο συνεχώς αυξανόμενο παγκόσμιο πληθυσμό. Η οικονομική ανάπτυξη είναι πρώτιστα τοπικά προσανατολισμένη και η κατά κεφαλήν οικονομική ανάπτυξη και τεχνολογική αλλαγή είναι τεμαχισμένες και πιο αργές απ' ό,τι σε άλλες πλοκές.

Η οικογένεια πλοκής και σεναρίου **B1** περιγράφει έναν συγκλίνοντα κόσμο με τον παγκόσμιο πληθυσμό να κορυφώνεται στα μέσα του αιώνα και να παρουσιάζει μείωση έκτοτε, όπως στην πλοκή A1, αλλά με γρήγορες αλλαγές στις οικονομικές δομές προς μια οικονομία υπηρεσιών και πληροφοριών, με μειώσεις στην πυκνότητα των υλικών και την εισαγωγή των καθαρών και αποδοτικών ως προς τους πόρους τεχνολογιών. Η έμφαση δίνεται σε παγκόσμιες λύσεις για οικονομική, κοινωνική και περιβαλλοντική βιωσιμότητα, συμπεριλαμβανομένου και ενός βελτιωμένου δικαίου, αλλά χωρίς πρόσθετες πρωτοβουλίες για το κλίμα.

Η οικογένεια πλοκής και σεναρίου **B2** περιγράφει έναν κόσμο στον οποίο η έμφαση δίνεται στις τοπικές λύσεις για την οικονομική, κοινωνική και περιβαλλοντική βιωσιμότητα. Είναι ένας κόσμος με συνεχώς αυξανόμενο παγκόσμιο πληθυσμό με ένα ρυθμό χαμηλότερο από την A2, ενδιάμεσα επίπεδα οικονομικής ανάπτυξης και λιγότερο γρήγορη και πιο ποικίλη τεχνολογική αλλαγή απ' ό,τι στις B1 και A1 πλοκές. Ενώ το σενάριο προσανατολίζεται επίσης προς την προστασία του περιβάλλοντος και την κοινωνική αμεροληψία, εστιάζει στο τοπικό και περιφερειακό επίπεδο.

2.4 Καταβιβασμός Κλίμακας

Το σήμα της κλιματικής αλλαγής που απαιτείται σε πολλές μελέτες επιδράσεων απαιτεί πολύ μικρότερη χωρική κλίμακα σε σχέση με αυτή που παρέχουν τα GCMs ή τα RCMs. Είναι γεγονός ότι τα GCMs παρέχουν αναλύσεις εκατοντάδων χιλιομέτρων ενώ τα RCMs δεκάδων χιλιομέτρων. Τα πιο ακριβή μέσα για την απόκτηση σεναρίων υψηλότερης χωρικής ανάλυσης είναι να εφαρμόσουμε τραχιάς κλίμακας προβολές στο μέλλον για την κλιματική αλλαγή σε μια παρατηρημένη βάση υψηλής ανάλυσης (μέθοδος αλλαγής του παράγοντα). Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται συχνά όταν τα αποτελέσματα του RCM δεν είναι διαθέσιμα, για μελέτες ευαισθησίας ή όταν απαιτούνται ραγδαίες αποτιμήσεις πολλαπλών σεναρίων κλιματικής αλλαγής (και/ή πειράματα με GCM). Η πληροφορία κλιματικής αλλαγής, υψηλής ανάλυσης για χρήση σε μελέτες επιδράσεων μπορεί ακόμη να αποκτηθεί διαμέσου πιο σύνθετων μεθόδων στατιστικού καταβιβασμού κλίμακας, αλλά τέτοιες μελέτες πρέπει να περιοριστούν στη χρήση ενός απλού κατευθυνόμενου GCM. Ο σκοπός εδώ είναι να παρέχουμε υπόβαθρο πληροφοριών και καθοδήγηση στην εφαρμογή των στατιστικών μεθόδων καταβιβασμού κλίμακας για την ανάπτυξη κλιματικών σεναρίων. Το υλικό καθοδήγησης της χρήσης της περιοχικής μοντελοποίησης για την ανάπτυξη κλιματικών σεναρίων δίνεται από ένα συγγενές έγγραφο (Mearns et al., 2003).

2.4.1 Στατιστικός Καταβιβασμός Κλίμακας

Ο στατιστικός καταβιβασμός κλίμακας βασίζεται στην άποψη ότι το κλίμα μιας περιοχής είναι προετοιμασμένο από δύο παράγοντες: την μεγάλης κλίμακας

κλιματική κατάσταση, και τα περιοχικά/τοπικά φυσιογραφικά χαρακτηριστικά (π.χ. τοπογραφία, κατανομή θάλασσας-γης, και χρήση γης; von Storch 1995,1999). Από αυτή την πλευρά, οι περιοχικές ή τοπικές κλιματικές πληροφορίες εξάγονται πρώτα καθορίζοντας ένα στατιστικό μοντέλο που συνδέει τις μεγάλης κλίμακας εξαρτημένες μεταβλητές πρόγνωσης με τις τοπικής κλίμακας ανεξάρτητες μεταβλητές πρόγνωσης.

Στη συνέχεια η μεγάλης κλίμακας εκροή μιας προσομοίωσης GCM τροφοδοτείται μέσα σε αυτό το στατιστικό μοντέλο για να εκτιμήσει τα αντίστοιχα περιοχικά και τοπικά χαρακτηριστικά. Ένα από τα κυρίαρχα πλεονεκτήματα αυτών των τεχνικών είναι ότι είναι υπολογιστικά οικονομικές, και έτσι μπορούν εύκολα να εφαρμοστούν στην έξοδο διαφορετικών πειραμάτων με GCM. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να παρέχουν πληροφορίες ειδικής τοποθεσίας, οι οποίες μπορεί να είναι πολύ σημαντικές για αρκετές μελέτες επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής. Η κύρια θεωρητική αδυναμία των μεθόδων στατιστικού καταβιβασμού κλίμακας είναι ότι η βασική τους παραδοχή δεν είναι επαληθεύσιμη, δηλαδή, το γεγονός ότι οι στατιστικές σχέσεις που αναπτύσσονται για το κλίμα της παρούσας ημέρας διέπονται επίσης και από διαφορετικές συνθήκες πιθανού μελλοντικού κλίματος-ένας περιορισμός που ισχύει και στην φυσική παραμετροποίηση των δυναμικών μοντέλων. (Τζαμπύρας, 2009)

Ο στατιστικός καταβιβασμός κλίμακας περιλαμβάνει την ανάπτυξη ποσοτικών σχέσεων ανάμεσα σε μεγάλης κλίμακας ατμοσφαιρικές εξαρτημένες μεταβλητές πρόγνωσης (predictors) και τοπικές επιφανειακές ανεξάρτητες μεταβλητές πρόγνωσης (predictands).

Είναι σημαντικό να γνωρίζουμε ορισμένες βασικές παραδοχές όταν κάνουμε καταβιβασμό κλίμακας σε εξόδους κλιματικών μοντέλων για τρέχοντα και προβαλλόμενα κλίματα (Hewitson and Crane, 1996; Giorgi et al., 2001):

Οι εξαρτημένες μεταβλητές predictors που είναι σχετικές με την τοπική ανεξάρτητη μεταβλητή πρόγνωσης (predictand) θα πρέπει να αναπαράγονται επαρκώς από το κεντρικό κλιματικό μοντέλο σε χωρικές κλίμακες που χρησιμοποιούνται για να προσαρμοστεί η καταβιβασμένη αντίδραση.

Η σχέση μεταξύ των εξαρτημένων μεταβλητών πρόγνωσης (predictors) και των ανεξάρτητων μεταβλητών πρόγνωσης (predictands) παραμένει έγκυρη για περιόδους έξω από την περίοδο προσαρμογής (χρονική σταθερότητα).

Το σετ των εξαρτημένων μεταβλητών πρόγνωσης (predictors) ενσωματώνει ικανοποιητικά το μελλοντικό σήμα της κλιματικής αλλαγής.

Οι εξαρτημένες μεταβλητές πρόγνωσης (predictors) που χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό του μελλοντικού τοπικού κλίματος δεν πρέπει να εκτείνονται έξω από τα όρια της κλιματολογίας που χρησιμοποιείται για τη βαθμονόμηση του στατιστικού μοντέλου καταβιβασμού κλίμακας.

Η πιο κοινά χρησιμοποιούμενη λογική για καταβιβασμό κλίμακας είναι ότι τα GCMs παρέχουν μόνο μια γενική άποψη για το πως οι κλιματικές μεταβλητές, όπως η παγκόσμια θερμοκρασία και βροχόπτωση, μπορεί να μεταβληθούν στο μέλλον ως αποτέλεσμα των αυξανόμενων συγκεντρώσεων ανθρωπογενών αερίων του θερμοκηπίου. Γι' αυτό ο καταβιβασμός κλίμακας συχνά δικαιολογείται από το γεγονός ότι η κλιματική πληροφορία απαιτείται σε υψηλότερες χρονικές και / ή χωρικές αναλύσεις σε σχέση με το πως δίνεται από την έξοδο του GCM. Παρακάτω περιγράφεται πότε είναι κατάλληλος ή όχι ο στατιστικός καταβιβασμός της κλίμακας ή όχι.

2.4.2 Καταστάσεις που απαιτούν στατιστικό καταβιβασμό κλίμακας

Οι μέθοδοι στατιστικού καταβιβασμού κλίμακας είναι ιδιαίτερα χρήσιμες σε ετερογενή περιβάλλοντα με πολύπλοκη φυσιογραφία ή με απότομες κλίσεις (όπως νησιά ή βουνώδη ηπειρωτικά ή θαλάσσια συμπλέγματα) όπου υπάρχουν ισχυρές σχέσεις με τη συνοπτική κλίμακα μεταβολής. Πράγματι, ο στατιστικός καταβιβασμός κλίμακας μπορεί να είναι το μόνο πρακτικό μέσο δημιουργίας κλιματικών σεναρίων για σημειακές κλίμακας διαδικασίες όπως η διάβρωση του εδάφους (Favis-Mortlock and Boardman, 1995). Μια περαιτέρω δικαιολόγηση για τον στατιστικό καταβιβασμό κλίμακας είναι η ανάγκη για καλύτερες πληροφορίες sub-GCM grid scale για ακραία γεγονότα όπως τα θερμικά κύματα (Schubert and Henderson-Sellers, 1997), έντονες βροχοπτώσεις (Olsson et al., 2001) ή τοπική πλημμύρα (Pilling and Jones, 2002).

Το κύριο πλεονέκτημα των στατιστικών μεθόδων καταβιβασμού κλίμακας σε σχέση με τα RCMs η χαμηλή υπολογιστική τους απαίτηση. Τα πλάνα στατιστικού καταβιβασμού κλίμακας είναι επίσης εύκαμπτα με την έννοια ότι για οποιαδήποτε τοπική μεταβλητή με προβλεψιμότητα, μια μετατρεπόμενης-κλίμακας σχέση μπορεί να βρεθεί (Τζαμπύρας, 2009).

2.4.3 Θεωρητική Προσέγγιση Μεθοδολογίας Στατιστικού Καταβιβασμού

Η χρήση του στατιστικού καταβιβασμού κλίμακας για την ανάπτυξη σεναρίων κλιματικής αλλαγής γενικά απαιτεί φυσική λογική. Ωστόσο, η αξιοπιστία των σεναρίων καταβιβασμού κλίμακας ενισχύεται με την εφαρμογή κατευθυντήριων γραμμών καλής-πρακτικής. Παρακάτω παρουσιάζονται μερικά από τα πιο σημαντικά βήματα της διαδικασίας στατιστικού καταβιβασμού.

Καθορισμός των σκοπών της μελέτης:

Είναι σαφές ότι καθοριστικό ρόλο στον στατιστικό καταβιβασμό κλίμακας διαδραματίζει η ποσότητα και η ποιότητα των δεδομένων, ο διαθέσιμος χρόνος, οι πόροι και οι μετεωρολογικές πληροφορίες που απαιτούνται. Ένα χρήσιμο αρχικό σημείο για κάθε μελέτη στατιστικού καταβιβασμού κλίμακας είναι μια ανάλυση από κάτω (bottom up) των βασικών κλιματικών ευαισθησιών του συστήματος που μας ενδιαφέρει (Beersma et al., 2000).

Αποτίμηση της διαθεσιμότητας και της ποιότητας των δεδομένων του αρχείου:

Η μεταβλητότητα όλων των τεχνικών καταβιβασμού κλίμακας έγκειται στην πρόσβαση σε υψηλής ποιότητας ανεξάρτητες μεταβλητές πρόγνωσης (predictands) και εξαρτημένες μεταβλητές πρόγνωσης (predictors) στο χώρο και σε χρονικές κλίμακες μελλοντικής χρήσης. Θα πρέπει επίσης να αναγνωρισθεί στο τέλος ότι λίγοι μετεωρολογικοί σταθμοί έχουν ομάδες δεδομένων που είναι 100% πλήρη και / ή εντελώς ακριβή. Γι' αυτό η διαχείριση των ελλιπών δεδομένων είναι απαραίτητη για τις περισσότερες πρακτικές καταστάσεις. Ευτυχώς η επιστημονική κοινότητα καταβιβασμού κλίμακας τώρα ασχολείται με τα κέντρα κλιματικών μοντέλων που αναφέρονται στις επιθυμητές λίστες των εξαρτημένων μεταβλητών πρόγνωσης (predictors). Χαρακτηριστικό είναι το CCCMa (Canadian Center for Climate Analysis and Modeling) το οποίο προμηθεύει εξαρτημένες μεταβλητές πρόγνωσης στο διαδίκτυο και το οποίο αποτελεί μια από τις πηγές δεδομένων για την παρούσα εργασία. Ακόμη η επικύρωση των εξόδων των κλιματικών μοντέλων σε χωρικές και χρονικές κλίμακες είναι ένας απαραίτητος προκέρσος σε όλες τις ασκήσεις καταβιβασμού κλίμακας διότι οι τεχνικές αυτές πολλαπλασιάζουν την αβεβαιότητα στα πεδία κατεύθυνσης του GCM, και δεν βελτιώνουν βασική ικανότητα του GCM (Hewitson and Crane, 2003).

Καθορισμός του τύπου και της δομής του μοντέλου:

Το εύρος των τεχνικών και των εφαρμογών στατιστικού καταβιβασμού κλίμακας έχουν αυξηθεί σημαντικά από το IPCC TAR. Σημαντικό βήμα είναι αρχικά η επιλογή της μεθόδου που θα χρησιμοποιηθεί. Συγκριτικές μελέτες έχουν δείξει ότι η ικανότητα αυτών των τεχνικών εξαρτάται από την επιλεγόμενη εφαρμογή και

την περιοχή ενδιαφέροντος. Πρακτικά η επιλογή του τύπου του μοντέλου απεικονίζει τη διαθεσιμότητα των δεδομένων, την ευκολία πρόσβασης σε υπάρχοντα μοντέλα (και τα παρελκόμενα έγγραφα), και τη φύση του προβλήματος. Πολλές μελέτες λαμβάνουν υπόψη την περιοδική διαστρωμάτωση των δεδομένων που προηγούνται της βαθμονόμησης του μοντέλου. Οι κύριες θεωρήσεις περιλαμβάνουν το χρονικό βήμα του στατιστικού μοντέλου (ωριαίοι, ημερήσιοι, μηνιαίοι μέσοι) και μετεωρολογικά στατιστικά μοντέλα καταβιβασμού κλίμακας θα πρέπει να αναπτυχθούν ειδικά για κάθε μήνα ατομικά, για κάθε περίοδο και κάθε έτος (όπως υγρά και ξηρά επεισόδια). Σε κάποιες περιπτώσεις, οι συμβατικές κλιματολογικές περίοδοι (DIF, MAM, κ.ο.κ) μπορεί να μην απεικονίζουν φυσικές περιόδους που περιέχονται στα δεδομένα και έτσι μπορεί να χρειαστούν εναλλακτικές οροθετήσεις. Ακόμη, αυστηρές ταξινομήσεις των δεδομένων χρησιμοποιώντας περιοδικούς ορισμούς που βασίζονται στην παρούσα κλιματική συμπεριφορά μπορεί να μην είναι έγκυρες κάτω από διαφοροποιημένες κλιματικές συνθήκες. Με βάση αυτές τις συνθήκες οι παράμετροι του μοντέλου επιτρέπεται να μεταβάλλονται σε υπό-περιοδική χρονική κλίμακα. Ωστόσο, σε μερικές περιπτώσεις (π.χ. καταβιβασμένης κλίμακας ποσότητες βροχόπτωσης σε ημίξηρες περιοχές) θα είναι απαραίτητο να ομαδοποιηθούν τα δεδομένα σε περιόδους απλά για να εξασφαλιστούν επαρκείς περιπτώσεις (υγρής-ημέρας) για τη βαθμονόμηση του μοντέλου.

Επιλογή των κατάλληλων εξαρτημένων μεταβλητών πρόγνωσης (predictors):

Η επιλογή των μεταβλητών predictors είναι ένα από τα πιο κρίσιμα βήματα στην ανάπτυξη ενός πλάνου στατιστικού καταβιβασμού κλίμακας επειδή η απόφαση καθορίζει σε μεγάλο βαθμό το χαρακτήρα του καταβιβασμένου σεναρίου. Η διαδικασία επιλογής είναι πολύπλοκη από το γεγονός ότι η ισχύς της συσχέτισης των ατομικών εξαρτημένων μεταβλητών πρόγνωσης (predictors) μπορεί να είναι χαμηλή (ειδικά για ημερήσια βροχόπτωση), ή η ισχύς να μεταβάλλεται χωρικά και χρονικά. Δυστυχώς, έχουν γίνει λίγες σχετικά συστηματικές προσεγγίσεις διαφορετικών εξαρτημένων μεταβλητών πρόγνωσης (Charles et al., 1999b; Huth, 1999; Wilby and Wigley, 2000; Winkler et al., 1997). Είναι ακόμη πιθανό σε μερικές περιπτώσεις να παραβλεφθούν χρήσιμες μεταβλητές λόγω χαμηλής συσχέτισης με τις παρούσες κλιματικές συνθήκες. Για καταβιβασμό κλίμακας της βροχόπτωσης που λαμβάνει χώρα και στην τρέχουσα εργασία είναι γνωστό ότι ο συνυπολογισμός των μεταβλητών της υγρασίας μπορεί να ασκήσει σημαντική επίδραση στο αποτέλεσμα, όχι μόνο αλλάζοντας το μέγεθος των μελλοντικών μεταβολών αλλά και την ταυτότητα των μεταβολών (Hewitson, 1999; Charlew et al., 1999b). Σε τελική ανάλυση, η επιλογή των μεταβλητών predictors για καταβιβασμό κλίμακας παρεμποδίζεται από τα δεδομένα αρχείου των πειραμάτων με GCMs διότι το εύρος των προϊόντων της επανάλυσης γενικά υπερβαίνει αυτό

που επανορθώνεται για ατομικά τρεξίματα του GCM. Λαμβάνοντας αυτό υπόψη, απλές διαδικασίες όπως η μερική ανάλυση συσχέτισης, η βηματική συµµεταβολή (stepwise regression), ή το κριτήριο πληροφορίας µπορεί να χρησιµοποιηθούν για την καταγραφή των πιο υποσχόµενων µεταβλητών predictors από µια υποψήφια ακολουθία (Charles et al., 1999b; Wilby et al., 2003). Η ιδανική εξαρτηµένη µεταβλητή πρόγνωσης (predictor) για στατιστικό καταβιβασµό κλίµακας είναι ισχυρά συνδεδεµένη µε την µεταβλητή στόχο, έχει φυσική έννοια, παρουσιάζεται αξιόπιστα από το GCM, και συλλαµβάνει πολυετή µεταβλητότητα. Ακόµη, οι εξαρτηµένες µεταβλητές πρόγνωσης (predictors) πρέπει να αντανakλούν αθροιστικά το σήµα της κλιµατικής αλλαγής συµπληρώνοντας όλα τα άλλα κριτήρια, γιατί αν λείπει αυτό θα προκύψει ένα πολύ αναξιόπιστο σενάριο κλιµατικής αλλαγής.

Ορισµός του πεδίου καταβιβασµού κλίµακας:

Είναι αναγκαίο να οριστεί η τοποθεσία και οι διαστάσεις του πεδίου των µεγάλης κλίµακας εξαρτηµένων µεταβλητών πρόγνωσης (predictors) για καταβιβασµό κλίµακας τοπικών µετεωρολογικών µεταβλητών (ανάλογα µε την επιλογή των πλευρικών µετεωρολογικών οριακών συνθηκών που χρησιµοποιούνται στην κατεύθυνση προσοµοιώσεων RCM υψηλής ανάλυσης). Όσο µικρότερο το πεδίο των εξαρτηµένων µεταβλητών πρόγνωσης (predictor), τόσο πιο άµεση η επιρροή του αρχικού GCM στο καταβιβασµένο σενάριο. Η τοποθεσία του καταβιβασµένου πεδίου είναι σηµαντική επειδή η ικανότητα των GCMs στην αναπαραγωγή της κλιµατολογίας παρατήρησης διαφέρει µεταξύ των µοντέλων και δεν είναι οµοιόµορφη κατά µήκος του χώρου ή του χρόνου (Lambert and Boer, 2001). Η θέση του πεδίου δείχνει επίσης τις επικρατούσες διαδικασίες που επηρεάζουν την περιοχή µελέτης (όπως τροχιά των µεσαίου γεωγραφικού πλάτους κυκλώνων, επιρροή των υδάτινων σωµάτων, ορογραφία, κ.τ.λ.). Η βέλτιστη περιοχή του πεδίου εξαρτάται σε κάποιο επίπεδο από το θεωρητικό επίπεδο του συνόλου στο οποίο το αρχικό GCM είναι ικανό-γενικά υποτίθεται ότι είναι τουλάχιστον αρκετά σηµειακά φατνία (grid points) (Widmann and Bretherton, 2000). Τέλος, είναι αποδεκτό ότι η βέλτιστη τοποθεσία και διαστάσεις του πεδίου των µεταβλητών predictors µπορεί να διαφέρει από περιοχή σε περιοχή και πρέπει να αναγνωρισθεί επίσης ότι το χωρικό πλάνο των σχέσεων των µεταβλητών predictor-predictand µπορεί να αλλάξει κάτω από µεταβληµένες κλιµατικές συνθήκες.

Μεταβολή της διάστασης των φατνίων και βελτιστοποίηση των δεδοµένων:

Η κατασκευή ενός υποψήφιου συνόλου εξαρτηµένων µεταβλητών πρόγνωσης µεταβλητών (predictors) µπορεί να αποτελέσει µια πολύπλοκη διαδικασία που προϋποθέτει την εξαγωγή δεδοµένων, και τεχνικές µεταβολής της διάστασης των

φατνίων και βελτιστοποίησης. Η μεταβολή της διάστασης των φατνίων συχνά απαιτείται επειδή η χωρική διακριτοποίηση των φατνίων (grid-spacing) και / ή τα ισοδύναμα συστήματα παρατήρησης και τα σύνολα δεδομένων επανάλυσης (που χρησιμοποιούνται για βαθμονόμηση μοντέλων στατιστικού καταβιβασμού κλίμακας), δεν ανταποκρίνονται πάντα στην χωροθέτηση των φατνίων και τα ισοδύναμα συστήματα τής εξόδου του GCM (που χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη περιοχικών σεναρίων κλιματικής αλλαγής). Η βελτιστοποίηση είναι ευρέως χρησιμοποιούμενη πριν από την εφαρμογή του στατιστικού καταβιβασμού κλίμακας για την μείωση των συστηματικών διαφορών στις τιμές του μέσου και της διακύμανσης των εξαρτημένων μεταβλητών πρόγνωσης (predictors) του GCM των σχετικών με τις παρατηρήσεις. Η διαδικασία ουσιαστικά περιλαμβάνει την αφαίρεση από του μέσου και τη διαίρεση με την τυπική απόκλιση της μεταβλητής predictor για μια προκαθορισμένη περίοδο βάσης. Τα κύρια ζητήματα, σχετίζονται με την επιλογή της περιόδου βάσης και μέσο εύρος (μηνιαίο, περιοδικό, ή ετήσιο). Η περίοδος 1961-1990 είναι ευρέως χρησιμοποιούμενη σαν βάση διότι είναι επαρκούς διάρκειας ώστε να εγκαθιδρύσει μια αξιόπιστη κλιματολογία, όχι πολύ μακριά, ούτε υπερβολικά σύγχρονη να περιλάβει ένα ισχυρό παγκόσμιο σήμα μεταβολής.

Επαλήθευση του μοντέλου χρησιμοποιώντας ανεξάρτητα δεδομένα:

Θα πρέπει να τονιστεί ότι οι μέθοδοι στατιστικού καταβιβασμού κλίμακας δεν πρέπει να εφαρμόζονται αυθαίρετα ειδικά όταν γίνεται χρήση γραμμικής ή μη παλινδρόμησης που έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία στατιστικών μοντέλων, κάτι που εφαρμόζεται και σε αυτή την εργασία. Για το λόγο αυτό, η καλύτερη πρακτική απαιτεί ακριβή εκτίμηση των μεθόδων στατιστικού καταβιβασμού κλίμακας (και αντίστοιχα των RCMs) χρησιμοποιώντας ανεξάρτητα δεδομένα. Μια βασική προσέγγιση στην πιστοποίηση του μοντέλου περιλαμβάνει τη χρήση διακριτών αρχείων: ένα μέρος για βαθμονόμηση του μοντέλου και το υπόλοιπο για δοκιμή. Αυτή η μέθοδος είναι κατάλληλη όταν μεγάλα (>30-έτη) αρχεία παρατήρησης είναι διαθέσιμα. Ωστόσο, οι τεχνικές πιστοποίησης μπορεί να είναι μια πιο αποτελεσματική χρήση των μικρότερων αρχείων, ή υποκατάστατα των δεδομένων (όπως παράξενα / ομαλά έτη) όταν υπάρχει η υποψία τάσεων. Εναλλακτικά, το μοντέλο μπορεί να αναπτυχθεί χρησιμοποιώντας δεδομένα από ξηρά έτη και δοκιμαζόμενα με δεδομένα από υγρά έτη, ή vice versa (Wilks, 1999). Μια επιπλέον στρατηγική η "πολυλειτουργική υπόθεση" περιλαμβάνει την ενδοσύγκριση διαφορετικών στατιστικών πλάνων μεταβολής (Zorita and von Storch, 1999), ή δοκιμή των επιδόσεων του μοντέλου σχετικά με τα RCMs (Murphy, 1999).

Δημιουργία σεναρίων καταβιβασμού κλίμακας:

Μετά την πιστοποίηση και βαθμονόμηση του μοντέλου είναι απαραίτητο να δημιουργηθούν συνθετικές μετεωρολογικές σειρές, δεδομένου ότι οι ατμοσφαιρικές εξαρτημένες μεταβλητές πρόγνωσης (predictors) που παρέχονται από το GCM (αντιπροσωπεύουν είτε παρών είτε μελλοντικό κλίμα). Οι εξαρτημένες μεταβλητές πρόγνωσης (predictors) μπορεί να προέρχονται είτε από χρονικά κομμάτια ή από πειράματα με μοντέλα μετάδοσης.

Μερικές μεθοδολογίες είναι ικανές να παραδίδουν ταυτόχρονα πολλαπλές εξόδους όπως βροχόπτωση, μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία, ηλιακή ακτινοβολία, σχετική υγρασία και ταχύτητα του ανέμου (Parlange και Katz, 2000). Πράγματι, αυτή είναι μια συνηθισμένη ανάγκη για πολλές μελέτες επίδρασης. Ωστόσο, όπου οι μεταβλητές predictor είναι ανεξάρτητες είναι απαραίτητο αν επιβεβαιωθεί ότι οι ενδο-μεταβλητές σχέσεις διατηρούνται αξιόπιστα (για παράδειγμα, ότι η μέγιστη ημερήσια θερμοκρασία είναι πάντοτε μεγαλύτερη από την ελάχιστη). Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό όποτε αναλύονται οι πιθανότητες ένωσης των γεγονότων όπως η εξάρτηση μεταξύ θαλάσσιων ρευμάτων, ποτάμιας ροής και βροχόπτωσης (Svensson and Jones, 2002).

Για καλύτερα αποτελέσματα ο καταβιβασμός κλίμακας πρέπει να εφαρμόζεται χρησιμοποιώντας εξόδους από ένα μεγάλο φάσμα πειραμάτων με κλιματικά μοντέλα έτσι ώστε να παρουσιάζονται οι αβεβαιότητες που αποδίδονται σε διαφορετικά σενάρια εκπομπής, δομές μοντέλων, πλάνα παραμετροποίησης και κλιματικές ευαισθησίες (Mearns et al., 2001). Δεδομένου ότι οι εξαρτημένες μεταβλητές πρόγνωσης (predictor) διαφορετικών κλιματικών μοντέλων έχουν βελτιστοποιηθεί με τον ίδιο τρόπο και αντιπροσωπεύουν πανομοιότυπα ατμοσφαιρικά φαινόμενα (ένας ακόμη καλός λόγος για υψηλής ποιότητας μετεωρολογικά δεδομένα), η επανάληψη των πειραμάτων καταβιβασμού κλίμακας μπορεί να διασφαλιστεί χρησιμοποιώντας τους ίδιους παράγοντες δομής / μεταφοράς του μοντέλου αλλά διαφορετικές πηγές κατεύθυνσης των μεταβλητών. Αυτό είναι εφαρμόσιμο για τις περισσότερες μεθόδους στατιστικού καταβιβασμού κλίμακας αλλά σπάνια εγγυημένο.

Εκτίμηση της προστιθέμενης αξίας του καταβιβασμού κλίμακας:

Κατά τη δημιουργία μιας ομάδας σεναρίων είναι σημαντικό να εκτιμηθεί το επίπεδο μέχρι το οποίο ο καταβιβασμός κλίμακας έχει προστιθέμενη αξία στην εκτίμηση της επίδρασης πάνω και πέρα από τη χρήση της σειράς εξόδου του GCM. Η πιο σύγχρονη τεχνική είναι να εκτιμηθεί η αξιοπιστία του GCM και των μεταβλητών καταβιβασμού κλίμακας των σχετικών με την κλιματολογία

παρατήρησης κάτω από παρούσες κλιματικές συνθήκες, σε χρονική και χωρική κλίμακα της μελετούμενης επίδρασης (Hay et al., 2000). Ένα περαιτέρω βήμα περιλαμβάνει τη σύγκριση των αντλούμενων μεταβλητών που δημιουργήθηκαν για παράδειγμα από την υδάτινη ισορροπία (Wilby et al., 2000), τη συχνότητα των πλημμύρων (Reynard et al., 2004) ή γεωργικά (Mearns et al., 1999) μοντέλα επίδρασης κατευθυνόμενα από καταβιβασμό κλίμακας ή από τη χρονοσειρά εξόδου του GCM. Τέλος, είναι αποδεκτό ότι η περιοδική πρόβλεψη μπορεί να αποτελέσει ένα χρήσιμο πλαίσιο εργασίας για δοκιμή του καταβιβασμού κλίμακας διότι οι προβλέψεις είναι μέχρι τώρα υποθετικές, αλλά τα μοντέλα μπορούν να επαληθευθούν στο διαδίκτυο καθώς καινούρια δεδομένα γίνονται διαθέσιμα.(Leung et al., 2003).

3. ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΡΟΗΣ

3.1 Εισαγωγή

Συστήματα προσομοίωσης και διαχείρισης υδατικών πόρων έχουν δημιουργεί από ερευνητικές ομάδες στην Ευρώπη, στις Η.Π.Α., αλλά και της Ελλάδας. Παρακάτω παρατίθενται οι πιο σημαντικές εργασίες που έχουν πραγματοποιηθεί.

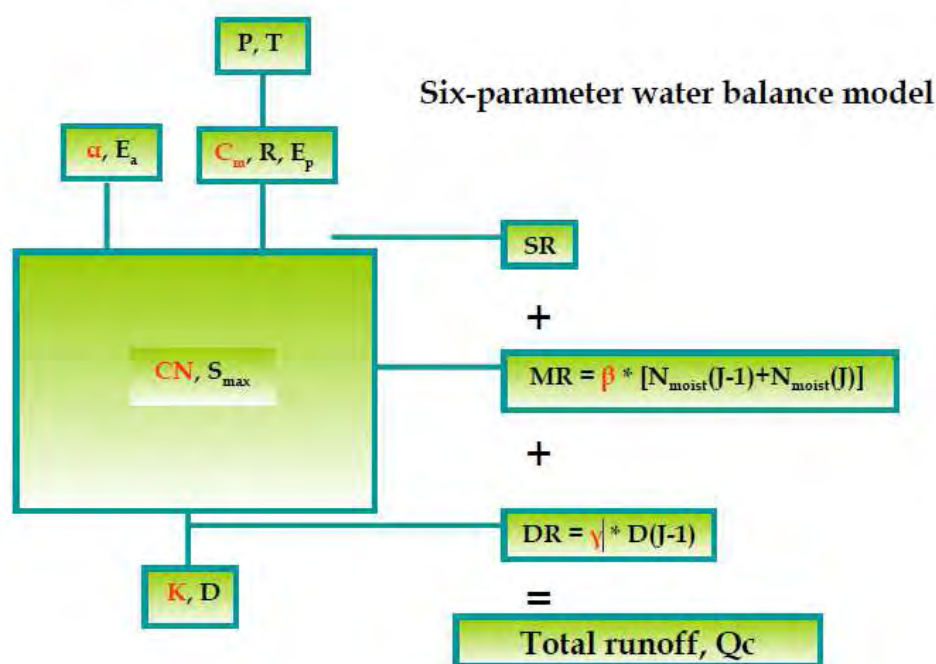
Το 1991 η ερευνητική ομάδα του Πολυτεχνείου της Βαλένθια (Andreu et al., 1991), παρουσίασε ένα σύστημα (με το όνομα AQUATOOL) για τη διαχείριση υδάτινων πόρων με την ταυτόχρονη και Sandia National παρουσίασε ένα ολοκληρωμένο σύστημα λήψης αποφάσεως για το σχεδιασμό ενός δικτύου παρακολούθησης πηγαδιών το οποίο θα τηρεί τους περιβαλλοντικούς περιορισμούς που έχει επιβάλλει η νομοθεσία. Το σύστημα αυτό, με την ονομασία SEDSS (Sandia Environmental Deciosion Support System), περιέχει ένα πολύ καλό διαδραστικό περιβάλλον χρήστη, διάφορα μοντέλα προσομοίωσης και ένα γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών. Στο σύστημα αυτό εφαρμόσθηκε μια πιθανολογική προσέγγιση για να μειωθεί η αντικειμενικότητα στους περιορισμούς.

Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, πολύ σημαντική προσπάθεια αποτελεί το MULINO (Multi-sectoral Integrated and Operational decision support system for sustainable use of water resources at the catchment scale) (Giurponi et al., 2004) στο οποίο συμμετείχαν ευρωπαϊκά πανεπιστήμια, ινστιτούτα και φορείς. Αποτελεί ένα ολοκληρωμένο σύστημα λήψης αποφάσεων για τη βιώσιμη χρήση των υδατικών πόρων. Εφαρμόστηκε αρχικά για τη λεκάνη της Vela στην επαρχία της Βενετίας και αποτελεί πλέον οδηγός προς χρήση σε άλλες περιπτώσεις.

Στην Ελλάδα, μια πρόσφατη προσπάθεια είναι της ερευνητικής ομάδας ΙΤΙΑ του Ε.Μ.Π. (Koutsoyiannis et al., 2003), το ολοκληρωμένο σύστημα της οποίας αποτελείται από ένα σύστημα συλλογής δεδομένων λήψης αποφάσεων, ένα σύστημα μοντέλων προσομοίωσης και ένα σύστημα διαχείρισης.

3.2 Υδρολογικό μοντέλο UTHBAL

Το μηνιαίο υδρολογικό μοντέλο UTHBAL (Loukas et. al, 2007) χρησιμοποιήθηκε για την ημι-κατανεμημένη μηνιαία προσομοίωση του υδρολογικού ισοζυγίου και την εκτίμηση της κατείσδυσης στον υπόγειο υδροφορέα της περιοχής μελέτης. Το μοντέλο χρησιμοποιεί χωρικά κατανεμημένα υδρομετεωρολογικά δεδομένα εισόδου σε υψομετρικές ζώνες σε περιβάλλον ενός Γεωγραφικού Συστήματος Πληροφοριών. Τα αποτελέσματα εξόδου του μοντέλου παρέχουν χωρικά ημικατανεμημένη πληροφορία των συνιστωσών του υδρολογικού κύκλου. Το μοντέλο εφαρμόσθηκε στη λεκάνη απορροής της λίμνης Κάρλας της Θεσσαλίας, έκτασης περίπου 1220 km², ανάντη του σημείου εισόδου του νέου ταμιευτήρα, έκτασης περίπου 38 km². Η υδρολογική λεκάνη χωρίστηκε σε δύο ομοιογενείς υψομετρικές ζώνες με βάση το ψηφιακό μοντέλο εδάφους της περιοχής μελέτης. Η εκτίμηση του υδρολογικού ισοζυγίου και της κατείσδυσης στον υπόγειο υδροφορέα έγινε σε μηνιαία βάση για τη χρονική περίοδο Οκτώβριος 1960 έως Σεπτέμβριος 2009.



Σχήμα 3.1: 6 παράμετροι του υδρολογικού μοντέλου UTHBAL

Αρχικό βήμα στη κατάστρωση του μοντέλου προσομοίωσης της απορροής, είναι ο διαχωρισμός της υετόπτωσης σε βροχή και χιόνι. Ο διαχωρισμός αυτός

καθορίζεται, κυρίως από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Ορίστηκε ένα όριο θερμοκρασίας κάτω από το οποίο όλη η υετόπτωση είναι χιόνι και κάποιο άλλο, πάνω από το οποίο είναι βροχή. Έτσι, για μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 12.22°C θεωρήθηκε ότι όλο το ποσοστό της υετόπτωσης είναι βροχή, ενώ για μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες μικρότερες από -10°C, όλο το ποσοστό της συνολικής υετόπτωσης είναι χιόνι. Για θερμοκρασίες μεταξύ των δύο αυτών τιμών το χιόνι υπολογίζεται ως ποσοστό της υετόπτωσης που παρατηρήθηκε. Αρχικά χρησιμοποιήθηκε γραμμική σχέση ως προς τη θερμοκρασία (Semadeni – Davies, A., 1997):

$$\%S = -4.5 \cdot T + 55 \quad \text{για } -10^{\circ}\text{C} \leq T \leq 12.22^{\circ}\text{C} \quad \text{εξ. 3.1}$$

Δοκιμάζοντας τη σχέση αυτή διαπιστώθηκε ότι για τιμές θερμοκρασίας κοντά στο μηδέν, η συνολική απορροή είχε αποκλίσεις από τις παρατηρούμενες τιμές κάτι που πιθανόν οφείλονταν στη γραμμική σχέση μεταξύ θερμοκρασίας-ποσοστού χιονιού. Δοκιμάστηκε και διαπιστώθηκε ότι βελτιώνονται τα αποτελέσματα όταν χρησιμοποιηθεί αντί για γραμμική, λογιστική (logistic) σχέση. Λογιστική σχέση έχει χρησιμοποιηθεί σε αντίστοιχο μοντέλο σε μελέτη για τη βόρεια λεκάνη απορροής του Στρυμόνα με σχετικά παρόμοια κλιματολογικά χαρακτηριστικά και έδωσε επίσης καλύτερα αποτελέσματα (Knight et al, 2001). Σύμφωνα λοιπόν με τη λογιστική σχέση, το ποσοστό της υετόπτωσης που είναι χιόνι δίνεται από τη παρακάτω έκφραση:

$$\%S = 0 \quad \text{για } T \geq 12.22^{\circ}\text{C}$$

$$\%S = \frac{100}{1.35^T \cdot 1.61 + 1} \quad \text{για } -10^{\circ}\text{C} \leq T \leq 12.22^{\circ}\text{C} \quad \text{εξ. 3.2}$$

$$\%S = 100 \quad \text{για } T \leq -10^{\circ}\text{C}$$

όπου:

T η μέση μηνιαία θερμοκρασία.

Έχοντας, λοιπόν, ως δεδομένα, από μετεωρολογικούς σταθμούς, τις μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες και τη μηνιαία υετόπτωση, υπολογίστηκε η μηνιαία χιονόπτωση.

Ο επόμενος υπολογισμός αφορά τη δυνητική μηνιαία τήξη χιονιού εκφρασμένη σε mm/μήνα. Η τήξη χιονιού επηρεάζεται από μια σειρά παραμέτρων, όπως, η θερμοκρασία περιβάλλοντος, η ηλιακή ακτινοβολία, η ατμοσφαιρική πίεση, η ταχύτητα του ανέμου και κυρίως η φυτοκάλυψη. Οι παραπάνω παράμετροι είναι δύσκολο να υπολογιστούν καθώς δεν υπάρχουν ανάλογα δεδομένα. Γνωρίζοντας την ημερήσια θερμοκρασία περιβάλλοντος, μπορεί να υπολογιστεί η τήξη χιονιού από τη σχέση (degree-day method) (Semadeni – Davies, A., 1997):

$$SM = C_m \cdot T \cdot N \quad \text{εξ. 3.3}$$

όπου C_m είναι παράμετρος με μονάδες mm/°C/ημέρα, T ημερήσια θερμοκρασία, N ο αριθμός των ημερών σε κάθε μήνα. Στη συγκεκριμένη μελέτη όπου τα θερμοκρασιακά δεδομένα ήταν μηνιαία, η παραπάνω σχέση μετατράπηκε ως εξής:

$$SM = C_m \cdot T_{\text{μηνιαία}} (J) \quad \text{εξ. 3.4}$$

όπου πλέον η παράμετρος C_m έχει μονάδες mm/°C/μήνα και σύμφωνα με αυτήν δίνεται η δυνητική μηνιαία τήξη χιονιού.

Η παράμετρος C_m αλλάζει ανάλογα με την εξεταζόμενη κάθε φορά λεκάνη αφού εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τη φυτοκάλυψη, τη μορφολογία και κλιματολογία της περιοχής (πεδινή, ορεινή). Έτσι, για κάθε λεκάνη η τιμή της παραμέτρου πρέπει να ρυθμιστεί κατά τη διαδικασία ρύθμισης των παραμέτρων (calibration) και αποτελεί μια επιπλέον παράμετρο των υδρολογικών μοντέλων. Διαπιστώθηκε ότι υπάρχει σχέση μεταξύ της παραμέτρου C_m και του μέσου υψομέτρου της λεκάνης καθώς και ότι οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 5 – 10 mm/°C/μήνα.

Το ισοδύναμο ύψος χιονιού του συσσωρευμένου χιονιού, SWE_{sp} , εκτιμάται από:

$$SWE_{sp}(J) = SWE_{sp}(J-1) + S(J) - SM(J) \quad \text{εξ. 3.5}$$

όπου:

$S(J)$ το χιόνι που κατακρημνίστηκε κατά τη διάρκεια του μήνα J και ισούται

με:

$$S(J) = \%S \cdot P(J) \quad \text{εξ. 3.6}$$

όπου:

$P(J)$ η συνολική υετόπτωση του μήνα J .

Το προτεινόμενο μοντέλο διακρίνει την συνολική απορροή σε τρεις συνιστώσες απορροής, δηλαδή, την επιφανειακή απορροή, την ενδιάμεση ή επιδερμική απορροή, και την βασική απορροή ή απορροή που προέρχεται από την εκροή του υδροφορέα. Σύμφωνα με το μοντέλο πρώτη προτεραιότητα στο υδατικό ισοζύγιο πριν τη δημιουργία απορροής αποτελεί η ικανοποίηση της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής. Η μηνιαία πραγματική εξατμισοδιαπνοή E_a του μήνα J εξαρτάται από τη διαθέσιμη εδαφική υγρασία του μήνα J , και την μέση επιφανειακή δυνητική εξατμισοδιαπνοή E_p του μήνα J . Η μηνιαία πραγματική εξατμισοδιαπνοή υπολογίζεται από τη σχέση που πρότειναν οι Vandewiele και Win (Vandewiele and Win, 1998):

$$E_a(J) = \min\{E_p(J) * (1 - \alpha^{S_{moist}(J)/E_p(J)}), S_{moist}(J)\} \quad \text{εξ. 3.7}$$

όπου:

$S_{moist}(J)$: η διαθέσιμη εδαφική εργασία του μήνα J για πλήρωση της πραγματικής Εξατμισοδιαπνοής

α :ένας συντελεστής πραγματικής εξατμισοδιαπνοής ($0 \leq \alpha \leq 1$)

$E_p(J)$: η δυνητική εξατμισοδιαπνοή του μήνα J

Η επιφανειακή απορροή, SR , του μήνα J υπολογίζεται ως:

$$SR(J) = (1 - K) * (AS_{moist}(J) - S_{max}) \quad \text{εάν } AS_{moist}(J) > S_{max} \quad \text{εξ. 3.8}$$

ή

$$SR(J) = 0 \quad \text{εάν } AS_{moist}(J) \leq S_{max} \quad \text{εξ. 3.9}$$

όπου:

$AS_{moist}(J) = S_{moist}(J) - E_a(J)$ η υπολειπόμενη εδαφική υγρασία του μήνα J μετά την ικανοποίηση της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής

$S_{max} = \frac{25400}{CN} - 254$ η μέγιστη εδαφική υγρασία

CN το Curve Number της Soil Conservation Method (SCS,1972) ($0 \leq CN \leq 100$)

K ο συντελεστής κατείσδυσης ($0 \leq K \leq 1$)

Η διήθηση προς τον υπόγειο υδροφόρα, D, του μήνα J υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$D(J) = K * (AS_{moist}(J) - S_{max}) \text{ εάν } AS_{moist}(J) > S_{max} \quad \text{εξ. 3.10}$$

ή

$$D(J) = 0 \text{ εάν } AS_{moist}(J) \leq S_{max} \quad \text{εξ. 3.11}$$

Η διαθέσιμη εδαφική εργασία του μήνα J, N_{moist} , υπολογίζεται από τη σχέση:

$$N_{moist}(J) = AS_{moist}(J) - SR(J) - D(J) \quad \text{εξ. 3.12}$$

Η ενδιάμεση απορροή από την εδαφική υγρασία, MR, του μήνα J υπολογίζεται ως:

$$MR(J) = \beta * [N_{moist}(J-1) + N_{moist}(J)] \quad \text{εξ. 3.13}$$

όπου, β ο συντελεστής ενδιάμεσης απορροής ($0 \leq \beta \leq 1$)

Η υπολειπόμενη υγρασία στο τέλος του μήνα J, NS_{moist} , υπολογίζεται από τη σχέση:

$$NS_{moist}(J) = N_{moist}(J) - MR(J) \quad \text{εξ. 3.14}$$

Η διαθέσιμη εδαφική εργασία για πλήρωση της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής του επόμενου μήνα J+1 είναι:

$$S_{moist}(J+1) = P(J+1) + NS_{moist}(J) \quad \text{εξ. 3.15}$$

Η βασική απορροή ή απορροή από την εκροή του υδροφορέα, Q_g , του μήνα J υπολογίζεται από τη διήθηση, D , του προηγούμενου μήνα $J-1$, από τη σχέση:

$$Q_g(J) = \gamma * D(J-1) \quad \text{εξ. 3.16}$$

όπου, γ ο συντελεστής βασικής απορροής ή συντελεστής εκροής του υδροφορέα ($0 \leq \gamma \leq 1$).

