



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΤΗΣ ΠΟΣΟΤΙΚΗΣ  
ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΤΗΣ  
ΛΙΜΝΗΣ ΚΑΡΛΑΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ  
ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΤΗΣ**

*ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ*

*ΠΑΝΑΓΙΩΤΑ Π. ΚΑΛΥΒΑ, ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΥΧΟΣ ΠΟΛΙΤΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΠΑΤΡΩΝ*

**ΒΟΛΟΣ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2014**

## **Ευχαριστήριο Σημείωμα**

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου, κ. Αντώνη Λιακόπουλο, για την υποστήριξη, τις συμβουλές του, καθώς και για την πολύτιμη βοήθεια που πάντα μου παρείχε.

Επίσης, οφείλω ένα θερμό ευχαριστώ στον υποψήφιο διδάκτορα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας Παντελή Σιδηρόπουλο, που μου συμπαραστάθηκε και με καθοδήγησε παρέχοντάς μου πολύτιμες πληροφορίες.

Τέλος, ευχαριστώ θερμά την οικογένεια μου με υποστήριξε ώστε να ολοκληρώσω την παρούσα εργασία.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	4
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	6
1.1 Σκοπός της εργασίας.....	6
1.2 Η έννοια της Διαχείρισης των Υδατικών Πόρων.....	6
2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΤΗΣ ΚΑΡΛΑΣ.....	12
2.1 Υδρολογικά στοιχεία της Λεκάνη της Κάρλας.....	12
2.2 Υδρολογικά στοιχεία της Λεκάνη της Κάρλας.....	14
2.3 Χλωρίδα-Πανίδα.....	17
2.3.1 Ιχθυοπανίδα.....	17
2.3.2 Ορνιθοπανίδα.....	17
2.3.3 Θηλαστικά.....	18
2.3.4 Χλωρίδα - ζώνες φυσικής βλάστησης.....	19
2.3.5 Οικοσύστημα.....	19
2.4 Δημογραφικά – Πληθυσμιακά στοιχεία.....	20
2.5 Δεδομένα χρήσεως γης.....	20
3. ΑΠΟΞΗΡΑΝΣΗ ΚΑΙ ΕΠΑΝΑΣΥΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ.....	26
3.1 Αποξήρανση της Λίμνης Κάρλας.....	26
3.2 Έργα αποξήρανσης.....	29
3.2.1 Αναχώματα Πηνειού από Λάρισα μέχρι Γυρτώνη.....	29
3.2.2 Συλλεκτήρας Σ1.....	30
3.2.3 Τάφος 1Τ.....	30
3.2.4 Τάφος 2Τ.....	30
3.2.5 Σήραγγα Κάρλας.....	31
3.2.6 Αρδευτικά Έργα.....	31
3.3 Επιπτώσεις της αποξήρανσης και Επανασύσταση της Λίμνης Κάρλας.....	33
3.3.1 Λόγοι και στόχοι του έργου επανασύστασης της λίμνης Κάρλας.....	33
3.3.2 Περιγραφή του Έργου Επαναδημιουργίας της Λίμνης Κάρλας (ΕΕΛΚ).....	34
3.4 Εναλλακτικές Προτάσεις.....	35
4. ..ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ.....	40
4.1 Υδρολογικό μοντέλο UTHBAL.....	40
5. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ.....	46
5.1 Εισαγωγή.....	46