Η επαναφόρτιση του υδροφορέα, R_g , είναι ίση με:

$$R_g = (1 - \gamma) * D(J-1) \quad \text{εξ. 3.17}$$

Τέλος, η συνολική απορροή, Q_c , υπολογίζεται ως άθροισμα των επιμέρους συνιστωσών της απορροής, δηλαδή της επιφανειακής απορροής, ενδιάμεσης απορροής και βασικής απορροής:

$$Q_c(J) = SR(J) + MR(J) + Q_g(J) \quad \text{εξ. 3.18}$$

Το προτεινόμενο μοντέλο υδρολογικού ισοζυγίου είναι ένα μοντέλο έξι παραμέτρων. Είναι όμως δυνατόν δύο από τους παραμέτρους του μοντέλου, το CN και ο συντελεστής κατείσδυσης, K , να εκτιμηθούν άμεσα από εδαφολογικούς και γεωλογικούς αναλογικούς ή ψηφιακούς χάρτες, και χάρτες χρήσεων γης, περιορίζοντας έτσι σημαντικά τον αριθμό των παραμέτρων που πρέπει να προσδιορισθούν με τη βοήθεια μεθόδων βελτιστοποίησης.

3.3 Σύστημα Μοντέλων Προσομοίωσης Υπόγειων Ροών (Groundwater Modeling System – GMS 6.0)

3.3.1 Γενικά

Το Groundwater Modeling System είναι ένα περιεκτικότατο γραφικό περιβάλλον στο οποίο πραγματοποιούνται προσομοιώσεις υπόγειων ροών. Πρόκειται για ένα πλήρες σύστημα διαφορετικών τύπων μαθηματικών μοντέλων (δισδιάστατων ή

τρισεδιάστατων μοντέλων πεπερασμένων διαφορών). Αναφέρονται τα MODFLOW 2000, MODPATH, MT3DMS/RT3D, SEAM3D, ART3D, UTCHEM, FEMWATER, PEST, UCODE, MODAEM and SEEP2D.

Σε ένα γραφικό περιβάλλον όπως αυτό του GMS 6.0, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα, μέσω της απλής επιλογής ενός σημείου (κελίου) ή συνόλου σημείων, να εισάγει ή / και να τροποποιεί υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά και οριακές συνθήκες στα κατάλληλα πεδία των παραθύρων διαλόγου. Τα εκάστοτε δεδομένα είτε εισάγονται ως εγγραφές, είτε εισάγονται ως σειρές δεδομένων τυχαίων σημείων που «διαβάζονται» από το χρησιμοποιούμενο πρόγραμμα. Τα εξαγόμενα, τέλος, αποτελέσματα είναι γενικευμένα με τέτοιο τρόπο από το GMS, ώστε ο χρήστης να έχει στη διάθεσή του πλήθος επιλογών (μορφών αποτελεσμάτων) προκειμένου να συνδέει το προς επίλυση κάθε φορά πρόβλημα με την αντίστοιχη γραφική απεικόνιση της λύσης.

3.3.2 Ο Κώδικας Modflow

Για την προσομοίωση της υδροδυναμικής κατάστασης των υδροφορέων χρησιμοποιείται από πολλούς ερευνητές ο κώδικας Modflow (Modular three dimensional finite difference ground water flow model) της Αμερικανικής Υπηρεσίας Γεωλογικών Ερευνών (U.S.G.S.). Το πρόγραμμα στηρίζεται στην αριθμητική επίλυση μιας κύριας διαφορικής εξίσωσης, η οποία προκύπτει από την εφαρμογή της εξίσωσης διατήρησης της μάζας και του νόμου του Darcy. Πρόκειται για ένα μοντέλο πεπερασμένων διαφορών με επίλυση των εξισώσεων στο κέντρο των κυψελίδων του καννάβου. Εφαρμόζεται τόσο σε μόνιμα, όσο και σε μη μόνιμα προβλήματα ροής και υπολογίζει τις μεταβολές του φορτίου στα σημεία πεδίου σε όλη τη διάρκεια του χρόνου για ομογενή – ετερογενή, ισότροπο ή ανισότροπο υδροφορέα. Επίσης έχει τη δυνατότητα προσομοίωσης μεγάλου αριθμού πηγαδιών, της κατείσδυσης, της επίδρασης στραγγιστηριών και ποταμών και λιμνών κ.α όπως θα παρουσιαστούν παρακάτω.

Μαθηματικό Υπόβαθρο του Modflow

Έστω ένας στοιχειώδης όγκος δV με περιεχόμενη μάζα δM . Η μεταβολή της μάζας αυτής ανά μονάδα όγκου και χρόνου είναι :

$$\frac{\partial(\delta M)}{\partial t} / \delta V \quad \text{Εξ. 3.19}$$

Έστω $\bar{q}$ η ταχύτητα Darcy και ρ η πυκνότητα του ρευστού, τότε η ροή της μάζας ανά μονάδα χρόνου θα είναι $\rho \cdot \bar{q}$.

Αν το ρευστό εισέρχεται ή εξέρχεται από το χώρο κατά $W(x,y,z,t)$ ανά μονάδα χρόνου και μονάδα όγκου, η προστιθέμενη μάζα ανά μονάδα χρόνου και όγκου είναι $\rho \cdot W$.

Επειδή η μάζα διατηρείται, θα ισχύει :

$$\oint_{\partial V} \rho \cdot \bar{q} \cdot d\vec{S} + \iiint_V \rho \cdot W \cdot dV + \iiint_V \left(\frac{\partial(\delta M)}{\partial t} / \delta V \right) \cdot dV = 0 \quad \text{Εξ. 3.20}$$

Όπου ο πρώτος όρος είναι το επιφανειακό ολοκλήρωμα, που λαμβάνεται σε όλη την κλειστή επιφάνεια του δV και οι άλλοι δύο όροι ολοκληρώματα όγκου που εκτείνονται στον όγκο του στοιχείου. Σύμφωνα με το θεώρημα της απόκλισης, το επιφανειακό ολοκλήρωμα μπορεί να γραφεί σαν ολοκλήρωμα όγκου :

$$-\oint \rho \cdot \bar{q} \cdot d\vec{S} = -\iiint \nabla(\rho \cdot \bar{q}) \cdot dV \quad \text{Εξ. 3.21}$$

Κατά τον Hantush (1964) :

$$\frac{d(\delta M)}{\rho \cdot \delta V} = \frac{d(\delta V_w)}{\delta V} = S_s \cdot d\phi \quad \text{Εξ. 3.22}$$

όπου S_s είναι η ειδική αποθηκευτικότητα με διαστάσεις L^{-1} . Έτσι η Εξ. 3.23 γράφεται :

$$-\iiint \left\{ \nabla(\rho \cdot \bar{q}) - \rho \cdot W + \rho \cdot S_s \cdot \frac{\partial \phi}{\partial t} \right\} \cdot dV = 0 \quad \text{Εξ. 3.24}$$

ή

$$-\left[\frac{\partial(\rho \cdot q_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot q_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \cdot q_z)}{\partial z} \right] + \rho \cdot W = \rho \cdot S_s \cdot \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad \text{Εξ. 3.25}$$

Σύμφωνα με το Hantush (1964), η μεταβολή της πυκνότητας του νερού είναι πολύ μικρή και θεωρείται σταθερή στα περισσότερα προβλήματα υπόγειας

υδραυλικής, οπότε μπορεί να παραληφθεί από την Εξ. 3.25. Οι συνιστώσες της ταχύτητας Darcy στις τρεις διαστάσεις, δίνονται από τη σχέση :

$$\left. \begin{aligned} q_x &= -K_{xx} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x} = -K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \\ q_y &= -K_{yy} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial y} = -K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \\ q_z &= -K_{zz} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial z} = -K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad \text{Εξ. 3.26}$$

Η Εξ. 3.25, λόγω της Εξ.3.26 γίνεται :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \cdot \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \cdot \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \quad \text{Εξ. 3.27}$$

όπου :

K_{xx}, K_{yy}, K_{zz} οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας κατά τις διευθύνσεις X, Y, Z αντίστοιχα σε μονάδες [LT⁻¹].
 h το πιεζομετρικό φορτίο σε [L].
 W οι εξωτερικές εισροές ή εκροές νερού ανά μονάδα όγκου σε [T⁻¹]
 S_s η ειδική αποθηκευτικότητα του πορώδους υλικού σε [L⁻¹], ή το αποτελεσματικό πορώδες ανά μέτρο βάθους το υδροφορέα
 t ο χρόνος [T].

Η Εξ.3.27 είναι η τρισδιάστατη διαφορική εξίσωση με μερικές παραγώγους, που περιγράφει την κίνηση του υπόγειου νερού σε υπό πίεση υδροφορείς και χρησιμοποιείται από μοντέλο MODFLOW. Η εξίσωση αυτή περιγράφει την κίνηση του υπόγειου νερού κάτω από συνθήκες μη μόνιμης ροής, σε ετερογενές και ανισότροπο μέσο, με την προϋπόθεση ότι οι κύριοι άξονες της υδραυλικής αγωγιμότητας, ταυτίζονται με τους άξονες του καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων. Τα $S_s, K_{xx}, K_{yy}, K_{zz}$ στην Εξ. 8 μπορούν να είναι συναρτήσεις του χώρου ($S_s = S_s(x,y,z), K_{xx} = K_{xx}(x,y,z), K_{yy} = K_{yy}(x,y,z), K_{zz} = K_{zz}(x,y,z)$) και το W συναρτήση του χώρου όσο και του χρόνου ($W = W(x,y,z,t)$).

Η Εξ.3.27 σε συνδυασμό με τις οριακές συνθήκες στα όρια του υδροφορέα και με καθορισμό αρχικής συνθήκης πιεζομετρίας, αποτελεί ένα μαθηματικό μοντέλο ενός υπόγειου υδροφορέα. Εκτός από περιπτώσεις πολύ απλών συστημάτων υδροφορέων, αναλυτικές λύσεις της Εξ.3.27 είναι πολύ δύσκολο και τις περισσότερες φορές αδύνατο να επιτευχθούν. Γι' αυτό το λόγο έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια μαθηματικά μοντέλα, που στηρίζονται σε αριθμητικές

μεθόδους επίλυσης των διαφορικών εξισώσεων και δίνουν προσεγγιστικές λύσεις. Τέτοιες αριθμητικές μέθοδοι είναι οι πεπερασμένες διαφορές, τα πεπερασμένα στοιχεία, τα πολλαπλά κελιά, τα οριακά στοιχεία κ.α.

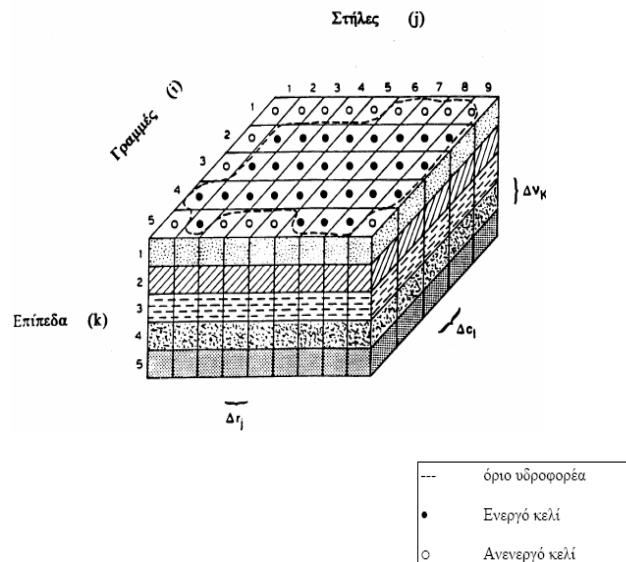
Το μοντέλο MODFLOW με τη βοήθεια του οποίου γίνεται η επίλυση της Εξ.3.27, χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών στις τρεις διαστάσεις όπου το συνεχές σύστημα που περιγράφεται από την Εξ.3.27, αντικαθίσταται από ένα πεπερασμένο αριθμό διακριτών σημείων τόσο ως προς το χρόνο όσο και ως προς το χώρο. Οι μερικές παράγωγοι αντικαθίστανται από όρους που υπολογίζονται ως διαφορές στην πιεζομετρία για τα συγκεκριμένα αυτά σημεία και η διαδικασία αυτή τελικά οδηγεί σε συστήματα γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων με πεπερασμένες διαφορές και συγκεκριμένα πίσω διαφορές.

Η αριθμητική λύση των συστημάτων αυτών δίνει τιμές για το φορτίο σε συγκεκριμένα σημεία και για συγκεκριμένα χρονικά βήματα. Οι τιμές αυτές αποτελούν μία προσέγγιση της αναλυτικής λύσης της εξίσωσης η οποία, σε αντίθεση με την αριθμητική λύση, δίνει συνεχείς τιμές της κατανομής φορτίου, για οποιοδήποτε σημείο και για οποιοδήποτε χρόνο.

Διακριτοποίηση

Στο Σχήμα 3.2 φαίνεται η χωρική διακριτοποίηση ενός υδροφορέα, με ένα πλέγμα ορθογώνιων υποπεριοχών, προσανατολισμένων προς το καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων, που λέγονται κελιά (cells). Κάθε υποπεριοχή αποτελείται από ένα χαρακτηριστικό σημείο, το οποίο είναι το κέντρο βάρους του κελιού και στο οποίο ζητείται να υπολογιστεί η τιμή του h . Χρησιμοποιούνται δείκτες (i,j,k) όπου :

$i = 1, 2, \dots, nrow$, αντιπροσωπεύει τον αριθμό των γραμμών,
 $j = 1, 2, \dots, ncol$, αντιπροσωπεύει τον αριθμό των στηλών,
 $k = 1, 2, \dots, nlay$, αντιπροσωπεύει τον αριθμό των επιπέδων στην κατακόρυφη διεύθυνση,



Σχήμα 3.2 Χωρική διακριτοποίηση ενός τρισδιάστατου υδροφορέα.

Κατά τον σχηματισμό των εξισώσεων του μοντέλου, έγινε η σύμβαση ότι τα επίπεδα αντιπροσωπεύουν οριζόντιες υδρογεωλογικές μονάδες. Έτσι ο δείκτης k σημαίνει αλλαγές πάνω στον κατακόρυφο άξονα z με φορά από πάνω προς τα κάτω. Το ίδιο ισχύει και για τους άλλους δύο άξονες. Τόσο οι γραμμές, που είναι παράλληλες στον άξονα x όσο και οι στήλες που είναι παράλληλες στον y , δίνουν μεταβολές κατά τη διεύθυνση y και x αντίστοιχα. Έτσι το μήκος ενός κελιού κατά τη διεύθυνση των γραμμών σε μια δεδομένη στήλη j , γράφεται Δr_j , ενώ κατά τη διεύθυνση των στηλών σε μια δεδομένη γραμμή i , γράφεται Δc_i και το πάχος του κελιού για ένα δεδομένο επίπεδο Δn_k . Δηλαδή ένα κελί με συντεταγμένες $(i,j,k) = (4,8,3)$ έχει όγκο $\Delta V = \Delta r_8 \Delta c_4 \Delta n_3$.

Εξίσωση Πεπερασμένων Διαφορών

Η ανάπτυξη της Εξ. 3.8 υπό μορφή πεπερασμένων διαφορών, απαιτεί την εφαρμογή της εξίσωσης συνέχειας. Με την προϋπόθεση ότι η πυκνότητα ρ του υπόγειου νερού είναι σταθερή, η εξίσωση συνέχειας που εκφράζει το ισοζύγιο της ροής για ένα κελί, δίνεται από την έκφραση :

$$\sum Q_i = S_s \cdot \frac{\Delta h}{\Delta t} \cdot \Delta V \quad \text{Εξ. 3.28}$$

όπου

$\sum Q_i$ το σύνολο των πραγματοποιούμενων εισροών ή εκροών στα όρια του κελιού που προέρχονται από γειτονικά κελιά [L^3T^{-1}]

S_s η ειδική αποθηκευτικότητα ή το αποτελεσματικό πορώδες ανά μέτρο

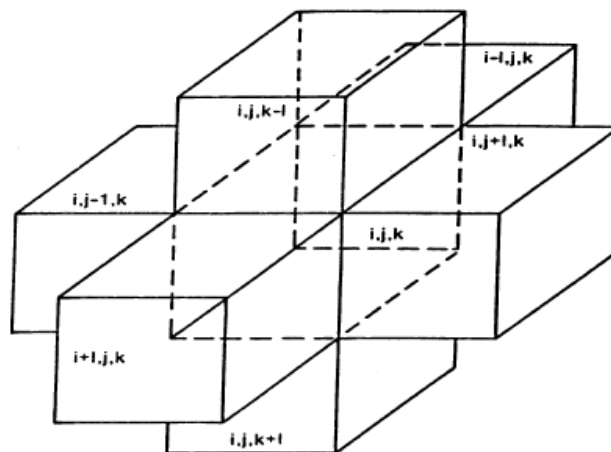
βάθους του υδροφορέα. Αυτή μπορεί να οριστεί και σαν ο όγκος του νερού, που αντλείται ανά μονάδα όγκου του υδροφορέα και ανά μονάδα μεταβολής της πιεζομετρίας [L^{-1}]

ΔV ο όγκος του κελιού [L^3]

Δh η μεταβολή της πιεζομετρίας [L]

Δt το χρονικό βήμα [T]

Οι όροι στο δεξί μέλος της Εξ.3.28, είναι ισοδύναμοι με τον όγκο του νερού που αποθηκεύεται σ' ένα χρονικό διάστημα Δt , κατά το οποίο παρατηρείται αλλαγή της στάθμης κατά Δh . Σύμφωνα με το Σχήμα 3.2 από την διακριτοποίηση της Εξ.3.9 προκύπτει ένα κεντρικό κελί (i,j,k) , και έξι γειτονικά του τα $(i-1,j,k)$, $(i+1,j,k)$, $(i,j-1,k)$, $(i,j+1,k)$, $(i,j,k-1)$, $(i,j,k+1)$.



Σχήμα 3.3: Το κελί (i,j,k) και τα γειτονικά του.

Η εισροή στο (i,j,k) λαμβάνεται με θετικό πρόσημο, ενώ η εκροή με αρνητικό. Σύμφωνα με το νόμο του Darcy, για τις ροές των 6 γειτονικών κελιών προς το κεντρικό (i,j,k) , θα ισχύει :

1) Ροή από το κελί $(i,j-1,k)$, στο (i,j,k) κατά τη διεύθυνση γραμμών (Σχ.3.3) :

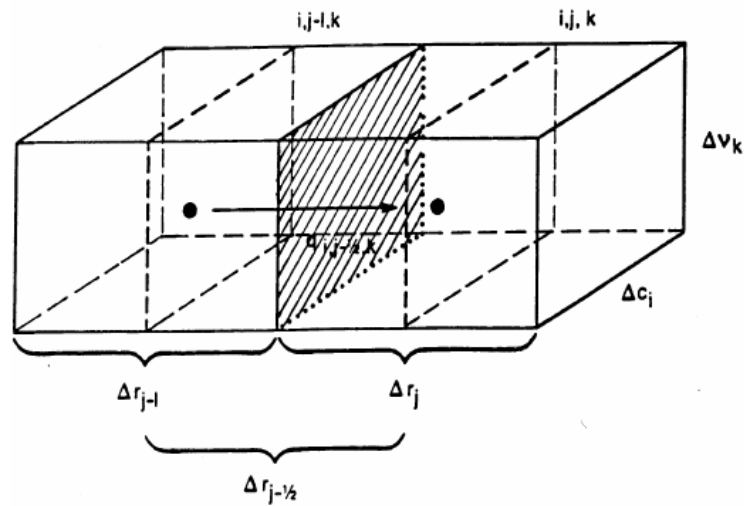
$$q_{i,j-1/2,k} = KR_{i,j-1/2,k} \cdot \Delta c_i \cdot \Delta v_k \cdot \frac{(h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k})}{\Delta r_{j-1/2}} \quad \text{Εξ. 3.28}$$

όπου

$h_{i,j,k}$ το φορτίο στον κόμβο (i,j,k) [L]

$h_{i,j-1,k}$ το φορτίο στον κόμβο $(i,j-1,k)$ [L]

$q_{i,j-1/2,k}$	η παροχή στην κοινή πλευρά των ορθογώνιων στοιχείων (i,j,k) και $(i,j-1,k)$ [L^3T^{-1}]
$KR_{i,j-1/2,k}$	η υδραυλική αγωγιμότητα κατά τη διεύθυνση των γραμμών, στην κοινή πλευρά των στοιχείων (i,j,k) και $(i,j-1,k)$ [LT^{-1}]
$\Delta c_i \Delta v_k$	το εμβαδό της πλευράς του στοιχείου που είναι κάθετη στη διεύθυνση των γραμμών [L^2]
$\Delta r_{j-1/2}$	η οριζόντια απόσταση ανάμεσα στα κέντρα των στοιχείων (i,j,k) και $(i,j-1,k)$ [L]



Σχήμα: 3.4 Ροή από το κελί (i,j,k) στο $(i,j-1,k)$ κατά τη διεύθυνση των γραμμών

Παρόμοιες εκφράσεις μπορούν να γραφούν προσομοιώνοντας τις ροές προς το κελί (i,j,k) για τις υπόλοιπες 5 επιφάνειες, ως εξής :

2) Ροή από το κελί $(i,j+1,k)$, στο (i,j,k) κατά τη διεύθυνση γραμμών :

$$q_{i,j+1/2,k} = KR_{i,j+1/2,k} \cdot \Delta c_i \cdot \Delta v_k \cdot \frac{(h_{i,j+1,k} - h_{i,j,k})}{\Delta r_{j+1/2}} \quad \text{Εξ. 3.30}$$

3) Ροή από το κελί $(i-1,j,k)$, στο (i,j,k) κατά τη διεύθυνση στηλών :

$$q_{i-1/2,j,k} = KC_{i-1/2,j,k} \cdot \Delta r_j \cdot \Delta v_k \cdot \frac{(h_{i-1,j,k} - h_{i,j,k})}{\Delta c_{j-1/2}} \quad \text{Εξ. 3.31}$$

4) Ροή από το κελί $(i+1,j,k)$, στο (i,j,k) κατά τη διεύθυνση στηλών :

$$q_{i+1/2,j,k} = KC_{i+1/2,j,k} \cdot \Delta r_j \cdot \Delta v_k \cdot \frac{(h_{i+1,j,k} - h_{i,j,k})}{\Delta c_{j+1/2}} \quad \text{Εξ. 3.32}$$

5) Ροή από το κελί (i,j,k-1), στο (i,j,k) κατά τη κατακόρυφη διεύθυνση :

$$q_{i,j,k-1/2} = KV_{i,j,k-1/2} \cdot \Delta r_j \cdot \Delta c_i \cdot \frac{(h_{i,j,k-1} - h_{i,j,k})}{\Delta v_{k-1/2}} \quad \text{Εξ. 3.33}$$

6) Ροή από το κελί (i,j,k+1), στο (i,j,k) κατά τη κατακόρυφη διεύθυνση :

$$q_{i,j,k+1/2} = KV_{i,j,k+1/2} \cdot \Delta r_j \cdot \Delta c_i \cdot \frac{(h_{i,j,k+1} - h_{i,j,k})}{\Delta v_{k+1/2}} \quad \text{Εξ. 3.34}$$

όπου οι παράγοντες των παραπάνω γινομένων δικαιολογούνται ανάλογα με την Εξ.3.28. Οι διαστάσεις των στοιχείων (Δr , Δc και Δv) και η υδραυλική αγωγιμότητα K , μπορούν να εκφραστούν με μία σταθερή ποσότητα αγωγιμότητας, με διαστάσεις μεταφορικότητας (transmissivity) [L^2T^{-1}], ως εξής :

$$\left. \begin{aligned} CR_{i,j-1/2,k} &= KR_{i,j-1/2,k} \cdot \frac{\Delta c_i \cdot \Delta v_k}{\Delta r_{j-1/2}} \\ CR_{i,j+1/2,k} &= KR_{i,j+1/2,k} \cdot \frac{\Delta c_i \cdot \Delta v_k}{\Delta r_{j+1/2}} \\ CC_{i-1/2,j,k} &= KC_{i-1/2,j,k} \cdot \frac{\Delta r_j \cdot \Delta v_k}{\Delta c_{i-1/2}} \\ CC_{i+1/2,j,k} &= KC_{i+1/2,j,k} \cdot \frac{\Delta r_j \cdot \Delta v_k}{\Delta c_{i+1/2}} \\ CV_{i,j,k-1/2} &= KV_{i,j,k-1/2} \cdot \frac{\Delta r_j \cdot \Delta c_i}{\Delta v_{k-1/2}} \\ CV_{i,j,k+1/2} &= KV_{i,j,k+1/2} \cdot \frac{\Delta r_j \cdot \Delta c_i}{\Delta v_{k+1/2}} \end{aligned} \right\} \quad \text{Εξ. 3.35}$$

Οι Εξ.3.28-3.34 με τη βοήθεια της Εξ. 3.35 μετατρέπονται σε μια λιγότερο πολύπλοκη μορφή :

$$\left. \begin{aligned} q_{i,j-1/2,k} &= CR_{i,j-1/2,k} \cdot (h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k}) \\ q_{i,j+1/2,k} &= CR_{i,j+1/2,k} \cdot (h_{i,j+1,k} - h_{i,j,k}) \\ q_{i-1/2,j,k} &= CC_{i-1/2,j,k} \cdot (h_{i-1,j,k} - h_{i,j,k}) \\ q_{i+1/2,j,k} &= CC_{i+1/2,j,k} \cdot (h_{i+1,j,k} - h_{i,j,k}) \\ q_{i,j,k-1/2} &= CV_{i,j,k-1/2} \cdot (h_{i,j,k-1} - h_{i,j,k}) \\ q_{i,j,k+1/2} &= CV_{i,j,k+1/2} \cdot (h_{i,j,k+1} - h_{i,j,k}) \end{aligned} \right\} \text{Εξ. 3.36}$$

Οι Εξ.3.36 ισχύουν μόνο για εσωτερικές ροές από τα έξι στοιχεία προς το στοιχείο (i,j,k). Για την περίπτωση κατά την οποία συμβαίνουν εισροές ή εκροές από εξωτερικές πηγές όπως ποτάμια, λίμνες, πηγάδια, εξατμισοδιαπνοή και άλλα, οι ροές αυτές αντιπροσωπεύονται από την έκφραση :

$$a_{i,j,k,n} = p_{i,j,k,n} h_{i,j,k} + q_{i,j,k,n} \quad \text{Εξ. 3.37}$$

όπου :

$a_{i,j,k,n}$ αντιπροσωπεύει τη ροή από τη n-οστή εξωτερική πηγή στο κελί (i,j,k) σε $[L^3T^{-1}]$
 $p_{i,j,k,n}$ σταθερή ποσότητα σε μονάδες $[L^2T^{-1}]$
 $q_{i,j,k,n}$ σταθερή ποσότητα σε μονάδες $[L^3T^{-1}]$

Για το σύνολο των πραγματοποιούμενων εξωτερικών εισροών ή εκροών από N εξωτερικές πηγές προς το κελί (i,j,k), μπορεί να γραφτεί :

$$\sum_{n=1}^N a_{i,j,k,n} = \sum_{n=1}^N p_{i,j,k,n} \cdot h_{i,j,k} + \sum_{n=1}^N q_{i,j,k,n} \quad \text{Εξ. 3.38}$$

όπου καθένας από τους όρους της Εξ.3.38, είναι ίσος με :

$$\left. \begin{aligned} \sum_{n=1}^N a_{i,j,k,n} &= QS_{i,j,k} \\ \sum_{n=1}^N p_{i,j,k,n} &= P_{i,j,k} \\ \sum_{n=1}^N q_{i,j,k,n} &= Q_{i,j,k} \end{aligned} \right\} \quad \text{Εξ. 3.39}$$

άρα για το σύνολο των εξωτερικών ροών θα ισχύει :

$$QS_{i,j,k} = P_{i,j,k} h_{i,j,k} + Q_{i,j,k} \quad \text{Εξ. 3.40}$$

Εφαρμόζοντας την εξίσωση συνέχειας Εξ.3.28 για το στοιχείο (i,j,k) και λαμβάνοντας υπ' όψη τις ροές από τα έξι γειτονικά του στοιχεία Εξ.3.36 καθώς και το σύνολο των εξωτερικών ροών Εξ.3.40 προκύπτει :

$$q_{i,j-1/2,k} + q_{i,j+1/2,k} + q_{i-1/2,j,k} + q_{i+1/2,j,k} + q_{i,j,k-1/2} + q_{i,j,k+1/2} + QS_{i,j,k} = Ss_{i,j,k} \cdot \frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t} \cdot \Delta r_j \cdot \Delta c_i \cdot \Delta v_k$$

Εξ. 3.41

όπου :

$\frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t}$	είναι η προσέγγιση της παραγώγου του φορτίου ως προς το χρόνο [LT ⁻¹]
$Ss_{i,j,k}$	η ειδική αποθηκευτικότητα του στοιχείου (i,j,k) [L ⁻¹]
$\Delta r_j \cdot \Delta c_i \cdot \Delta v_k$	ο όγκος του στοιχείου (i,j,k) [L ³]

Αν αντικατασταθούν οι Εξ.28 και Εξ.3.40 στην Εξ. 3.41 τότε η εξίσωση πεπερασμένων διαφορών γράφεται :

$$\begin{aligned} & CR_{i,j-1/2,k} \cdot (h_{i,j-1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CR_{i,j+1/2,k} \cdot (h_{i,j+1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CC_{i-1/2,j,k} \cdot (h_{i-1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) \\ & + CC_{i+1/2,j,k} \cdot (h_{i+1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CV_{i,j,k-1/2} \cdot (h_{i,j,k-1}^m - h_{i,j,k}^m) + CV_{i,j,k+1/2} \cdot (h_{i,j,k+1}^m - h_{i,j,k}^m) \\ & + P_{i,j,k} \cdot h_{i,j,k}^m + Q_{i,j,k} = Ss_{i,j,k} \cdot \left(\frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t} \right)^m \cdot \Delta r_j \cdot \Delta c_i \cdot \Delta v_k \end{aligned} \quad \text{Εξ. 3.42}$$

όπου m το χρονικό βήμα

Αν αντικατασταθεί η προσέγγιση της παραγώγου του φορτίου με διαφορές ανάμεσα σε μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή t^m όπου το φορτίο είναι άγνωστο και ίσο με $h^m_{i,j,k}$ και σε μία χρονική στιγμή αμέσως προηγούμενη, την t^{m-1} όπου το φορτίο είναι γνωστό και ίσο με $h^{m-1}_{i,j,k}$, θα προκύψει ένα σχήμα πίσω διαφορών ή πεπλεγμένο υπολογιστικό σχήμα :

$$\left(\frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t} \right)^m = \frac{h^m_{i,j,k} - h^{m-1}_{i,j,k}}{t^m - t^{m-1}} \quad \text{Εξ. 3.43}$$

Άλλο σχήμα που μπορεί εναλλακτικά να χρησιμοποιηθεί εναλλακτικά, είναι το σχήμα των εμπρός διαφορών (forward differences) ή ρητό υπολογιστικό σχήμα :

$$\left(\frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t} \right)^m = \frac{h^{m+1}_{i,j,k} - h^m_{i,j,k}}{t^{m+1} - t^m} \quad \text{Εξ. 3.44}$$

Στο σχήμα αυτό το φορτίο σε μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή t^{m+1} είναι άγνωστο και ίσο με $h^{m+1}_{i,j,k}$, ενώ σε μια χρονική στιγμή αμέσως προηγούμενη, την t^m , είναι γνωστό και ίσο με $h^m_{i,j,k}$. Το ρητό υπολογιστικό σχήμα είναι απλούστερο στην επίλυση, γιατί σε κάθε εξίσωση υπάρχει μόνο ένας άγνωστος και μπορεί να λυθεί απευθείας, δίνει όμως αστάθεια στις λύσεις με αποτέλεσμα η αριθμητική λύση να αποκλίνει τελείως από την αναλυτική. Αντίθετα, το πεπλεγμένο υπολογιστικό σχήμα, είναι μεν πιο πολύπλοκο, αφού κάθε εξίσωση έχει 7 αγνώστους και η λύση απαιτεί την ταυτόχρονη επίλυση ενός συστήματος εξισώσεων, αλλά δίνει ευσταθείς αριθμητικές λύσεις, έτσι ώστε τα αποτελέσματα να συγκλίνουν.

Το πεπλεγμένο υπολογιστικό σχήμα ή πίσω διαφορών είναι ευσταθές άνευ όρων, όπως αποδεικνύεται παρακάτω στην ανάλυση ευστάθειας και γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιείται στο μοντέλο MODFLOW.

Λαμβάνοντας υπόψη την Εξ. 3.42, η Εξ. 3.43 γράφεται :

$$\begin{aligned} & CR_{i,j-1/2,k} \cdot (h^m_{i,j-1,k} - h^m_{i,j,k}) + CR_{i,j+1/2,k} \cdot (h^m_{i,j+1,k} - h^m_{i,j,k}) + CC_{i-1/2,j,k} \cdot (h^m_{i-1,j,k} - h^m_{i,j,k}) \\ & + CC_{i+1/2,j,k} \cdot (h^m_{i+1,j,k} - h^m_{i,j,k}) + CV_{i,j,k-1/2} \cdot (h^m_{i,j,k-1} - h^m_{i,j,k}) + CV_{i,j,k+1/2} \cdot (h^m_{i,j,k+1} - h^m_{i,j,k}) \\ & + P_{i,j,k} \cdot h^m_{i,j,k} + Q_{i,j,k} = Ss_{i,j,k} \cdot \frac{h^m_{i,j,k} - h^{m-1}_{i,j,k}}{t^m - t^{m-1}} \cdot \Delta r_j \cdot \Delta c_i \cdot \Delta v_k \end{aligned} \quad \text{Εξ. 3.45}$$

Η εξίσωση των πεπερασμένων διαφορών Εξ 3.26 αποτελεί μία προσομοίωση της διαφορικής εξίσωσης κίνησης του υπόγειου νερού στις τρεις διαστάσεις με μερικές παραγώγους. Όλοι οι συντελεστές είναι γνωστοί, καθώς επίσης και το φορτίο στην χρονική στιγμή $m-1$. Άγνωστοι είναι τα φορτία στο κελί (i,j,k) και στα 6 γειτονικά του τη χρονικής στιγμή m , δηλαδή 7 άγνωστοι που πρέπει να βρεθούν στην χρονική στιγμή m . Αν το i παίρνει τιμές από 1 ως $NROW$, το j από 1 ως $NCOL$ και το k από 1 ως $NLAY$, θα έχουμε ένα σύστημα εξισώσεων $(NROW-2) (NCOL-2) (NLAY-2)$ με αγνώστους $(NROW \cdot NCOL \cdot NLAY)$. Άρα χρειάζονται 6 επιπλέον εξισώσεις οι οποίες προκύπτουν από τις οριακές συνθήκες του προβλήματος. Επίσης χρειάζεται και μία αρχική συνθήκη που θα δίνει τα φορτία h στην χρονική στιγμή $m=1$. Επομένως η Εξ.3.45 γράφεται για κάθε ένα από τα στοιχεία του πλέγματος και σε συνδυασμό με την αρχική συνθήκη πιεζομετρίας και τις 6 οριακές συνθήκες ροής (σταθερό φορτίο, αδιαπέρατο όριο, σταθερή ροή) στα όρια του υδροφορέα, προκύπτει τελικά ένα σύστημα n - αλγεβρικών εξισώσεων με n - αγνώστους. Αν στην παραπάνω σχέση χωρίσουμε γνωστούς από αγνώστους για το συγκεκριμένο στοιχείο (i,j,k) προκύπτει :

$$\begin{aligned} & CR_{i,j-1/2,k} \cdot (h^m_{i,j-1,k}) + CR_{i,j+1/2,k} \cdot (h^m_{i,j+1,k}) + CC_{i-1/2,j,k} \cdot (h^m_{i-1,j,k}) \\ & + CC_{i+1/2,j,k} \cdot (h^m_{i+1,j,k}) + CV_{i,j,k-1/2} \cdot (h^m_{i,j,k-1}) + CV_{i,j,k+1/2} \cdot (h^m_{i,j,k+1}) \\ & - (CR_{i,j-1/2,k} + CR_{i,j+1/2,k} + CC_{i-1/2,j,k} \\ & + CC_{i+1/2,j,k} + CV_{i,j,k-1/2} + CV_{i,j,k+1/2} + HCOF_{i,j,k}) h^m_{i,j,k} = RHS_{i,j,k} \end{aligned} \quad \text{Εξ. 3.46}$$

όπου

$$\begin{aligned} HCOF_{i,j,k} &= P_{i,j,k} - \frac{SCI}{t^m - t^{m-1}} \quad [L^2 T^{-1}] \\ RHS_{i,j,k} &= -Q_{i,j,k} + SCI_{i,j,k} \cdot \frac{h^{m-1}_{i,j,k}}{t^m - t^{m-1}} \quad [L^3 T^{-1}] \\ SCI_{i,j,k} &= S_{i,j,k} \cdot \Delta r_j \cdot \Delta c_i \cdot \Delta v_k \quad [L^2] \end{aligned} \quad \text{Εξ. 3.47}$$

η οποία γράφεται με τη μορφή μητρώων, για n -αριθμό στοιχείων (i,j,k) ως εξής :

$$[A] [h] = [q] \quad \text{Εξ. 3.48}$$

όπου

$[A]$ το μητρώο των σταθερών συντελεστών των φορτίων

- [h] ο πίνακας - διάνυσμα των αγνώστων τιμών των φορτίων στο χρονικό βήμα m
- [q] ο πίνακας - διάνυσμα των σταθερών όρων και φορτίων που αντιστοιχούν στη χρονική στιγμή $m-1$ και περιλαμβάνει όλα τα στοιχεία του πλέγματος.

Ο καθορισμός των οριακών συνθηκών

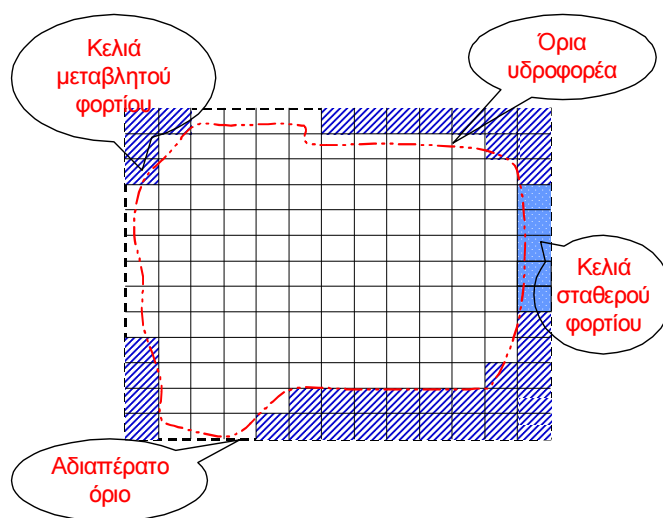
Στο MODFLOW, για τις ανάγκες της εξομοίωσης των οριακών συνθηκών του εκάστοτε προβλήματος, τα κελιά που χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό κατατάσσονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

Κελιά σταθερού φορτίου, όπου το υδραυλικό φορτίο καθορίζεται εκ των προτέρων και παραμένει σταθερό σε όλα τα βήματα της προσομοίωσης.

Ανενεργά ή αδιαπέρατα κελιά, στα οποία η ροή δεν επιτρέπεται από ή προς αυτά καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Κελιά μεταβλητού φορτίου. Είναι όλα τα υπόλοιπα, στα οποία τα φορτία δεν καθορίζονται, αλλά μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Οι οριακές συνθήκες ενός προβλήματος προσεγγίζονται μόνο από κελιά σταθερού φορτίου και ανενεργά ή αδιαπέραστα. Τα πρώτα μπορεί να προσομοιώνουν την επικοινωνία του υδροφορέα με επιφανειακούς πόρους (όπως λίμνες ή ποτάμια), ενώ τα δεύτερα κελιά τα έξω όρια του υδροφορέα ή τα αδιαπέραστα όριά του. Όπου υπάρχουν όρια σταθερής εισροής ή μεταβαλλόμενης με το φορτίο μπορούν να προσομοιωθούν ως εξωτερικές πηγές ή ως συνδυασμός αδιαπέραστων κελιών και εξωτερικής πηγής. Στο αμέσως επόμενο σχήμα παρουσιάζεται η διακριτοποίηση ενός υποθετικού υδροφορέα με τις οριακές του συνθήκες.



Σχήμα:3.5 Τύποι κελιών και προσομοίωση οριακών συνθηκών.

Πακέτα υποστήριξης του MODFLOW

Στο Modflow εκτός από το κεντρικό πρόγραμμα περιλαμβάνεται και μια σειρά από ανεξάρτητα υποπρογράμματα (packages). Τα υποπρογράμματα συνίστανται από υπορουτίνες (modules). Η κάθε υπορουτίνα επιτελεί συγκεκριμένους υπολογισμούς. Με απλά λόγια τα modules έχουν ομαδοποιηθεί με τη μορφή «πακέτων» και κάθε πακέτο είναι μια ομάδα από modules, που σχετίζεται με μια φάση της προσομοίωσης. Κατά το “τρέξιμο” του προγράμματος χρησιμοποιούνται μόνον εκείνα από τα προσφερόμενα πακέτα, τα οποία είναι απαραίτητα για τη συγκεκριμένη περίπτωση προσομοίωσης.

Σχεδιασμός του καννάβου

Χρησιμοποιούνται γραμμές καννάβου για να χωριστεί η περιοχή μελέτης σε κελιά, τα οποία είναι ορθογώνια κατά τις δύο διαστάσεις τους, αλλά η καθ' ύψος διάσταση μπορεί να ακολουθήσει τη γεωλογική δομή. Τα κελιά του καννάβου δεν χρειάζεται να είναι όλα του ίδιου μεγέθους, παρόλα αυτά καμιά σειρά ή στήλη δεν πρέπει να είναι κατά 50% μεγαλύτερη από γειτονική της. Η διαφορά στο μέγεθος επιβαρύνει το σφάλμα του μοντέλου και εάν η διαφορά στα μεγέθη εφαπτόμενων σειρών ή στηλών είναι πολύ μεγάλη, τα προκύπτοντα σφάλματα μπορεί να είναι σημαντικά.

Επειδή η επίλυση της προσομοίωσης του μοντέλου μπορεί να πάρει αρκετό χρόνο, είναι χρήσιμο να χρησιμοποιούνται μικρά κελιά μόνο σε εκείνα τα τμήματα του μοντέλου, στα οποία απαιτούνται λεπτομερή αποτελέσματα ή όπου οι κλίσεις είναι μάλλον απότομες. Πιο απότομες κλίσεις βρίσκονται κοντά στα πηγάδια άντλησης και σε άλλα σημεία απορροής. Αν ο υδροφορέας προς εξομοίωση είναι ανισότροπος, ο κάνναβος πρέπει να ευθυγραμμιστεί με τις διευθύνσεις της μεγαλύτερης και της μικρότερης υδραυλικής αγωγιμότητας. Διαφορετικά, ο κάνναβος θα πρέπει να ευθυγραμμιστεί με όποιον τρόπο είναι πιο βολικός.

Υπάρχει η δυνατότητα κάποια κελιά του καννάβου να καθοριστούν ως ανενεργά, με αποτέλεσμα να εξαιρούνται από το μοντέλο. Τα όρια του συστήματος ροής πρέπει να προσεγγιστούν από ένα κλειστό όριο. Εάν η επαναφόρτιση δεν είναι ομοιόμορφη, η περιοχή που εκτείνεται γύρω από κάθε ζώνη διαφορετικής επαναφόρτισης πρέπει να είναι κοντά στα πραγματικά της όρια, έτσι ώστε η ποσότητά της να είναι προσεγγιστικά σωστή.

3.4 Εφαρμογή των Μοντέλων στην Λεκάνη Απορροής

Η βαθμονόμηση των 6 παραμέτρων του μοντέλου πραγματοποιήθηκε στις παρατηρούμενες τιμές απορροής που υπήρχαν στην έξοδο της τέως λίμνης Κάρλας προς τον Παγασητικό Κόλπο. Οι παράμετροι του μοντέλου υδατικού ισοζυγίου βελτιστοποιήθηκαν (calibration) και η αποδοτικότητα των μοντέλων ελέγχθηκε (validation) με τη μέθοδο του χωριστού δείγματος (split sample test). Η μέθοδος του χωριστού δείγματος είναι μια ανεξάρτητη και χωρίς προκατάληψη (unbiased) μέθοδος ελέγχου των προσομοιώσεων. Οι παράμετροι των μοντέλων προσαρμόσθηκαν στις βέλτιστες τιμές τους χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο γενικευμένης ανοιγμένης κλίσης με πολλαπλές εκκινήσεις (multi-start generalized reduced gradient algorithm) με ελαχιστοποίηση των αποκλίσεων μεταξύ παρατηρημένης και προσομοιωμένης απορροής. Η αντικειμενική συνάρτηση που χρησιμοποιήθηκε για την βελτιστοποίηση είναι η model efficiency (*Eff*) η οποία έχει προταθεί από τους Nash και Sutcliffe (Nash et. al., 1970) και χρησιμοποιείται ευρέως στις υδρολογικές προσομοιώσεις, και δίνεται από τον τύπο:

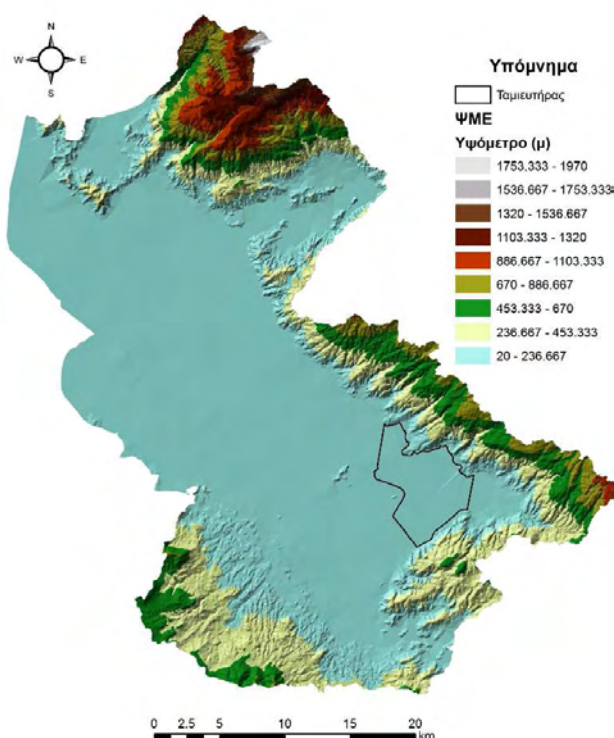
$$Eff = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - Q_{sim_i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad \text{εξ.: 3.50}$$

όπου, Q_{obs_i} η παρατηρημένη απορροή του μήνα i , Q_{sim_i} η προσομοιωμένη απορροή του μήνα i , $\overline{Q_{obs}}$ ο μέσος όρος των τιμών της μηνιαίας παρατηρημένης απορροής.

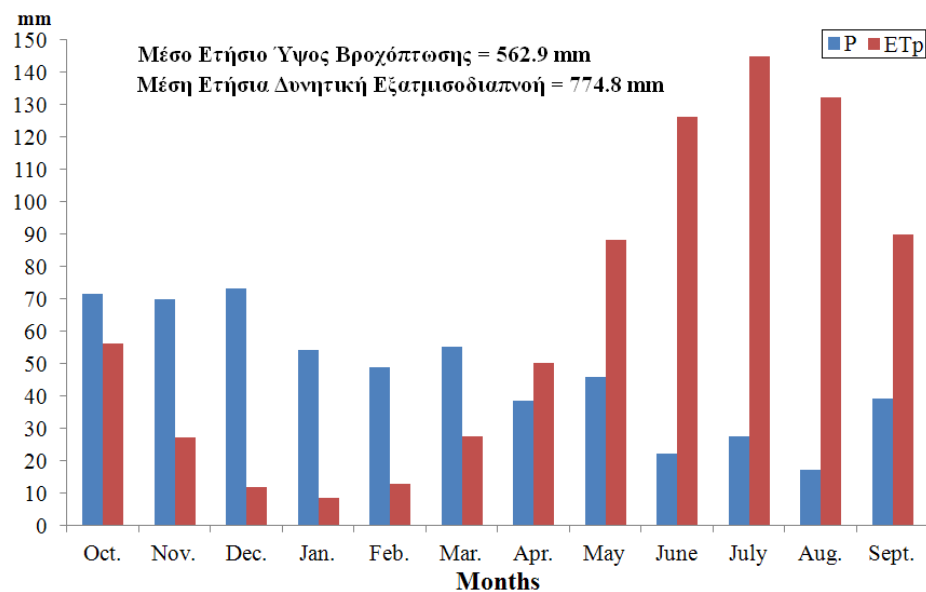
Εκτός της αντικειμενικής συνάρτησης διάφορες άλλες στατιστικές παράμετροι χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο της πιστότητας των προσομοιώσεων της απορροής, όπως ο συντελεστής προσδιορισμού (coefficient of determination, R^2), η σύγκριση μεταξύ της μέσης παρατηρημένης απορροής (mean observed runoff, $\overline{Q_{obs}}$) και της μέσης προσομοιωμένης απορροής (mean simulated runoff, $\overline{Q_{sim}}$), καθώς και η ποσοστιαία διαφορά μεταξύ των παρατηρημένων και προσομοιωμένων όγκων της απορροής (percentage volume difference, %DV), η οποία υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\%DV = \frac{V_{sim} - V_{obs}}{V_{obs}} \times 100 \quad \text{εξ.: 3.51}$$

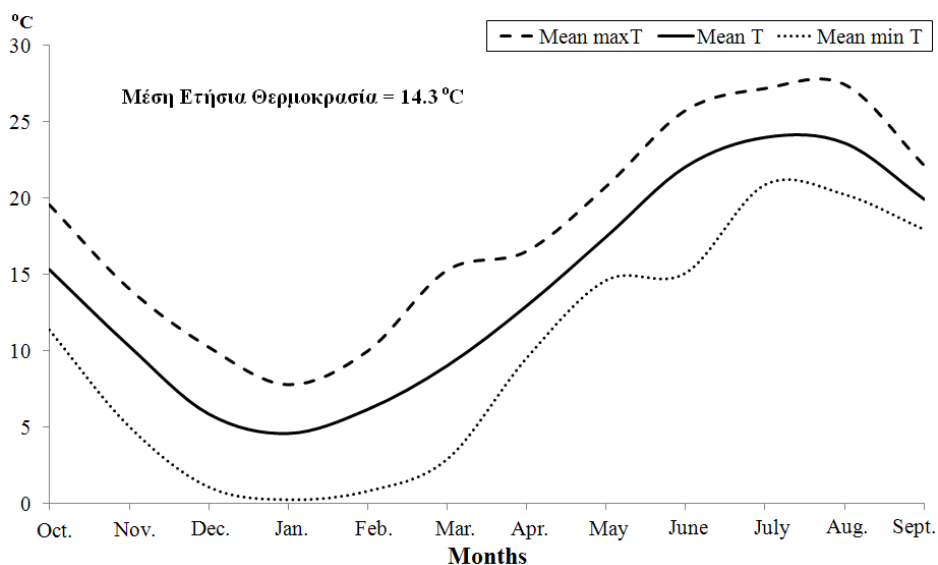
όπου, V_{obs} ο παρατηρημένος όγκος απορροής για την περίοδο της προσομοίωσης, V_{sim} ο προσομοιωμένος όγκος της απορροής για την περίοδο της προσομοίωσης. Επίσης, έγινε οπτικός έλεγχος των παρατηρουμένων και προσομοιωμένων υδρογραφημάτων της απορροής καθώς και διαγράμματα διασποράς της απορροής για τις περιόδους βελτιστοποίησης των παραμέτρων των μοντέλων και πιστοποίησης. Η αποδοτικότητα του μοντέλου (Model efficiency) κρίνεται ικανοποιητική αφού τα απορροϊκά δεδομένα της ιστορικής περιόδου κρίνονται γενικά αναξιόπιστα και με μεγάλα κενά για συνεχόμενες χρονικές περιόδους (**Eff=0.66** για περίοδο βελτιστοποίησης και πιστοποίησης).



Σχήμα 3.6: Ψηφιακό μοντέλο εδάφους (ΨΜΕ) λεκάνης απορροής της λίμνης Κάρλας



Σχήμα 3.7: Διάγραμμα Μέσου Ετήσιου ύψους Βροχόπτωσης και Μέσης Ετήσιας Δυν. Εξατμισοδιαπνοής της Λεκάνης της Κάρλας



Σχήμα 3.8: Διάγραμμα Μέσης Ετήσιας Θερμοκρασίας της Λεκάνης της Κάρλας

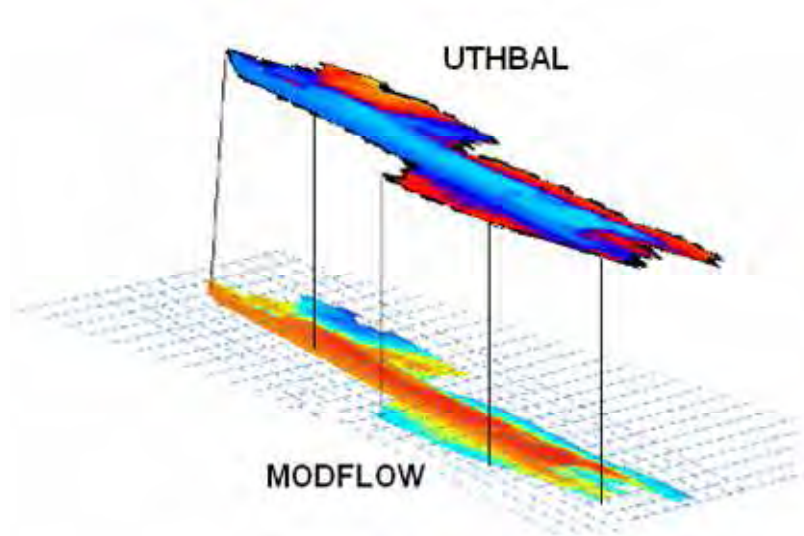
Η υδρολογική λεκάνη της Κάρλας παρουσιάζει γεωμορφολογική ποικιλία με υψόμετρο που κυμαίνεται από 40 έως 1970 μέτρα και μέσο υψόμετρο περίπου 230 μ. Για τον επιμερισμό της λεκάνης σε υψομετρικές ζώνες το ΨΜΕ χρησιμοποιήθηκε λαμβάνοντας υπόψη και τις κλίσεις της περιοχής. Έτσι, επειδή

το μεγαλύτερο μέρος της λεκάνης είναι πεδινό με πολύ μικρές κλίσεις και χαμηλό υψόμετρο, δύο υψομετρικές κλάσεις παρήχθησαν με βάση το υψόμετρο των 200 μέτρων. Το Σχήμα 3.9 δείχνει τις δύο υψομετρικές ζώνες (υπολεκάνες) της λεκάνης απορροής της Κάρλας που είναι η ορεινή ζώνη (με υψόμετρο ≥ 200 m) και η πεδινή ζώνη (με υψόμετρο <200 m). Στο ίδιο Σχήμα απεικονίζεται και ο υπόγειος υδροφόρος της περιοχής μελέτης, ο οποίος βρίσκεται εξ ολοκλήρου στη χαμηλή υψομετρική πεδινή ζώνη.

Το υδρολογικό μοντέλο UTHBAL εφαρμόστηκε ημι-κατανεμημένα (semi) στην υδρολογική λεκάνη της Κάρλας και εκτιμήθηκε η κατείσδυση στον υπόγειο υδροφόρα από την πεδινή υποπεριοχή της λεκάνης της Κάρλας (Σχήμα 4.9) Οι μηνιαίες κατεισδύσεις που προέκυψαν από το μοντέλο UTHBAL εισήχθησαν στο Modflow και έδωσαν απεικονίσεις των υδραυλικών υψών.



Σχήμα 3.9: Μοντέλο προσομοίωσης θεωρώντας την τιμή της κατείσδυσης ενιαία μόνο στην πεδινή ζώνη της λεκάνης της Κάρλας



Σχήμα 3.10: Απεικόνιση σύνδεσης κατείσδυσης από το επιφανειακό μοντέλο υδρολογίας στο μοντέλο προσομοίωσης υπόγειου υδροφορέα.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

4.1 Υδρολογικά και Θερμοκρασιακά Δεδομένα

Στην παρούσα μελέτη θα αναπτυχθεί μεθοδολογία προσδιορισμού χρονοσειρών καθώς αντικείμενο της αποτελεί η εκτίμηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής. Οι μελλοντικές χρονοσειρές βροχόπτωσης και θερμοκρασίας θα προσδιοριστούν για την περίοδο 2009-2058.

Όπως κάθε μελέτη επίδρασης της κλιματικής αλλαγής, θα χρησιμοποιηθούν κλιματικές πληροφορίες από παγκόσμια μοντέλα κυκλοφορίας GCMs (Global Circulation Models). Τα μοντέλα αυτά είναι σαφές ότι έχουν μεγάλα πεδία ορισμού και παρέχουν κλιματικές πληροφορίες μεγάλης (πλανητικής) κλίμακας. Πρόκειται για μοντέλα χρησιμοποιούνται από τα μεγαλύτερα εργαστήρια και βοηθούν στην αποθήκευση πληροφοριών κλιματικής αλλαγής οι οποίες έχουν υπολογιστεί από τα GCMs. Πιο συγκεκριμένα πρόκειται για εκτιμήσεις μελλοντικών ατμοσφαιρικών ή ωκεάνιων παραμέτρων σε συμφωνία πάντοτε με κάποιο από τα επιλεγμένα σενάρια SRES. Από θεωρητική άποψη το κύριο πλεονέκτημα της απόκτησης πληροφοριών από τα μοντέλα αυτά είναι ότι η ανάδραση προκύπτει από την κλιματική αλλαγή σε μια συγκεκριμένη περιοχή σε πλανητική κλιματική κλίμακα και το κλίμα άλλων περιοχών επιτρέπεται για διαφυσικές και δυναμικές διαδικασίες μέσα στο μοντέλο.

Βέβαια αρκετά σημαντικοί είναι και οι περιορισμοί που υπεισέρχονται κατά τη χρήση κλιματικών πληροφοριών που προκύπτουν από τα GCMs. Τα μοντέλα αυτά δεν μπορούν να παρέχουν άμεσες πληροφορίες σε κλίμακες μικρότερες της ανάλυσης τους (εκατοντάδες χιλιόμετρα) και επομένως δεν μπορούν να αιχμαλωτίσουν τις κλιματικές επιδράσεις σε κλίμακες μικρότερες του φατνίου. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα ότι ένα στενό πεδίο βουνού (κλίμακας μικρότερης του φατνίου) μπορεί να είναι η αιτία για τις επιδράσεις της βροχής σε μεγαλύτερη κλίμακα. Ακόμη μελέτες που έχουν διεξαχθεί κατά το παρελθόν έδειξαν ότι τα GCMs στη μικρότερη δυνατή κλίμακα που εντάσσεται στο πεδίο ανάλυσης τους έχουν ουσιαστικό πρόβλημα στο να παράγουν κλιματικά χαρακτηριστικά της παρούσας ημέρας.

Στην εργασία αυτή γίνεται μια προσπάθεια εκτίμησης των επιπτώσεων της κλιματικής μεταβλητότητας για την λεκάνη απορροής της Κάρλας. Θα πρέπει να τονιστεί ότι χρησιμοποιήθηκαν αποτελέσματα της εξόδου δυο παγκόσμιων

κλιματικών μοντέλων GCM τα οποία παρείχαν το σήμα της κλιματικής αλλαγής με βάση το οποίο έγινε εκτίμηση των επιπτώσεων στη περιοχή μελέτης για την ξηρασία. Ειδικότερα με τη χρήση συγκεκριμένων τεχνικών έγινε εκτίμηση των μεταβολών της βροχόπτωσης από την ανάλυση των οποίων προέκυψαν οι πιθανές επιδράσεις της κλιματικής αλλαγής. Επίσης σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι έγινε χρήση της βροχόπτωσης και της θερμοκρασίας κατά την περίοδο 1960-90 και με βάση αυτές αλλά και τα αποτελέσματα των κλιματικών μοντέλων εκτιμήθηκε το σήμα της κλιματικής αλλαγής. Στην παρούσα εργασία τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τα CGCM2 (Coupled Global Climate Model), από την δεύτερη έκδοσή του Καναδικού Κέντρου για Κλιματικά Μοντέλα.

Τα σενάρια που θα χρησιμοποιήσουμε στην μελέτη είναι:

- **IS92a** σενάριο του IPCC. Στο σενάριο αυτό η μεταβολή στα αέρια του θερμοκηπίου (GHG) αντιστοιχεί στην παρατηρούμενη από το 1900 ως το 1990 και από εκεί και πέρα αυξάνεται με ρυθμό 1 % ανά έτος ως το 2100. Επίσης περιλαμβάνεται η άμεση επιρροή των θειούχων αεροζόλ.

- **A2.** Δεδομένα από ένα σύνολο τριών προσομοιώσεων 111-ετών χρησιμοποιώντας το σενάριο A2 του IPCC SRES για τα αέρια του θερμοκηπίου και τα αεροζόλ. Οι προσομοιώσεις αρχίζουν το 1990 με αρχικές συνθήκες από το αντίστοιχο GHG+A που περιγράφεται παραπάνω. Τα αποτελέσματα του A2 διαφέρουν πολύ λίγο από αυτά του IS92a. Καθημερινά δεδομένα για την χρονική περίοδο 1961-2100 από το GHG+A είναι επίσης διαθέσιμα. Καθημερινά δεδομένα για την χρονική περίοδο 1961-1989 εξάγονται από την προσομοίωση με το IS92a.

- **B2.** Δεδομένα από ένα σύνολο τριών προσομοιώσεων 111-ετών χρησιμοποιώντας το σενάριο B2 του IPCC SRES για τα αέρια του θερμοκηπίου και τα αεροζόλ. Οι προσομοιώσεις αρχίζουν το 1990 με αρχικές συνθήκες από το αντίστοιχο GHG+A που περιγράφεται παραπάνω. Για την εξαγωγή δεδομένων πριν από το 1990 χρησιμοποιείται το GHG+A. Το σενάριο B2 παράγει μια πιο μέτρια θέρμανση συγκριτικά με τα άλλα δύο σενάρια. Καθημερινά δεδομένα για την χρονική περίοδο 1961-2100 από το GHG+A είναι επίσης διαθέσιμα. Καθημερινά δεδομένα για την χρονική περίοδο 1961-1989 εξάγονται από την προσομοίωση με το IS92a.

4.2 Εκτίμηση Μελλοντικών Χρονοσειρών

Στο σημείο αυτό γίνεται μια περιγραφή των διαδικασιών υπολογισμού μελλοντικών χρονοσειρών με τη μέθοδο στατιστικού καταβιβασμού κλίμακας, επισημαίνονται τα βασικότερα στάδια στα οποία βασίστηκε η παρούσα εργασία. Η διαδικασία καταβιβασμού στην παρούσα εργασία στηρίζεται στην πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση (multiple linear regression) των υποψήφιων εξαρτημένων μεταβλητών πρόγνωσης (predictors) και της ανεξάρτητης μεταβλητής πρόγνωσης (predictand) που στην προκειμένη περίπτωση είναι η βροχόπτωση και η θερμοκρασία. Η μέθοδος εφαρμόστηκε ξεχωριστά για τη βροχόπτωση και την θερμοκρασία και επίσης επιχειρήθηκαν βελτιώσεις των μοντέλων που προέκυπταν με τυποποίηση των δεδομένων και κανονικοποίηση τους. Οι μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν έχουν την μεγαλύτερη βαρύτητα για την βροχόπτωση είναι η μέση ημερήσια ελάχιστη θερμοκρασία ST_{min} και η γεωδυναμική πυκνότητα $Gz_{500-1000}$ και προστέθηκαν δώδεκα ψευδομεταβλητές (dummies) για να δοθεί έμφαση στον κάθε μήνα ενώ η εξαρτημένη μεταβλητή κρίθηκε σκόπιμο να μετατραπεί λογαριθμικά αφού αυτό ενίσχυε σημαντικά την αξιοπιστία του μοντέλου. Από την άλλη μεριά για την θερμοκρασία οι ανεξάρτητες μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της θερμοκρασίας ήταν η πίεση στο επίπεδο της θαλάσσιας στάθμης και η γεωδυναμική πυκνότητα $Gz_{500-1000}$ μαζί με τις 12 ψευδομεταβλητές που και στην περίπτωση αυτή είχαν μεγάλη βαρύτητα στην αξιοπιστία του μοντέλου. (Τζαμπύρας, 2009)

4.2.2 Θερμοκρασία

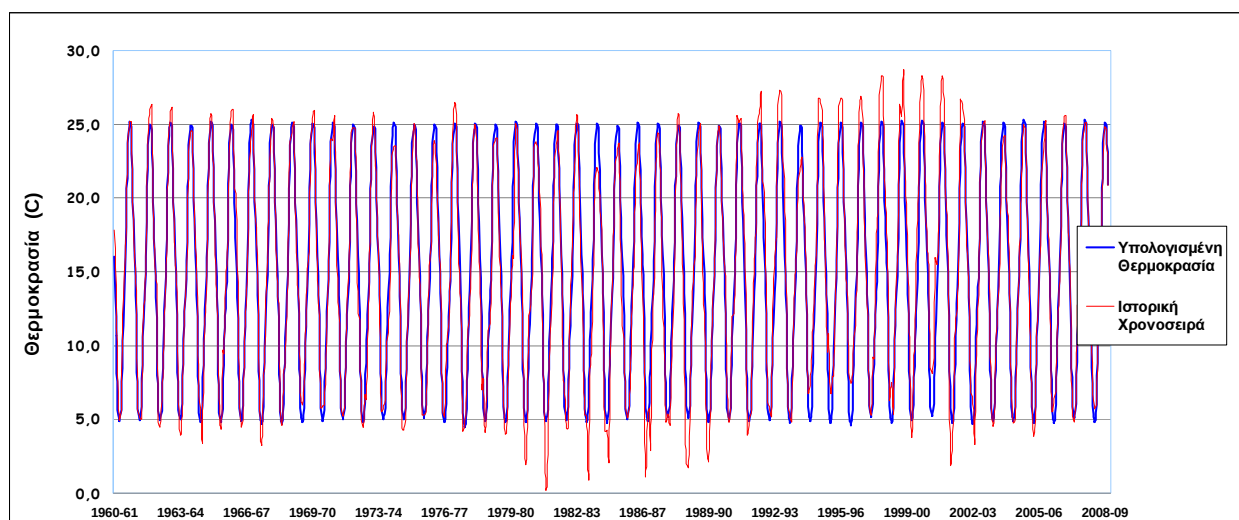
Σε προηγούμενη μελέτη (Λουκάς, Τζαμπύρας), στις λεκάνες γύρω από την λεκάνη της Κάρλας αποδείχτηκε ότι η μελλοντική χρονοσειρά της θερμοκρασίας μπορεί να αναπαραχθεί με ικανοποιητικά αποτελέσματα με πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση χρησιμοποιώντας 14 παραμέτρους. Η ταυτότητα των παραμέτρων προσδιορίστηκε με παραμετρική ανάλυση. Η τιμή της θερμοκρασίας δίνεται από τον τύπο:

$$T = \sum a_i * b_i + a_{13} * g_{z(500-1000)} + a_{14} * mslp, \quad i = 1, 2, 3, \dots, 12 \quad \text{εξ: 4.1}$$

Από το GCM χρησιμοποιήθηκαν δύο μεταβλητές και συγκεκριμένα οι μεταβλητές MSLP (mean sea level pressure) και $gz(500-1000)$. Οι υπόλοιπες 12 μεταβλητές ($b_1, \dots, b_{12}$) είναι ψευδομεταβλητές (dummies) και παίρνουν τις τιμές 0,1 και είναι στην ουσία μηνιαίες παράμετροι καθώς η τιμή τους είναι 1 για τον μήνα που

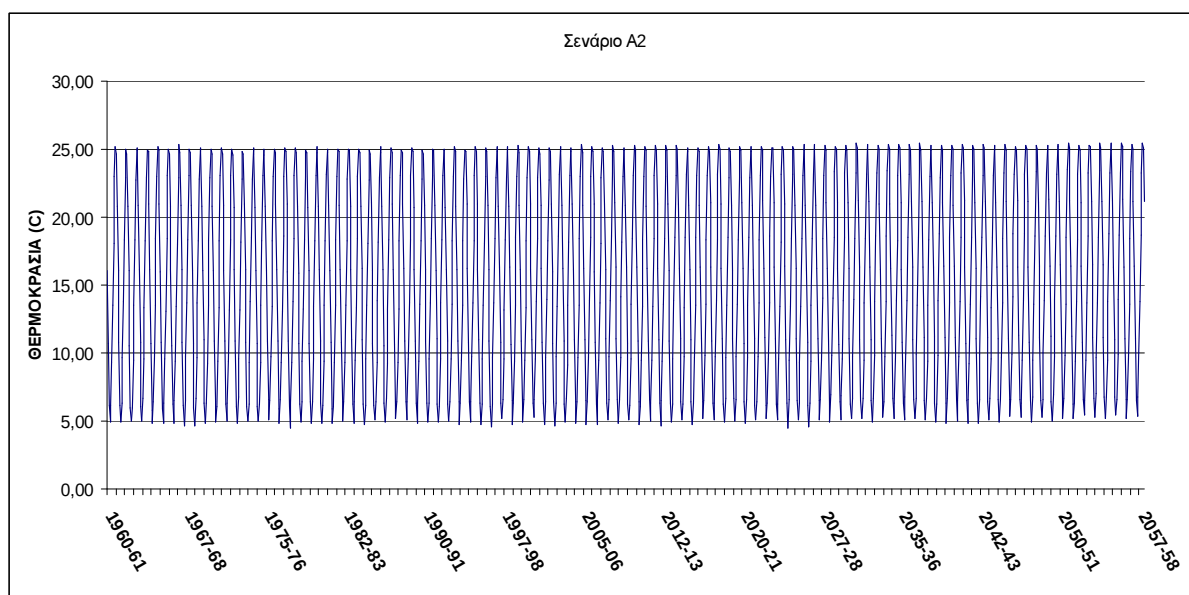
αντιπροσωπεύουν και μηδέν για τους υπόλοιπους. Οι συντελεστές ($a_1, \dots, a_{14}$) υπολογίστηκαν με τη βοήθεια του excel και της εντολής linest.

Έτσι χρησιμοποιώντας τα μοντέλα πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης υπολογίστηκαν οι τιμές της θερμοκρασίας για την χρονοσειρά 1960-2059. Συγκεκριμένα δουλέψαμε στην περίοδο βάσης 1960 -1990 και know η χ'ς τις χρονοσειρές b1-b12, gz(500-1000), ms1p για την ίδια περίοδο. (Πατσώνας 2008) Η μέθοδος πιστοποιήθηκε για την περίοδο 1990 – 2009. Ωστόσο πρέπει να τονιστεί ότι κάνουμε τον καταβιβασμό με τα δεδομένα του IS92.

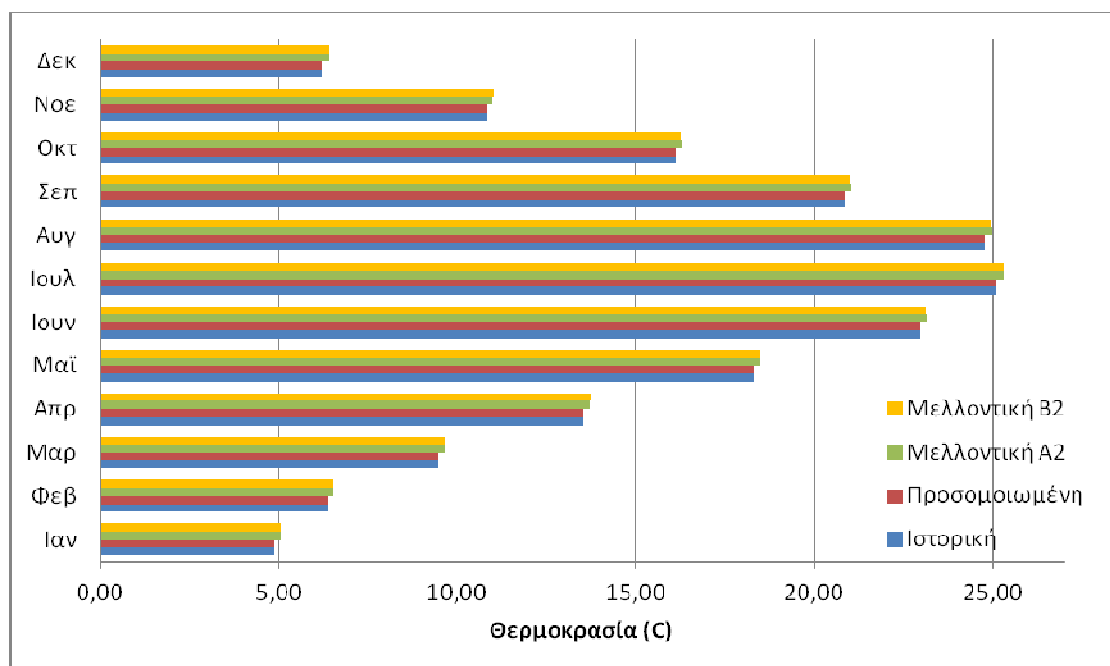


Σχήμα 4.1: Προσομοιωμένη και ιστορική θερμοκρασία για την περίοδο 1960 -2009

Στη συνέχεια, αφού τα αποτελέσματα της πιστοποίησης ήταν ικανοποιητικά, υπολογίστηκε η θερμοκρασία μέχρι το έτος 2058 για τα σενάρια A2 και B2.



Σχήμα 4.2: Προσομοιωμένη θερμοκρασία με το σενάριο A2 για την περίοδο 1960 -2058



Σχήμα 4.3: Μέσοι όροι προσομοιωμένης, ιστορικής και μελλοντικής θερμοκρασίας για την περίοδο 1960 -2058

Παρατηρείται αύξηση στις μελλοντικές τιμές της θερμοκρασίας στο μέλλον της τάξης του μισού βαθμού Κελσίου (°C) καθώς και μεγάλη ομοιότητα μεταξύ των σεναρίων A2 και B2. Διακρίνεται όμως ότι στους εαρινούς μήνες (Απρίλιος-Οκτώβριος) το A2 σενάριο είναι ελαφρώς αυξημένο σε σχέση με το B2, ενώ στους χειμερινούς μήνες το B2 αυξάνει.

4.2.3 Βροχόπτωση

Στην περίπτωση της βροχόπτωσης χρησιμοποιήσαμε ένα λογαριθμικό μοντέλο (Πατσώνας 2008).

$$\ln = (\text{pcp} + 1) = \sum a_i * b_i + a_{13} * \text{mslp} + a_{14} * \text{swa} + a_{15} * \text{gz}(500) + a_{16} * \text{gz}(500 - 1000) + \gamma \quad \text{εξ: 4.2}$$

Όπου ,

$b_1, \dots, b_{12}$ ψευδομεταβλητές όπως και στην θερμοκρασία,

mslp η πίεση στο επίπεδο της θαλάσσιας στάθμης,

swa ταχύτητα του ανέμου στο επίπεδο της θάλασσας

Ωστόσο για την περίοδο 1990-2009 θα πρέπει να τονιστεί ότι τα μοντέλα εφαρμόστηκαν χρησιμοποιώντας τους συντελεστές που αναπτύχθηκαν για την περίοδο 1960-90. Είναι σαφές ότι τα μοντέλα έχουν προφανώς ένα σφάλμα στην εκτίμηση βροχόπτωσης σε σχέση πάντοτε με τις παρατηρημένες τιμές. Η πραγματική τιμή του σφάλματος αυτού ονομάστηκε υπόλοιπο (residual). Έτσι και στην περίπτωσή μας η προσομοίωση με το λογαριθμικό μοντέλο παρουσιάζει εμφανή προβλήματα. Από το μοντέλο πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης υπολογίστηκε η μέση τιμή της βροχόπτωσης, για όλη την περίοδο 1960-90 ενώ όπως προαναφέρθηκε οι τιμές πιστοποιήθηκαν για την περίοδο 1990-2009. Το ζητούμενο λοιπόν ήταν να βρεθεί ένας τρόπος για την προσομοίωση των τιμών των υπολοίπων Pres.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε έχει εφαρμοστεί σε μέση επιφανειακή βροχόπτωση λεκάνης απορροής από τους L. Vasiliades, A. Loukas, and G. Patsonas 2009 και στηρίζεται στην στοχαστική προσομοίωση των υπολοίπων με την χρήση στοχαστικών μοντέλων χρονοσειρών. Για να διατηρηθεί η μεταβλητότητα των παρατηρούμενων χρονοσειρών, η εκτιμώμενη βροχόπτωση συνδυάστηκε με τις τιμές των υπολοίπων της παλινδρόμησης. Μετά την στοχαστική προσομοίωση των υπολοίπων και την αναπαραγωγή 100 χρονοσειρών

υπολοίπων έγινε υπολογισμός της βροχόπτωσης με την πρόσθεση των 100 χρονοσειρών υπολοίπων στην χρονοσειρά που προέκυψε από την GMLR.

Έτσι λοιπόν η διαδικασία που ακολουθήθηκε περιγράφεται καλύτερα από την παρακάτω σχέση:

$$P = \text{PMLR} + \text{Presidual} \quad \text{εξ: 4.3}$$

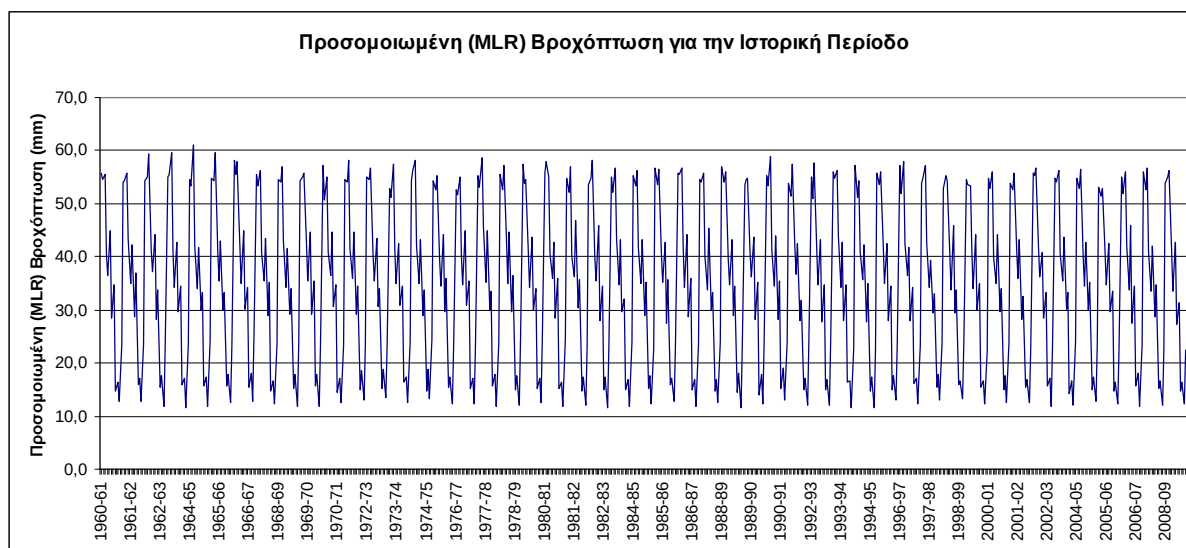
Όπου:

P = παρατηρημένη μηνιαία βροχόπτωση,

PMLR = μηνιαία βροχόπτωση που διεξήχθη από πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση και

Presidual = υπόλοιπο του MLR

Θα πρέπει να τονιστεί ότι όταν λέγεται ότι τα μοντέλα της GMLR πιστοποιήθηκαν για την περίοδο 1990-2009 σημαίνει απλά ότι χρησιμοποιήθηκαν οι συντελεστές των μοντέλων που αναπτύχθηκαν με βάση την περίοδο 1960-90 δηλαδή οι συντελεστές των μοντέλων παρέμειναν σταθεροί για την εκτίμηση της βροχόπτωσης για την περίοδο 1990-2009 και τα υπόλοιπα υπολογίστηκαν με τον ίδιο τρόπο όπως και για την περίοδο 1960-1990.



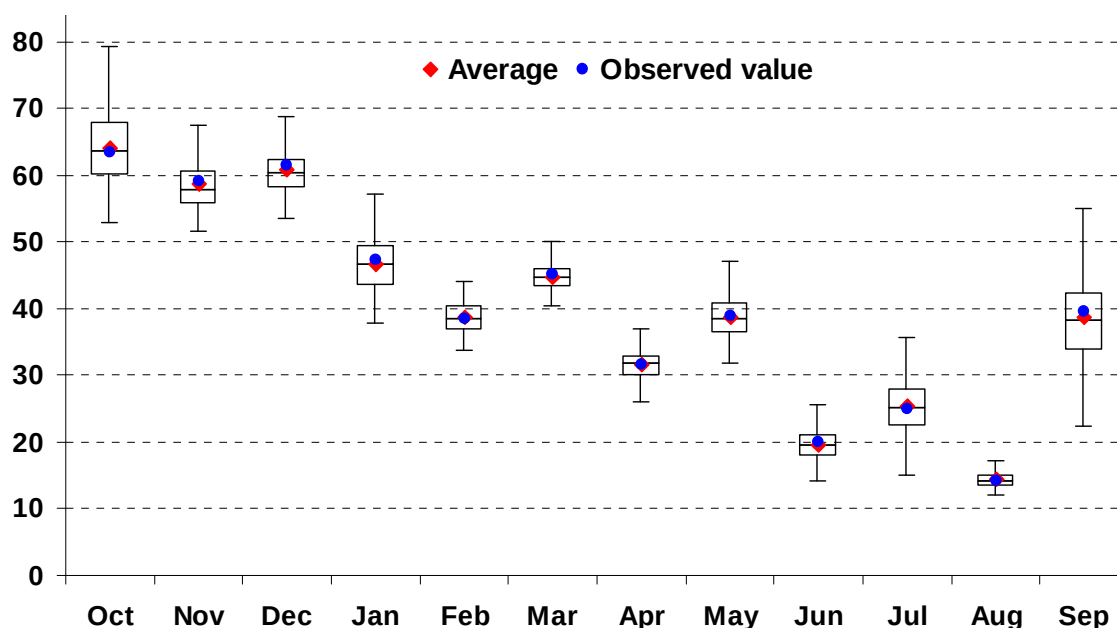
Σχήμα 4.4: Προσομοιωμένη βροχόπτωση για την περίοδο 1960 -2009

Πίνακας 4.1: Στατιστικά αποτελέσματα μηνιαίας βροχόπτωσης (mm) για την περίοδο βάσης 1960-2009: Μέση τιμή.

Μέση τιμή μηνιαίας βροχόπτωσης			Αποτελέσματα στοχαστικής ανάλυσης			
Μήνας	Παρατηρημένη	Καταβιβασμένη	Μέση τιμή	Τυπ. απόκλιση	Ελάχιστο	Μέγιστο
ΟΚΤ	63.41	55.01	64.09	5.47	52.82	79.78
ΝΟΕ	58.98	53.62	58.58	3.77	51.49	70.79
ΔΕΚ	61.38	56.59	60.74	3.47	53.50	69.88
ΙΑΝ	47.20	41.47	46.68	3.83	37.89	57.13
ΦΕΒ	38.46	35.09	38.67	2.28	33.69	44.04
ΜΑΡ	45.04	43.49	44.73	2.03	40.37	50.36
ΑΠΡ	31.57	29.13	31.65	2.24	25.38	37.84
ΜΑΪ	38.78	34.42	38.72	3.09	31.79	47.03
ΙΟΥΝ	19.91	15.23	19.65	2.35	14.21	25.95
ΙΟΥΛ	24.85	17.37	25.33	4.10	15.05	37.17
ΑΥΓ	14.26	12.32	14.32	1.11	11.98	17.21
ΣΕΠ	39.47	23.67	38.75	8.24	22.24	76.23

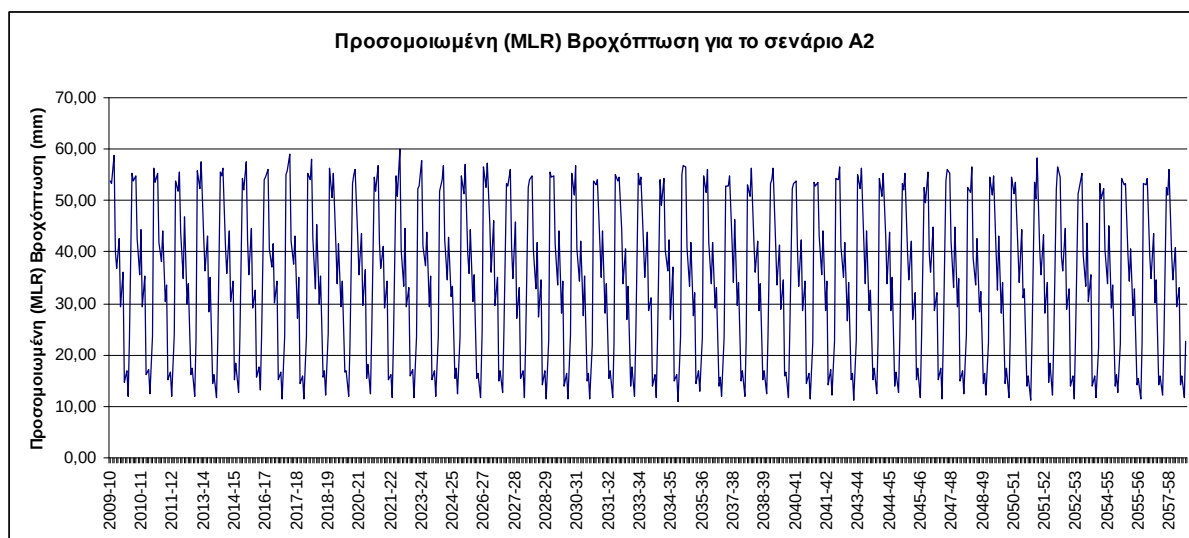
Πίνακας 4.2: Στατιστικά αποτελέσματα μηνιαίας βροχόπτωσης (mm) για την περίοδο βάσης 1960-2009: τυπική απόκλιση.

Τυπική απόκλιση μηνιαίας βροχόπτωσης			Αποτελέσματα στοχαστικής ανάλυσης			
Μήνας	Παρατηρημένη	Καταβιβασμένη	Μέση τιμή	Τυπ. απόκλιση	Ελάχιστο	Μέγιστο
ΟΚΤ	34.07	1.25	37.81	8.80	19.96	71.83
ΝΟΕ	27.58	1.52	25.95	3.46	18.64	33.95
ΔΕΚ	25.53	1.64	25.73	4.34	16.38	47.36
ΙΑΝ	26.25	1.21	24.41	4.89	14.19	43.45
ΦΕΒ	16.98	0.88	16.68	2.07	12.10	23.61
ΜΑΡ	12.74	1.41	12.91	1.74	8.61	17.81
ΑΠΡ	14.13	0.96	14.32	3.63	8.87	29.29
ΜΑΪ	20.60	1.14	19.99	3.33	13.63	28.43
ΙΟΥΝ	17.10	0.54	16.83	4.71	8.68	37.06
ΙΟΥΛ	23.54	0.65	26.50	11.43	14.51	78.68
ΑΥΓ	8.47	0.51	8.10	1.51	5.20	13.80
ΣΕΠ	50.59	0.66	48.45	21.61	18.51	146.47

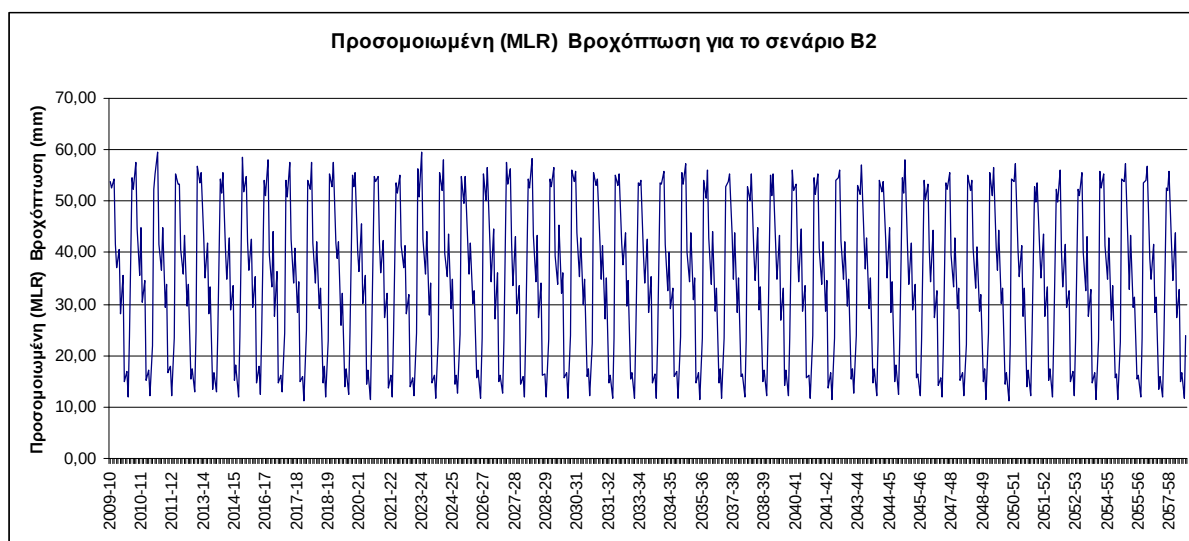


Σχήμα 4.5: Θηκόγραμμα καταβιβασμένης βροχόπτωσης για την ιστορική περίοδο.

Παρατηρούμε ότι η μεθοδολογία προσδιορισμού μας δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Οπότε συνεχίζουμε την μεθοδολογία μας για την μελλοντική περίοδο 2009-2058 και για τα κλιματικά σενάρια A2 και B2. Αρχικά υποθέτουμε ότι η χρονοσειρά των υπολοίπων (residuals) της ιστορικής βροχόπτωσης (που προκύπτει από την ιστορική χρονοσειρά της βροχόπτωσης αφαιρώντας την χρονοσειρά που προέκυψε από το λογαριθμικό μοντέλο παλινδρόμησης και την παραμετρική ανάλυση) θα έχει τα ίδια στατιστικά χαρακτηριστικά και στο μέλλον. Όποτε αναπαράγοντας τυχαίες χρονοσειρές υπολοίπων με χρήση του προγράμματος SAMS, διατηρώντας τον μέσο και την τυπική απόκλιση τις οποίες θα προσθέσουμε στην χρονοσειρά της παραμετρικής ανάλυσης των μελλοντικών περιόδων και θα έχουμε τυχαίες χρονοσειρές στις μελλοντικές περιόδους. Ουσιαστικά με την στοχαστική ανάλυση του προγράμματος SAMS αναπαράγουμε 100 χρονοσειρές residuals. Επομένως προσθέτουμε την καταβιβασμένη βροχόπτωση της ιστορικής περιόδου σε κάθε μία από τις χρονοσειρές residuals για να πάρουμε 100 χρονοσειρές βροχόπτωσης για την ιστορική περίοδο 1960-2009. Με τον τρόπο αυτό υπολογίστηκαν στην ουσία 100 χρονοσειρές βροχόπτωσης για κάθε παγκόσμιο κλιματικό μοντέλο.



Σχήμα 4.6: Προσομοιωμένη ιστορική βροχόπτωση και μελλοντική με το σενάριο A2 για την περίοδο 1960 -2058



Σχήμα 4.7: Προσομοιωμένη ιστορική βροχόπτωση και μελλοντική με το σενάριο B2 για την περίοδο 1960 -2058

Πίνακας 4.3 : Στατιστικά αποτελέσματα μηνιαίας βροχόπτωσης (mm) για την περίοδο 2009-58 και το σενάριο A2: Μέση τιμή

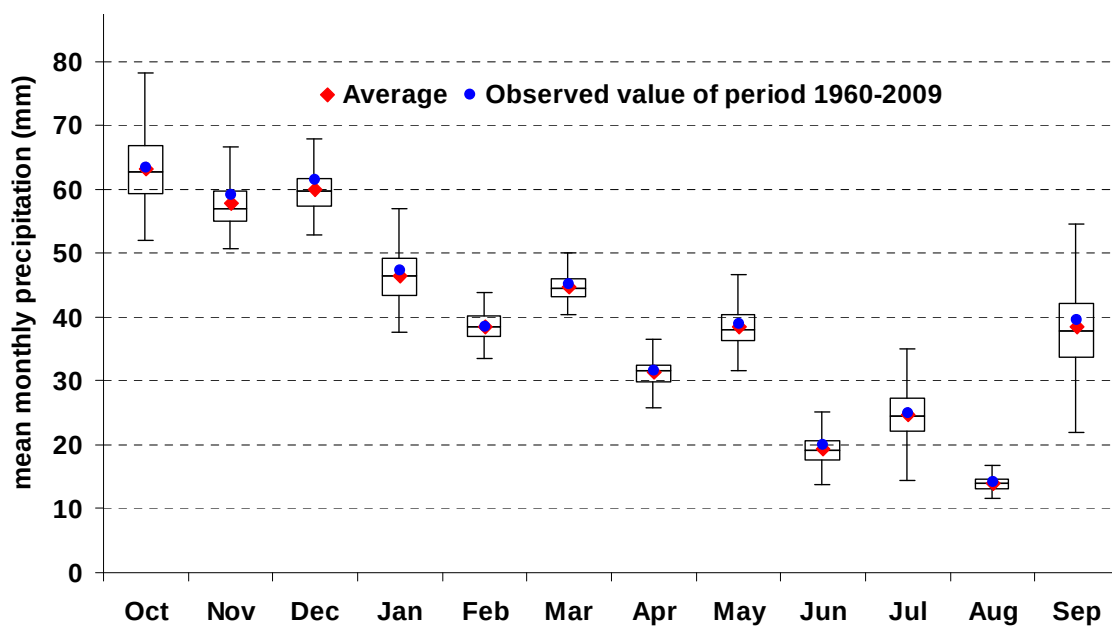
Μέση τιμή μηνιαίας βροχόπτωσης			Αποτελέσματα στοχαστικής ανάλυσης			
Μήνας	Παρατηρημένη	Καταβιβασμένη A2	Μέση τιμή	Τυπ. απόκλιση	Ελάχιστο	Μέγιστο
ΟΚΤ	63.41	54,08	63,16	5,47	51,89	78,85
ΝΟΕ	58.98	52,75	57,71	3,77	50,62	69,93
ΔΕΚ	61.38	55,84	59,98	3,47	52,75	69,12
ΙΑΝ	47.20	41,28	46,48	3,83	37,69	56,94
ΦΕΒ	38.46	34,94	38,53	2,28	33,55	43,9
ΜΑΡ	45.04	43,41	44,65	2,03	40,3	50,28
ΑΠΡ	31.57	28,88	31,4	2,24	25,13	37,59
ΜΑΪ	38.78	34,11	38,4	3,09	31,48	46,71
ΙΟΥΝ	19.91	14,86	19,28	2,35	13,84	25,58
ΙΟΥΛ	24.85	16,8	24,75	4,1	14,48	36,6
ΑΥΓ	14.26	11,94	13,94	1,11	11,6	16,83
ΣΕΠ	39.47	23,28	38,36	8,24	21,85	75,84

Πίνακας 4.4 : Στατιστικά αποτελέσματα μηνιαίας βροχόπτωσης (mm) για την περίοδο 2009-58 και το σενάριο A2: τυπική απόκλιση

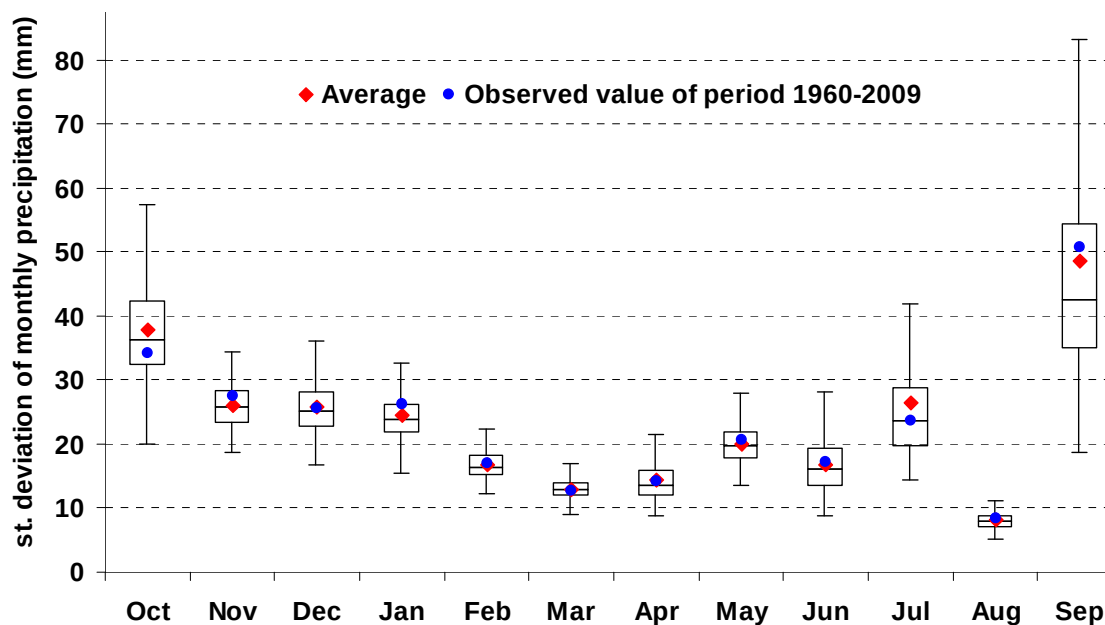
Τυπική απόκλιση μηνιαίας βροχόπτωσης			Αποτελέσματα στοχαστικής ανάλυσης			
Μήνας	Παρατηρημένη	Καταβιβασμένη A2	Μέση τιμή	Τυπ. απόκλιση	Ελάχιστο	Μέγιστο
ΟΚΤ	34.07	1,25	37,79	8,76	20	71,74
ΝΟΕ	27.58	1,76	26,01	3,44	18,6	34,3
ΔΕΚ	25.53	1,59	25,74	4,28	16,65	46,77
ΙΑΝ	26.25	1,41	24,41	4,87	14,46	43,6
ΦΕΒ	16.98	1,37	16,76	2,06	12,25	23,65
ΜΑΡ	12.74	1,55	12,95	1,73	8,87	18,01
ΑΠΡ	14.13	1,13	14,33	3,62	8,9	29,49
ΜΑΪ	20.60	1,23	19,99	3,32	13,55	28,36
ΙΟΥΝ	17.10	0,71	16,81	4,7	8,74	36,96
ΙΟΥΛ	23.54	0,67	26,5	11,44	14,49	78,69
ΑΥΓ	8.47	0,5	8,09	1,5	5,09	13,71
ΣΕΠ	50.59	0,68	48,45	21,6	18,64	146,62



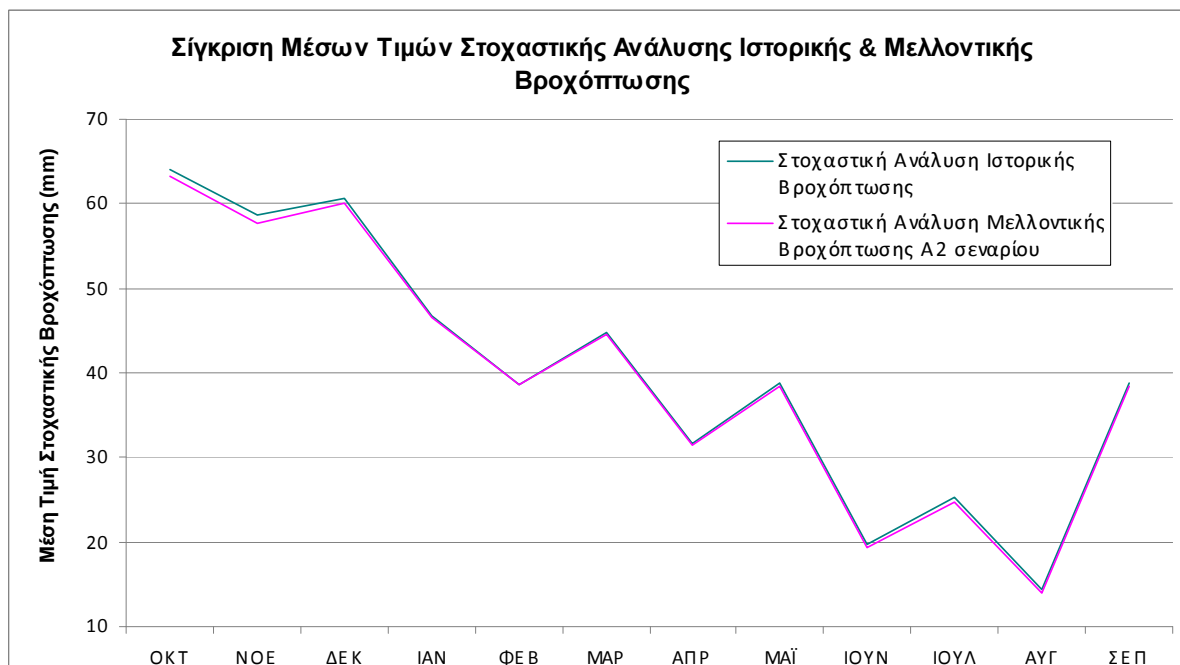
Σχήμα 4.8: Καταβιβασμένη βροχόπτωση περιόδου 2009-2058 για το σενάριο A2



Σχήμα 4.9: Θηκόγραμμα καταβιβασμένης βροχόπτωσης για την περίοδο 2009 έως 2058 για το σενάριο A2.



Σχήμα 4.10: Θηκόγραμμα τυπικής απόκλισης της καταβιβασμένης βροχόπτωσης για την περίοδο 2009 έως 2058 για το σενάριο A2.



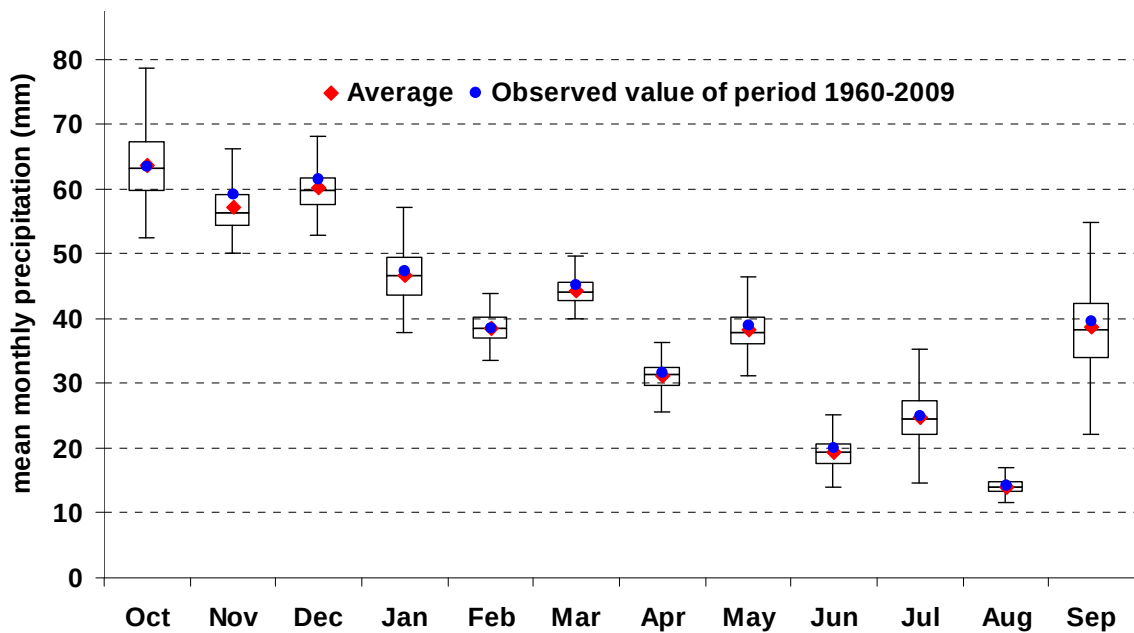
Σχήμα 4.11: Σύγκριση καταβιβασμένης ιστορικής και μελλοντικής βροχόπτωσης

Πίνακας 4.5: Στατιστικά αποτελέσματα μηνιαίας βροχόπτωσης (mm) για την περίοδο 2009-58 και το σενάριο B2: (α) Μέση τιμή (β) τυπική απόκλιση.

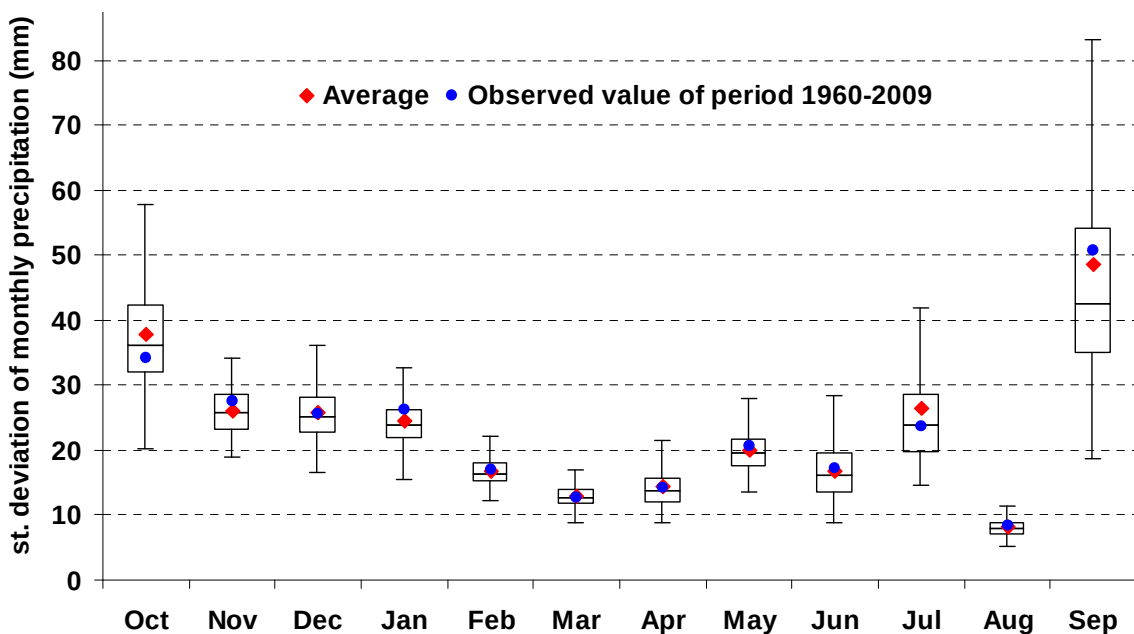
Μέση τιμή μηνιαίας βροχόπτωσης Μήνας Παρατηρημένη Καταβιβασμένη B2			Αποτελέσματα στοχαστικής ανάλυσης Μέση τιμή Τυπ. απόκλιση Ελάχιστο Μέγιστο			
ΟΚΤ	63.41	54,52	63,6	5,47	52,33	79,29
ΝΟΕ	58.98	52,17	57,14	3,77	50,05	69,35
ΔΕΚ	61.38	55,95	60,09	3,47	52,86	69,23
ΙΑΝ	47.20	41,43	46,63	3,83	37,84	57,08
ΦΕΒ	38.46	34,95	38,53	2,28	33,55	43,9
ΜΑΡ	45.04	43,01	44,25	2,03	39,9	49,89
ΑΠΡ	31.57	28,68	31,21	2,24	24,93	37,39
ΜΑΪ	38.78	33,86	38,16	3,09	31,23	46,47
ΙΟΥΝ	19.91	14,91	19,33	2,35	13,88	25,62
ΙΟΥΛ	24.85	16,83	24,79	4,1	14,51	36,63
ΑΥΓ	14.26	12,01	14,01	1,11	11,67	16,9
ΣΕΠ	39.47	23,52	38,6	8,24	22,09	76,08

Πίνακας 4.6: Στατιστικά αποτελέσματα μηνιαίας βροχόπτωσης (mm) για την περίοδο 2009-58 και το σενάριο B2: τυπική απόκλιση.

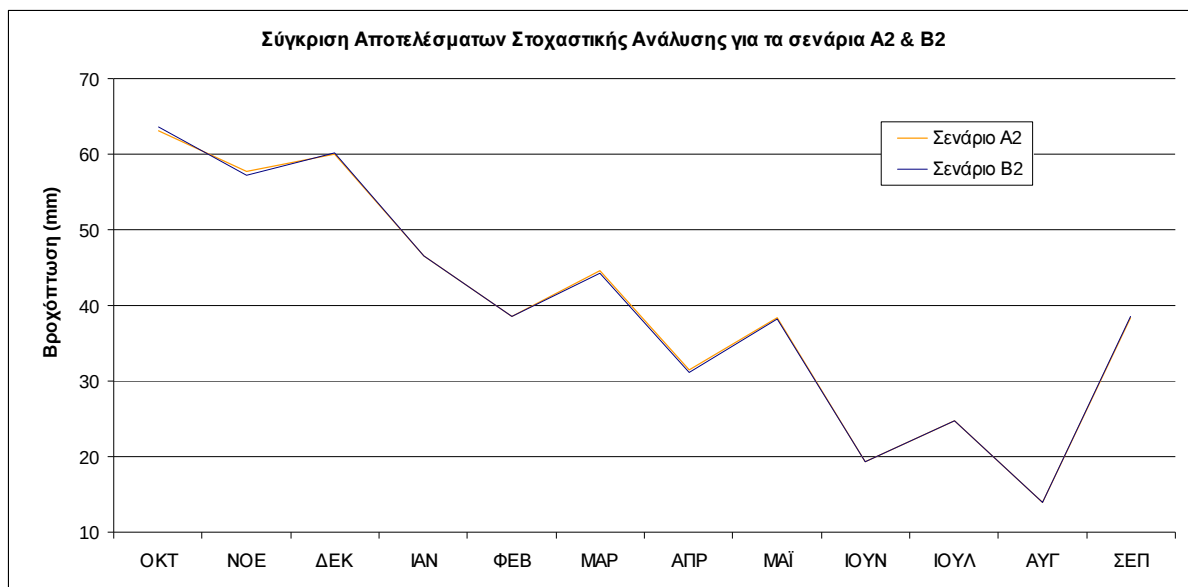
Τυπική απόκλιση μηνιαίας βροχόπτωσης Μήνας Παρατηρημένη Καταβιβασμένη B2			Αποτελέσματα στοχαστικής ανάλυσης Μέση τιμή Τυπ. απόκλιση Ελάχιστο Μέγιστο			
ΟΚΤ	34.07	1,32	37,78	8,78	20,11	71,68
ΝΟΕ	27.58	1,34	25,95	3,45	18,94	34,09
ΔΕΚ	25.53	1,54	25,73	4,22	16,44	46,24
ΙΑΝ	26.25	1,26	24,42	4,88	14,08	43,47
ΦΕΒ	16.98	1,34	16,72	2,05	12,31	23,6
ΜΑΡ	12.74	1,31	12,88	1,73	8,68	17,78
ΑΠΡ	14.13	1,16	14,31	3,61	8,73	29,33
ΜΑΪ	20.60	1,26	19,96	3,34	13,59	28,61
ΙΟΥΝ	17.10	0,72	16,85	4,71	8,75	37,03
ΙΟΥΛ	23.54	0,66	26,5	11,45	14,55	78,85
ΑΥΓ	8.47	0,45	8,1	1,5	5,07	13,79
ΣΕΠ	50.59	0,74	48,47	21,62	18,63	146,6



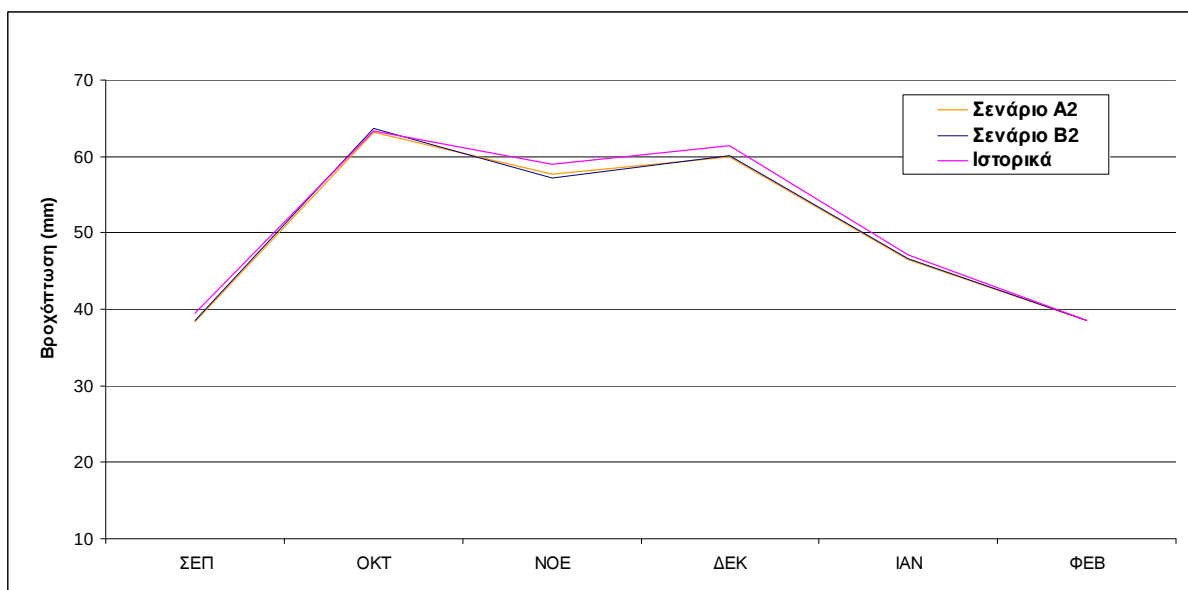
Σχήμα 4.12:Θηκόγραμμα καταβιβασμένης βροχόπτωσης για την περίοδο 2009 έως 2058 για το σενάριο B2.



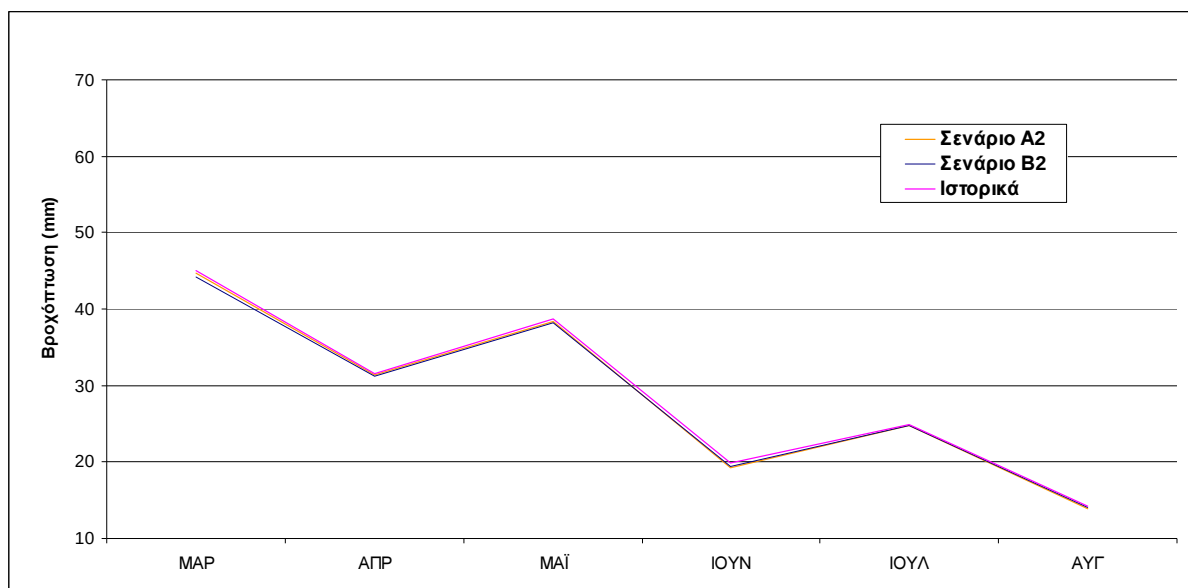
Σχήμα 4.13: Θηκόγραμμα τυπικής απόκλισης καταβιβασμένης βροχόπτωσης για την περίοδο 2009 έως 2058 για το σενάριο B2.



Σχήμα 4.14 Καταβιβασμένη βροχόπτωση περιόδου 2009-2058 για το σενάριο A2 και B2



Σχήμα 4.15: Σύγκριση μέσης ιστορικής και μέσης μελλοντικής (Σενάρια A2,B2) βροχόπτωσης για τους υγρούς μήνες



Σχήμα 4.16 : Σύγκριση ιστορικής και μελλοντικής βροχόπτωσης για τους ξηρούς μήνες

Παρατηρείται ότι οι μέσες τιμές της βροχόπτωσης για την περίοδο 2009-2058 εμφανίζουν πτώση σε σχέση με τις τιμές της ιστορικής περιόδου. Οι διαφορές ανάμεσα στα δύο μελλοντικά σενάρια A2 και B2 παραμένουν πολύ μικρές. Αξίζει να σημειωθεί ότι στους υγρούς μήνες (Σεπτέμβρης -Φεβρουάριος) το A2 σενάριο είναι ελαφρώς αυξημένο σε σχέση με το B2, ενώ στους ξηρούς μήνες το A2 μειώνεται έναντι του B2.

4.3 Προσομοίωση Επιφανειακής Υδρολογίας

Το μηνιαίο υδρολογικό μοντέλο UTHBAL (Loukas et. al., 2007) χρησιμοποιήθηκε για την ημικατανεμημένη μηνιαία προσομοίωση του υδρολογικού ισοζυγίου και την εκτίμηση της κατείσδυσης στον υπόγειο υδροφόρα της Κάρλας. Το μοντέλο αυτό αναπτύχθηκε από τον Λουκά και συνεργάτες και είναι μοντέλο 6 παραμέτρων, εκ των οποίων 2 μπορούν να εκτιμηθούν από εδαφολογικούς, γεωλογικούς και χρήσεων γης χάρτες (Loukas et al, 2003, Christodoulaki et al, 2003). Τα δεδομένα που ήταν διαθέσιμα για την υλοποίηση της εφαρμογής διακρίνονται σε γεωγραφικά και υδρομετεωρολογικά. Τα γεωγραφικά δεδομένα ήταν το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (Digital Terrain Model, DTM), το οποίο δημιουργήθηκε από την ψηφιοποίηση των ισοϋψών καμπυλών από τοπογραφικούς χάρτες κλίμακας 1:50000, ο ψηφιακός χάρτης των γεωλογικών σχηματισμών που προήλθε από ψηφιοποίηση γεωλογικών χαρτών κλίμακας 1:50000, το υδρογραφικό δίκτυο που δημιουργήθηκε από την ψηφιοποίηση τοπογραφικών χαρτών, η ψηφιακή απεικόνιση χρήσεων γης κατά CORINE, και οι

θέσεις των μετεωρολογικών σταθμών μέτρησης υετόπτωσης και θερμοκρασίας. Τα υδρομετεωρολογικά δεδομένα περιλαμβάνουν τις μηνιαίες τιμές υετόπτωσης από 12 βροχομετρικούς σταθμούς της ευρύτερης περιοχής για τη περίοδο Οκτώβριος 1960 έως Σεπτέμβριος 2002 (42 υδρολογικά έτη) και τιμές μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας από 24 μετεωρολογικούς σταθμούς για την ίδια περίοδο. Επίσης χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα μηνιαίας παροχής από τον υδρομετρικό σταθμό της λίμνης Κάρλας για τη βαθμονόμηση και την πιστοποίηση του υδρολογικού μοντέλου. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι υδρομετρικές παρατηρήσεις είναι μη συνεχόμενες με μεγάλα κενά ανάμεσα στις παρατηρήσεις.

Τα δεδομένα εισόδου του μοντέλου είναι η καταβιβασμένη μηνιαία θερμοκρασία (T), η εξατμισοδιαπνοή (E) και η καταβιβασμένη μηνιαία χωρική βροχόπτωση (P). Οι υπολογισμοί γίνονται σε (mm).

Οι επιφανειακές τιμές της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας δημιουργήθηκαν με την υπομετρική αναγωγή των μετρήσεων των μετεωρολογικών σταθμών, στο μέσο υψόμετρο των δύο ζωνών με τη χρήση της μεθόδου της θερμοβαθμίδας. Η μέθοδος θερμοβαθμίδας βασίζεται στην παρατήρηση ότι η θερμοκρασία μειώνεται με την αύξηση του υψομέτρου και χρησιμοποιεί την ετήσια θερμοβαθμίδα που περιγράφει την μείωση της ετήσιας θερμοκρασίας ανά 100 μέτρα αύξηση του υψομέτρου. Ο υπολογισμός της θερμοβαθμίδας υπολογίστηκε από όλους τους σταθμούς θερμοκρασίας της ευρύτερης περιοχής της Θεσσαλίας.

Η δυνητική εξατμισοδιαπνοή υπολογίστηκε με την εφαρμογή της μεθόδου Thornthwaite χρησιμοποιώντας τα επιφανειακά δεδομένα της θερμοκρασίας των δύο υπομετρικών ζωνών. Είναι η πλέον απλή ως προς την υπολογιστική διαδικασία μέθοδος η οποία όμως έχει τύχει ευρύτατης εφαρμογής αν και τείνει να ξεπεραστεί (χρονολογείται από το 1948). Η δυνητική εξατμισοδιαπνοή κάποιου μήνα υπολογίζεται από την σχέση:

$$E_p = 16 \left(\frac{10 T_a}{I} \right)^a \frac{\mu N}{360}$$

όπου E_p η δυνητική εξατμοδιαπνοή σε mm/μήνα, T_a η μέση θερμοκρασία του μήνα σε °C, μ ο αριθμός των ημερών του μήνα, N η μέση αστρονομική διάρκεια της ημέρας (λαμβάνεται η τιμή στην μέση του μήνα), I εμπειρικός συντελεστής που ονομάζεται ετήσιος θερμικός δείκτης και a άλλος εμπειρικός συντελεστής, συνάρτηση του I . Οι εμπειρικοί συντελεστές υπολογίζονται από το δείγμα των μέσων μηνιαίων θερμοκρασιών του έτους (T_{aj} , $j=1..12$) ως εξής:

$$I = \sum_{n=1}^{12} \left(\frac{T_n}{5} \right)^{1.514}$$

$$a = 0.000000675I^3 - 0.000077I^2 + 0.01792I + 0.49239$$

όπου, T_n η κανονική θερμοκρασία κάθε μήνα.

Τέλος στο υδρολογικό μοντέλο εισάγεται η καταβιβασμένη θερμοκρασία (παράγραφος 5.2.2) καθώς και οι 100 καταβιβασμένες χρονοσειρές της βροχόπτωσης (παράγραφος 5.2.3), για την περίοδο 1960 – 2058 για τα σενάρια A2 και B2.

Οι παράμετροι των εννοιολογικών υδρολογικών μοντέλων δεν είναι μετρήσιμα μεγέθη αλλά εκτιμώνται έμμεσα, μέσω μιας συστηματικής διαδικασίας αξιολόγησης εναλλακτικών συνδυασμών που καλείται βαθμονόμηση (calibration). Η βαθμονόμηση λοιπόν έγινε συγκρίνοντας τις προσομοιωμένες αποκρίσεις της λεκάνης με τις παρατηρημένες, και επιλέγοντας τον συνδυασμό εκείνο που επιτυγχάνει την καλύτερη προσαρμογή. Προφανώς, αυτό προϋποθέτει ένα επαρκές χρονικό διάστημα για το οποίο διατίθενται συστηματικές μετρήσεις (χρονοσειρές) απόκρισης της λεκάνης, έτσι ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση των ιστορικών με τα προσομοιωμένα δεδομένα.

Πίνακας 4.7 : Τιμές παραμέτρων του υδρολογικού μοντέλου για τη λεκάνη απορροής της Κάρλας

Συντελεστής δυνητικής τήξης χιονιού Cm	Curve Number CN	Συντελεστής κατείσδυσης K ($0 \leq K \leq 1$)	Συντελεστής πραγματικής εξατμισοδιαπνοής a ($0 \leq a \leq 1$)	Συντελεστής ενδιάμεσης απορροής β ($0 \leq \beta \leq 1$)	Συντελεστής βασικής απορροής γ ($0 \leq \gamma \leq 1$)
0,119	52,52	0,77	0,65	0,010	0,646

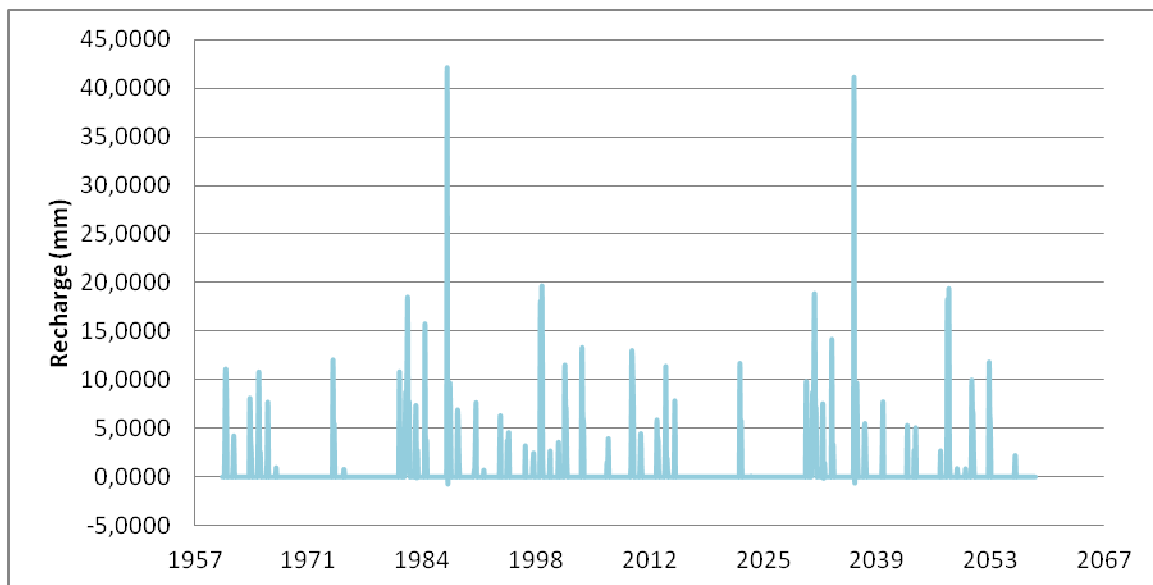
Το υδρολογικό μοντέλο UTHBAL εξήγαγε 100 χρονοσειρές απορροής για το σενάριο A2 και 100 χρονοσειρές απορροής για το σενάριο B2

Πίνακας 4.8: Βασικά στατιστικά μεγέθη μηνιαίας κατείσδυσης στον υπόγειο υδροφορέα για την περίοδο 1960 – 2058 για το σενάριο A2, όπως προκύπτει από το μοντέλο UTHBAL (mm).

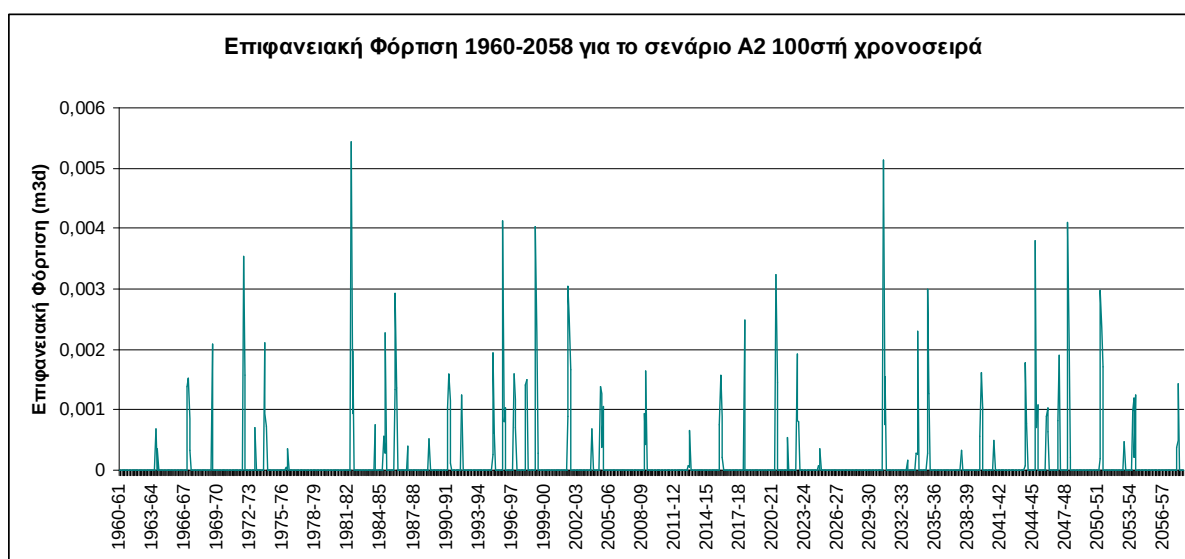
Αποτελέσματα στοχαστικής ανάλυσης μέσης μηνιαίας επιφανειακής φόρτισης					
Μήνας	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Ελάχιστο	Μέγιστο	Διάμεσος
ΟΚΤ	0,4019	0,794	0	4,6846	0
ΝΟΕ	0,3178	0,4093	0	1,9123	0,1303
ΔΕΚ	0,2608	0,2395	0	1,0174	0,2149
ΙΑΝ	0,9118	0,4839	0,0825	2,7647	0,8353
ΦΕΒ	2,0628	0,6867	0,702	4,2401	2,0675
ΜΑΡ	1,8347	0,4802	1,1057	2,9492	1,7323
ΑΠΡ	2,001	0,4931	0,9638	3,3466	1,988
ΜΑΪ	0,2621	0,241	0	1,309	0,2101
ΙΟΥΝ	0,0868	0,1191	0	0,5366	0,0313
ΙΟΥΛ	0,018	0,0676	0	0,5449	0
ΑΥΓ	0,0735	0,2883	0	1,6676	0
ΣΕΠ	0	0	0	0	0

Πίνακας 4.9: Βασικά στατιστικά μεγέθη της τυπικής απόκλισης της μηνιαίας κατείσδυσης στον υπόγειο υδροφορέα για την περίοδο 1960 – 2058 για το σενάριο A2, όπως προκύπτει από το μοντέλο UTHBAL (mm).

Αποτελέσματα στοχαστικής ανάλυσης για την τυπική απόκλιση μηνιαίας επιφανειακής φόρτισης					
Μήνας	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Ελάχιστο	Μέγιστο	Διάμεσος
ΟΚΤ	2,4121	4,5392	0	23,9809	0
ΝΟΕ	1,7146	2,0259	0	7,6093	0,8509
ΔΕΚ	1,2599	1,0211	0	5,77	1,1184
ΙΑΝ	2,8141	1,1788	0,521	8,7187	2,6475
ΦΕΒ	4,5034	1,283	1,7301	9,7321	4,3948
ΜΑΡ	3,1252	0,5902	2,0839	4,7649	3,0683
ΑΠΡ	2,9551	0,5328	1,6613	4,3131	2,9621
ΜΑΪ	1,1869	1,0205	0	5,787	0,9814
ΙΟΥΝ	0,5108	0,6643	0	2,8368	0,2294
ΙΟΥΛ	0,1255	0,4711	0	3,7946	0
ΑΥΓ	0,5129	2,0077	0	11,6131	0
ΣΕΠ	0	0	0	0	0



Σχήμα 4.15 : Μία τυχαία χρονοσειρά κατεισδυσης, περίοδος 1960-2058



Σχήμα 4.16: Η100στή χρονοσειρά κατεισδυσης, περίοδος 1960-2058



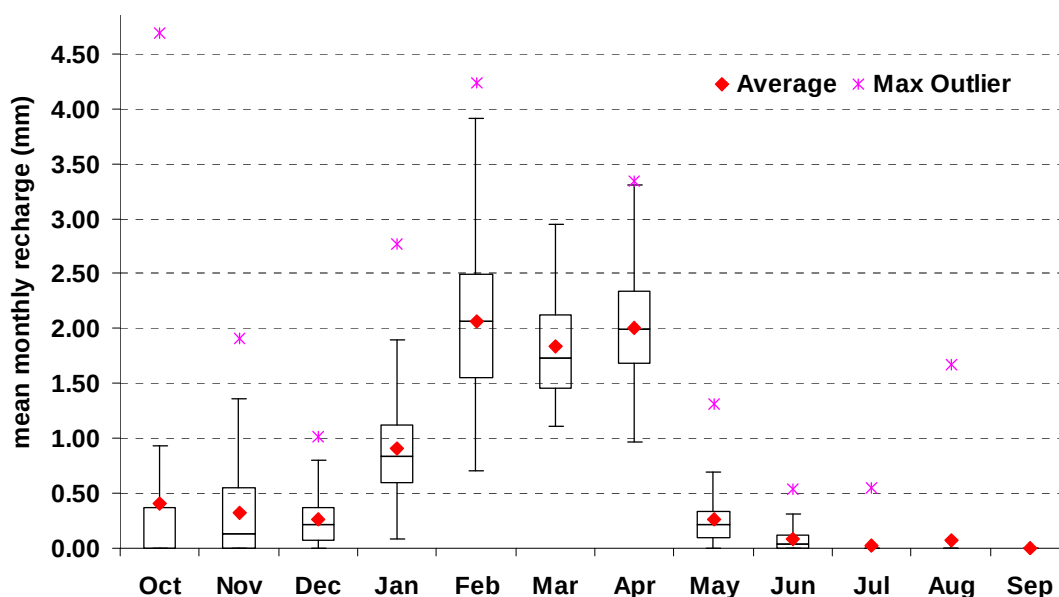
Σχήμα 4.17 : Μέση τιμή μηνιαίας κατείσδυσης της επιφανειακής υετόπτωσης της λεκάνης απορροής της Κάρλας

Πίνακας 4.10: Βασικά στατιστικά μεγέθη μηνιαίας κατείσδυσης στον υπόγειο υδροφορέα για την περίοδο 1960 – 2058 για το σενάριο B2, όπως προκύπτει από το μοντέλο UTHBAL (mm).

Αποτελέσματα στοχαστικής ανάλυσης μέσης μηνιαίας επιφανειακής φόρτισης					
Μήνας	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Ελάχιστο	Μέγιστο	Διάμεσος
ΟΚΤ	0,4025	0,7943	0	4,6762	0
ΝΟΕ	0,319	0,4107	0	1,9319	0,1349
ΔΕΚ	0,2584	0,2362	0	1,0094	0,2202
ΙΑΝ	0,9093	0,4862	0,0789	2,7631	0,8388
ΦΕΒ	2,061	0,6862	0,7077	4,255	2,0805
ΜΑΡ	1,8344	0,4786	1,1105	2,9659	1,7401
ΑΠΡ	1,9711	0,4872	0,9746	3,2727	1,9759
ΜΑΪ	0,2585	0,2387	0	1,3165	0,2069
ΙΟΥΝ	0,0859	0,1183	0	0,5461	0,0341
ΙΟΥΛ	0,0182	0,0676	0	0,5433	0
ΑΥΓ	0,0736	0,2891	0	1,6781	0
ΣΕΠ	0	0	0	0	0

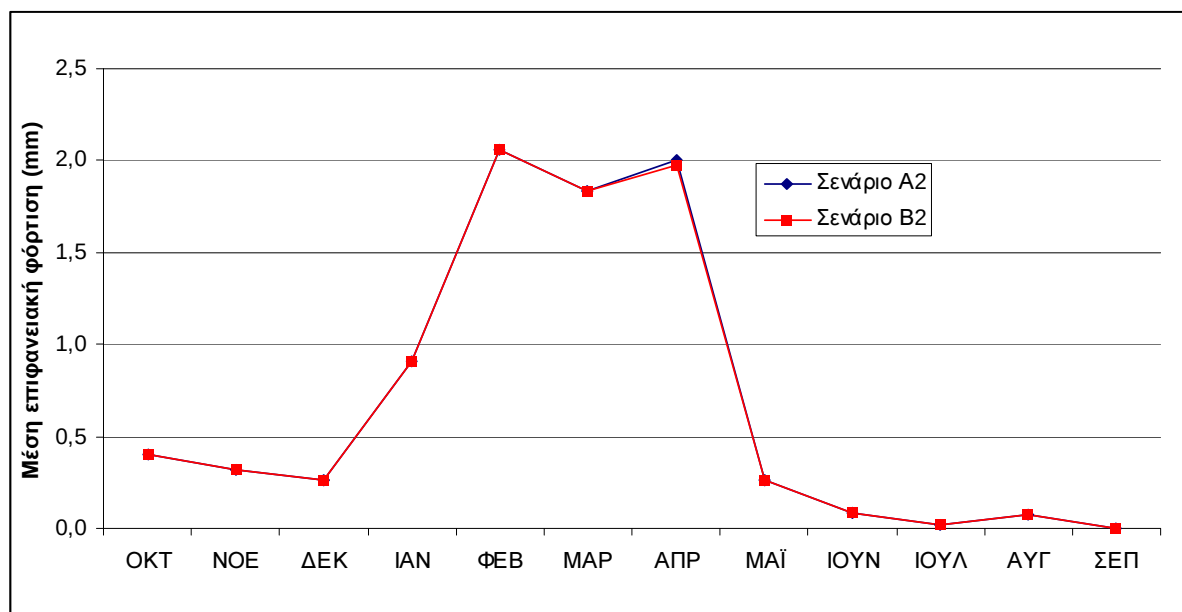
Πίνακας 4.11: Βασικά στατιστικά μεγέθη της τυπικής απόκλισης της μηνιαίας κατείσδυσης στον υπόγειο υδροφόρο για την περίοδο 1960 – 2058 για το σενάριο B2, όπως προκύπτει από το μοντέλο UTHBAL (mm).

Αποτελέσματα στοχαστικής ανάλυσης για την τυπική απόκλιση μηνιαίας επιφανειακής φόρτισης					
Μήνας	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Ελάχιστο	Μέγιστο	Διάμεσος
ΟΚΤ	2,4165	4,5419	0	23,9655	0
ΝΟΕ	1,7179	2,027	0	7,6291	0,8557
ΔΕΚ	1,2542	1,0148	0	5,7782	1,1505
ΙΑΝ	2,8103	1,1856	0,5046	8,7542	2,6216
ΦΕΒ	4,5045	1,2859	1,671	9,728	4,3869
ΜΑΡ	3,1168	0,5913	2,0927	4,7574	3,0593
ΑΠΡ	2,935	0,5345	1,666	4,2785	2,9067
ΜΑΪ	1,1793	1,0148	0	5,7481	0,9789
ΙΟΥΝ	0,5071	0,6588	0	2,7634	0,2514
ΙΟΥΛ	0,1269	0,4713	0	3,7837	0
ΑΥΓ	0,5132	2,0132	0	11,6857	0
ΣΕΠ	0	0	0	0	0



Σχήμα 4.18:Θηκόγραμμα μηνιαίας κατείσδυσης για την περίοδο 2009 έως 2058 για το σενάριο A2.

Στα παραπάνω σχήματα παρουσιάζονται οι στατιστικές χαρακτηριστικές της κατείδουσας εκτιμώμενης από τις παραμέτρους του υδρολογικού μοντέλου για την περίοδο προσομοίωσης Οκτώβριος 1960 έως Σεπτέμβριος 2058. Σενάρια A2 και B2.



Σχήμα 4.19 : Σύγκριση σεναρίων. Μέση τιμή μηνιαίας κατείδουσας της επιφανειακής υετόπτωσης της λεκάνης απορροής της Κάρλας για την περίοδο 1960-2058

Συγκρίνοντας τα δύο κλιματικά σενάρια παρατηρείται ότι το A2 σενάριο εμφανίζει ελαφρώς πιο έντονη μεταβολή σε σχέση με το σενάριο B2 όπως και ήταν αναμενόμενο καθώς βασίζεται σε πιο ακραία σενάρια εκπομπής CO₂ και οδηγεί σε πιο έντονη αύξηση του φαινομένου του θερμοκηπίου. Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι σταματάει να εξετάζεται ο υδροφορέας για το σενάριο B2, αφού καθ' όλη τη διάρκεια της παραπάνω εργασίας δεν παρατηρηθήκαν αξιόλογες διαφορές με το σενάριο A2.

4.4 Προσομοίωση Υπόγειου Υδροφορέα

Ο υπόγειος υδροφορέας της Κάρλας προσομοιώθηκε από τον κώδικα MODFLOW 2000 (Σιδηρόπουλος, 2004) με ένα κάνναβο 12500 κελιών, με βασική διάσταση 200 m X 200 m, και πύκνωσή του στις περιοχές των γεωτρήσεων. Η επιλογή του συγκεκριμένου πεδίου έρευνας είχε ως κριτήριο αφενός τη σχετικά απλή δομή του υδροφορέα στην περιοχή και αφετέρου τη λειτουργικότητα αυτού αναφορικά με τις δραστηριότητες που συνεπάγονται κατανάλωση υπόγειου νερού (ύδρευση, άρδευση κλπ). Ως εκ τούτου, από ένα σύνολο καρστικών και προσχωματικών υδροφόρων στρωμάτων το ενδιαφέρον περιορίστηκε στην πεδινή περιοχή της λίμνης και συγκεκριμένα στον υδροφόρο ορίζοντα των σύγχρονων προσχωματικών αποθέσεων. Την επιλογή αυτή ενίσχυσε και η γενική παραδοχή των υφιστάμενων μελετών σχετικά με την ανυπαρξία υδραυλικής επικοινωνίας μεταξύ καρστικών κρασπέδων και προσχωματικών υδροφοριών. Ουσιαστικά πρόκειται για τέσσερις ζώνες υδροφορίας της υδρογεωλογικής λεκάνης της Ανατολικής Θεσσαλίας, οι οποίες αντιμετωπίστηκαν ως ενιαίος υδροφορέας, εξαιτίας της πιεζομετρικής τους συνέχειας και χάριν απλούστευσης του προβλήματος.

Για το κατακόρυφο επίπεδο διακρίνονται τρεις τύποι υδροφορέων: οι αργιλοαμμώδεις λιμναίες αποθέσεις, οι αδρομερείς προσχώσεις και τα κορήματα με τα μάρμαρα (Μπεζές 2004). Οι τρεις παραπάνω υδροφόροι ορίζοντες είναι τοποθετημένοι ο ένας επάνω στον άλλο (επάλληλοι ορίζοντες).

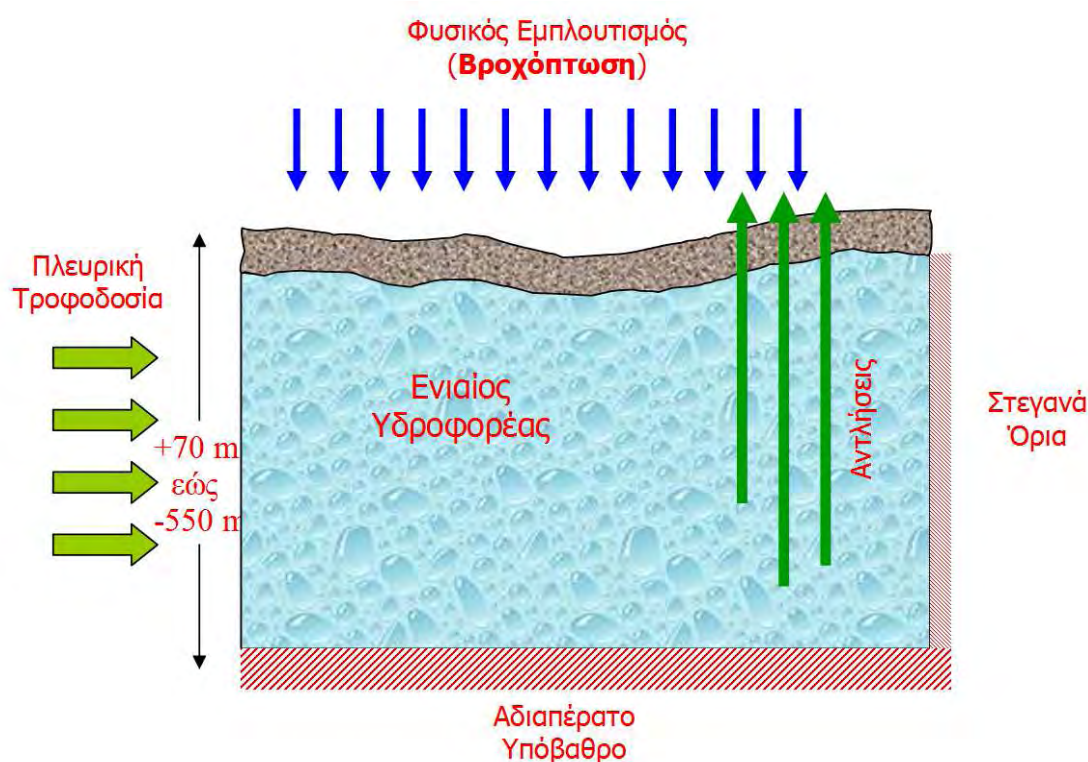
Η προσομοίωση περιορίστηκε στα δύο πρώτα στρώματα, διότι :

- η υδραυλική επικοινωνία αυτών των δύο πρώτων υδροφορέων με τον υδροφορέα των μαρμάρων είναι αρκετά μικρή σε σχέση με την μεταξύ τους υδραυλική επικοινωνία.
- ο υδροφορέας των μαρμάρων δεν συνεισφέρει στις απολήψεις των γεωτρήσεων, για τις αρδευτικές και υδρευτικές ανάγκες.

Οι δύο αυτοί υδροφορείς προσομοιώθηκαν στο Modflow με ένα κατακόρυφο επίπεδο (layer). Αντιμετωπίστηκαν ουσιαστικά σαν ένας υδροφορέας.

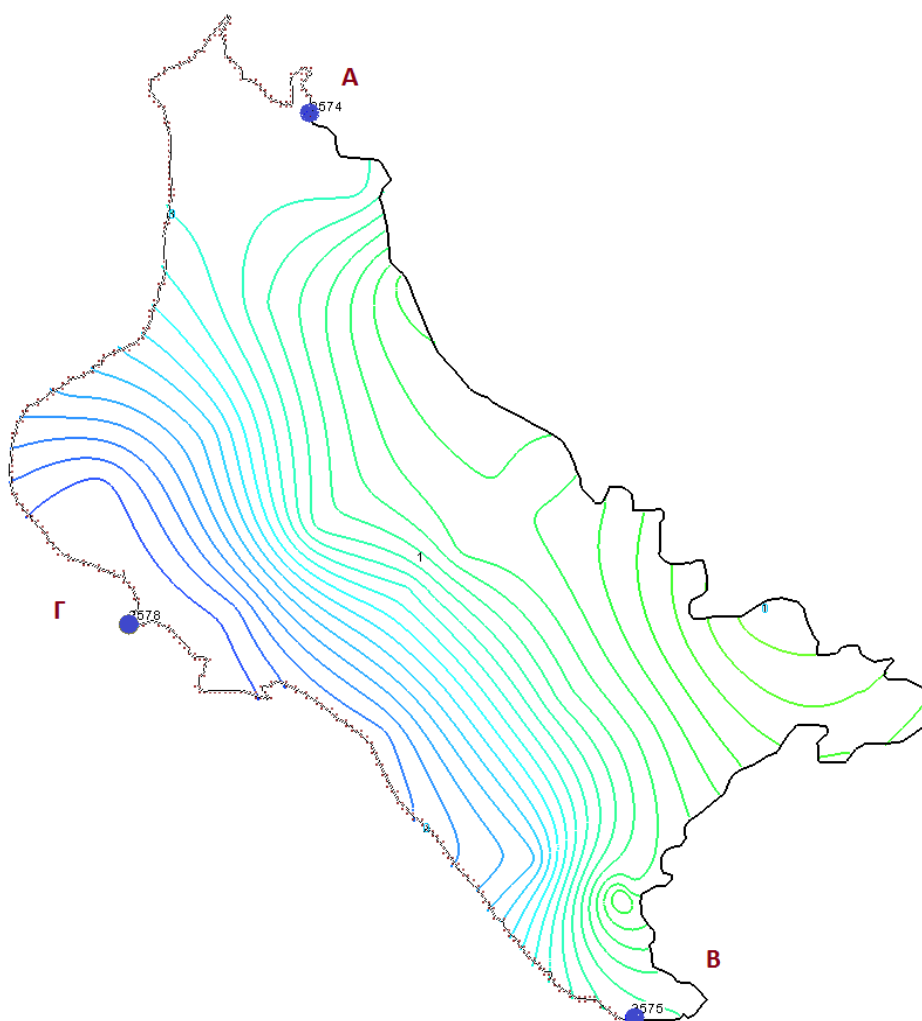
Αρχικά εισήχθη ένα προϋπάρχον μοντέλο της περιοχής - ενός επιπέδου- που περιείχε μία αρχική εκτίμηση των υδραυλικών αγωγιμοτήτων και των επαναφορτίσεων. Το μοντέλο αυτό είχε δομηθεί και βαθμονομηθεί για την

περίοδο από την 1η Ιανουαρίου 1987 έως την 1η Ιανουαρίου 1997. (Σιδηρόπουλος, 2004). Στην παρούσα μελέτη επεκτείναμε την δόμηση από το 1960. Η περίοδος προσομοίωσης είναι από την 1η Οκτώβρη 1960 έως την 1η Οκτώβρη 2058. Ως αρχική συνθήκη επιλέχθηκε η 1η Οκτώβρη 1960. η χρονική περίοδος προσομοίωσης είναι 98 χρόνια, δηλαδή για 1176 χρονικές περιόδους (stress periods).



Σχήμα 4.20 : Τομή της υπό προσομοίωση περιοχής, όπως αυτή αναπαρίσταται από το εννοιολογικό μοντέλο που καταρτίστηκε

Χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις από 27 πηγάδια παρατήρησης (πίνακας 4.12). Τα πηγάδια μέτρησαν το βάθος που παρατηρήθηκε ο υπόγειος υδροφόρας και με αφαίρεση από το υψόμετρο της περιοχής προέκυψαν τα αρχικά απόλυτα ύψη. Επίσης χρησιμοποιώντας τα πηγάδια παρατήρησης P6L, PZ7, E3, SR32 υπολογίστηκαν τα σταθερά υδραυλικά φορτία τριών σημείων (Α,Β,Γ).

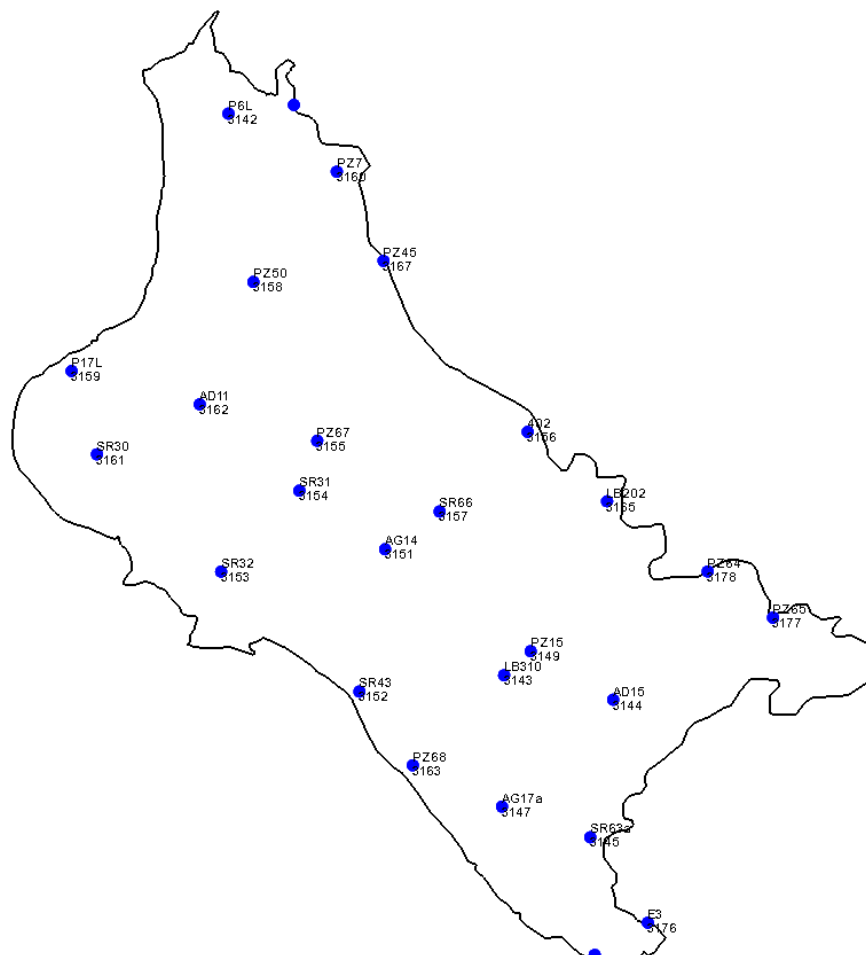


Σχήμα 4.21: Οι θέσεις των σημείων Α, Β, Γ

Πίνακας 4.12 Πηγάδια παρατήρησης των αρχικών υψών της 1^{ης} Ιανουαρίου 1987.

Πηγάδι	X	Y	Αρχικά Ύψη (m)
P6L	637874	4394211	52.82
LB310	649089	4371386	48.93
AD15	653522.3	4370390	40.8
SR63a	652594.2	4364801	34.68
SR63b	652600	4364806	44.45
AG17a	649002	4366046	59.82
AD13a	653349.3	4370961	43.15
PZ15	650170.5	4372364	40.62
AD13	653227.5	4370877	37.2
AG14	644246	4376506	51.66
SR43	643202	4370724	64.4
SR32	637576.8	4375596	68.35

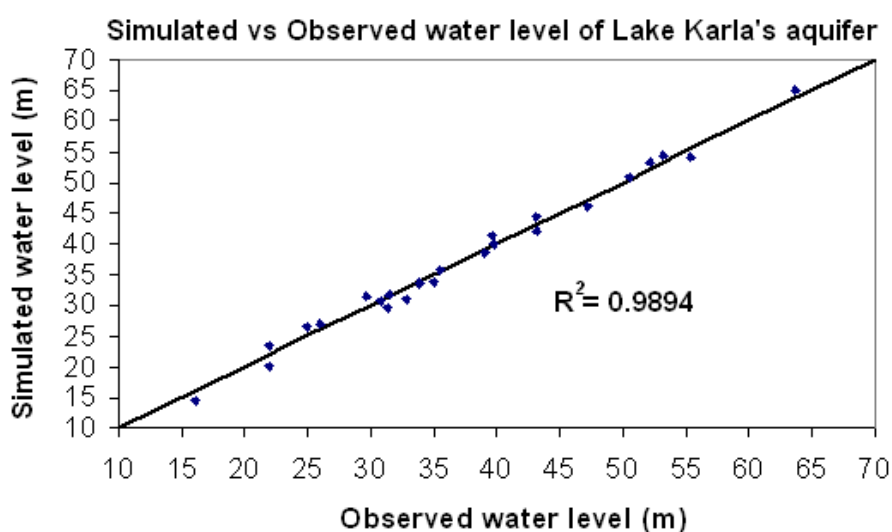
SR31	640758.1	4378887	58.33
PZ67	641486	4380913	54.2
402	650046.8	4381276	43.69
SR66	646465.5	4378039	39.8
PZ50	638888	4387371	53.12
P17L	631492	4383752	67.52
PZ7	642281.8	4391853	56.5
SR30	632522.3	4380364	72.95
AD11	636705.3	4382399	59.9
PZ68	645376.4	4367725	71.77
E3	654937	4361328	47.98
LB202	653280	4378456	34.25
PZ65	660104.5	4373872	27.78
PZ45	644182	4388225	41.08
PZ64	657371.6	4375602	32.45



Σχήμα: 4.22. Ο υπόγειος υδροφορέας της Κάρλας όπως αυτός προσομοιώθηκε με τις θέσεις των πηγαδιών παρατήρησης.

Οι εισροές στο πεδίο προέρχονται από την κατείσδυση, λόγω της βροχόπτωσης και από τις πλευρικές εισροές στο δυτικό όριο του. Η κατείσδυση εισήχθη μηνιαίως στο μοντέλο και είναι προϊόν της μελέτης Υδατικού Ισοζυγίου της Λεκάνης Απορροής της Κάρλας από τον Καθηγητή Θ. Λουκά (Loukas et al., 2007). Τα δεδομένα της κατείσδυσης αποτελούν 100 χάρτες απορροής η διεξαγωγή των οποίων περιγράφηκε στην παραπάνω παράγραφο. Οι χάρτες εισήχθησαν στοχαστικά στο πρόγραμμα MODFLOW. Τα δεδομένα της κατείσδυσης αυξήθηκαν κατά 10% εκφράζοντας την επιστροφή στον υπόγειο υδροφορέα του νερού της άρδευσης. Η πλευρική εισροή προσομοιώθηκε από το πακέτο General Head Boundary. Δόθηκε η τιμή της παραμέτρου conductance ίση με $0,0094 \text{ (m}^2/\text{d)(m)}$ (SOGREAH-Grénoble1974).

Τα δεδομένα από τα 27 πηγάδια παρατήρησης χρησιμοποιήθηκαν τόσο για τα αρχικά ύψη κατανομής (01.01.1987), όσο και για τη βαθμονόμηση του μοντέλου για την 01.01.1997. Η υδραυλική αγωγιμότητα ήταν η παράμετρος για την οποία το MODFLOW βαθμονομήθηκε και ήταν η μόνη υδρογεωλογική παράμετρος που διανέμεται χωρικά, ενώ οι άλλες είχαν την ίδια τιμή σε όλη την περιοχή. Η βαθμονόμηση επιτυγχάνεται με την χρήση πιλοτικών σημείων προσέγγισης του μοντέλου PEST ευρέσεως του βέλτιστου μοντέλου Ημιμεταβλητότητας. Στο παρακάτω σχήμα η γραφική παράσταση δείχνει τις παρατηρούμενες τιμές έναντι των προσομοιωμένων. Η υψηλή τιμή του συντελεστή συσχέτισης (R^2) και οι τιμές που σύγκλινουν σε 1:1 γραμμή εξάγουν την επιτυχία της βαθμονόμησης. Απλή παρεμβολή Kriging χρησιμοποιήθηκε για την χωρική κατανομή των 15 στοιχείων διασποράς της υδραυλικής αγωγιμότητας (Μυλόπουλος και Σιδηρόπουλος, 2009).

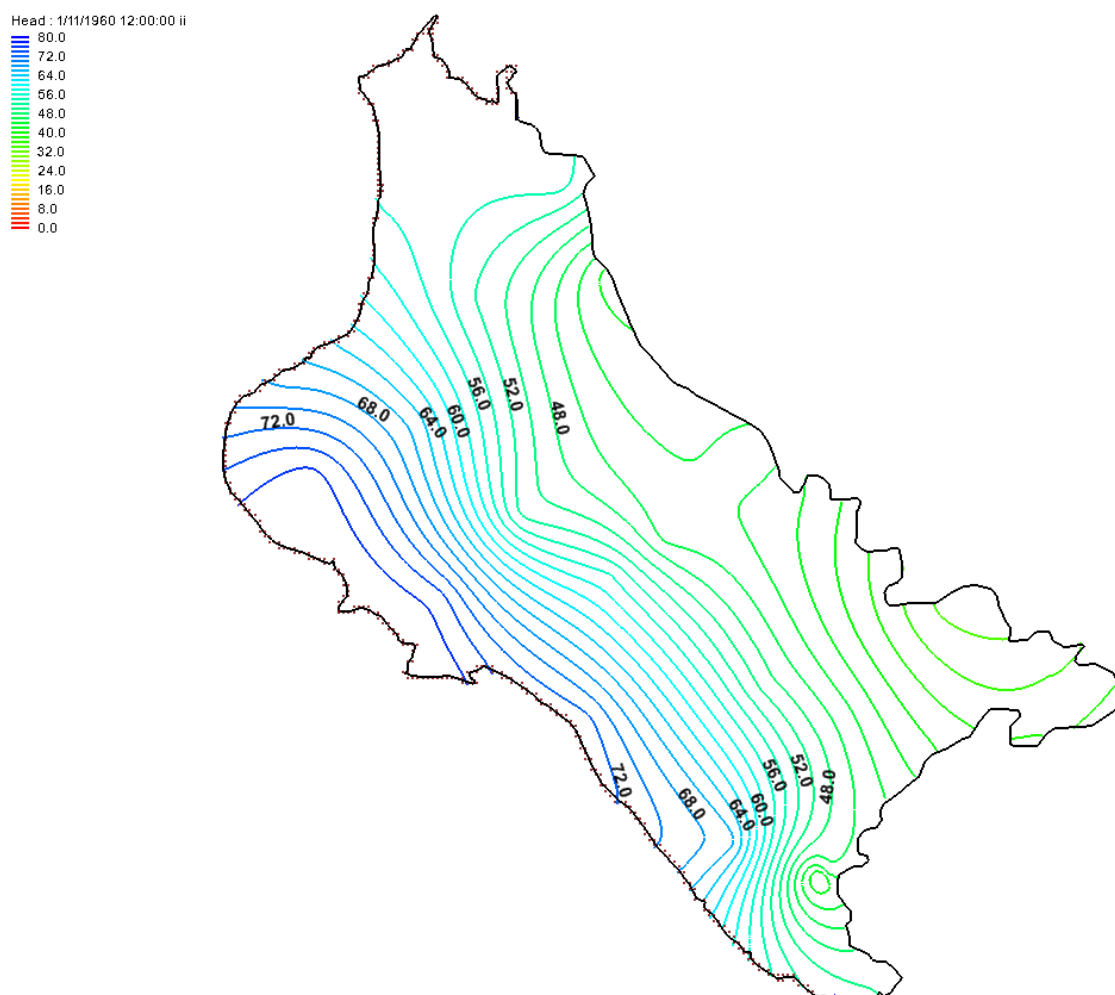


Σχήμα 4.23: Ρύθμιση του μοντέλου προσομοίωσης του υπόγειου υδροφορέα για την 1/1/1987.

4.4.1 Προσομοίωση Φυσικού Υδροφορέα

Όπως επισημάνθηκε και προηγουμένως, για την υπόγεια προσομοίωση εισήχθη ένα προϋπάρχον μοντέλο της περιοχής - ενός επιπέδου- που περιείχε μία αρχική εκτίμηση των υδραυλικών αγωγιμοτήτων και των επαναφορτίσεων. Το μοντέλο αυτό περιείχε γεωτρήσεις άντλησης οι οποίες αφαιρέθηκαν για την προσομοίωση του φυσικού υδροφορέα. Αφαιρώντας τα πηγάδια άντλησης το μοντέλο είναι έτοιμο να προσδιορίσει την επίπτωση τις κλιματικής αλλαγής στον υδροφορέα.

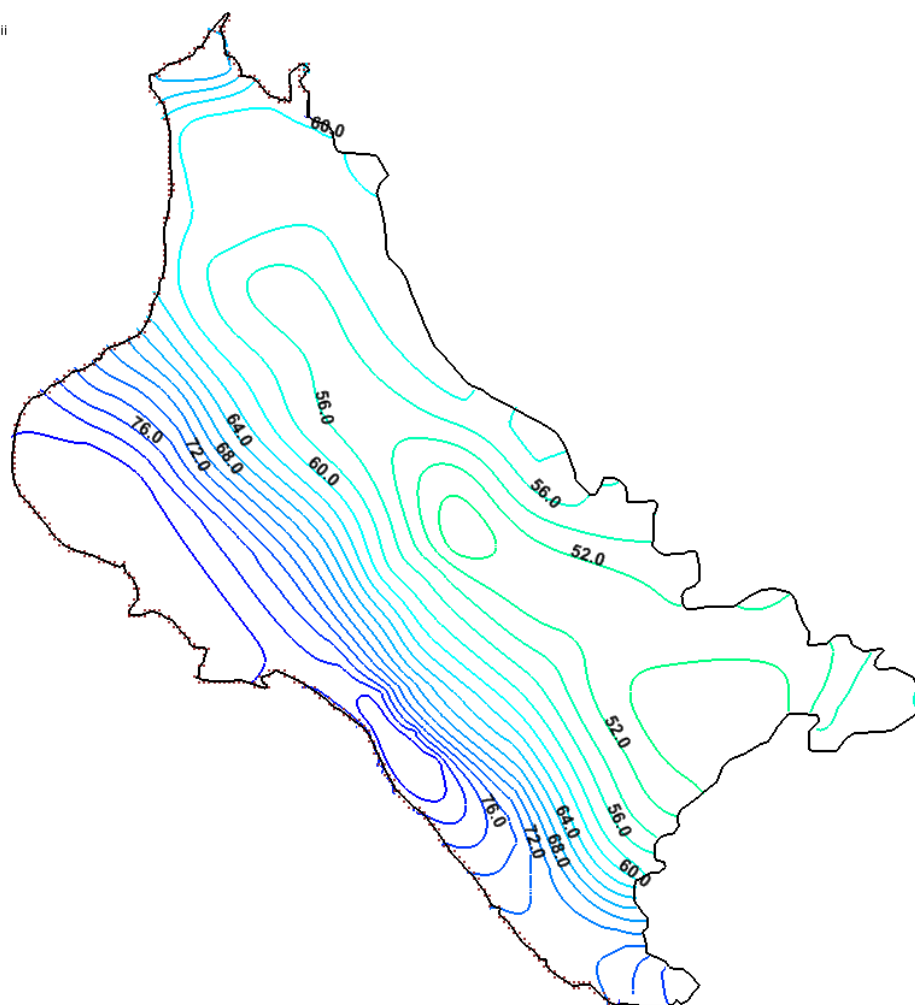
Τα δεδομένα εισόδου περιγράφηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Εισάγοντας τους 100 χάρτες κατείσδυσης παράγονται 100 προσομοιώσεις για την εκτίμηση του φυσικού υδροφορέα για την περίοδο 1060 - 20058.



Σχήμα 4.24 : Απεικόνιση του υπόγειου υδροφορέα για τα υδραυλικά ύψη (1/1/1960).

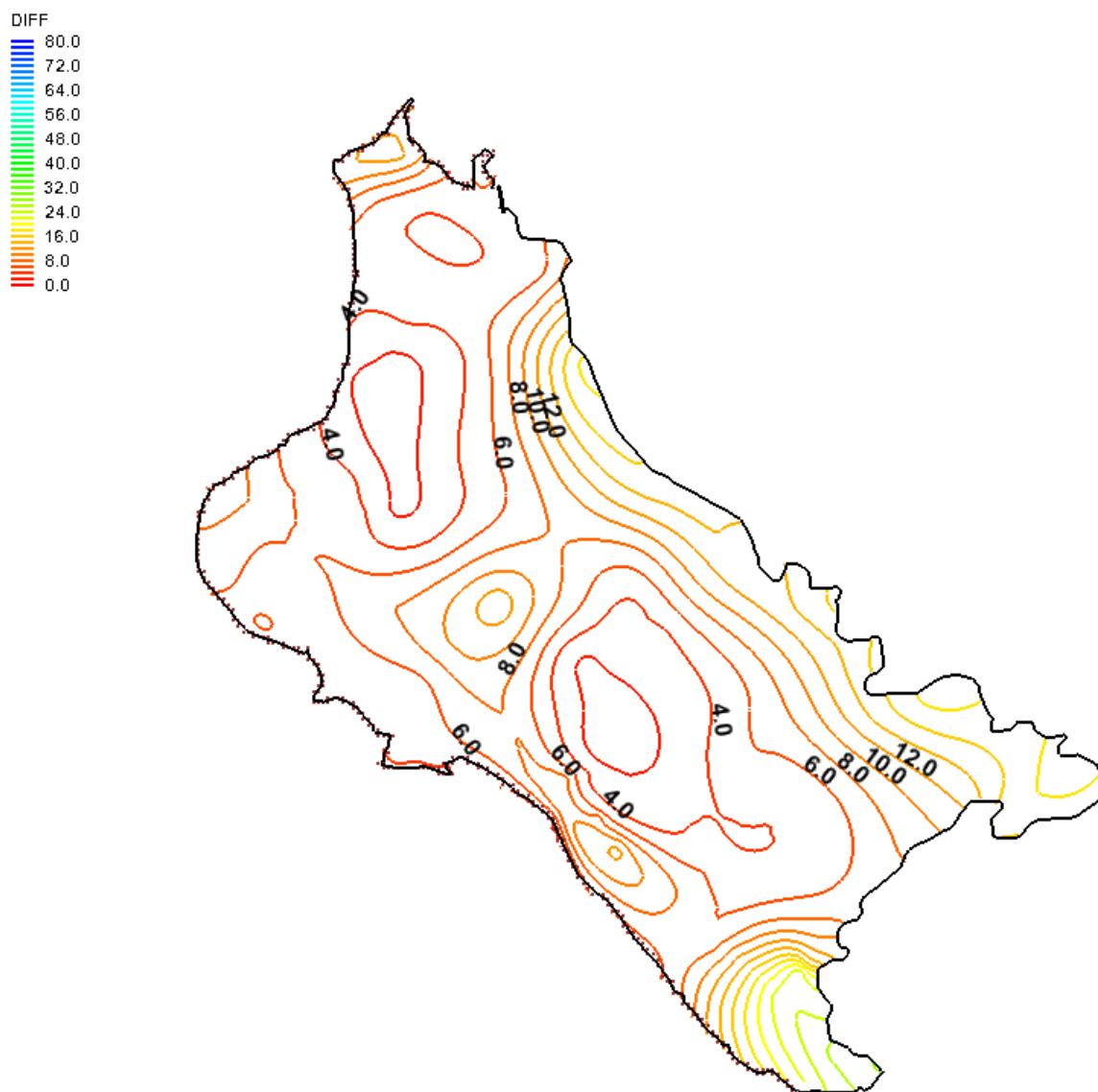
Head : 1/10/2058 12:00:00 ii

80.0
72.0
64.0
56.0
48.0
40.0
32.0
24.0
16.0
8.0
0.0



Σχήμα: 4.25: Υδραυλικά ύψη για το τέλος της προσομοίωσης 1/10/2058

Παρατηρείται ότι οι τιμές των υδραυλικών υψών αυξάνονται στο τέλος της προσομοίωσης (2058) συγκριτικά με αυτές της αρχής (1960).



Σχήμα 4.26 : Διαφορά Υδραυλικών υψών 2058 με 1960

Στο σχήμα 4.26 παρουσιάζεται η σύγκριση των απόλυτων υψομέτρων υδροφορέα στο έτος 1960 σε σχέση με αυτά του 2058. Δεν παρατηρούνται αρνητικές τιμές στην παραπάνω εικόνα του MODFLOW. Συμπεραίνουμε επομένως ότι υπάρχει αύξηση των υδραυλικών υψών του φυσικού υδροφορέα στο μέλλον.

Αξίζει να εξεταστούν τα αθροιστικά αποτελέσματα (CUMULATIVE VOLUMES) του ογκομετρικού ισοζυγίου (VOLUMETRIC BUDGET) για επίλυση της 1^{ης} (run 1) και τελευταίας χρονοσειράς (run 100).

Πίνακας 4.13 : Υδατικό ισοζύγιο υπόγειου υδροφορέα του 1^{ου} τρεξίματος την 1176^η χρονική περίοδο (stress period).

	ΕΙΣΡΟΕΣ (m ³)	ΕΚΡΟΕΣ (m ³)
Αποθηκευμένος Όγκος	854588992	2577291520
Όριο Σταθερού Φορτίου	0	0
Πηγάδια Άντλησης	0	0
Όριο Μεταβλητού Φορτίου	17355162	136183008
Κατείσδυση	1841557248	0
ΣΥΝΟΛΟ	2713501402	2713474528

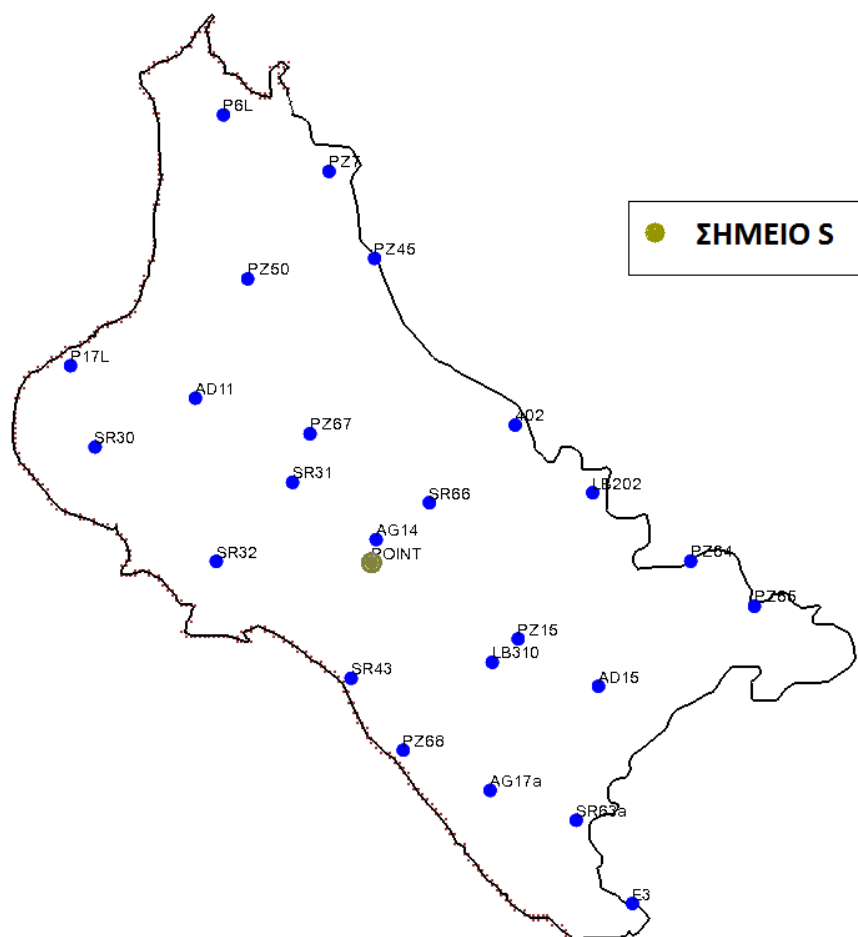
Πίνακας 4.14 : Υδατικό ισοζύγιο υπόγειου υδροφορέα του 100^{ου} τρεξίματος την 1176^η χρονική περίοδο (stress period).

	ΕΙΣΡΟΕΣ (m3)	ΕΚΡΟΕΣ (m3)
Αποθηκευμένος Όγκος	754297088	3011561472
Όριο Σταθερού Φορτίου	0	0
Πηγάδια Άντλησης	0	0
Όριο Μεταβλητού Φορτίου	17097506	129206352
Κατείσδυση	2369409536	0
ΣΥΝΟΛΟ	3140804130	3140767824

Στο παραπάνω πίνακα περιγράφεται το υδατικό ισοζύγιο του υδροφορέα στο τέλος της περιόδου προσομοίωσης. Η ανάλυση του υδατικού ισοζυγίου στο τέλος της 1176^{ης} χρονικής περιόδου (stress period), δείχνει ότι η διαφορά όγκου του νερού που εκρέει από το νερό που εισδύει στον υδροφορέα λόγω επιφανειακής φόρτισης παραμένει θετική, οπότε οι ποσότητες που απορρέουν καλύπτονται από τα ανανεώσιμα του υδροφορέα.

4.4.2 Εκτίμηση κλιματική αλλαγής σε ένα σημείο του Υδροφορέα

Στη συνέχεια εξετάζουμε την επίπτωση της κλιματικής αλλαγής σε ένα τυχαίο σημείο του υπόγειου υδροφορέα της Κάρλας. Έχοντας προσομοιώσει τον υπόγειο φυσικό υδροφορέα χωρίς γεωτρήσεις, εισάγεται ένα σημείο παρατήρησης και εκτελείτε ξανά το μοντέλο 100 φορές. Το τυχαίο σημείο έχει συντεταγμένες $x=644060$, $y=4375510$ και βρίσκεται κεντρικά του υδροφορέα, γειτονικά στο πηγάδι παρατήρησης AG14. Το σημείο εισήχθη στο μοντέλο σαν πηγάδι παρατήρησης.



Σχήμα 4.27 : Οι θέσεις των πηγαδιών παρατήρησης, και το υπό εξέταση σημείο S

Properties

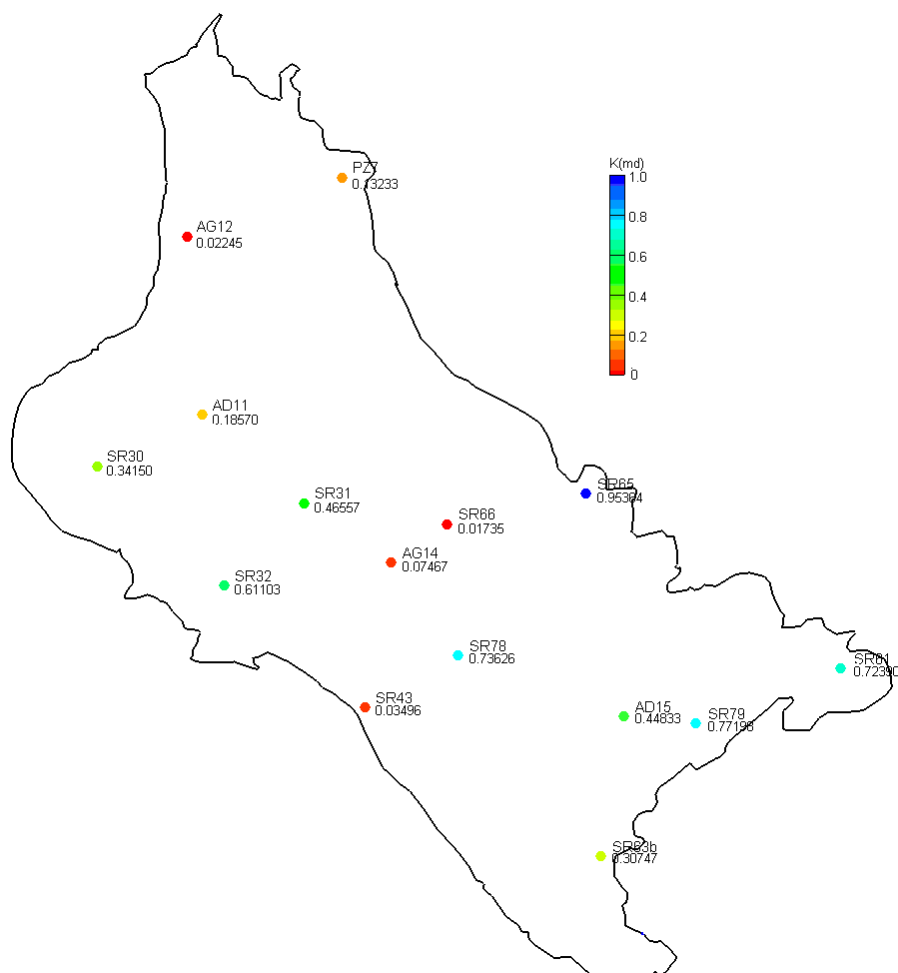
Feature type: Points Show: Selected BC type: ANY/NONE

☒ Show point coordinates

ID	Name	X	Y	Z	Type	Layer	Obs. Trans. Head	Obs. Trans. Head interval	Obs. Trans. Head conf(%)	Obs. Trans. Head std. dev
3181	POINT	644060.0	4375510.0	0.0	NONE	1	...	1.0	95	0.51021

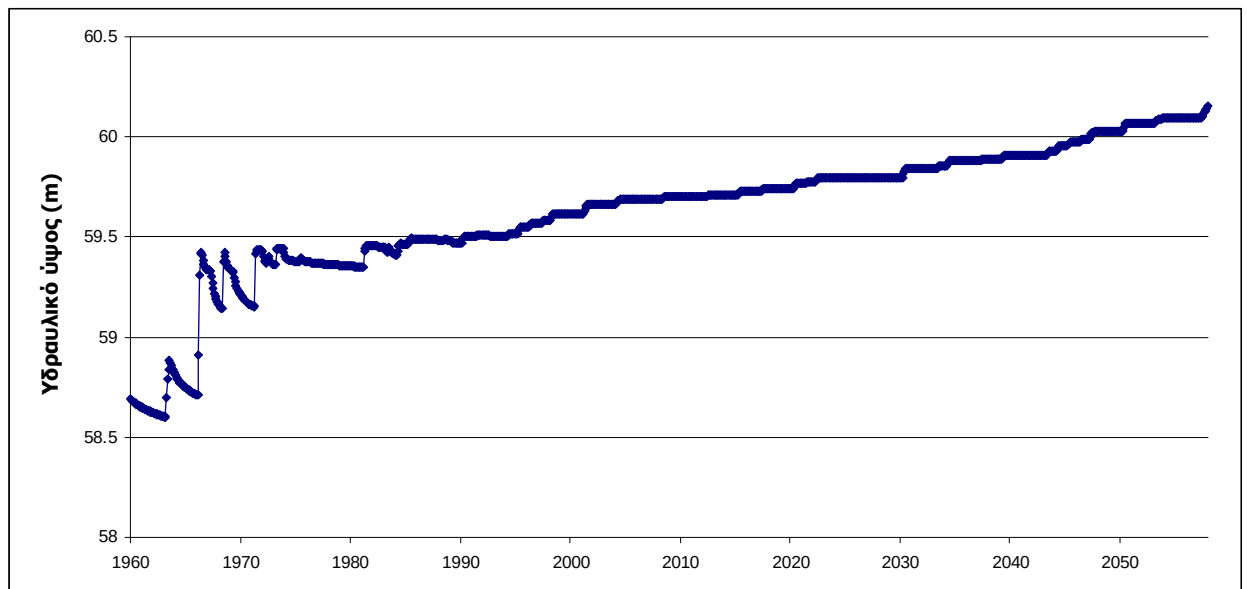
Help... Add Point Delete Point OK Cancel

Σχήμα 4.38 : Εισαγωγή του σημείου στο μοντέλο



Σχήμα. 4.29: Οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας σε μέτρα/ημέρα και οι θέσεις από τις γεωτρήσεις από τις οποίες πάρθηκαν.

Το μοντέλο έτρεξε ξανά 100 φορές, έχοντας αυτή τη φορά εισαχθεί το σημείο S. Επομένως παρήχθησαν 100 χρονοσειρές υδραυλικών φορτιών για το σημείο S, προς επεξεργασία.

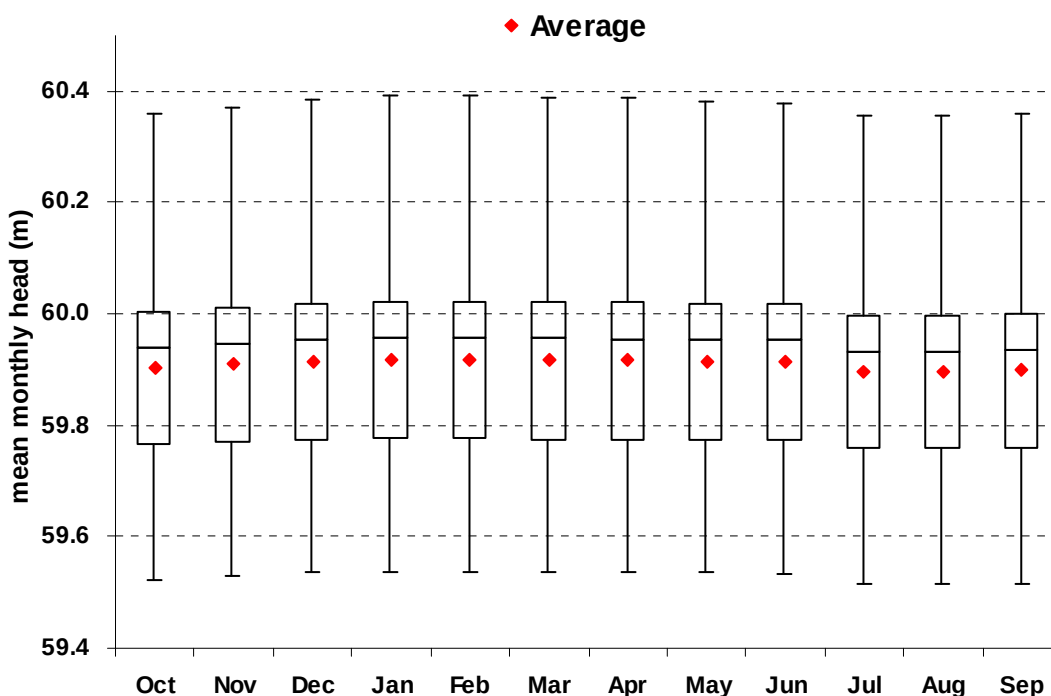


Σχήμα 4.30: Απόλυτο υψόμετρο υδροφόρου ορίζοντα 100 χρονοσειρών για το σημείο S.

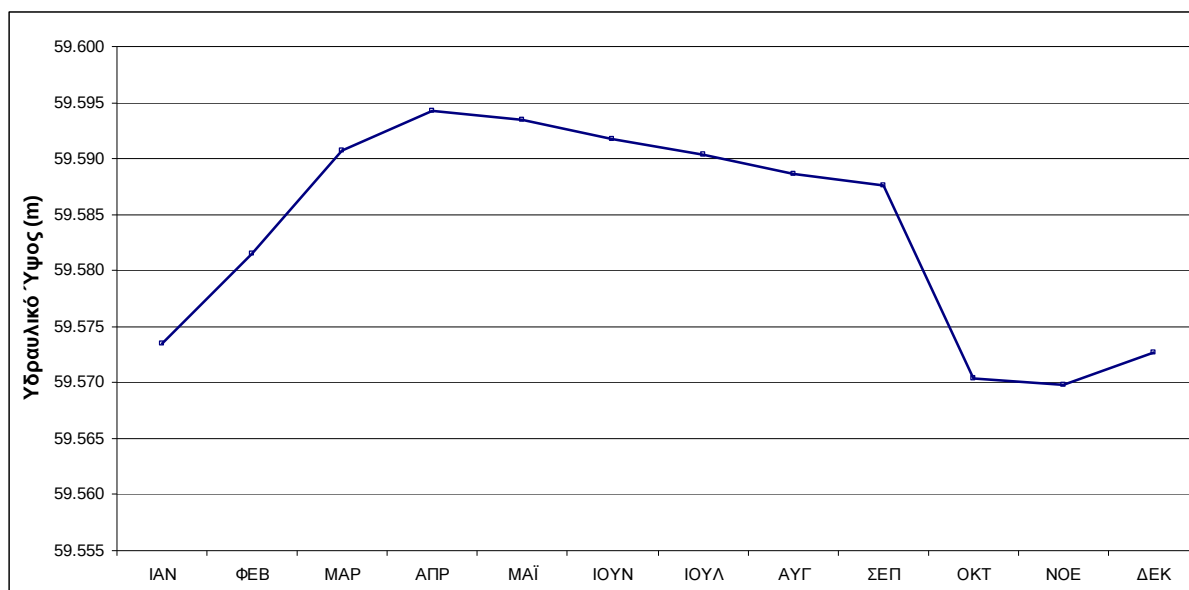
Στο παραπάνω σχήμα απεικονίζονται οι μέσες τιμές των 100 χρονοσειρών υδραυλικών υψών του σημείου S. Παρατηρείται ότι ο υδροφόρος ορίζοντας αυξάνει με την πάροδο των χρόνων. Διακρίνονται επίσης αυξομειώσεις στα ιστορικά χρόνια.

Πίνακας 4.15: Βασικά στατιστικά μεγέθη μηνιαίου Υδραυλικού φορτίου του σημείου S του υδροφορέα για την περίοδο 1960 – 2058 (m).

Αποτελέσματα ανάλυσης μέσης τιμής 100 χρονοσειρών Υδραυλικών υψών του σημείου S για την περίοδο 1960-2058 (m)					
Μήνας	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Ελάχιστο	Μέγιστο	Διάμεσος
ΙΑΝ	59.9041	0.1834	59.5235	60.5418	59.9388
ΦΕΒ	59.9095	0.1833	59.5301	60.5471	59.9459
ΜΑΡ	59.9154	0.1830	59.5367	60.5516	59.9541
ΑΠΡ	59.9181	0.1829	59.5381	60.5538	59.9562
ΜΑΪ	59.9178	0.1832	59.5374	60.5537	59.9561
ΙΟΥΝ	59.9170	0.1834	59.5370	60.5537	59.9557
ΙΟΥΛ	59.9165	0.1837	59.5366	60.5534	59.9552
ΑΥΓ	59.9157	0.1840	59.5355	60.5531	59.9543
ΣΕΠ	59.9153	0.1845	59.5344	60.5561	59.9541
ΟΚΤ	59.8974	0.1825	59.5160	60.5281	59.9325
ΝΟΕ	59.8973	0.1830	59.5160	60.5279	59.9320
ΔΕΚ	59.8991	0.1835	59.5164	60.5375	59.9353



Σχήμα 4.31: Θηκόγραμμα μηνιαίου Υδραυλικού φορτίου του σημείου S του υδροφορέα για την περίοδο 1960 – 2058.

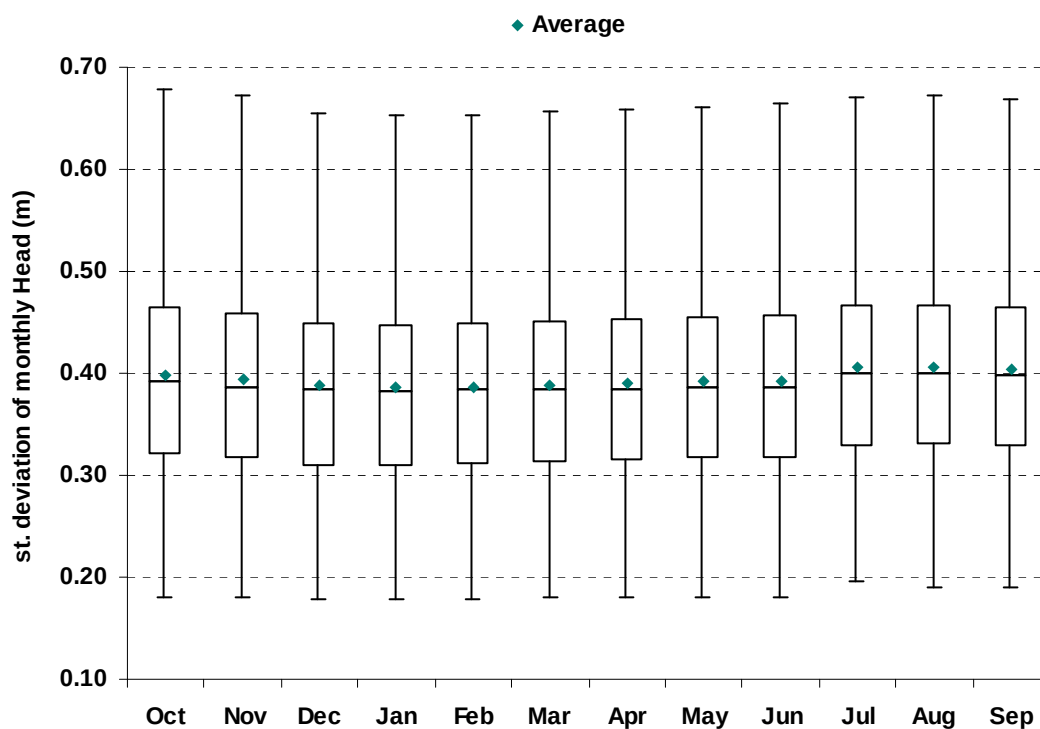


Σχήμα 4.32 : Απεικόνιση μέσω μηνιαίων Υδραυλικών φορτίων για την περίοδο 1960 - 2058

Από το παραπάνω γράφημα διαπιστώνεται ότι η στάθμη του υδροφορέα στο σημείο S είναι υψηλότερη τον μήνα Απρίλιο.

Πίνακας 4.16: Βασικά στατιστικά μεγέθη Τυπικής απόκλισης μηνιαίου Υδραυλικού φορτίου για το σημείο S του υδροφορέα, για την περίοδο 1960 – 2058.

Αποτελέσματα ανάλυσης Τυπικής απόκλισης μέσης τιμής 100 χρονοσειρών Υδραυλικών υψων 1960-2058					
Μήνας	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Ελάχιστο	Μέγιστο	Διάμεσος
ΙΑΝ	0.3986	0.1004	0.1807	0.7847	0.3920
ΦΕΒ	0.3938	0.1007	0.1797	0.7841	0.3872
ΜΑΡ	0.3882	0.1009	0.1785	0.7842	0.3838
ΑΠΡ	0.3865	0.1012	0.1786	0.7847	0.3822
ΜΑΪ	0.3872	0.1012	0.1791	0.7852	0.3835
ΙΟΥΝ	0.3886	0.1013	0.1796	0.7857	0.3843
ΙΟΥΛ	0.3898	0.1013	0.1802	0.7864	0.3851
ΑΥΓ	0.3914	0.1012	0.1808	0.7872	0.3862
ΣΕΠ	0.3924	0.1010	0.1813	0.7869	0.3872
ΟΚΤ	0.4056	0.0993	0.1956	0.7998	0.4002
ΝΟΕ	0.4063	0.0995	0.1911	0.8005	0.3996
ΔΕΚ	0.4041	0.0987	0.1911	0.7845	0.3978



Σχήμα 4.33: Θηκόγραμμα τυπικής απόκλισης μηνιαίου Υδραυλικού φορτίου του σημείου S του υδροφορέα για την περίοδο 1960 – 2058 (m)

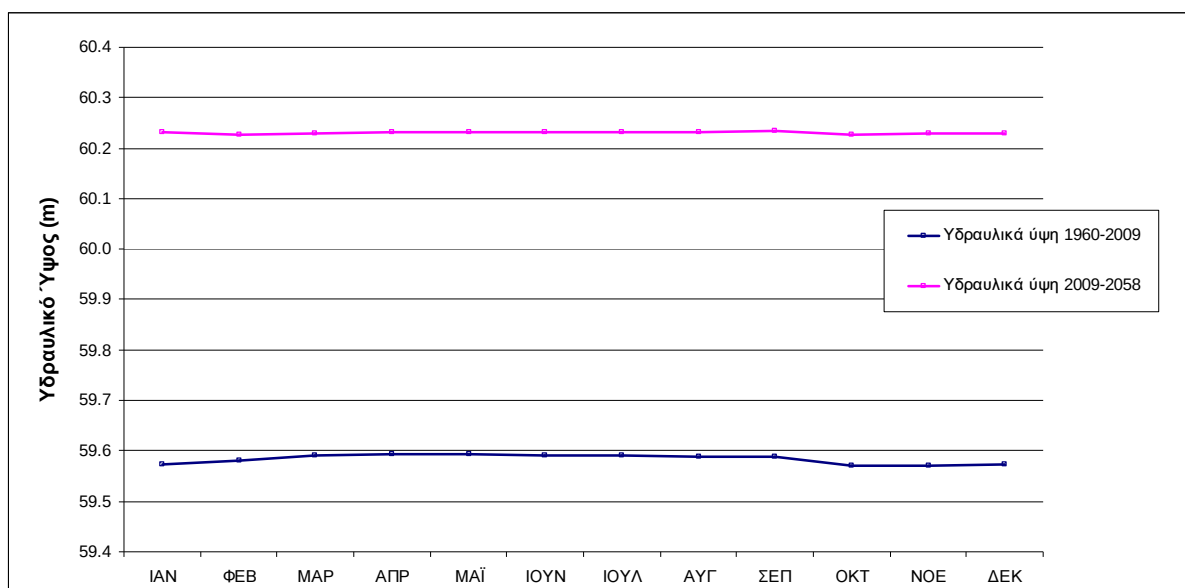
Στη συνέχεια χωρίζουμε τα δεδομένα μας σε 2 περιόδους. Η πρώτη από 1960 έως 2009 και η 2^η από 2009 έως 2058 για περαιτέρω επεξεργασία των αποτελεσμάτων και εκτίμηση της κλιματικής αλλαγής.

Πίνακας 4. 17: Βασικά στατιστικά μεγέθη μηνιαίου Υδραυλικού φορτίου του σημείου S του υδροφορέα για την περίοδο 1960 – 2009 (m).

Αποτελέσματα ανάλυσης μέσης τιμής 100 χρονοσειρών μέσης τιμής Υδραυλικών υψών 1960-2009 (m)					
Μήνας	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Ελάχιστο	Μέγιστο	Διάμεσος
ΙΑΝ	59.5735	0.1303	59.1854	60.2389	59.5775
ΦΕΒ	59.5816	0.1293	59.1952	60.2386	59.5833
ΜΑΡ	59.5907	0.1278	59.2055	60.2380	59.5931
ΑΠΡ	59.5943	0.1273	59.2065	60.2368	59.5995
ΜΑΪ	59.5934	0.1278	59.2049	60.2356	59.5971
ΙΟΥΝ	59.5918	0.1282	59.2038	60.2345	59.5955
ΙΟΥΛ	59.5904	0.1290	59.2029	60.2418	59.5938
ΑΥΓ	59.5887	0.1296	59.2005	60.2412	59.5923
ΣΕΠ	59.5876	0.1304	59.1982	60.2409	59.5916
ΟΚΤ	59.5704	0.1302	59.1802	60.2316	59.5787
ΝΟΕ	59.5699	0.1310	59.1800	60.2382	59.5782
ΔΕΚ	59.5727	0.1314	59.1801	60.2414	59.5804

Πίνακας 4.18: Βασικά στατιστικά μεγέθη μηνιαίου Υδραυλικού φορτίου του σημείου S του υδροφορέα για την περίοδο 2009 - 2058 (m)

Αποτελέσματα ανάλυσης μέσης τιμής 100 χρονοσειρών ανάλυσης μέσης τιμής Υδραυλικών υψών 2009-2058					
Μήνας	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Ελάχιστο	Μέγιστο	Διάμεσος
ΙΑΝ	60.23148	0.253731	59.77672	61.18663	60.25928592
ΦΕΒ	60.22791	0.252661	59.77467	61.17673	60.255135
ΜΑΡ	60.23077	0.253007	59.77653	61.18117	60.2589562
ΑΠΡ	60.2325	0.253198	59.77755	61.1836	60.2609122
ΜΑΪ	60.2328	0.253227	59.77758	61.18385	60.2616568
ΙΟΥΝ	60.23295	0.253259	59.77761	61.18406	60.2622532
ΙΟΥΛ	60.23314	0.253351	59.77763	61.18427	60.2626164
ΑΥΓ	60.23332	0.253438	59.77765	61.18448	60.2629854
ΣΕΠ	60.2336	0.253728	59.77767	61.18814	60.2632996
ΟΚΤ	60.22795	0.252687	59.77526	61.18065	60.25629551
ΝΟΕ	60.22838	0.252916	59.77528	61.18081	60.25635939
ΔΕΚ	60.2292	0.253205	59.77552	61.1824	60.25696449



Σχήμα 4.34: Σύγκριση μέσων μηνιαίων τιμών για τις 2 περιόδους.

Από την παραπάνω επεξεργασία διακρίνεται ότι το απόλυτο υψόμετρο του υδροφορέα αυξάνεται στο μέλλον. Παρατηρείται επομένως ότι η κλιματική αλλαγή δεν επηρεάζει με ταπείνωση τον φυσικό υδροφορέα της Κάρλας.

4.4.3 Προσομοίωση Υδροφορέα υπό συνθήκες εκμετάλλευσης

Στην παράγραφο αυτή εξετάζεται η περίπτωση του υδροφορέα της Κάρλας υπό συνθήκες ανθρώπινης εκμετάλλευσης. Για την προσομοίωση του φυσικού υδροφορέα, στις προηγούμενες παραγράφους, αφαιρέθηκαν οι γεωτρήσεις στο προϋπάρχον μοντέλο της περιοχής. Στην παρούσα περίπτωση το προϋπάρχον μοντέλο εκτελείτε με τις γεωτρήσεις.

Πρέπει να σημειωθεί ότι για την περίπτωση αυτή επιλύσαμε –τρέξαμε το μοντέλο μας για μία χρονοσειρά. Επιλέχθηκε τυχαία η χρονοσειρά 31. Επίσης αξίζει να τονιστεί ότι η εκροή από τον υπόγειο υδροφορέα της Κάρλας οφείλεται στο μεγαλύτερο βαθμό από την υπεράντληση των γεωτρήσεων και σε ένα πολύ μικρό ποσοστό στην κίνηση του νερού προς το γειτονικό υδροφορέα.

Το πεδίο μελέτης του προϋπάρχοντος μοντέλου χωρίστηκε σε επτά ζώνες άντλησης (Σχήμα 4.37), εκ των οποίων οι πέντε ανήκουν στο Νομό Μαγνησίας, ενώ οι άλλες δύο ζώνες ανήκουν στο Νομό Λαρίσης. Σύμφωνα με τη «Μελέτη Επαναδημιουργίας Λίμνης Κάρλας – Υποστηρικτική Υδρογεωλογική Μελέτη, 1999», η ευρύτερη περιοχή, γύρω από το μελλοντικό ταμιευτήρα της Κάρλας διαχωρίστηκε σε πέντε ζώνες. Ο διαχωρισμός αυτός λαμβάνει υπόψη τόσο τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά των υπογείων υδροφοριών, όπως επίσης και τα όρια των παλαιών κοινοτήτων της περιοχής. Ο διαχωρισμός του Νομού Λαρίσης έγινε σε δύο ζώνες διότι στη ζώνη 7 η άρδευση και ύδρευση γίνεται εξ' ολοκλήρου από γεωτρήσεις, ενώ στη ζώνη 6 ανήκει η περιοχή του ΤΟΕΒ Πηνειού. Ο αριθμός των γεωτρήσεων δεν ανταποκρίνεται στον πραγματικό αριθμό αυτών που υπάρχουν σε όλη τη περιοχή μελέτης, αφού ο αριθμός αυτών είναι πραγματικά τεράστιος(έως και 40000 σύμφωνα με προφορικές πηγές). Η συντριπτική τους πλειοψηφία είναι παράνομες και τον ακριβή αριθμό τους δεν γνωρίζουν ούτε καν οι αρμόδιες υπηρεσίες. Αυτό όμως που είναι γνωστό είναι η συνολική παροχή που αντλείται για κάθε ζώνη, αλλά και ένα εύρος της παροχής που μπορεί να αντλήσει μια γεώτρηση.

Στη **ζώνη 1** εκτάσεως περίπου 36267 στρεμμάτων περιλαμβάνει την περιοχή ανατολικά των χωριών Στεφανοβίκειου – Ριζόμυλου – Βελεστίνου. Αντλούνται από τον υπόγειο υδροφορέα από $15,232 \cdot 10^6$ έως $19,04 \cdot 10^6$ m³. Η ζώνη αυτή ανήκει στην περιοχή της τρίτης ομάδας πιεζόμετρων – όπως παρουσιάστηκε στο πρώτο κεφάλαιο – στην οποία η πτώση είναι μεγάλη και έντονη. Οι παροχές των γεωτρήσεων είναι αρκετά μεγάλες, ώστε σε περιόδους μη αιχμής να αντλούν 100 m³/h, ενώ έχουν καταγραφεί παροχές της τάξεως των 300 m³/h σε περιόδους αιχμής. Αξίζει να αναφερθεί ότι στο πλαίσιο των υποστηρικτικών έργων της Κάρλας είναι η διάνοιξη 50 νέων υδρευτικών γεωτρήσεων στην Ζώνη αυτή, για την κάλυψη των υδρευτικών αναγκών της πόλης του Βόλου, αλλά και των γύρω οικισμών. Οι γεωτρήσεις αυτές θα κατανεμηθούν ομοιόμορφα σε μια ζώνη έκτασης 15 km². Από αυτές τις 50 γεωτρήσεις λειτουργούν ήδη οι 10 για λογαριασμό της Δημοτικής Επιχείρησης Ύδρευσης Αποχέτευσης Μείζονος Βόλου (ΔΕΥΑΜΒ), οι οποίες θα αντικαθιστούν από νέες (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2004).

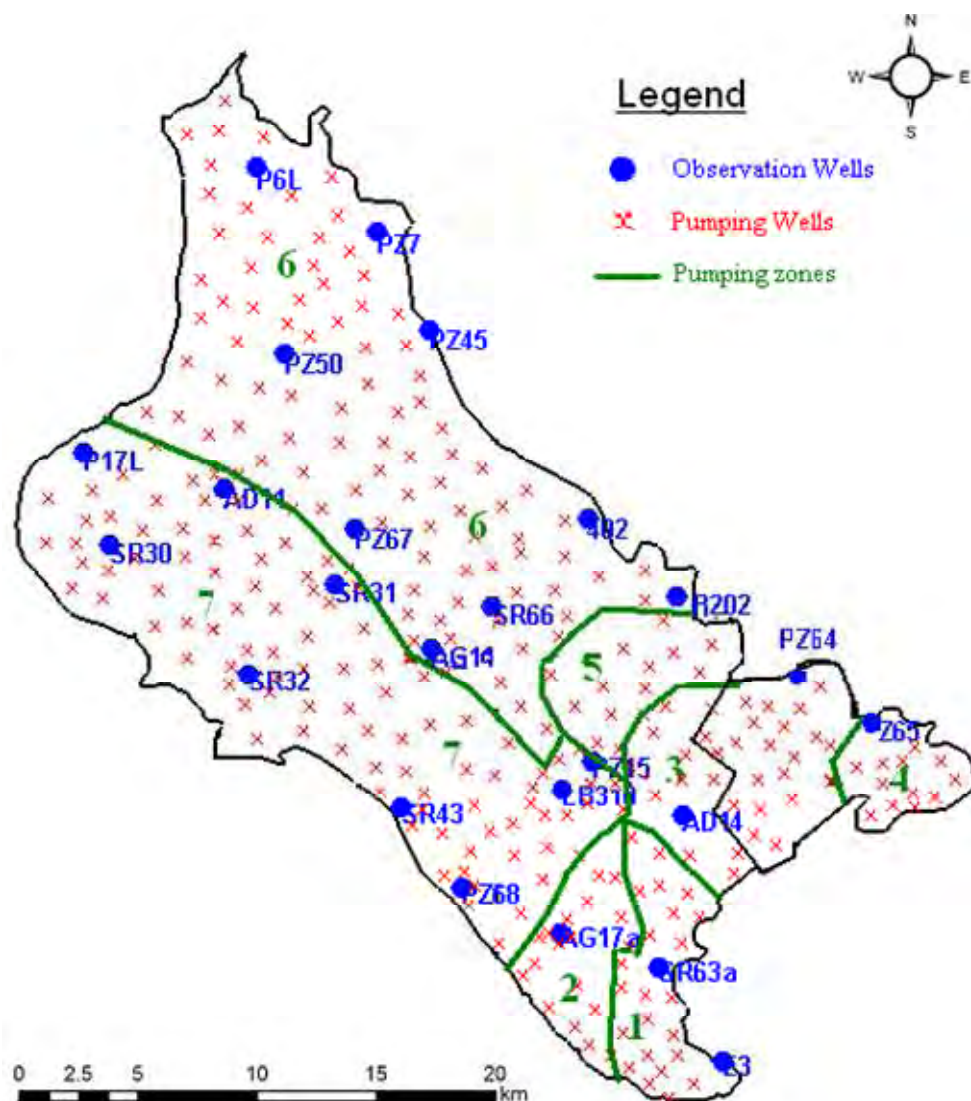
Η **ζώνη 2** εκτάσεως 14910 στρεμμάτων περιλαμβάνει τα Δ-ΝΔ περιθώρια της ζώνης 1 με όριο τη νοητή γραμμή μεταξύ των χωριών ΜέγαΜοναστήρι – Χλόη – Βελεστίνο – Αγ. Γεώργιος. Αντλούνται από τον υπόγειο υδροφορέα από $1,4 \cdot 10^6$ έως $3 \cdot 10^6$ m³. Ανήκει και αυτή στην τρίτη ομάδα πιεζόμετρων. Οι παροχές των γεωτρήσεων δεν είναι μεγάλες, με αυτές να φτάνουν σε ώρες μη αιχμής τα 30 m³/h και σε ώρες αιχμής να μην ξεπερνούν τα 100 m³/h.

Στις **ζώνες 3 και 5** περικλείουν την περιοχή που οριοθετείται από τα χωριά Κανάλια – Στεφανοβίκιου – Σωτήριου – και νοτίως Καλαμακίου, εκτάσεως 79931 στρεμμάτων. Αναπτύσσονται μικρού δυναμικού υπόγειες υδροφορίες στις σύγχρονες αποθέσεις. Ανήκουν στη δεύτερη ομάδα πιεζομέτρων, στην οποία η πτώση είναι μεγάλη, αλλά όχι έντονη. Στις δύο αυτές ζώνες, εξ αιτίας του μικρού γενικά δυναμικού των υπογείων υδροφοριών οι παροχές άντλησης των γεωτρήσεων δεν είναι μεγάλες. Έτσι στη ζώνη 3 αντλείται αντλούνται από $1,5 \cdot 10^6$ έως $1,875 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ με παροχή γεωτρήσεων στα $35 \text{ m}^3/\text{h}$ σε ώρες μη αιχμής και στα $105 \text{ m}^3/\text{h}$ ώρες αιχμής. Στη ζώνη 5 αντλείται παροχή από $1,2 \cdot 10^6$ έως $1,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ με παροχή γεωτρήσεων στα $20 \text{ m}^3/\text{h}$ σε ώρες μη αιχμής και στα $60 \text{ m}^3/\text{h}$ ώρες αιχμής.

Η **ζώνη 4** περιλαμβάνει τον κώνο του ρέματος Ξεριά και των άλλων ρεμάτων στην περιοχή Καναλιών, εκτάσεως 15000 στρεμμάτων. Ανήκει και αυτή στην δεύτερη ομάδα πιεζομέτρων. Αντλούνται από τα υπόγεια νερά περίπου $1,875 \cdot 10^6$ έως $2,8 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Οι γεωτρήσεις δίνουν μικρές παροχές της τάξεως των $20 \text{ m}^3/\text{h}$ σε ώρες μη αιχμής $70 \text{ m}^3/\text{h}$ ώρες αιχμής.

Η **ζώνη 6** οριοθετείται από τα χωριά - νοτίως του Καλαμακίου – Αρμένιο – Σωτήριο – Νίκη – Αχχίλειον – Γλαύκη – Ελευθέριο – Δήμητρα και Νεοχώρι. Έχει έκταση 210263 στρεμμάτων και το βόρειο τμήμα της ανήκει στην πρώτη ομάδα πιεζομέτρων, ενώ το νότιο στη δεύτερη. Είναι η περιοχή η οποία αρδεύεται από το ΤΟΕΒ Πηνειού. Η ποσότητα που αντλείται είναι περίπου των $22 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Οι παροχές των γεωτρήσεων κυμαίνονται από $55 \text{ m}^3/\text{h}$ έως και $220 \text{ m}^3/\text{h}$.

Τέλος η **ζώνη 7**, εκτάσεως 143840 στρεμμάτων, αποτελεί την πιο επιβαρυσμένη περιοχή της πεδιάδας της Κάρλας. Οι ανάγκες για άρδευση και ύρδευση καλύπτονται αποκλειστικά από γεωτρήσεις. Ανήκει στην τρίτη ομάδα πιεζομέτρων και συναντώνται οι μεγαλύτερες ταπεινώσεις που τους καλοκαιρινούς μήνες φτάνουν και τα 100 m. Αυτό όμως οφείλεται στο γεγονός ότι το βάθος του υδροφορέα είναι αρκετά μεγάλο, μιας και από τη μελέτη της SOGREAH-Grénoble 1974, ο αδιαπέρατος πυθμένας φτάνει στα -550 m (απόλυτο υψόμετρο). Αντλούνται από $37,95 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ έως $43,7 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Οι παροχές των γεωτρήσεων κυμαίνονται από $70 \text{ m}^3/\text{h}$ έως και $220 \text{ m}^3/\text{h}$.



Σχήμα: 4.35: Οι θέσεις των πηγαδιών παρατήρησης, πηγάδια άντλησης και οι ζώνες άντλησης.

Τα στοιχεία απολήψεων υπόγειων νερών (σημερινών και προτεινόμενων, ανά ζώνη) συνοψίζονται στον επόμενο πίνακα. (Μελέτη έργων ενίσχυσης της ύδρευσης της μείζονος περιοχής Βόλου)

Πίνακας 4.19 Ετήσιος προγραμματισμός εκμετάλλευσης των ζωνών του υπόγειου υδροφορέα του Νομού Μαγνησίας.

			Ζώνη 1	Ζώνη 1α	Ζώνη 2	Ζώνη 3	Ζώνη 4	Ζώνη 5	Σύνολο
Σημερινή εκμετάλ/ση υπόγειων νερών	Υδρευση	ΔΕΥΑΜΒ	2.100.000	900.000	0	0	0	0	3.000.000
		Τοπ. οικισμοί	300.000	0	0	0	200.000	300.000	800.000
	Άρδευση		20.000.000	4.000.000	3.600.000	5.900.000	2.300.000	1.200.000	37.000.000
	ΣΥΝΟΛΟ		22.400.000	4.900.000	3.600.000	5.900.000	2.500.000	1.500.000	40.800.000
Μελλοντική εκμετάλ/ση υπόγειων νερών	Υδρευση	ΔΕΥΑΜΒ	13.500.000	0	0	0	0	0	13.500.000
		Τοπ. οικισμοί	1.500.000	0	0	0	200.000	300.000	2.000.000
	Άρδευση		0	1.000.000	3.000.000	1.000.000	2.000.000	400.000	7.400.000
	ΣΥΝΟΛΟ		15.000.000	1.000.000	3.000.000	1.000.000	2.200.000	700.000	22.900.000

Πίνακας 4.20 Προγραμματισμός γεωτρήσεων για τη ζώνη 1 του υπόγειου υδροφορέα.

Αντλήσεις (hm ³)			Α΄ ΦΑΣΗ		Β΄ ΦΑΣΗ	
			1989	1 ^ο Στάδιο 1994	2 ^ο Στάδιο 1999	2009
Άρδευση				3.9	3.9	0
Υδρευση	Οικισμοί			1	2	2
	ΔΕΥΑΜΒ	Υπάρχουσες	10 γεωτρήσεις --> 2.1	10 γεωτρήσεις --> 2.1	10 γεωτρήσεις --> 2.1	
		Νέες	14 γεωτρήσεις --> 3.5	31 γεωτρήσεις --> 6.8	40 γεωτρήσεις --> 11.6	
Σύνολο				10.5	14.8	15.7

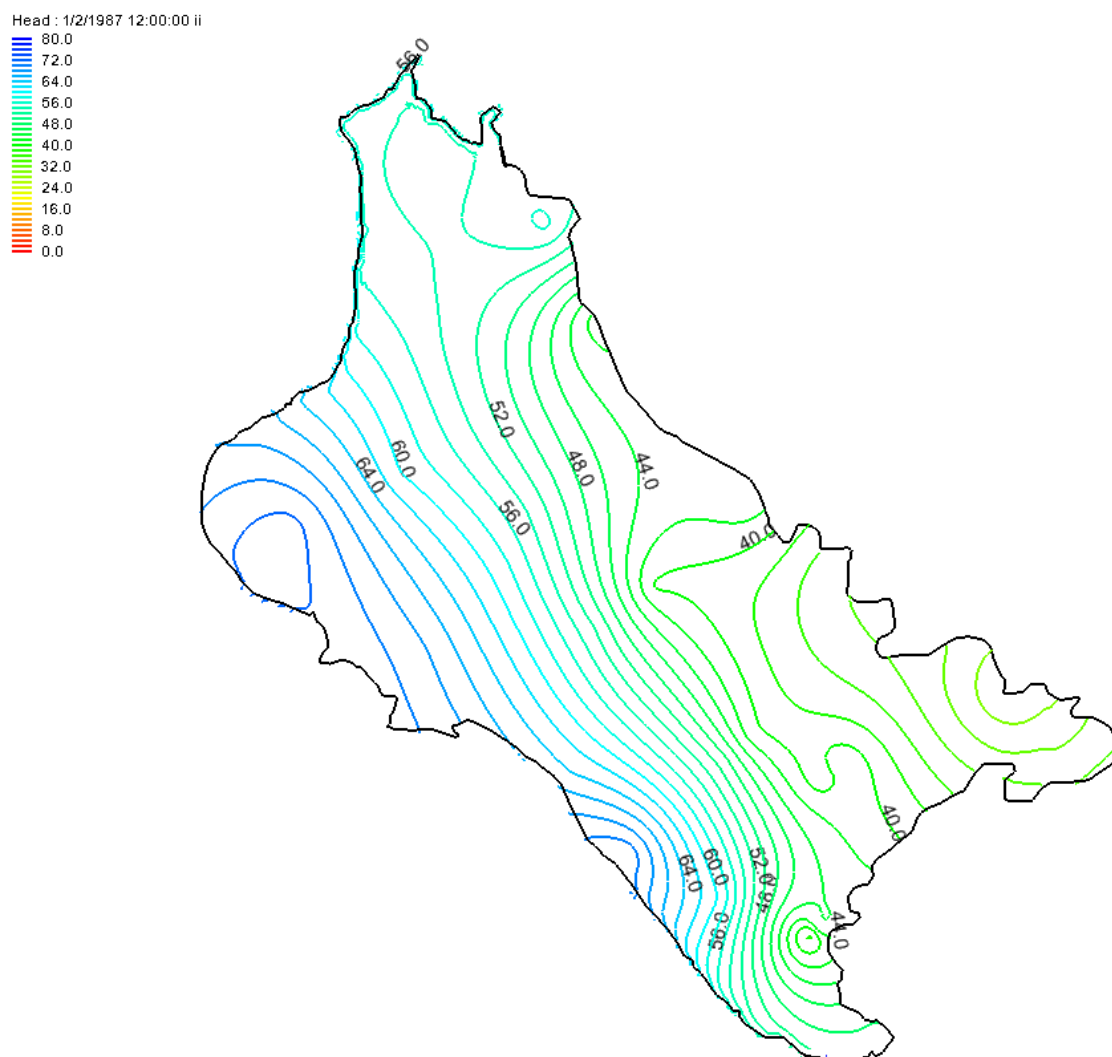
Η ενίσχυση της ύδρευσης του Βόλου θα γίνει με την κατασκευή 50 γεωτρήσεων στην περιοχή της Ζώνης 1 και την απόληψη 13.700.000 κ.μ. ετησίως. Η παραγωγή αυτή αναφέρεται στον χρονικό ορίζοντα μετά το 2030. Η κατασκευή και λειτουργία του έργου θα γίνει τμηματικά σε δύο στάδια, ώστε αρχικά να επιτευχθεί επάνοδος της στάθμης των υπόγειων νερών σε κανονικά επίπεδα. Αυτό θα συντελέσει στην ασφαλέστερη λειτουργία του έργου και θα μειώσει τις πιθανότητες επέκτασης της υφαλμύρυνσης, που παρατηρείται σε γειτονικές ζώνες. Οι 50 γεωτρήσεις θα κατασκευασθούν εκ νέου σε αντικατάσταση 50 υφισταμένων στην περιοχή Ριζόμυλου - Στεφανοβικείου.

Η περίοδος για την οποία επιλύεται η υπόγεια προσομοίωση είναι από την 1^η Ιανουαρίου 1987 έως την 1^η Οκτωβρίου 2058. Η χρονική περίοδος είναι 861 μήνες, δηλαδή 861 χρονικές περιόδους (stress periods). Ως αρχική συνθήκη επιλέχθηκε η 1^η Ιανουαρίου 1987. Η επιλογή οφείλεται στο γεγονός ότι ήδη από τα μέσα της δεκαετίας του '80 και έπειτα, οι συνέπειες της υπέραντλησης είναι εμφανείς στον υπόγειο υδροφορέα. Με άλλα λόγια η περίοδος του καθεστώτος

υπερεκμετάλλευσης του υπόγειου υδροφορέα ξεκινά αμέσως μετά από αυτήν την περίοδο.



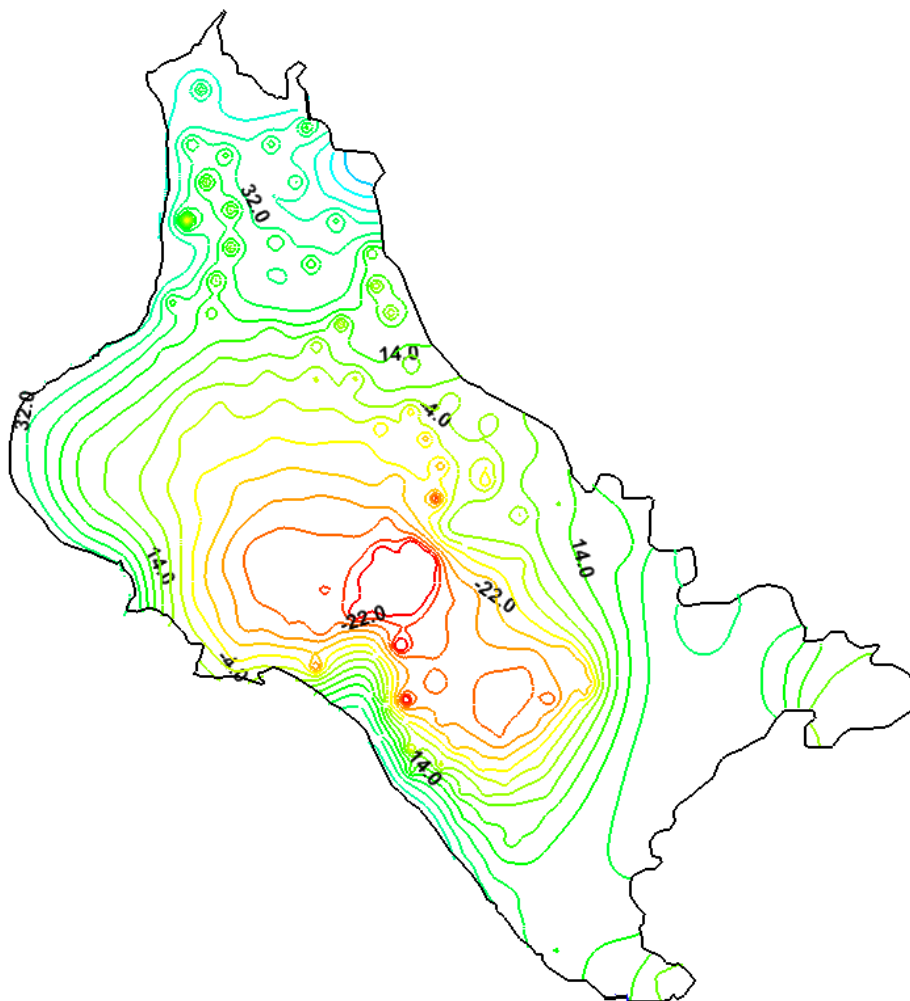
Σχήμα: 4.36: Ο υπόγειος υδροφορέας της Κάρλας με τις θέσεις των πηγαδιών άντλησης



Σχήμα 4.37 : Απεικόνιση των υδραυλικών υψών του υπόγειου υδροφορέα υπό εκμετάλλευση στην αρχή της προσομοίωσης.

Head : 1/10/2058 12:00:00 ii

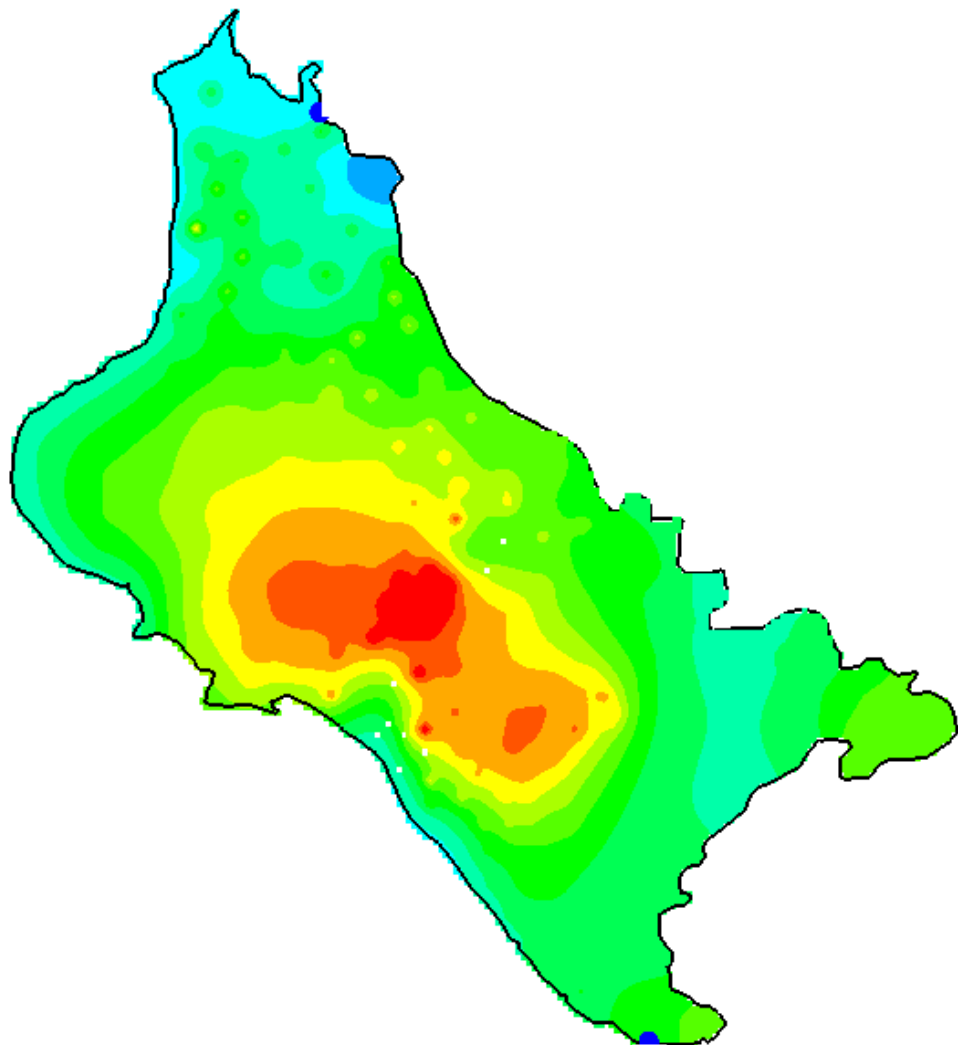
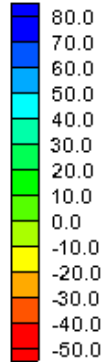
80.0
68.0
56.0
44.0
32.0
20.0
8.0
-4.0
-16.0
-28.0
-40.0



Σχήμα 4.38: Απεικόνιση των υδραυλικών υψών του υπόγειου υδροφορέα υπό εκμετάλλευση στο τέλος της προσομοίωσης.

Στο παραπάνω σχήμα παρατηρείται μείωση του υδραυλικού φορτίου για το 2058. Διαπιστώνεται ότι στο κέντρο σχεδόν του υδροφορέα, στην περιοχή της Ζώνης 7, συναντώνται οι μεγαλύτερες ταπεινώσεις. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω αποτελεί την πιο επιβαρυσμένη περιοχή της πεδιάδας της Κάρλας. Στη συνέχεια εξετάζεται γραφικά η διαφορά των υδραυλικών φορτίων του 1987 με το 2058.

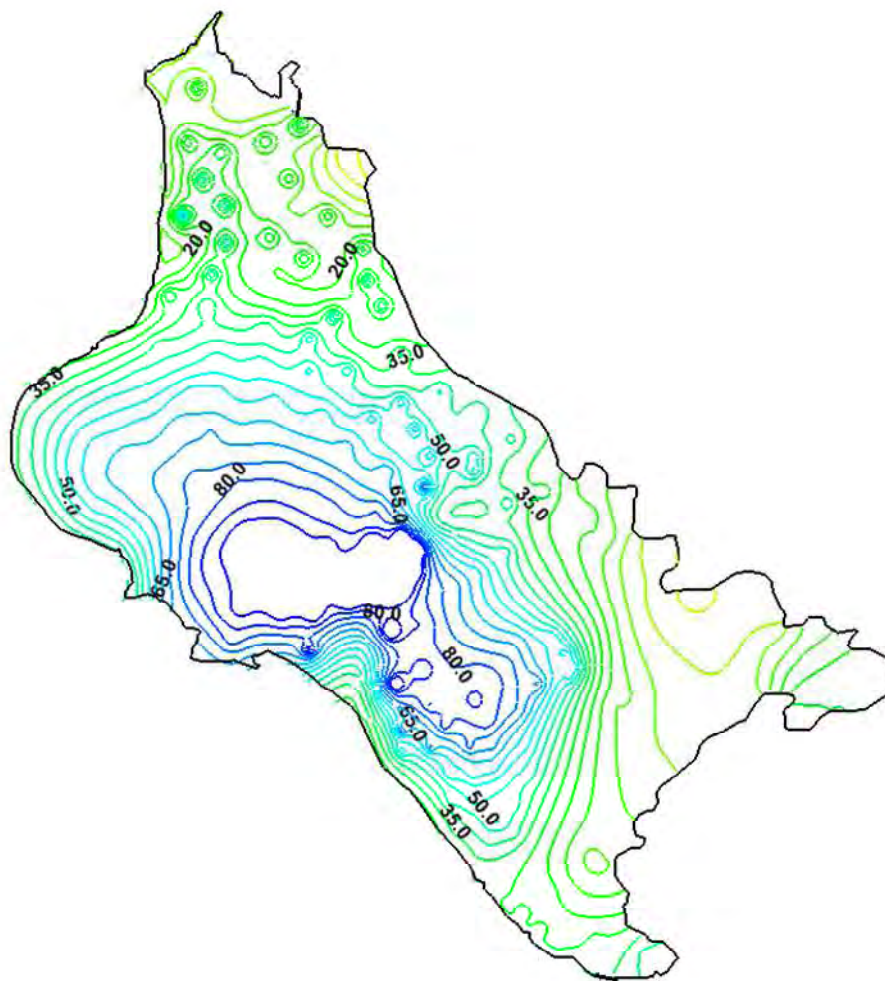
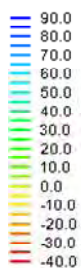
Head : 1/10/2058 12:00:00 ii



Σχήμα 4.39: Απεικόνιση των υδραυλικών υψών του υπόγειου υδροφορέα υπό εκμετάλλευση στο τέλος της προσομοίωσης.

Πυκνώνοντας τις καμπύλες διακρίνεται καλύτερα η περιοχή του ταμιευτήρα νοτιοανατολικά της λεκάνης. Στην περιοχή αυτή παρατηρούνται υψηλότερα υδραυλικά ύψη καθώς ο ταμιευτήρας παροχετεύει την εγγύς περιοχή.

afairesi 1987-2058



Σχήμα 4.40: Απεικόνιση της διαφοράς των υδραυλικών υψών του 1987 -2058.

Η διαφορά είναι θετική. Και ουσιαστικά η διαφορά αυτή αποτελεί το ύψος του υδροφορέα που χάνεται λόγω της ανθρώπινης εκμετάλλευσης στο μέλλον. Και σε αυτό το σχήμα φαίνεται έντονα η ταπείνωση της περιοχής της Ζώνης 7.

Αξίζει να εξεταστούν τα αθροιστικά αποτελέσματα (CUMULATIVE VOLUMES) του ογκομετρικού ισοζυγίου (VOLUMETRIC BUDGET) που εξήχθησαν από το μοντέλο του Modflow μετά την εκτέλεση της μίας χρονοσειράς.

Πίνακας 4.21 : Υδατικό ισοζύγιο υπόγειου υδροφορέα για την 1^η χρονική περίοδο (stress period).

	ΕΙΣΡΟΕΣ(m3)	ΕΚΡΟΕΣ (m3)
Αποθηκευμένος Όγκος	698241.5	3043016.75
Όριο Σταθερού Φορτίου	0	0
Πηγάδια Άντλησης	0	0
Όριο Μεταβλητού Φορτίου	2464133.5	119356.0625
Κατείσδυση	0	0
Γεωτρήσεις	0	
ΣΥΝΟΛΟ	3162375	3162372.813

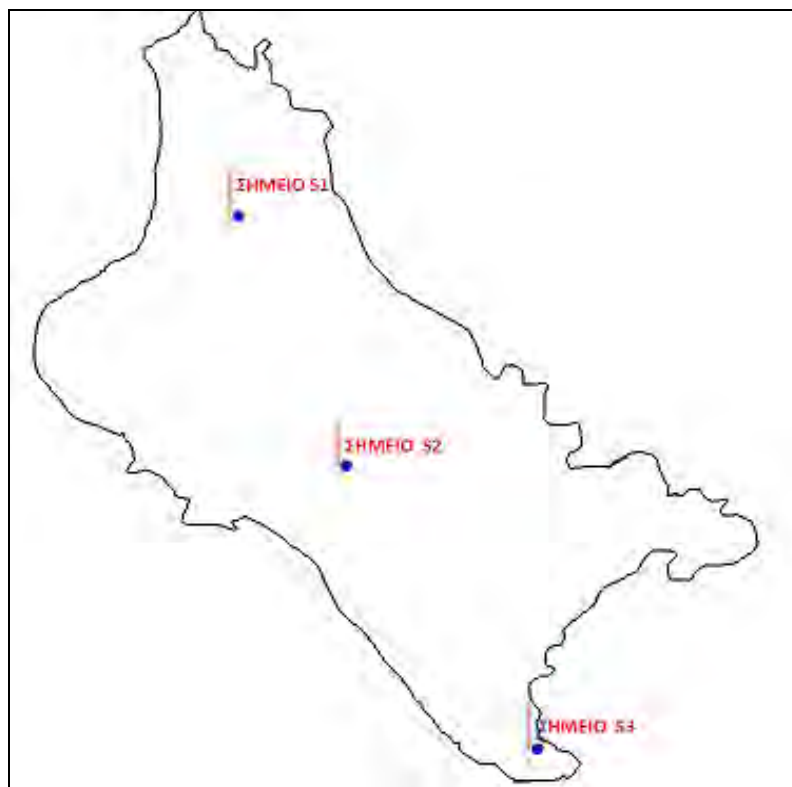
Πίνακας 4.22: Υδατικό ισοζύγιο υπόγειου υδροφορέα για την 861^η χρονική περίοδο (stress period).

	ΕΙΣΡΟΕΣ (m3)	ΕΚΡΟΕΣ (m3)
Αποθηκευμένος Όγκος	6852113408	4657136640
Όριο Σταθερού Φορτίου	0	0
Πηγάδια Άντλησης	0	0
Όριο Μεταβλητού Φορτίου	627929984	109153864
Κατείσδυση	2626750208	0
Γεωτρήσεις	0	5340495360
ΣΥΝΟΛΟ	10106793600	10106785864

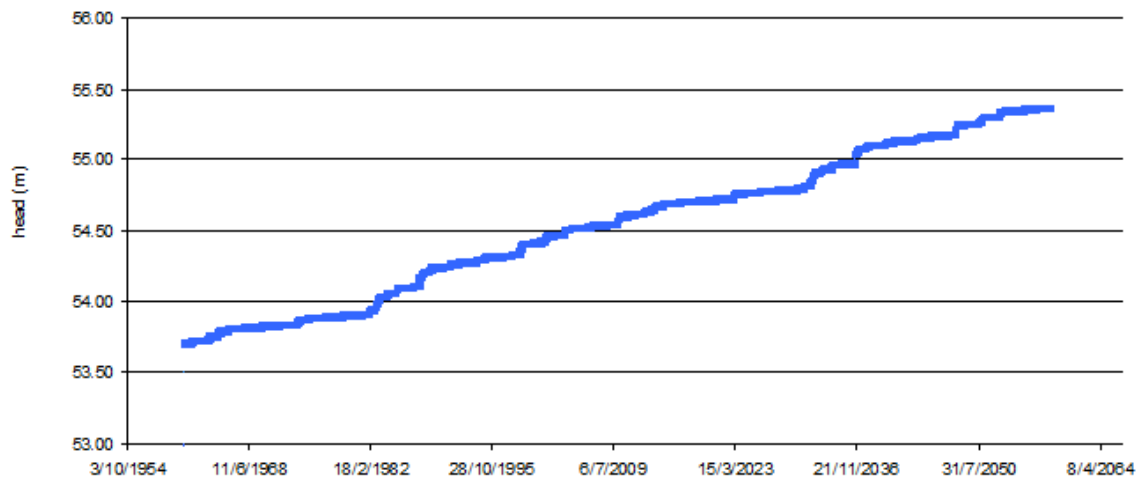
Στους παραπάνω πίνακες περιγράφεται το υδατικό ισοζύγιο του υδροφορέα στην αρχής και στο τέλος της περιόδου προσομοίωσης. Η ανάλυση του υδατικού ισοζυγίου στην αρχή, δείχνει ότι η διαφορά όγκου του νερού που εκρέει από το νερό που εισδύει στον υδροφορέα λόγω επιφανειακής φόρτισης παραμένει θετική, οπότε οι ποσότητες που απορρέουν καλύπτονται από τα ανανεώσιμα του υδροφορέα. Η ανάλυση για το τέλος της προσομοίωσης (1/10/2058), δείχνει ότι η διαφορά όγκου του νερού που αντλείται στις γεωτρήσεις από το νερό που εισδύει στον υδροφορέα λόγω επιφανειακής φόρτισης είναι αρνητική, οπότε οι αντλούμενες ποσότητες δεν καλύπτονται από τα ανανεώσιμα του υδροφορέα.

4.4.3.1 Σύγκριση Προσομοίωσης φυσικού και υπό άντληση Υδροφορέα

Για την καλύτερη εκτίμηση του βαθμού επίδρασης της ανθρώπινης εκμετάλλευσης στον υδροφορέα συγκρίνουμε την περίπτωση του φυσικού και του υπό εκμετάλλευση υδροφορέα. Για τον σκοπό αυτό ελέγχθηκαν 3 ενδεικτικά σημεία του υδροφορέα. Το S1 σημείο βρίσκεται βόρεια του υδροφορέα, το S2 στο κέντρο περίπου του υδροφορέα και το S3 νότια. Τα σημεία αυτά εισήχθησαν στο Modflow ως πηγάδια παρατήρησης. Το μοντέλο έτρεξε δύο φορές για την ίδια χρονοσειρά (τυχαία επιλέχθηκε η χρονοσειρά 31). Την πρώτη φορά με το υπόβαθρο του φυσικού υδροφορέα και την δεύτερη φορά με τα πηγάδια άντλησης.

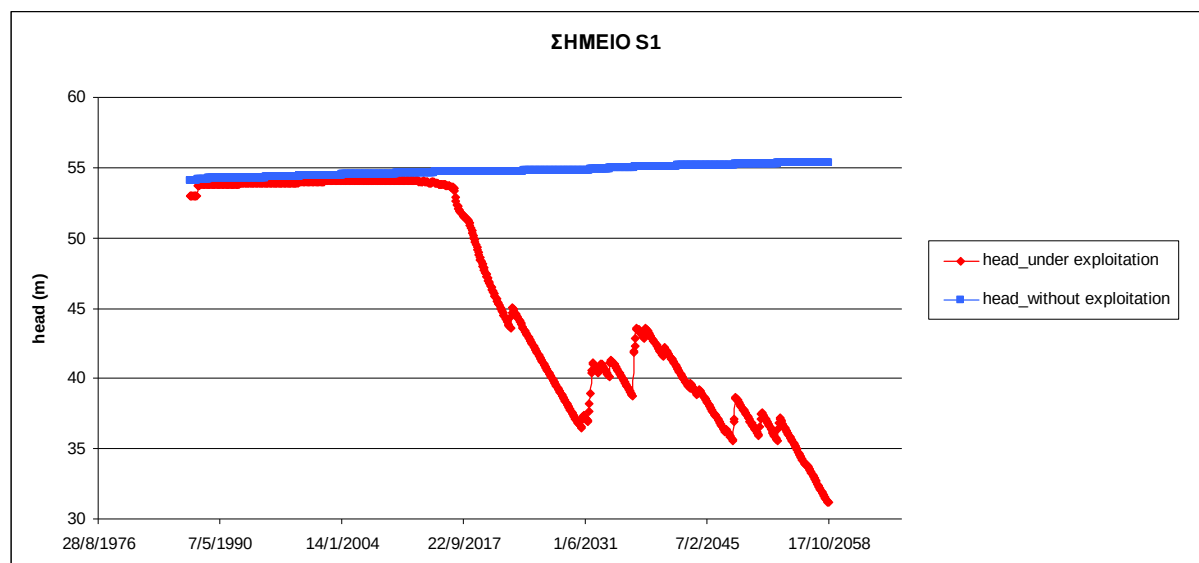


Σχήμα 4.41: Απεικόνιση των σημείων S1,S2 και S3.



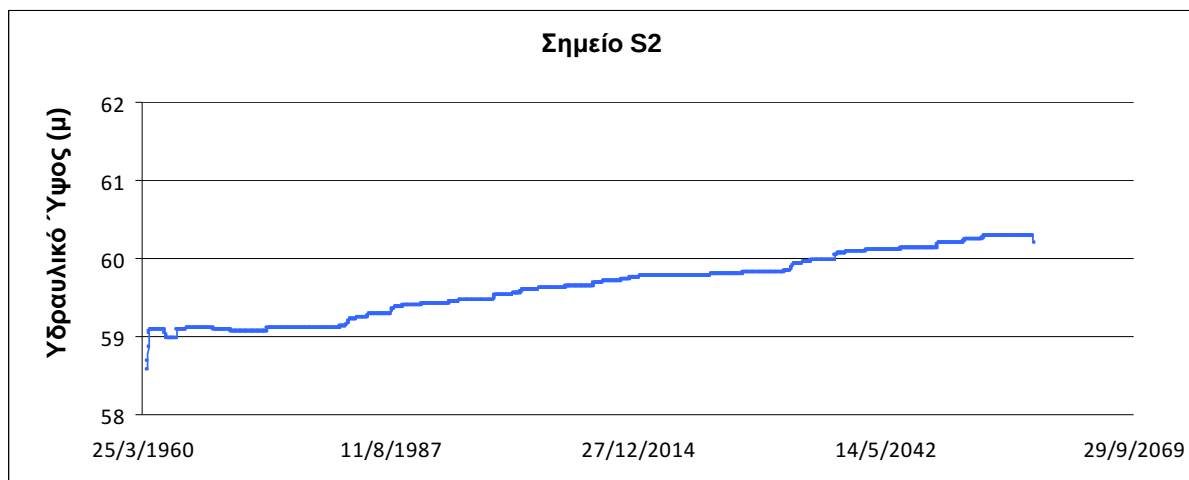
Σχήμα 4.42: Υδραυλικά ύψη φυσικού υπόγειου υδροφορέα για το σημείο S1

Παρατηρείται άνοδος της πιεζομετρίας στον φυσικό υδροφόρο στο S1 όπως είναι αναμενόμενο.

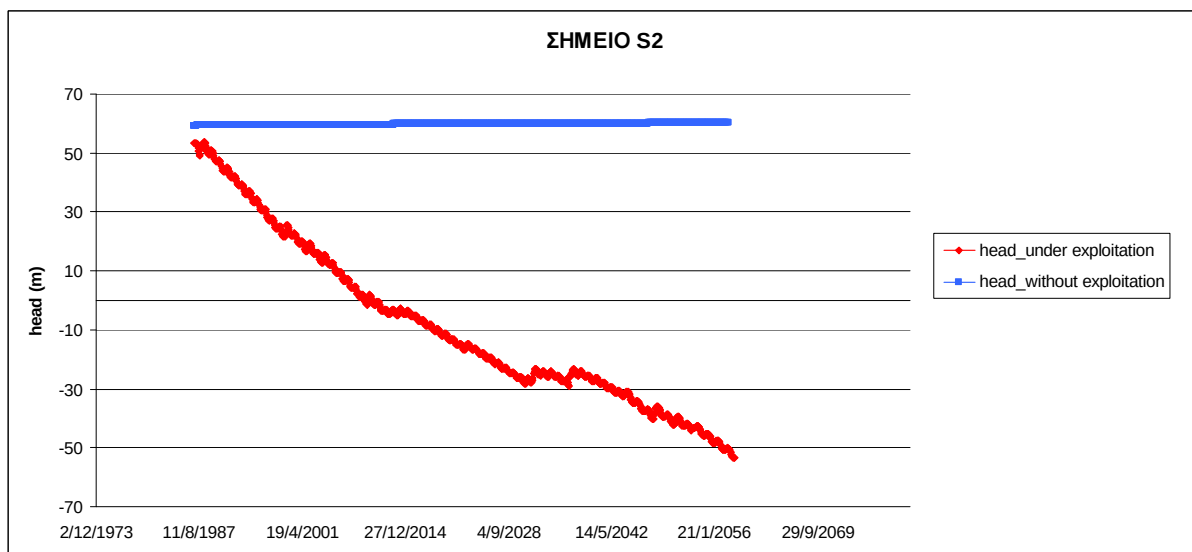


Σχήμα 4.43: Υδραυλικά ύψη φυσικού υδροφορέα και υπό άντληση υδροφορέα για το σημείο S1 για την ιστορική περίοδο

Στο παραπάνω σχήμα γίνεται σύγκριση του φυσικού υδροφορέα και του υπό άντληση για το σημείο S1. Παρατηρείται ότι το 2015 περίπου η στάθμη πέφτει απότομα και συνεχίζεται μέχρι το τέλος της περιόδου προσομοίωσης. Η συνεχόμενη μείωση της στάθμης δικαιολογείται εφόσον στην Ζώνη αυτή δεν καταργούνται οι γεωτρήσεις.

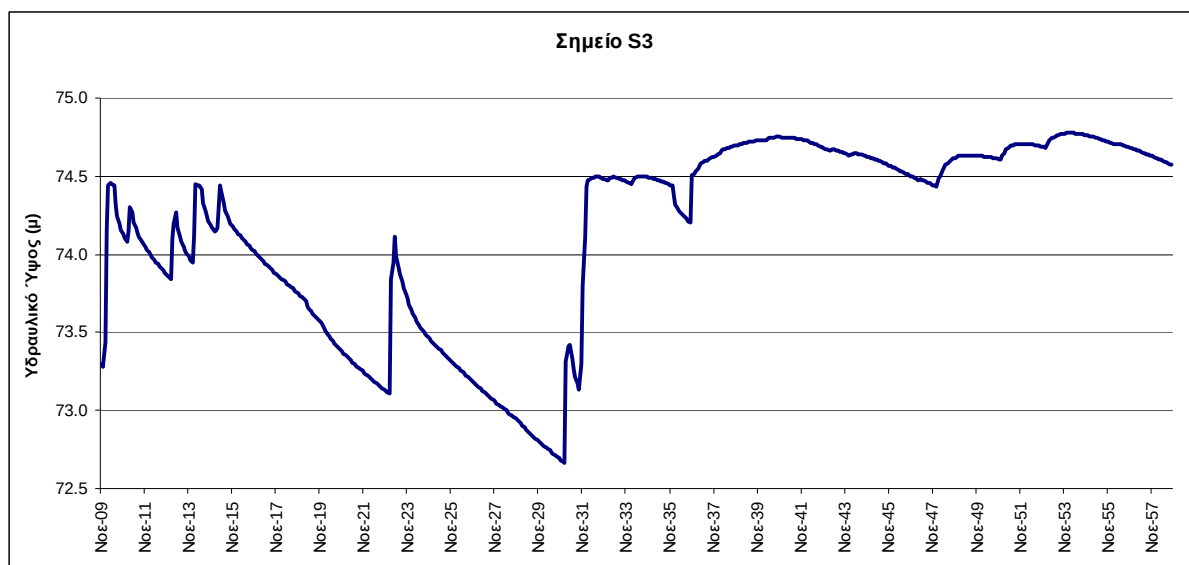


Σχήμα 4.44: Υδραυλικά ύψη φυσικού υδροφορέα για το σημείο S2

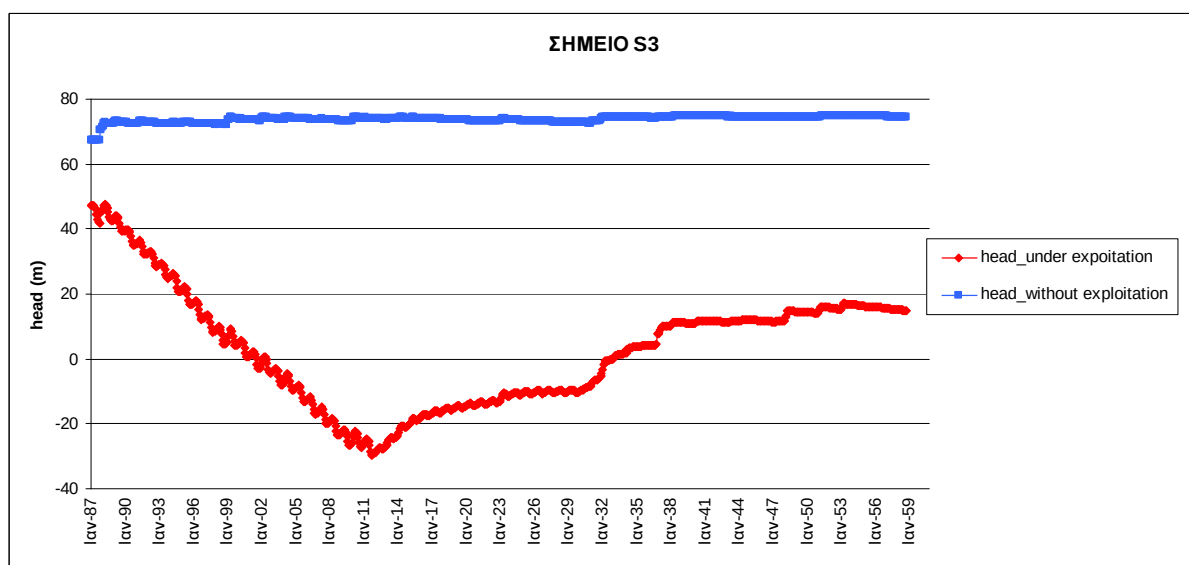


Σχήμα 4.45: Υδραυλικά ύψη φυσικού υδροφορέα και υπό άντληση υδροφορέα για το σημείο S2 για την ιστορική περίοδο

Η ταπείνωση του υδροφορέα λόγω αντλήσεων, σε αυτό το σημείο, είναι πολύ μεγάλη. Οι τιμές πέφτουν κάτω από τη στάθμη του ύψους της θάλασσας.



Σχήμα 4.46: Υδραυλικά ύψη φυσικού υδροφορέα για το σημείο S3 για την ιστορική περίοδο



Σχήμα 4.47: Υδραυλικά ύψη φυσικού υδροφορέα και υπό άντληση υδροφορέα για το σημείο S3 για την ιστορική περίοδο

Από το παραπάνω σχήμα διαπιστώνεται η ταπείνωση του υδροφόρου ορίζοντα λόγω αντλήσεων στο σημείο S3. Σημειώνεται ότι αν απουσίαζε η ανθρώπινη επιβάρυνση ο υδροφορέας θα βρισκόταν στα επίπεδα του φυσικού. Επίσης γίνεται εμφανής η σταδιακή κατάργηση των παλίων γεωτρήσεων της περιοχής (Ζωνή 1),

μετά το 2012 και η αντικατάστασή τους με ηπιότερες . Όπως διακρίνεται στο γράφημα, το ύψος του υπό άντληση υδροφορέα αυξάνεται σταδιακά μετά το 2012.

Πίνακας 4.23 : Βασικά στατιστικά μεγέθη μηνιαίου Υδραυλικού φορτίου του σημείου S1 του φυσικού υδροφορέα για την περίοδο 1987 – 2058 (m).

Αποτελέσματα ανάλυσης Μηνιαίων τιμών Υδραυλικών υψών για το S1 για 1987-2058				
Μήνας	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Ελάχιστο	Μέγιστο
ΙΑΝ	54.75871	0.35907	54.0947	55.35649
ΦΕΒ	54.76283	0.358899	54.09505	55.35682
ΜΑΡ	54.76578	0.358627	54.09545	55.35718
ΑΠΡ	54.76929	0.358284	54.09582	55.35753
ΜΑΪ	54.77016	0.358227	54.09621	55.35789
ΙΟΥΝ	54.77053	0.358216	54.0966	55.35823
ΙΟΥΛ	54.77092	0.358204	54.09699	55.3586
ΑΥΓ	54.7713	0.358192	54.09738	55.35896
ΣΕΠ	54.77168	0.358181	54.09776	55.35931
ΟΚΤ	54.77208	0.358106	54.09816	55.3566
ΝΟΕ	54.7661	0.352732	54.15992	55.35577
ΔΕΚ	54.76665	0.352753	54.16032	55.35613

Πίνακας 4.24 : Βασικά στατιστικά μεγέθη μηνιαίου Υδραυλικού φορτίου του σημείου S2 του φυσικού υδροφορέα για την περίοδο 1987 – 2058(m).

Αποτελέσματα ανάλυσης Μηνιαίων τιμών Υδραυλικών υψών για το S2 για 1987-2058				
Μήνας	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Ελάχιστο	Μέγιστο
ΙΑΝ	59.81771	0.283484	59.28053	60.28389
ΦΕΒ	59.82165	0.283281	59.28054	60.28389
ΜΑΡ	59.82435	0.283029	59.28056	60.28389
ΑΠΡ	59.82764	0.282703	59.28057	60.28389
ΜΑΪ	59.82818	0.282651	59.28059	60.28389
ΙΟΥΝ	59.82821	0.282634	59.28061	60.28389
ΙΟΥΛ	59.82824	0.282618	59.28063	60.28389
ΑΥΓ	59.82828	0.282601	59.28065	60.28389
ΣΕΠ	59.82831	0.282584	59.28067	60.28389
ΟΚΤ	59.82732	0.280946	59.28069	60.28389
ΝΟΕ	59.82398	0.278165	59.34444	60.28389
ΔΕΚ	59.82418	0.278169	59.34447	60.28389

Πίνακας 4.25 : Βασικά στατιστικά μεγέθη μηνιαίου Υδραυλικού φορτίου του σημείου S3 του φυσικού υδροφορέα για την περίοδο 1987 – 2058(m)

Αποτελέσματα ανάλυσης Μηνιαίων τιμών Υδραυλικών υψών για το S3 για 1987-2058				
Μήνας	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Ελάχιστο	Μέγιστο
ΙΑΝ	73.69275	1.133526	67.42648	74.77641
ΦΕΒ	73.77491	1.09356	67.41096	74.77762
ΜΑΡ	73.80394	1.080815	67.39372	74.77695
ΑΠΡ	73.84924	1.062031	67.37701	74.7752
ΜΑΪ	73.83598	1.064214	67.3597	74.77363
ΙΟΥΝ	73.81533	1.070723	67.34296	74.772
ΙΟΥΛ	73.79346	1.075699	67.32564	74.77013
ΑΥΓ	73.77429	1.081085	67.30833	74.76807
ΣΕΠ	73.75831	1.086899	67.2916	74.76787
ΟΚΤ	73.74584	1.091555	67.27433	74.77065
ΝΟΕ	73.77962	0.866567	70.62093	74.77287
ΔΕΚ	73.77001	0.874751	70.60042	74.7748

Πίνακας 4.26 : Βασικά στατιστικά μεγέθη μηνιαίου Υδραυλικού φορτίου του σημείου S1 του υπό εκμετάλλευση υδροφορέα για την περίοδο 1987 – 2058 (m)

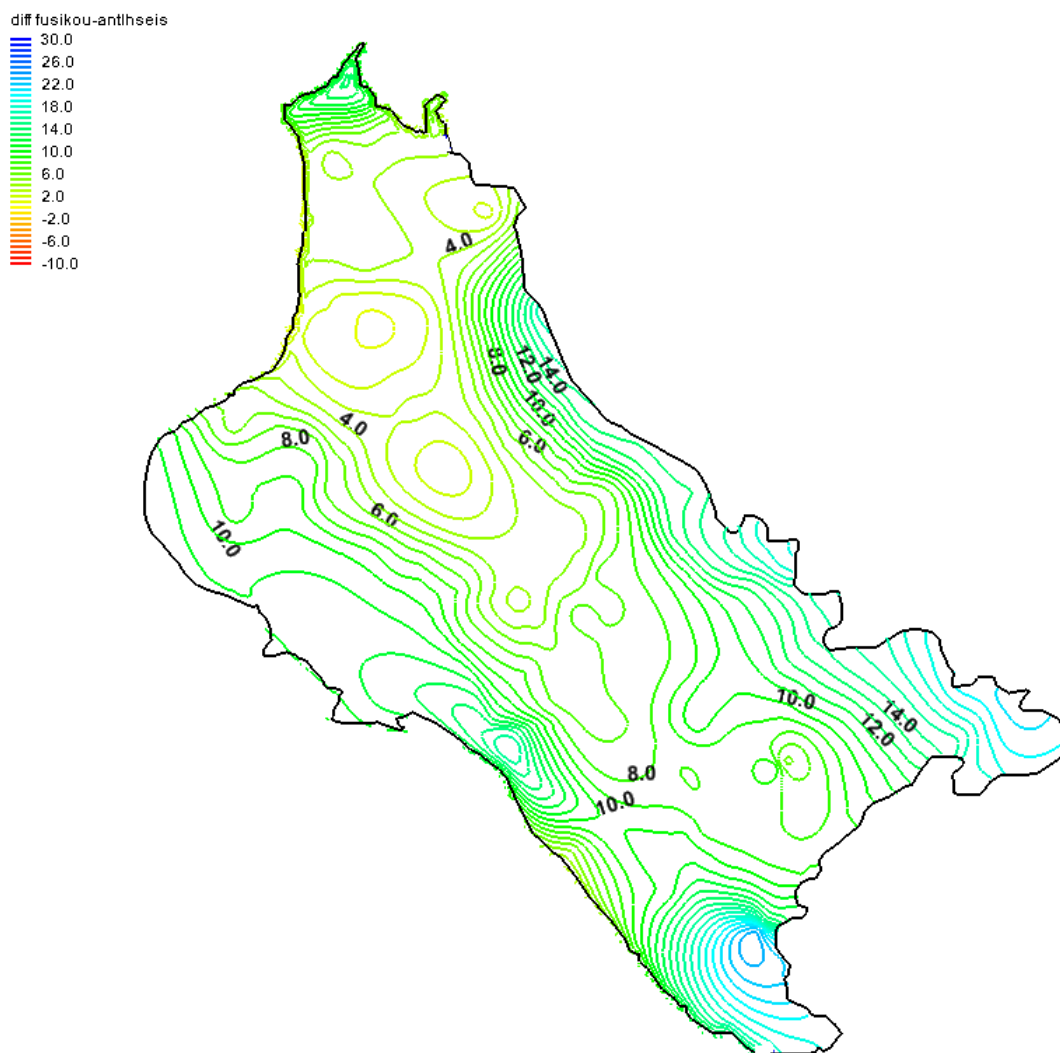
Αποτελέσματα ανάλυσης Μηνιαίων τιμών Υδραυλικών υψών του υπό άντληση υδροφορέα για το σημείο S1 για 1987-2058				
Μήνας	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Ελάχιστο	Μέγιστο
ΙΑΝ	45.93104	7.647592297	31.92685	54.1008
ΦΕΒ	45.99338	7.582215027	31.8385	54.1022
ΜΑΡ	46.00251	7.575106387	31.7407	54.1073
ΑΠΡ	46.02613	7.54807469	31.6461	54.1136
ΜΑΪ	45.98347	7.579570924	31.54842	54.1126
ΙΟΥΝ	45.92807	7.618093266	31.45395	54.1115
ΙΟΥΛ	45.86984	7.65722932	31.35641	54.1104
ΑΥΓ	45.81163	7.696438032	31.25892	54.1090
ΣΕΠ	45.75558	7.734628672	31.16462	54.1075
ΟΚΤ	45.69983	7.765934227	31.151	54.1059
ΝΟΕ	45.91017	7.621046213	32.12245	54.1043
ΔΕΚ	45.85817	7.648376899	32.02467	54.1026

Πίνακας 4.27 : Βασικά στατιστικά μεγέθη μηνιαίου Υδραυλικού φορτίου του σημείου S2 του υπό εκμετάλλευση υδροφορέα για την περίοδο 1987 – 2058 (m)

Αποτελέσματα ανάλυσης Μηνιαίων τιμών Υδραυλικών υψών του υπό άντληση υδροφορέα για το σημείο S2 για 1987-2058				
Μήνας	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Ελάχιστο	Μέγιστο
ΙΑΝ	-8.49335	28.40483	-50.241	53.2544
ΦΕΒ	-8.25247	28.46773	-50.5386	53.24635
ΜΑΡ	-8.02779	28.57217	-51.0296	53.40301
ΑΠΡ	-7.7419	28.68884	-51.5787	53.8089
ΜΑΪ	-7.7166	28.71456	-52.1417	53.66389
ΙΟΥΝ	-7.82365	28.6781	-52.6176	53.36356
ΙΟΥΛ	-8.19331	28.51323	-52.9687	52.65635
ΑΥΓ	-8.76856	28.25068	-53.1788	51.65331
ΣΕΠ	-9.32866	28.00849	-53.2656	50.73267
ΟΚΤ	-9.74274	27.86146	-53.44	50.0983
ΝΟΕ	-9.27732	27.57481	-50.0749	51.84602
ΔΕΚ	-9.3943	27.57449	-50.0858	51.58843

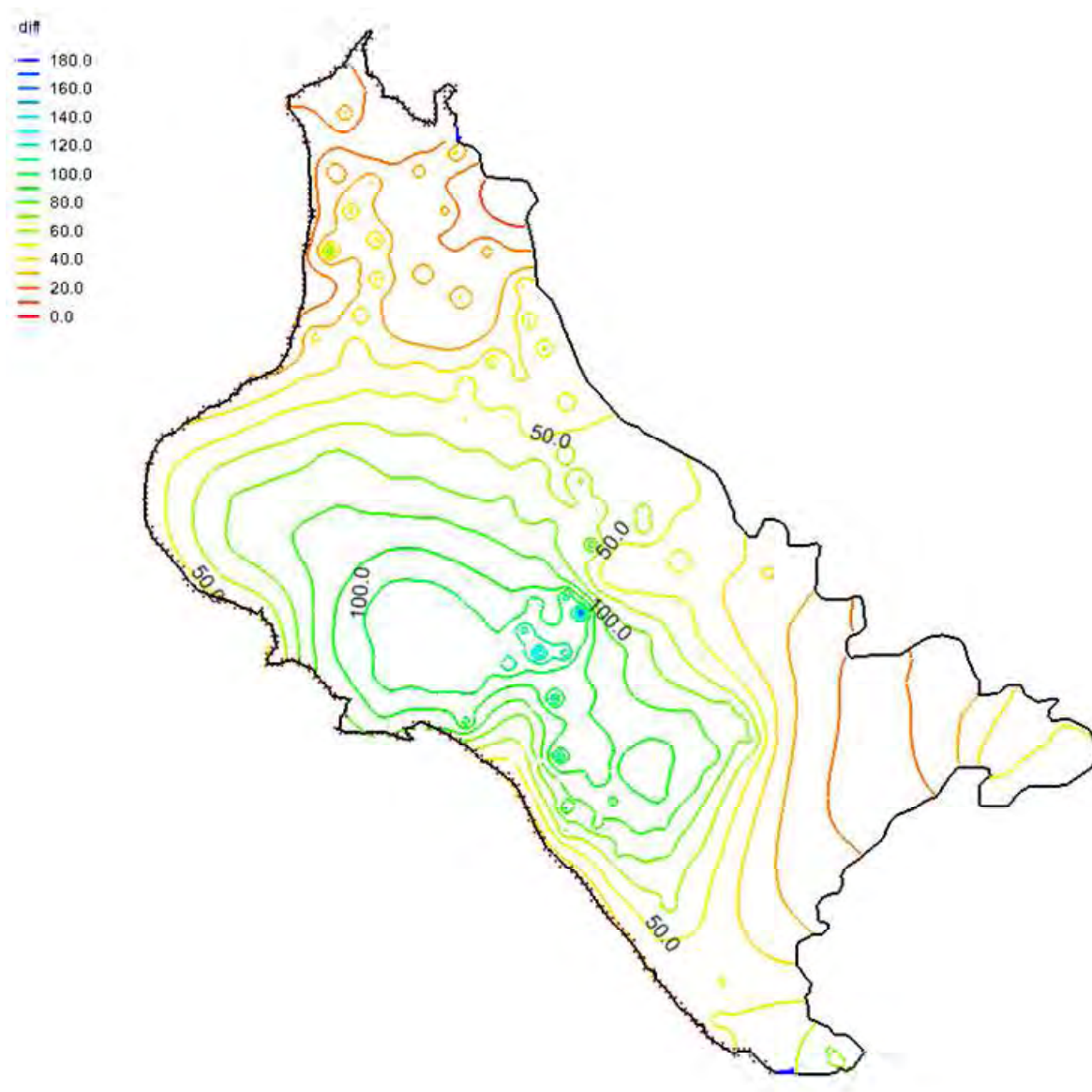
Πίνακας 4.28 : Βασικά στατιστικά μεγέθη μηνιαίου Υδραυλικού φορτίου του σημείου S3 του υπό εκμετάλλευση υδροφορέα για την περίοδο 1987 – 2058 (m)

Αποτελέσματα ανάλυσης Μηνιαίων τιμών Υδραυλικών υψών του υπό άντληση υδροφορέα για το σημείο S3 για 1987-2058				
Μήνας	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Ελάχιστο	Μέγιστο
ΙΑΝ	3.073171	18.28121	-28.7509	47.05892
ΦΕΒ	3.410616	18.19902	-28.4156	47.07349
ΜΑΡ	3.693807	18.11148	-28.0587	47.24778
ΑΠΡ	4.003282	18.05849	-27.7146	47.66768
ΜΑΪ	3.926014	17.97837	-27.5213	47.21769
ΙΟΥΝ	3.734679	17.88998	-27.402	46.61665
ΙΟΥΛ	3.195126	17.80037	-27.5121	45.27727
ΑΥΓ	2.527555	17.7508	-28.3855	43.7076
ΣΕΠ	2.125644	17.72713	-29.4387	42.74657
ΟΚΤ	2.086316	17.6786	-29.623	42.53287
ΝΟΕ	2.104567	17.78732	-29.431	45.04863
ΔΕΚ	2.251491	17.70171	-29.106	45.10482



Σχήμα 4.48: Διαφορά υδραυλικών υψών υδροφορέα με αντλήσεις και φυσικού υδροφορέα στην αρχή της περιόδου προσομοίωσης.

Στο παραπάνω σχήμα απεικονίζεται η πτώση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα της Κάρλας λόγω αντλήσεων στην αρχή της περιόδου προσομοίωσης. Διαπιστώνεται μεγαλύτερη εκμετάλλευση στην περιοχή της Ζώνης 1 και της Ζώνης 3.



Σχήμα 4.49: Χρονοσειρά 31 -Διαφορά υψών υδροφορέα με αντλήσεις και φυσικού υδροφορέα στο τέλος της περιόδου προσομοίωσης.

Στο σχήμα αυτό παρουσιάζεται η πτώση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα της Κάρλας λόγω αντλήσεων στο τέλος της περιόδου προσομοίωσης. Παρατηρείται ότι στις βόρειες περιοχές η διαφορά λόγω αντλήσεων είναι μικρότερη. Επίσης στο νοτιοδυτικό σημείο παρατηρούνται μικρές μεταβολές διότι στο σημείο αυτό έχουν καταργηθεί οι γεωτρήσεις λόγω δημιουργίας του ταμιευτήρα. Διαπιστώνεται μεγαλύτερη εκμετάλλευση στην περιοχή της Ζώνης 1 και της Ζώνης 7, περιοχές οι οποίες ήταν και στην αρχή της προσομοίωσης επιβαρυμένες.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων για την επίδραση της κλιματική αλλαγής προκύπτουν τα εξής:

Αύξηση στις μελλοντικές τιμές της θερμοκρασίας στο μέλλον της τάξης του μισού βαθμού Κελσίου (°C).

Μείωση των τιμών της βροχόπτωσης για την περίοδο 2009-2058 σε σχέση με τις τιμές της ιστορικής περιόδου.

Σε γενικό επίπεδο, με το πέρασμα των χρόνων η στάθμη του υδροφορέα έχει ανοδική πορεία.

Η εξέταση του φυσικού υδροφορέα σε ένα ενδεικτικό σημείο αποτέλεσε απόρροια αρκετών συμπερασμάτων. Η ανάλυση του υδατικού ισοζυγίου στο τέλος της χρονικής περιόδου φανερώνει ότι οι ποσότητες που απορρέουν καλύπτονται από τα ανανεώσιμα του υδροφορέα στο υπό εξέταση σημείο.

Αναλύοντας στατιστικώς τις τιμές των 100 χρονοσειρών υδραυλικών υψών του σημείου S για την περίοδο 1969 με 2058, παρατηρείται ότι ο υδροφόρος ορίζοντας αυξάνει με την πάροδο των χρόνων. Από την παραπάνω επεξεργασία διακρίνεται ότι το απόλυτο υψόμετρο του υδροφορέα αυξάνεται στο μέλλον. Παρατηρείται επομένως ότι η κλιματική αλλαγή δεν επηρεάζει με ταπείνωση τον φυσικό υδροφορέα της Κάρλας. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η ανάλυση για τα ιστορικά χρόνια αφού διαπιστώνεται αύξηση στις μέσες τιμές των μηνιαίων υδραυλικών υψών τους εαρινούς μήνες.

Με βάση τα αποτελέσματα για την επίδραση της ανθρώπινης εκμετάλλευσης στον υπόγειο υδροφορέα της περιοχής έρευνας προκύπτουν τα κάτωθι συμπεράσματα:

Το υδραυλικό φορτίο της περιοχής μειώνεται λόγω των αντλήσεων όπως είναι αναμενόμενο. Οι διαφορές μεταξύ της στάθμης στην αρχή της περιόδου και στο τέλος αποδεικνύουν την ταπείνωση του υδροφορέα στο μέλλον.

Διαπιστώνεται ότι στο κέντρο σχεδόν του υδροφορέα, στην περιοχή της Ζώνης 7, συναντώνται οι μεγαλύτερες ταπεινώσεις.

Επίσης μεγάλη ταπείνωση φαίνεται να δέχεται και η περιοχή της Ζώνης 1 λόγω των γεωτρήσεων της ΔΕΥΑΜΒ.

Η περιοχή του ταμειυτήρα νοτιοανατολικά της λεκάνης παρατηρούνται υψηλότερα υδραυλικά ύψη καθώς σημείο αυτό έχουν καταργηθεί οι γεωτρήσεις λόγω δημιουργίας του ταμειυτήρα.

Η ανάλυση του υδατικού ισοζυγίου για το τέλος της προσομοίωσης (1/10/2058), δείχνει ότι οι αντλούμενες ποσότητες δεν καλύπτονται από τα ανανεώσιμα του υδροφορέα.

Συμπεραίνεται ότι η κλιματική αλλαγή δεν θα επιδράσει αρνητικά τον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα της λίμνης Κάρλας. Παρόλη την αύξηση της θερμοκρασίας και την μείωση των βροχοπτώσεων, η στάθμη του υδροφορέα φαίνεται να είναι σε συνεχή άνοδο με το πέρασμα των χρόνων. Με βάση τα αποτελέσματα της μελέτης, προκύπτει λοιπόν ότι τα ποσά που εκρέουν από τον υδροφορέα είναι μικρότερα σε σχέση με την τροφοδοσία. Όποτε η στάθμη ανέρχεται συνεχώς δημιουργώντας σε κάποιες περιοχές αρτεσιανισμό.

Όσο αναφορά την επίδραση της ανθρώπινης εκμετάλλευσης στον υπό μελέτη υδροφορέα, οι επιπτώσεις είναι σφοδρές και οδηγούν σε σοβαρή ταπείνωση του υδροφορέα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Βαβίζος Γ.,(1984). «Μελέτη-Επιπτώσεις αποξήρανσης λίμνης Κάρλας». Αθήνα.
- Λουκάς, Α., Βασιλειάδης, Λ., Μπαστρογιάννης Ν.,(2003). «Υδρολογική Προσομοίωση Υδατικού Ισοζυγίου Λεκάνης Απορροής Γερμασόγειας, Κύπρος». Πρακτικά Ημερίδας Μελέτες και Έρευνες Υδατικών Πόρων στον Κυπριακό Χώρο, Λευκωσία, Κύπρος, σελ. 83-114.
- Μαλλιαρός Αναστάσιος, (2010) «Διαχείριση Υδατικών Αποθεμάτων ταμιευτήρων σε Συνθήκες Κλιματικής Αλλαγής – Εφαρμογή στους Ταμιευτήρες Πλαστήρα και Σμοκόβου Θεσσαλίας.» Ε.Μ.Π. , Αθήνα.
- Μουστάκα Ε. (2002). «Διαχείριση Υδατικών Πόρων της υπό ανασύστασης Λίμνης Κάρλας με χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών.» Διπλωματική εργασία, τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Π.Θ.
- Μπαρτζώκα – Τσιόμπρα Μ.,Ψυλλός Ι. (2011) «Ιστορική αναδρομή της υπό επανασύσταση λίμνης Κάρλας και Επιχειρηματικό πλάνο για την ανάδειξη της περιοχής» Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.
- Μπεζές Κ. (2004). «Μελέτη έργων ενίσχυσης της ύδρευσης της μείζονος περιοχής Βόλου – Υδρογεωλογική Μελέτη». ΥΠΕΧΩΔΕ.
- Παπαμιχαήλ, Δ., (2001) «Τεχνική Υδρολογία Επιφανειακών Υδάτων», Εκδόσεις Γιαχούδη-Γιαπούλη, 394 σελ.
- Πατσώνας, Γ., 2008. «Επιπτώσεις σεναρίων κλιματικής αλλαγής και στρατηγικών διαχείρισης υδατικών πόρων στη λειτουργία του ταμιευτήρα της λίμνης Κάρλα.» Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.
- Σιδηρόπουλος, Π. (2004). «Προσομοίωση και Διαχείριση του Υπόγειου Υδροφορέα της Λίμνης Κάρλας με το Μαθηματικό Μοντέλο MODFLOW 2000», Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.
- Σιδηρόπουλος, Π (2007). «Στοχαστική Προσομοίωση του Υπόγειου Υδροφορέα της Λίμνης Κάρλας με το Μαθηματικό Μοντέλο MODFLOW 2000», Μεταπτυχιακή Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

- Τζαμπύρας Ι. (2009) «Ανάπτυξη υβριδικών μεθοδολογιών καταβιβασμού κλίμακας για την εκτίμηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στην ξηρασία.» Μεταπτυχιακή Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.
- Τσελέπη Μ. (2009) «Προσομοίωση της Λειτουργίας Υδροφορέα υπό Συνθήκες Κλιματικών Αλλαγών.» Διπλωματική εργασία, Θεσσαλονίκη, Οκτώβριος 2009.
- ΥΠΕΧΩΔΕ, «Γενική Γραμματεία Δημοσίων Έργων, Διεύθυνση Εγγειοβελτιστικών Έργων (1999). *Επαναδημιουργία Λίμνης Κάρλας: Περιβαλλοντική Τεχνική Έκθεση, Μελέτη Κόστους - Οφέλους και Υποστηρικτικές Μελέτες, Παράρτημα III.2, Υποστηρικτική Υδρογεωλογική Μελέτη*. Αθήνα
- ΥΠΕΧΩΔΕ, (2004). «Μελέτη Έργων Ενίσχυσης της Ύδρευσης της Μείζονος περιοχής του Βόλου, Αθήνα, 72 σελ.
- Π.Θ. (2010). «Αναγνωριστική μελέτη εδαφικών κατιζήσεων στο Δήμο Κάρλας».

ΞΕΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Arnell, N.W. (2003). Effects of climate change on river flows and groundwater recharge using the UKCIP02 scenarios. Report to UK Water Industry Research Limited. University of Southampton.
- Gerakis P.A., (1992). Conservation and Management of Greek Wetlands Proceedings of a Greek Wetlands Workshop held in Thessaloniki.
- Haldorsen Sylvi, Heim Michael, Dale Barrie, Landvik Jon Y., Martine van der Ploeg , Leijnse Anton, Salvigsen Otto, Hagen Jon Ove, Banks David, (2010), Sensitivity to longterm climate change of subpermafrost groundwater systems in Svalbard, Quaternary Research 73 (2010) 393–402.
- Hewitson, B.C. and Crane, R.G. (2003). Global climate change: Questions of downscaled climate scenarios for impact assessment. Bulletin of the American Meteorological Society, submitted.
- Holman P. & Tascone D. & Hess T. M., (2009). A comparison of stochastic and deterministic downscaling methods for modelling potential groundwater recharge under climate change in East Anglia, UK: implications for groundwater resource management, Hydrogeology Journal, 17: 1629–1641, 2009

- IPCC. 2001. Climate change 2001. Impacts, Adaption, and Vulnerability, McCATHY , Canziani O. Leary N., Dokken D. , White K., Houghton JT, Ding Y, Cambridge University Press: Cambridge.
- IPCC. 2001. Climate change 2001. In The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Houghton JT, Ding Y, Griggs DJ, Noguer M, van der Linden PJ, Dai X, Maskell K (eds.). Cambridge University Press: Cambridge.
- IPCC, 2007, Climate Change 2007. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Gin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- IPCC 2007. Climate Change 2007. Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof. P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge. UK, 976pp.
- IPCC. 2007. Climate Change 2007. Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.
- Kuhn Nikolaus J., Baumhauer Roland, Schutt Brigitta, (2009), Managing the impact of climate change on the hydrology of the Gallocanta Basin, NE-Spain, Journal of Environmental Management xxx (2009) 1–9
- Loukas, A., Mylopoulos, N. & Vasiliades, L., 2007. A Modelling System for the Evaluation of Water Resources Management Scenarios in Thessaly, Greece. Water Resources Management, Vol 21. pp 1673 – 1702.
- Loukas, A., L. Vasiliades and J. Tzabiras(2007), Evaluation of Climate Change on Drought Impulses in Thessaly, Greece European Water, 17/18 (1), 17-28.
- Loukas, A., Vasiliades, L. and Tzabiras, J., (2008). Climate Change Impacts on Drought Severity, Advances in Geosciences 17, pp 23-29.

- Mylopoulos, N., Sidiropoulos, P., and Loukas, A., (2008). A coupled surface hydrology-lake-groundwater modeling and management framework under hydrogeologic uncertainty, IAHR International Groundwater Symposium, Istanbul, Turkey
- Mendicino G. ,. Senatore A.,. Versace P, (2008) A Groundwater Resource Index (GRI) for drought monitoring and forecasting in a Mediterranean climate, Journal of Hydrology (2008) 357, 282– 302
- Peters E. (2003). Propagation of drought through groundwater systems - Illustrated in the Pang (UK) and Upper-Guadiana (ES) catchments. Ph.D. thesis, Wageningen University, The Netherlands. 203 pp
- Sidiropoulos, P., Folia, S., Mylopoulos, N. and Loukas, A., (2008). A coupled surface hydrology-lake-groundwater modeling framework for the lake Karla basin, Protection and Restoration of the Environment X, Greece, Kefalonia.
- SOGREAH - GRENOBLE (1974). Μελέτη αναπτύξεως υπογείων υδάτων πεδιάδος Θεσσαλίας. Τελική έκθεση, R 11971, Υπουργείο Γεωργίας, Διεύθυνση Γεωργ. Αναπτ. & YEB.
- Været Lars & Kelbe Bruce & Haldorsen Sylvi & Taylor Richard H. (2009), A modelling study of the effects of land management and climatic variations on groundwater inflow to Lake St Lucia, South Africa, Hydrogeology Journal 17: 1949–1967, 2009
- Varis Olli, Kajander Tommi And Lemmela Risto, (2004), Climate Andwater: From Climate Models Towater Resources Management and Vice Versa Climatic Change 66: 321–344, 2004.
- Vasiliades L., Loukas A., and Patsonas G. (2009.) Evaluation of a statistical downscaling procedure for the estimation of climate change impacts on droughts. Nat Hazards Earth Syst Sei, 9, 879-894, 2009
- Yu Pao-Shan and Wang Yu-Chi (2009), Impact of climate change on hydrological processes over a basin scale in northern Taiwan, Hydrol. Process. 23, 3556–3568 (2009)
- Zalidis G., and A. Gerakis, (1999). Research Evaluating Sustainability of Watershed Resources Management through Wetland Functional Analysis. Environmental Management Vol. 24, No. 2.

ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΟΙ ΤΟΠΟΙ

www.fdkarlas.gr

<http://www.ipcc.ch/>

<http://www.aquaveo.com/gms-tutorials>

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

<http://www.cccma.ec.gc.ca/>

<http://www.eea.europa.eu/>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Πίνακας 1 : Επεκταμένες Τιμές Υδραυλικών Φορτίων για τα σημεία Α,Β,Γ για την περίοδο 1960 -1987

Ημερομηνία	ΣΗΜΕΙΟ Α	ΣΗΜΕΙΟ Β	ΣΗΜΕΙΟ Γ	Ημερομηνία	ΣΗΜΕΙΟ Α	ΣΗΜΕΙΟ Β	ΣΗΜΕΙΟ Γ
1/10/1960	55.375	49.43	77.2	1/9/1964	56.435	49.1	77.19
1/11/1960	55.89	49.1	77.38	1/10/1964	56.355	48.18	77.2
1/12/1960	55.66	48.18	77.4	1/11/1964	55.78	48.58	76.31
1/1/1961	55.53	48.58	77.2	1/12/1964	55.64	47.78	73.85
1/2/1961	55.455	47.78	77.46	1/1/1965	55.735	48.18	74.91
1/3/1961	55.31	48.18	77.19	1/2/1965	55.785	49.18	75.5
1/4/1961	55.555	49.18	77.2	1/3/1965	55.215	49.18	75.58
1/5/1961	55.915	49.18	76.31	1/4/1965	56	49.26	75.84
1/6/1961	56.43	49.26	73.85	1/5/1965	55.755	49.25	76.03
1/7/1961	56.575	49.25	74.91	1/6/1965	55.665	49.37	76.25
1/8/1961	56.53	49.37	75.5	1/7/1965	55.59	49.05	76.5
1/9/1961	55.94	49.05	75.58	1/8/1965	55.56	47.98	76.9
1/10/1961	55.86	47.98	75.84	1/9/1965	55.615	48.08	76.5
1/11/1961	55.73	48.08	76.03	1/10/1965	55.995	49.08	76.9
1/12/1961	55.16	49.08	76.25	1/11/1965	56.505	48.18	76.73
1/1/1962	56.04	48.18	76.1	1/12/1965	55.94	48.28	76.3
1/2/1962	55.69	48.28	75.6	1/1/1966	55.86	48.48	75.68
1/3/1962	55.61	48.48	76.8	1/2/1966	55.73	48.75	75.78
1/4/1962	55.48	48.75	76.9	1/3/1966	55.16	48.97	75.68
1/5/1962	55.45	48.97	76.8	1/4/1966	56.04	48.97	75.8
1/6/1962	55.405	48.97	76.3	1/5/1966	55.69	49.05	75.9
1/7/1962	55.76	49.05	75.68	1/6/1966	55.61	49.18	75.5
1/8/1962	56.47	49.18	75.78	1/7/1966	55.48	49.43	76.15
1/9/1962	56.455	49.43	75.68	1/8/1966	55.45	49.1	76.17
1/10/1962	56.575	49.1	75.8	1/9/1966	55.405	48.18	76.06
1/11/1962	55.98	48.18	75.9	1/10/1966	48.58	76.9	55.76
1/12/1962	55.885	48.58	76.9	1/11/1966	47.78	76.8	56.465
1/1/1963	55.755	47.78	76.15	1/12/1966	48.18	75.1	56.465
1/2/1963	55.565	48.18	76.17	1/1/1967	49.18	74.7	56.44
1/3/1963	55.52	49.18	76.06	1/2/1967	49.18	74.27	55.85
1/4/1963	55.83	49.18	75.9	1/3/1967	49.26	74.5	56.065
1/5/1963	55.885	49.26	75.4	1/4/1967	49.25	74.9	55.86
1/6/1963	56.41	49.25	75.6	1/5/1967	49.37	74.6	55.725
1/7/1963	56.355	49.37	75.5	1/6/1967	49.05	74.75	55.115
1/8/1963	56.33	49.05	74.27	1/7/1967	47.98	75.1	55.755
1/9/1963	55.64	47.98	74.5	1/8/1967	48.08	74.4	55.415
1/10/1963	55.735	48.08	74.5	1/9/1967	49.08	75.6	55.515
1/11/1963	55.785	49.08	74.6	1/10/1967	48.18	76.9	55.62
1/12/1963	55.215	48.18	74.75	1/11/1967	48.28	76.73	55.575
1/1/1964	56	48.28	74.9	1/12/1967	48.48	76.3	55.79
1/2/1964	55.755	48.48	74.4	1/1/1968	48.75	75.68	55.95
1/3/1964	55.665	48.75	75.6	1/2/1968	48.97	75.78	56.465
1/4/1964	55.59	48.97	77.2	1/3/1968	48.97	75.68	55.64
1/5/1964	55.56	48.97	77.38	1/4/1968	49.05	75.8	55.565

1/6/1964	55.615	49.05	77.4	1/5/1968	49.18	75.9	55.52
1/7/1964	56.035	49.18	77.2	1/6/1968	49.43	77.46	55.83
1/8/1964	56.44	49.43	77.46	1/7/1968	49.1	77.19	55.885

date	ΣΗΜΕΙΟ Α	ΣΗΜΕΙΟ Β	ΣΗΜΕΙΟ Γ	date	ΣΗΜΕΙΟ Α	ΣΗΜΕΙΟ Β	ΣΗΜΕΙΟ Γ
1/8/1968	56.41	48.18	77.2	1/7/1972	55.585	48.58	76.17
1/9/1968	56.355	48.58	76.31	1/8/1972	55.65	47.78	77.46
1/10/1968	56.33	47.78	73.85	1/9/1972	55.775	48.18	77.19
1/11/1968	55.94	48.18	74.91	1/10/1972	56.305	48.88	77.2
1/12/1968	55.915	49.18	75.5	1/11/1972	55.25	49.18	75.68
1/1/1969	55.835	49.18	75.58	1/12/1972	55.89	49.18	77.2
1/2/1969	55.69	49.26	75.84	1/1/1973	55.665	49.26	77.38
1/3/1969	55.375	49.25	76.03	1/2/1973	55.575	49.25	77.4
1/4/1969	55.89	49.37	76.25	1/3/1973	55.74	49.37	76.9
1/5/1969	55.66	49.05	74.4	1/4/1973	55.585	49.05	77.46
1/6/1969	55.53	47.98	75.6	1/5/1973	55.65	47.98	77.19
1/7/1969	55.455	48.08	77.2	1/6/1973	55.775	47.87	77.2
1/8/1969	55.31	49.08	77.38	1/7/1973	56.305	47.34	76.31
1/9/1969	55.555	48.18	77.4	1/8/1973	55.99	47.91	73.85
1/10/1969	55.67	48.28	77.2	1/9/1973	56.295	48.39	74.91
1/11/1969	55.58	48.48	77.46	1/10/1973	56.495	48.75	75.5
1/12/1969	55.695	48.75	77.19	1/11/1973	56.455	48.97	75.58
1/1/1970	55.745	48.97	77.2	1/12/1973	55.97	48.97	75.84
1/2/1970	55.91	48.97	76.31	1/1/1974	55.71	49.05	76.03
1/3/1970	56.44	49.05	73.85	1/2/1974	55.475	49.12	76.25
1/4/1970	56.44	49.18	74.91	1/3/1974	55.73	49.88	75.9
1/5/1970	56.4	49.43	75.5	1/4/1974	55.74	49.48	76.3
1/6/1970	56.065	49.1	75.58	1/5/1974	55.505	49.78	77
1/7/1970	55.915	48.18	75.84	1/6/1974	56.565	49.61	76.9
1/8/1970	55.83	48.58	76.03	1/7/1974	56.465	59.08	76.73
1/9/1970	55.645	47.78	76.25	1/8/1974	56.435	48.06	76.3
1/10/1970	55.09	48.18	76.31	1/9/1974	56.355	47.7	75.68
1/11/1970	55.915	49.18	73.85	1/10/1974	56.33	48.08	75.78
1/12/1970	55.69	49.18	74.91	1/11/1974	55.715	49.38	75.68
1/1/1971	55.615	49.26	75.5	1/12/1974	55.575	49.66	75.8
1/2/1971	55.525	49.25	75.58	1/1/1975	55.735	49.73	75.9
1/3/1971	55.735	49.37	75.84	1/2/1975	55.68	49.78	76.5
1/4/1971	55.68	49.05	76.03	1/3/1975	55.875	49.86	76.15
1/5/1971	55.885	47.98	76.25	1/4/1975	55.685	49.82	76.17
1/6/1971	55.75	48.08	76.1	1/5/1975	55.64	49.53	76.06
1/7/1971	55.62	49.08	75.9	1/6/1975	55.865	49.57	75.9
1/8/1971	54.95	48.18	76.2	1/7/1975	56.25	48.78	76
1/9/1971	55.765	48.28	76.9	1/8/1975	56.315	48.08	75.5
1/10/1971	55.72	48.48	76.73	1/9/1975	56	48.58	75.2
1/11/1971	55.63	48.75	76.3	1/10/1975	55.88	45.16	74.27
1/12/1971	55.7	48.97	75.68	1/11/1975	55.97	48.37	74.7
1/1/1972	55.65	48.97	75.78	1/12/1975	56.09	48.81	74.6
1/2/1972	55.705	49.05	75.68	1/1/1976	56.23	48.78	74.75
1/3/1972	55.585	49.18	75.8	1/2/1976	56.33	48.76	74.5
1/4/1972	55.655	49.43	75.9	1/3/1976	56.29	47.73	74.4
1/5/1972	55.575	49.1	76.2	1/4/1976	56.345	49.13	75.6
1/6/1972	55.74	48.18	76.15	1/5/1976	56.065	49.15	75.78

date	ΣΗΜΕΙΟ Α	ΣΗΜΕΙΟ Β	ΣΗΜΕΙΟ Γ	date	ΣΗΜΕΙΟ Α	ΣΗΜΕΙΟ Β	ΣΗΜΕΙΟ Γ
1/6/1976	55.925	49.26	75.96	1/6/1980	56.41	49.25	75.6
1/7/1976	55.725	48.82	75.59	1/7/1980	56.355	49.37	75.5
1/8/1976	55.775	48.8	75	1/8/1980	56.33	49.05	74.27
1/9/1976	55.495	48.39	74.56	1/9/1980	55.64	47.98	74.5
1/10/1976	55.775	48.38	74.5	1/10/1980	55.735	48.08	74.5
1/11/1976	55.69	48.69	75.2	1/11/1980	55.785	49.08	74.6
1/12/1976	55.59	48.84	75.54	1/12/1980	55.215	48.18	74.75
1/1/1977	55.85	48.83	75.12	1/1/1981	56	48.28	74.9
1/2/1977	55.69	48.68	74.8	1/2/1981	55.755	48.48	74.4
1/3/1977	55.895	48.79	74.98	1/3/1981	55.665	48.75	75.6
1/4/1977	55.99	48.35	74.86	1/4/1981	55.59	48.97	77.2
1/5/1977	55.49	47.9	74.1	1/5/1981	55.56	48.97	77.38
1/6/1977	55.54	47.88	73.7	1/6/1981	55.615	49.05	77.4
1/7/1977	55.035	47.13	72.89	1/7/1981	56.035	49.18	77.2
1/8/1977	54.73	46.53	71.68	1/8/1981	56.44	49.43	77.46
1/9/1977	55.065	46.53	70.5	1/9/1981	56.435	49.1	77.19
1/10/1977	55.375	49.43	77.2	1/10/1981	56.355	48.18	77.2
1/11/1977	55.89	49.1	77.38	1/11/1981	55.78	48.58	76.31
1/12/1977	55.66	48.18	77.4	1/12/1981	55.64	47.78	73.85
1/1/1978	55.53	48.58	77.2	1/1/1982	55.735	48.18	74.91
1/2/1978	55.455	47.78	77.46	1/2/1982	55.785	49.18	75.5
1/3/1978	55.31	48.18	77.19	1/3/1982	55.215	49.18	75.58
1/4/1978	55.555	49.18	77.2	1/4/1982	56	49.26	75.84
1/5/1978	55.915	49.18	76.31	1/5/1982	55.755	49.25	76.03
1/6/1978	56.43	49.26	73.85	1/6/1982	55.665	49.37	76.25
1/7/1978	56.575	49.25	74.91	1/7/1982	55.59	49.05	76.5
1/8/1978	56.53	49.37	75.5	1/8/1982	55.56	47.98	76.9
1/9/1978	55.94	49.05	75.58	1/9/1982	55.615	48.08	76.5
1/10/1978	55.86	47.98	75.84	1/10/1982	55.995	49.08	76.9
1/11/1978	55.73	48.08	76.03	1/11/1982	56.505	48.18	76.73
1/12/1978	55.16	49.08	76.25	1/12/1982	55.94	48.28	76.3
1/1/1979	56.04	48.18	76.1	1/1/1983	55.86	48.48	75.68
1/2/1979	55.69	48.28	75.6	1/2/1983	55.73	48.75	75.78
1/3/1979	55.61	48.48	76.8	1/3/1983	55.16	48.97	75.68
1/4/1979	55.48	48.75	76.9				
1/5/1979	55.45	48.97	76.8	1/4/1983	56.04	48.97	75.8
1/6/1979	55.405	48.97	76.3	1/5/1983	55.69	49.05	75.9
1/7/1979	55.76	49.05	75.68	1/6/1983	55.61	49.18	75.5
1/8/1979	56.47	49.18	75.78	1/7/1983	55.48	49.43	76.15
1/9/1979	56.455	49.43	75.68	1/8/1983	55.45	49.1	76.17
1/10/1979	56.575	49.1	75.8	1/9/1983	55.405	48.18	76.06
1/11/1979	55.98	48.18	75.9	1/10/1983	55.76	48.58	76.9
1/12/1979	55.885	48.58	76.9	1/11/1983	56.465	47.78	76.8
1/1/1980	55.755	47.78	76.15	1/12/1983	56.465	48.18	75.1
1/2/1980	55.565	48.18	76.17	1/1/1984	56.44	49.18	74.7
1/3/1980	55.52	49.18	76.06	1/2/1984	55.85	49.18	74.27
1/4/1980	55.83	49.18	75.9	1/3/1984	56.065	49.26	74.5
1/5/1980	55.885	49.26	75.4				

date	ΣΗΜΕΙΟ Α	ΣΗΜΕΙΟ Β	ΣΗΜΕΙΟ Γ
1/4/1984	55.86	49.25	74.9
1/5/1984	55.725	49.37	74.6
1/6/1984	55.115	49.05	74.75
1/7/1984	55.755	47.98	75.1
1/8/1984	55.415	48.08	74.4
1/9/1984	55.515	49.08	75.6
1/10/1984	55.62	48.18	76.9
1/11/1984	55.575	48.28	76.73
1/12/1984	55.79	48.48	76.3
1/1/1985	55.95	48.75	75.68
1/2/1985	56.465	48.97	75.78
1/3/1985	55.64	48.97	75.68
1/4/1985	55.565	49.05	75.8
1/5/1985	55.52	49.18	75.9
1/6/1985	55.83	49.43	77.46
1/7/1985	55.885	49.1	77.19
1/8/1985	56.41	48.18	77.2
1/9/1985	56.355	48.58	76.31
1/10/1985	56.33	47.78	73.85
1/11/1985	55.94	48.18	74.91
1/12/1985	55.915	49.18	75.5
1/1/1986	55.835	49.18	75.58
1/2/1986	55.69	49.26	75.84
1/3/1986	55.375	49.25	76.03
1/4/1986	55.89	49.37	76.25
1/5/1986	55.66	49.05	74.4
1/6/1986	55.53	47.98	75.6
1/7/1986	55.455	48.08	77.2
1/8/1986	55.31	49.08	77.38
1/9/1986	55.555	48.18	77.4
1/10/1986	55.67	48.28	77.2
1/11/1986	55.58	48.48	77.46
1/12/1986	55.695	48.75	77.19
1/1/1987	55.745	48.97	77.2

Πίνακας 2: ΥΔΑΤΙΚΑ ΙΣΟΖΥΓΙΑ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ, όπως παρήχθησαν από το μοντέλο MODFLOW

ΕΠΙΛΥΣΗ 1^{ης} ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑΣ ΦΥΣΙΚΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ

VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 1			
IN STRESS PERIOD 1			

CUMULATIVE VOLUMES		L**3	RATES FOR THIS TIME STEP
L**3/T			
-----			-----
IN:			IN:
---			---
STORAGE =	242810.2188	STORAGE =	
7832.5879		CONSTANT HEAD =	
CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =	
0.0000		WELLS =	
WELLS =	0.0000	WELLS =	
0.0000		HEAD DEP BOUNDS =	
HEAD DEP BOUNDS =	49326.6328	HEAD DEP BOUNDS =	
1591.1818		RECHARGE =	
RECHARGE =	2392205.5000	RECHARGE =	
77167.9219		TOTAL IN =	
TOTAL IN =	2684342.2500	TOTAL IN =	
86591.6875		OUT:	
OUT:		OUT:	
----		----	
STORAGE =	2628923.7500	STORAGE =	
84803.9922		CONSTANT HEAD =	
CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =	
0.0000		WELLS =	
WELLS =	0.0000	WELLS =	
0.0000		HEAD DEP BOUNDS =	
HEAD DEP BOUNDS =	55327.6172	HEAD DEP BOUNDS =	
1784.7618		RECHARGE =	
RECHARGE =	0.0000	RECHARGE =	
0.0000		TOTAL OUT =	
TOTAL OUT =	2684251.2500	TOTAL OUT =	
86588.7578		IN - OUT =	
IN - OUT =	91.0000	IN - OUT =	
2.9297		PERCENT DISCREPANCY =	
PERCENT DISCREPANCY =	0.00	PERCENT DISCREPANCY =	
0.00			

VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 1
IN STRESS PERIOD 1176

CUMULATIVE VOLUMES L**3/T	L**3	RATES FOR THIS TIME STEP
IN:		IN:
---		---
STORAGE = 854588992.0000		STORAGE = 14840.4414
CONSTANT HEAD = 0.0000		CONSTANT HEAD =
0.0000		
WELLS = 0.0000		WELLS = 0.0000
HEAD DEP BOUNDS = 17355162.0000		HEAD DEP BOUNDS =
571.9069		
RECHARGE = 1841557248.0000		RECHARGE = 0.0000
TOTAL IN = 2713501440.0000		TOTAL IN = 15412.3486
OUT:		OUT:
----		----
STORAGE = 2577291520.0000		STORAGE = 13920.2773
CONSTANT HEAD = 0.0000		CONSTANT HEAD =
0.0000		
WELLS = 0.0000		WELLS = 0.0000
HEAD DEP BOUNDS = 136183008.0000		HEAD DEP BOUNDS =
1492.6438		
RECHARGE = 0.0000		RECHARGE = 0.0000
TOTAL OUT = 2713474560.0000		TOTAL OUT =
15412.9209		
IN - OUT = 26880.0000		IN - OUT = -0.5723
PERCENT DISCREPANCY = 0.00		PERCENT DISCREPANCY =
0.00		

TIME SUMMARY AT END OF TIME STEP	1	IN	STRESS PERIOD	1176
SECONDS	MINUTES	HOURS	DAYS	YEARS
TIME STEP LENGTH	2.59200E+06	43200.	720.00	30.000
8.21355E-02				
STRESS PERIOD TIME	2.59200E+06	43200.	720.00	30.000
8.21355E-02				
TOTAL TIME	3.09260E+09	5.15434E+07	8.59056E+05	35794. 97.999

ΕΠΙΛΥΣΗ 100^{ης} ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑΣ ΦΥΣΙΚΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ

VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 1 IN STRESS PERIOD 1				

CUMULATIVE VOLUMES		L**3	RATES FOR THIS TIME STEP	
L**3/T			-----	

IN:			IN:	
---			---	
STORAGE =	743165.8125		STORAGE =	
23973.0898				
CONSTANT HEAD =	0.0000		CONSTANT HEAD =	
0.0000				
WELLS =	0.0000		WELLS =	
0.0000				
HEAD DEP BOUNDS =	49756.7617		HEAD DEP BOUNDS =	
1605.0569				
RECHARGE =	0.0000		RECHARGE =	
0.0000				
TOTAL IN =	792922.5625		TOTAL IN =	
25578.1465				
OUT:			OUT:	
----			----	
STORAGE =	738104.5625		STORAGE =	
23809.8242				
CONSTANT HEAD =	0.0000		CONSTANT HEAD =	
0.0000				
WELLS =	0.0000		WELLS =	
0.0000				
HEAD DEP BOUNDS =	54824.5938		HEAD DEP BOUNDS =	
1768.5353				
RECHARGE =	0.0000		RECHARGE =	
0.0000				
TOTAL OUT =	792929.1250		TOTAL OUT =	
25578.3594				
IN - OUT =	-6.5625		IN - OUT =	
-0.2129				
PERCENT DISCREPANCY =	0.00		PERCENT DISCREPANCY =	
0.00				
TIME SUMMARY AT END OF TIME STEP			1 IN STRESS PERIOD	1
	SECONDS	MINUTES	HOURS	DAYS
YEARS				

TIME STEP LENGTH	2.67840E+06	44640.	744.00	31.000
8.48734E-02				
STRESS PERIOD TIME	2.67840E+06	44640.	744.00	31.000
8.48734E-02				

TOTAL TIME 2.67840E+06	44640.	744.00	31.000
8.48734E-0			

VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 1 IN STRESS PERIOD1176				

CUMULATIVE VOLUMES	L**3	RATES FOR THIS TIME STEP		
L**3/T				

IN:		IN:		
---		---		
STORAGE =	754297088.0000	STORAGE =		
0.0000		CONSTANT HEAD =		
0.0000	0.0000	CONSTANT HEAD =		
0.0000	0.0000	WELLS =		
HEAD DEP BOUNDS =	17097506.0000	HEAD DEP BOUNDS =		
370.3909		RECHARGE =		
732855.3125	2369409536.0000	RECHARGE =		
TOTAL IN =	3140804096.0000	TOTAL IN =		
733225.6875				
OUT:		OUT:		
---		---		
STORAGE =	3011561472.0000	STORAGE =		
727347.1875		CONSTANT HEAD =		
0.0000	0.0000	CONSTANT HEAD =		
0.0000	0.0000	WELLS =		
HEAD DEP BOUNDS =	129206352.0000	HEAD DEP BOUNDS =		
5812.0649		RECHARGE =		
0.0000	0.0000	RECHARGE =		
TOTAL OUT =	3140767744.0000	TOTAL OUT =		
733159.2500				
IN - OUT =	36352.0000	IN - OUT =		
66.4375				
PERCENT DISCREPANCY =	0.00	PERCENT DISCREPANCY =		
0.01				
TIME SUMMARY AT END OF TIME STEP 1 IN STRESS PERIOD 1176				
YEARS	SECONDS	MINUTES	HOURS	DAYS

TIME STEP LENGTH	2.59200E+06	43200.	720.00	30.000
8.21355E-02				
STRESS PERIOD TIME	2.59200E+06	43200.	720.00	30.000
8.21355E-02				
TOTAL TIME	3.09260E+09	5.15434E+07	8.59056E+05	35794.
97.999				

ΕΠΙΛΥΣΗ 31^{ης} ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑΣ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΥΠΟ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ

VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 1 IN
STRESS PERIOD 1

CUMULATIVE VOLUMES L**3/T	L**3	RATES FOR THIS TIME STEP			
-----		-----			
IN: ---		IN: ---			
STORAGE =	698241.5000	STORAGE =			
22523.9199					
CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =			
0.0000					
WELLS =	0.0000	WELLS =			
0.0000					
HEAD DEP BOUNDS =	2464133.5000	HEAD DEP BOUNDS =			
79488.1797					
RECHARGE =	0.0000	RECHARGE =			
0.0000					
TOTAL IN =	3162375.0000	TOTAL IN =			
102012.1016					
OUT: ----		OUT: ----			
STORAGE =	3043016.7500	STORAGE =			
98161.8281					
CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =			
0.0000					
WELLS =	0.0000	WELLS =			
0.0000					
HEAD DEP BOUNDS =	119356.0625	HEAD DEP BOUNDS =			
3850.1956					
RECHARGE =	0.0000	RECHARGE =			
0.0000					
TOTAL OUT =	3162372.7500	TOTAL OUT =			
102012.0234					
IN - OUT =	2.2500	IN - OUT =			
7.8125E-02					
PERCENT DISCREPANCY =	0.00	PERCENT DISCREPANCY =			
0.00					
TIME SUMMARY AT END OF TIME STEP		1 IN STRESS PERIOD	1		
	SECONDS	MINUTES	HOURS	DAYS	YEARS
-----		-----			
TIME STEP LENGTH	2.67840E+06	44640.	744.00	31.000	
8.48734E-02					
STRESS PERIOD TIME	2.67840E+06	44640.	744.00	31.000	
8.48734E-02					
TOTAL TIME	2.67840E+06	44640.	744.00	31.000	
8.48734E-02					
1					

VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 1 IN
STRESS PERIOD 861

CUMULATIVE VOLUMES		L**3	RATES FOR THIS TIME STEP		
L**3/T					
IN:			IN:		
---			---		
STORAGE =	6852113408.0000		STORAGE =		
104727.3047					
CONSTANT HEAD =	0.0000		CONSTANT HEAD =		
0.0000					
WELLS =	0.0000		WELLS =		
0.0000					
HEAD DEP BOUNDS =	627929984.0000		HEAD DEP BOUNDS =		
36207.2656					
RECHARGE =	2626750208.0000		RECHARGE =		
0.0000					
TOTAL IN =	10106793984.0000		TOTAL IN =		
140934.5625					
OUT:			OUT:		
----			----		
STORAGE =	4657136640.0000		STORAGE =		
135545.7656					
CONSTANT HEAD =	0.0000		CONSTANT HEAD =		
0.0000					
WELLS =	5340495360.0000		WELLS =		
5321.8232					
HEAD DEP BOUNDS =	109153864.0000		HEAD DEP BOUNDS =		
66.9462					
RECHARGE =	0.0000		RECHARGE =		
0.0000					
TOTAL OUT =	10106785792.0000		TOTAL OUT =		
140934.5469					
IN - OUT =	8192.0000		IN - OUT =		
1.5625E-02					
PERCENT DISCREPANCY =	0.00		PERCENT DISCREPANCY =		
0.00					
TIME SUMMARY AT END OF TIME STEP			1 IN STRESS PERIOD	861	
	SECONDS	MINUTES	HOURS	DAYS	YEARS

TIME STEP LENGTH	2.59200E+06	43200.	720.00	30.000	
8.21355E-02					
STRESS PERIOD TIME	2.59200E+06	43200.	720.00	30.000	
8.21355E-02					
TOTAL TIME	2.26420E+09	3.77366E+07	6.28944E+05	26206.	71.748

**ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΑ ΠΑΡΑΘΕΤΟΝΤΑΙ ΤΑ ΙΣΟΖΥΓΙΑ ΤΩΝ 10 ΠΡΩΤΩΝ
ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ 10 ΤΕΛΕΥΤΑΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ
ΥΠΟ ΑΝΤΛΗΣΗ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ**

VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 1 IN
STRESS PERIOD 1

CUMULATIVE VOLUMES	L**3	RATES FOR THIS TIME STEP	L**3/T
-----	-----		
IN:	IN:		
---	---		
STORAGE =	698241.5000	STORAGE =	22523.9199
CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =	0.0000
WELLS =	0.0000	WELLS =	0.0000
HEAD DEP BOUNDS =	2464133.5000	HEAD DEP BOUNDS =	79488.1797
RECHARGE =	0.0000	RECHARGE =	0.0000
TOTAL IN =	3162375.0000	TOTAL IN =	102012.1016
OUT:	OUT:		
----	----		
STORAGE =	3043016.7500	STORAGE =	98161.8281
CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =	0.0000
WELLS =	0.0000	WELLS =	0.0000
HEAD DEP BOUNDS =	119356.0625	HEAD DEP BOUNDS =	3850.1956
RECHARGE =	0.0000	RECHARGE =	0.0000
TOTAL OUT =	3162372.7500	TOTAL OUT =	102012.0234
IN - OUT =	2.2500	IN - OUT =	7.8125E-02
PERCENT DISCREPANCY =	0.00	PERCENT DISCREPANCY =	0.00

VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 1 IN
STRESS PERIOD 2

CUMULATIVE VOLUMES		L**3	RATES FOR THIS TIME STEP		L**3/T
-----		-----			
IN:		IN:			
---		---			
STORAGE =		1276033.7500	STORAGE =		20635.4395
CONSTANT HEAD =		0.0000	CONSTANT HEAD =		0.0000
WELLS =		0.0000	WELLS =		0.0000
HEAD DEP BOUNDS =		4296630.5000	HEAD DEP BOUNDS =		65446.3203
RECHARGE =		0.0000	RECHARGE =		0.0000
TOTAL IN =		5572664.0000	TOTAL IN =		86081.7578
OUT:		OUT:			
----		----			
STORAGE =		5354460.5000	STORAGE =		82551.5625
CONSTANT HEAD =		0.0000	CONSTANT HEAD =		0.0000
WELLS =		0.0000	WELLS =		0.0000
HEAD DEP BOUNDS =		218206.5000	HEAD DEP BOUNDS =		3530.3728
RECHARGE =		0.0000	RECHARGE =		0.0000
TOTAL OUT =		5572667.0000	TOTAL OUT =		86081.9375
IN - OUT =		-3.0000	IN - OUT =		-0.1797
PERCENT DISCREPANCY =		0.00	PERCENT DISCREPANCY =		0.00

VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 1 IN
STRESS PERIOD 3

CUMULATIVE VOLUMES	L**3	RATES FOR THIS TIME STEP	L**3/T
IN:	IN:		
---	---		
STORAGE =	1876746.2500	STORAGE =	19377.8242
CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =	0.0000
WELLS =	0.0000	WELLS =	0.0000
HEAD DEP BOUNDS =	6037136.5000	HEAD DEP BOUNDS =	56145.3555
RECHARGE =	0.0000	RECHARGE =	0.0000
TOTAL IN =	7913883.0000	TOTAL IN =	75523.1797
OUT:	OUT:		
----	----		
STORAGE =	7592897.0000	STORAGE =	72207.6172
CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =	0.0000
WELLS =	0.0000	WELLS =	0.0000
HEAD DEP BOUNDS =	320989.6250	HEAD DEP BOUNDS =	3315.5850
RECHARGE =	0.0000	RECHARGE =	0.0000
TOTAL OUT =	7913886.5000	TOTAL OUT =	75523.2031
IN - OUT =	-3.5000	IN - OUT =	-2.3438E-02
PERCENT DISCREPANCY =	0.00	PERCENT DISCREPANCY =	0.00

VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 1 IN
STRESS PERIOD 4

CUMULATIVE VOLUMES	L**3	RATES FOR THIS TIME STEP	L**3/T
IN:	IN:		
---	---		
STORAGE =	2433480.5000	STORAGE =	18557.8086
CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =	0.0000
WELLS =	0.0000	WELLS =	0.0000
HEAD DEP BOUNDS =	7539632.5000	HEAD DEP BOUNDS =	50083.1992
RECHARGE =	0.0000	RECHARGE =	0.0000
TOTAL IN =	9973113.0000	TOTAL IN =	68641.0078
OUT:	OUT:		
----	----		
STORAGE =	9555563.0000	STORAGE =	65422.2070
CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =	0.0000
WELLS =	0.0000	WELLS =	0.0000
HEAD DEP BOUNDS =	417557.3750	HEAD DEP BOUNDS =	3218.9250
RECHARGE =	0.0000	RECHARGE =	0.0000
TOTAL OUT =	9973120.0000	TOTAL OUT =	68641.1328
IN - OUT =	-7.0000	IN - OUT =	-0.1250
PERCENT DISCREPANCY =	0.00	PERCENT DISCREPANCY =	0.00

VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 1 IN
STRESS PERIOD 5

```

-----
CUMULATIVE VOLUMES    L**3    RATES FOR THIS TIME STEP
L**3/T
-----

      IN:                      IN:
      ---                      ---
      STORAGE = 14020278.0000    STORAGE = 373767.6875
      CONSTANT HEAD = 0.0000    CONSTANT HEAD = 0.0000
      WELLS = 0.0000    WELLS = 0.0000
      HEAD DEP BOUNDS = 8960712.0000    HEAD DEP BOUNDS =
45841.2656
      RECHARGE = 0.0000    RECHARGE = 0.0000

      TOTAL IN = 22980990.0000    TOTAL IN = 419608.9375

      OUT:                      OUT:
      ----                      ----
      STORAGE = 10863927.0000    STORAGE = 42205.3008
      CONSTANT HEAD = 0.0000    CONSTANT HEAD = 0.0000
      WELLS = 11601899.0000    WELLS = 374254.8125
      HEAD DEP BOUNDS = 515184.5625    HEAD DEP BOUNDS =
3149.2642
      RECHARGE = 0.0000    RECHARGE = 0.0000

      TOTAL OUT = 22981010.0000    TOTAL OUT = 419609.3750

      IN - OUT = -20.0000    IN - OUT = -0.4375

      PERCENT DISCREPANCY = 0.00    PERCENT DISCREPANCY =
0.00

```

1 VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 1
IN STRESS PERIOD 6

L**3/T	CUMULATIVE VOLUMES L**3		RATES FOR THIS TIME STEP	
	-----	-----		
	IN:	IN:		
	---	---		
	STORAGE = 25111890.0000	STORAGE = 369720.4062		
	CONSTANT HEAD = 0.0000	CONSTANT HEAD = 0.0000		
	WELLS = 0.0000	WELLS = 0.0000		
42885.6680	HEAD DEP BOUNDS = 10247282.0000	HEAD DEP BOUNDS =		
	RECHARGE = 0.0000	RECHARGE = 0.0000		
	TOTAL IN = 35359172.0000	TOTAL IN = 412606.0625		
	OUT:	OUT:		
	----	----		
	STORAGE = 11921114.0000	STORAGE = 35239.5664		
	CONSTANT HEAD = 0.0000	CONSTANT HEAD = 0.0000		
	WELLS = 22829544.0000	WELLS = 374254.8125		
3111.9326	HEAD DEP BOUNDS = 608542.5625	HEAD DEP BOUNDS =		
	RECHARGE = 0.0000	RECHARGE = 0.0000		
	TOTAL OUT = 35359200.0000	TOTAL OUT = 412606.3125		
	IN - OUT = -28.0000	IN - OUT = -0.2500		
0.00	PERCENT DISCREPANCY = 0.00	PERCENT DISCREPANCY =		

VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 1 IN
STRESS PERIOD 7

```

-----
CUMULATIVE VOLUMES    L**3    RATES FOR THIS TIME STEP
L**3/T
-----

      IN:                      IN:
      ---                      ---
      STORAGE = 51636140.0000    STORAGE = 855620.9375
      CONSTANT HEAD = 0.0000    CONSTANT HEAD = 0.0000
      WELLS = 0.0000            WELLS = 0.0000
      HEAD DEP BOUNDS = 11513419.0000    HEAD DEP BOUNDS =
40843.1250
      RECHARGE = 0.0000            RECHARGE = 0.0000

      TOTAL IN = 63149560.0000    TOTAL IN = 896464.0625

      OUT:                      OUT:
      ----                      ----
      STORAGE = 12843970.0000    STORAGE = 29769.5430
      CONSTANT HEAD = 0.0000    CONSTANT HEAD = 0.0000
      WELLS = 49603168.0000    WELLS = 863665.3750
      HEAD DEP BOUNDS = 702456.2500    HEAD DEP BOUNDS =
3029.4736
      RECHARGE = 0.0000            RECHARGE = 0.0000

      TOTAL OUT = 63149592.0000    TOTAL OUT = 896464.4375

      IN - OUT = -32.0000            IN - OUT = -0.3750

      PERCENT DISCREPANCY = 0.00    PERCENT DISCREPANCY =
0.00

```

VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 1 IN
STRESS PERIOD 9

CUMULATIVE VOLUMES	L**3	RATES FOR THIS TIME STEP	L**3/T
IN:	IN:		
---	---		
STORAGE =	92641840.0000	STORAGE =	484796.7812
CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =	0.0000
WELLS =	0.0000	WELLS =	0.0000
HEAD DEP BOUNDS =	13886693.0000	HEAD DEP BOUNDS =	38341.1562
RECHARGE =	0.0000	RECHARGE =	0.0000
TOTAL IN =	106528536.0000	TOTAL IN =	523137.9375
OUT:	OUT:		
----	----		
STORAGE =	17185050.0000	STORAGE =	117327.3203
CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =	0.0000
WELLS =	88468112.0000	WELLS =	403043.9062
HEAD DEP BOUNDS =	875407.8750	HEAD DEP BOUNDS =	2766.7344
RECHARGE =	0.0000	RECHARGE =	0.0000
TOTAL OUT =	106528568.0000	TOTAL OUT =	523137.9375
IN - OUT =	-32.0000	IN - OUT =	0.0000
PERCENT DISCREPANCY =	0.00	PERCENT DISCREPANCY =	0.00

VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 1 IN
STRESS PERIOD 851

CUMULATIVE VOLUMES	L**3	RATES FOR THIS TIME STEP	L**3/T
-----	-----		
IN:	IN:		
---	---		
STORAGE = 6766522368.0000	STORAGE = 202219.7500		
CONSTANT HEAD = 0.0000	CONSTANT HEAD = 0.0000		
WELLS = 0.0000	WELLS = 0.0000		
HEAD DEP BOUNDS = 617239488.0000	HEAD DEP BOUNDS = 33905.8633		
RECHARGE = 2626750208.0000	RECHARGE = 0.0000		
TOTAL IN = 10010512384.0000	TOTAL IN = 236125.6094		
OUT:	OUT:		
----	----		
STORAGE = 4637239808.0000	STORAGE = 8521.7461		
CONSTANT HEAD = 0.0000	CONSTANT HEAD = 0.0000		
WELLS = 5264137728.0000	WELLS = 227478.1406		
HEAD DEP BOUNDS = 109126416.0000	HEAD DEP BOUNDS = 125.7394		
RECHARGE = 0.0000	RECHARGE = 0.0000		
TOTAL OUT = 10010504192.0000	TOTAL OUT = 236125.6250		
IN - OUT = 8192.0000	IN - OUT = -1.5625E-02		
PERCENT DISCREPANCY = 0.00	PERCENT DISCREPANCY = 0.00		

VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 1 IN
STRESS PERIOD 852

CUMULATIVE VOLUMES		L**3	RATES FOR THIS TIME STEP		L**3/T
-----		-----			
IN:		IN:			
---		---			
STORAGE =		6772927488.0000	STORAGE =		206614.9375
CONSTANT HEAD =		0.0000	CONSTANT HEAD =		0.0000
WELLS =		0.0000	WELLS =		0.0000
HEAD DEP BOUNDS =		618293824.0000	HEAD DEP BOUNDS =		34009.8398
RECHARGE =		2626750208.0000	RECHARGE =		0.0000
TOTAL IN =		10017971200.0000	TOTAL IN =		240624.7812
OUT:		OUT:			
----		----			
STORAGE =		4637279232.0000	STORAGE =		1273.1156
CONSTANT HEAD =		0.0000	CONSTANT HEAD =		0.0000
WELLS =		5271554048.0000	WELLS =		239233.6875
HEAD DEP BOUNDS =		109130072.0000	HEAD DEP BOUNDS =		117.9770
RECHARGE =		0.0000	RECHARGE =		0.0000
TOTAL OUT =		10017963008.0000	TOTAL OUT =		240624.7812
IN - OUT =		8192.0000	IN - OUT =		0.0000
PERCENT DISCREPANCY =		0.00	PERCENT DISCREPANCY =		0.00

1

VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 1 IN
STRESS PERIOD 853

```

-----
CUMULATIVE VOLUMES    L**3    RATES FOR THIS TIME STEP    L**3/T
-----
IN:                    IN:
---                    ---
STORAGE = 6783331840.0000    STORAGE = 335624.0000
CONSTANT HEAD = 0.0000    CONSTANT HEAD = 0.0000
WELLS = 0.0000    WELLS = 0.0000
HEAD DEP BOUNDS = 619352768.0000    HEAD DEP BOUNDS = 34159.9141
RECHARGE = 2626750208.0000    RECHARGE = 0.0000

TOTAL IN = 10029434880.0000    TOTAL IN = 369783.9062

OUT:                    OUT:
----                    ----
STORAGE = 4637284352.0000    STORAGE = 166.7868
CONSTANT HEAD = 0.0000    CONSTANT HEAD = 0.0000
WELLS = 5283008512.0000    WELLS = 369506.3750
HEAD DEP BOUNDS = 109133504.0000    HEAD DEP BOUNDS = 110.7271
RECHARGE = 0.0000    RECHARGE = 0.0000

TOTAL OUT = 10029426688.0000    TOTAL OUT = 369783.8750

IN - OUT = 8192.0000    IN - OUT = 3.1250E-02

PERCENT DISCREPANCY = 0.00    PERCENT DISCREPANCY = 0.00

```

VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 1 IN
STRESS PERIOD 854

CUMULATIVE VOLUMES	L**3	RATES FOR THIS TIME STEP	L**3/T
-----	-----		
IN:	IN:		
---	---		
STORAGE =	6797000704.0000	STORAGE =	488164.6875
CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =	0.0000
WELLS =	0.0000	WELLS =	0.0000
HEAD DEP BOUNDS =	620314816.0000	HEAD DEP BOUNDS =	34358.9531
RECHARGE =	2626750208.0000	RECHARGE =	0.0000
TOTAL IN =	10044065792.0000	TOTAL IN =	522523.6250
OUT:	OUT:		
----	----		
STORAGE =	4637290496.0000	STORAGE =	214.2864
CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =	0.0000
WELLS =	5297630208.0000	WELLS =	522204.7188
HEAD DEP BOUNDS =	109136432.0000	HEAD DEP BOUNDS =	104.6785
RECHARGE =	0.0000	RECHARGE =	0.0000
TOTAL OUT =	10044057600.0000	TOTAL OUT =	522523.6875
IN - OUT =	8192.0000	IN - OUT =	-6.2500E-02
PERCENT DISCREPANCY =	0.00	PERCENT DISCREPANCY =	0.00

1
VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 1 IN
STRESS PERIOD 855

```

-----
CUMULATIVE VOLUMES    L**3    RATES FOR THIS TIME STEP
L**3/T
-----

IN:                    IN:
---                    ---
STORAGE = 6812585472.0000    STORAGE = 502741.5625
CONSTANT HEAD = 0.0000    CONSTANT HEAD = 0.0000
WELLS = 0.0000    WELLS = 0.0000
HEAD DEP BOUNDS = 621389696.0000    HEAD DEP BOUNDS =
34674.4062
RECHARGE = 2626750208.0000    RECHARGE = 0.0000
TOTAL IN = 10060725248.0000    TOTAL IN = 537416.0000

OUT:                    OUT:
----                    ----
STORAGE = 4637292032.0000    STORAGE = 46.0552
CONSTANT HEAD = 0.0000    CONSTANT HEAD = 0.0000
WELLS = 5314285568.0000    WELLS = 537271.7500
HEAD DEP BOUNDS = 109139472.0000    HEAD DEP BOUNDS =
98.1372
RECHARGE = 0.0000    RECHARGE = 0.0000
TOTAL OUT = 10060718080.0000    TOTAL OUT = 537415.9375
IN - OUT = 7168.0000    IN - OUT = 6.2500E-02

PERCENT DISCREPANCY = 0.00    PERCENT DISCREPANCY =
0.00

```

1
VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 1 IN
STRESS PERIOD 856

```

-----
CUMULATIVE VOLUMES    L**3    RATES FOR THIS TIME STEP
L**3/T
-----

IN:                    IN:
---                    ---
STORAGE = 6824309248.0000    STORAGE = 390798.9375
CONSTANT HEAD = 0.0000    CONSTANT HEAD = 0.0000
WELLS = 0.0000    WELLS = 0.0000
HEAD DEP BOUNDS = 622440768.0000    HEAD DEP BOUNDS =
35035.3750
RECHARGE = 2626750208.0000    RECHARGE = 0.0000

TOTAL IN = 10073500672.0000    TOTAL IN = 425834.3125

OUT:                    OUT:
----                    ----
STORAGE = 4637619200.0000    STORAGE = 10903.4912
CONSTANT HEAD = 0.0000    CONSTANT HEAD = 0.0000
WELLS = 5326730752.0000    WELLS = 414838.6562
HEAD DEP BOUNDS = 109142240.0000    HEAD DEP BOUNDS =
92.1603
RECHARGE = 0.0000    RECHARGE = 0.0000

TOTAL OUT = 10073491456.0000    TOTAL OUT = 425834.3125

IN - OUT = 9216.0000    IN - OUT = 0.0000

PERCENT DISCREPANCY = 0.00    PERCENT DISCREPANCY =
0.00

```

VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 1 IN
STRESS PERIOD 857

	CUMULATIVE VOLUMES	L**3	RATES FOR THIS TIME STEP
L**3/T			
	IN:	IN:	
	---	---	
	STORAGE = 6833401856.0000	STORAGE = 293315.4375	
	CONSTANT HEAD = 0.0000	CONSTANT HEAD = 0.0000	
	WELLS = 0.0000	WELLS = 0.0000	
35403.6875	HEAD DEP BOUNDS = 623538304.0000	HEAD DEP BOUNDS =	
	RECHARGE = 2626750208.0000	RECHARGE = 0.0000	
	TOTAL IN = 10083690496.0000	TOTAL IN = 328719.1250	
	OUT:	OUT:	
	----	----	
	STORAGE = 4639415296.0000	STORAGE = 57945.9492	
	CONSTANT HEAD = 0.0000	CONSTANT HEAD = 0.0000	
	WELLS = 5335121920.0000	WELLS = 270687.0625	
86.2070	HEAD DEP BOUNDS = 109144912.0000	HEAD DEP BOUNDS =	
	RECHARGE = 0.0000	RECHARGE = 0.0000	
	TOTAL OUT = 10083682304.0000	TOTAL OUT = 328719.2188	
	IN - OUT = 8192.0000	IN - OUT = -9.3750E-02	
0.00	PERCENT DISCREPANCY = 0.00	PERCENT DISCREPANCY =	

VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 1 IN
STRESS PERIOD 858

```

-----
CUMULATIVE VOLUMES    L**3    RATES FOR THIS TIME STEP
L**3/T
-----

      IN:                      IN:
      ---                      ---
      STORAGE = 6840022016.0000    STORAGE = 220673.0312
      CONSTANT HEAD = 0.0000    CONSTANT HEAD = 0.0000
      WELLS = 0.0000    WELLS = 0.0000
      HEAD DEP BOUNDS = 624609664.0000    HEAD DEP BOUNDS =
35712.0430
      RECHARGE = 2626750208.0000    RECHARGE = 0.0000

      TOTAL IN = 10091381760.0000    TOTAL IN = 256385.0781

      OUT:                      OUT:
      ----                      ----
      STORAGE = 4642681856.0000    STORAGE = 108880.2109
      CONSTANT HEAD = 0.0000    CONSTANT HEAD = 0.0000
      WELLS = 5339544576.0000    WELLS = 147424.3438
      HEAD DEP BOUNDS = 109147328.0000    HEAD DEP BOUNDS =
80.5582
      RECHARGE = 0.0000    RECHARGE = 0.0000

      TOTAL OUT = 10091373568.0000    TOTAL OUT = 256385.1250

      IN - OUT = 8192.0000    IN - OUT = -4.6875E-02

      PERCENT DISCREPANCY = 0.00    PERCENT DISCREPANCY =
0.00
  
```

1
VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 1 IN
STRESS PERIOD 859

```

-----
CUMULATIVE VOLUMES    L**3    RATES FOR THIS TIME STEP
L**3/T
-----

IN:                    IN:
---                    ---
STORAGE = 6845046272.0000    STORAGE = 162069.1250
CONSTANT HEAD = 0.0000    CONSTANT HEAD = 0.0000
WELLS = 0.0000    WELLS = 0.0000
HEAD DEP BOUNDS = 625724288.0000    HEAD DEP BOUNDS =
35955.1992
RECHARGE = 2626750208.0000    RECHARGE = 0.0000

TOTAL IN = 10097520640.0000    TOTAL IN = 198024.3281

OUT:                    OUT:
----                    ----
STORAGE = 4648217088.0000    STORAGE = 178549.0469
CONSTANT HEAD = 0.0000    CONSTANT HEAD = 0.0000
WELLS = 5340146176.0000    WELLS = 19400.0039
HEAD DEP BOUNDS = 109149664.0000    HEAD DEP BOUNDS =
75.2850
RECHARGE = 0.0000    RECHARGE = 0.0000

TOTAL OUT = 10097512448.0000    TOTAL OUT = 198024.3281

IN - OUT = 8192.0000    IN - OUT = 0.0000

PERCENT DISCREPANCY = 0.00    PERCENT DISCREPANCY =
0.00

```

1
VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 1 IN
STRESS PERIOD 860

```

-----
CUMULATIVE VOLUMES    L**3    RATES FOR THIS TIME STEP
L**3/T
-----

      IN:                      IN:
      ---                      ---
      STORAGE = 6848971776.0000    STORAGE = 126637.0469
      CONSTANT HEAD = 0.0000    CONSTANT HEAD = 0.0000
      WELLS = 0.0000    WELLS = 0.0000
      HEAD DEP BOUNDS = 626843776.0000    HEAD DEP BOUNDS =
36112.4414
      RECHARGE = 2626750208.0000    RECHARGE = 0.0000

      TOTAL IN = 10102565888.0000    TOTAL IN = 162749.4844

      OUT:                      OUT:
      ----                      ----
      STORAGE = 4653070336.0000    STORAGE = 156564.3906
      CONSTANT HEAD = 0.0000    CONSTANT HEAD = 0.0000
      WELLS = 5340335616.0000    WELLS = 6114.3745
      HEAD DEP BOUNDS = 109151856.0000    HEAD DEP BOUNDS =
70.7262
      RECHARGE = 0.0000    RECHARGE = 0.0000

      TOTAL OUT = 10102558720.0000    TOTAL OUT = 162749.4844

      IN - OUT = 7168.0000    IN - OUT = 0.0000

      PERCENT DISCREPANCY = 0.00    PERCENT DISCREPANCY =
0.00

```

VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 1 IN
STRESS PERIOD 861

```

-----
CUMULATIVE VOLUMES    L**3    RATES FOR THIS TIME STEP
L**3/T
-----

      IN:                IN:
      ---                ---
      STORAGE = 6852113408.0000    STORAGE = 104727.3047
      CONSTANT HEAD = 0.0000    CONSTANT HEAD = 0.0000
      WELLS = 0.0000    WELLS = 0.0000
      HEAD DEP BOUNDS = 627929984.0000    HEAD DEP BOUNDS =
36207.2656
      RECHARGE = 2626750208.0000    RECHARGE = 0.0000

      TOTAL IN = 10106793984.0000    TOTAL IN = 140934.5625

      OUT:                OUT:
      ----                ----
      STORAGE = 4657136640.0000    STORAGE = 135545.7656
      CONSTANT HEAD = 0.0000    CONSTANT HEAD = 0.0000
      WELLS = 5340495360.0000    WELLS = 5321.8232
      HEAD DEP BOUNDS = 109153864.0000    HEAD DEP BOUNDS =
66.9462
      RECHARGE = 0.0000    RECHARGE = 0.0000

      TOTAL OUT = 10106785792.0000    TOTAL OUT = 140934.5469

      IN - OUT = 8192.0000    IN - OUT = 1.5625E-02

      PERCENT DISCREPANCY = 0.00    PERCENT DISCREPANCY =
0.00

```