5.2	Κώδικας ZOOMQ3D .....	47
5.3	Μαθηματικό Υπόβαθρο του ZOOMQ3D .....	47
5.4	Χαρακτηριστικά του μοντέλου ZOOMQ3D.....	50
5.4.1	Στρώματα μοντέλου με διαφορετικά υψόμετρα (layers).....	50
5.4.2	Διακριτοποίηση του κανάβου.....	50
5.4.3	Μοντέλα κατανεμημένα και μη.....	51
5.4.4	Ανομοιογένεια και ανισοτροπία .....	51
5.4.5	Οριακές συνθήκες.....	51
5.4.6	Φόρτιση υδροφόρου ορίζοντα .....	52
5.4.7	Ποτάμια.....	52
5.4.8	Όρια διαρροής (head-dependent leakages nodes).....	52
5.4.9	Πηγάδια-Ξηραντήρια (Drains).....	52
5.4.10	Χρονική διακριτοποίηση.....	52
5.4.11	Κατασκευάζοντας το μοντέλο.....	53
6.	ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗ ΤΩΝ ΟΜΟΙΩΜΑΤΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑΣ ΜΕΣΩ ΤΟΥ OpenMI .....	56
6.1	Εισαγωγή.....	56
6.2	Προσομοίωση διαδικασιών .....	58
6.3	Αρχιτεκτονική του OpenMI .....	59
6.4	Διαδικασία τροποποίησης των μοντέλων. ....	62
6.4.1	Διαχωρισμός γραφικού περιβάλλοντος και υπολογισμών.....	62
6.4.2	Τροποποίηση του υπολογιστικού πυρήνα. ....	63
6.4.3	Καθορισμός αντικειμένων ανταλλαγής .....	64
6.4.4	Δημιουργία κελύφους επικοινωνίας .....	65
6.4.5	Εισαγωγή του μοντέλου στην πλατφόρμα.....	66
7.	ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΣΤΟΝ ΥΠΟΓΕΙΟ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΤΗΣ ΚΑΡΛΑΣ. ....	67
7.1	Προσομοίωση επιφανειακής απορροής. ....	67
7.1.1	Εφαρμογή του μοντέλου στην Κάρλα .....	67
7.1.2	Ρύθμιση του υδρολογικού μοντέλου στην λεκάνη απορροής της Κάρλας.....	75
7.2	Υδρολογικό μοντέλο ZOOMQ3D.....	78
8.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	87
8.1	Αποτελέσματα.....	87
8.2	Συμπεράσματα.....	94

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία μελετάται η ολοκληρωμένη διαχείριση των υδατικών πόρων της λεκάνης απορροής της λίμνης Κάρλας μέσω ενός συστήματος προσομοίωσης.

Στο 1<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, το οποίο αποτελεί εισαγωγικό κεφάλαιο της εργασίας, παρουσιάζεται ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας και αναλύεται η έννοια της Διαχείρισης των Υδατικών Πόρων.

Στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο γίνεται μια εκτενής περιγραφή της περιοχής μελέτης, της λεκάνης της Κάρλας, τα υδρολογικά και γεωλογικά στοιχεία της, η χλωρίδα και η πανίδα της περιοχής. Παρουσιάζονται πλυθησμιακά-δημογραφικά στοιχεία καθώς και οι οι χρήσεις γης της περιοχής.

Στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, το ενδιαφέρον εστιάζεται στην αποξήρανση της λίμνης. Αναφέρονται οι μελέτες της αποξήρανσης, καθώς και οι λόγοι που οδήγησαν σε αυτή την κίνηση. Αναλύονται τα έργα που έχουν γίνει για την επίτευξη αυτού του σκοπού. Επίσης, παρουσιάζονται οι επιπτώσεις της αποξήρανσης, οι οποίες οδηγούν στην ανάγκη επανασύστασης της λίμνης. Τέλος, παρουσιάζονται προτάσεις αποκατάστασης και επίλυσης των προβλημάτων που προέκυψαν από την αποξήρανση.

Στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο γίνεται αναφορά στο μοντέλο προσομοίωσης επιφανειακού υδροφορέα UTHBAL. Αναφέρονται περιοχές, όπου αυτό εφαρμόστηκε επιτυχώς και δίνονται στοιχεία για το πως δημιουργήθηκε αυτό το μοντέλο και σε ποιες μαθηματικές εξισώσεις βασίζεται.

Στο 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο γίνεται ανάλυση του ZOOMQ3D, λογισμικού προσομοίωσης των υπόγειων υδροφορέων, που αναπτύχθηκε από την British Geological Survey. Το μοντέλο στηρίζεται στην αριθμητική επίλυση μιας κύριας διαφορικής εξίσωσης, η οποία προκύπτει από την εφαρμογή της εξίσωσης διατήρησης μάζας και του νόμου Darcy. Παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά και οι δυνατότητες του μοντέλου καθώς επίσης και το πως δημιουργείται αρχείο πληροφοριών της περιοχής μελέτης για την είσοδο αυτού στο μοντέλο.

Στο 6<sup>ο</sup> Κεφάλαιο αναλύεται εκτενώς η πλατφόρμα OpenMI. Για να γίνει σωστή διαχείριση των υδατικών πόρων δεν επαρκεί η μελέτη του κάθε υδατικού πόρου, υπόγειου και επιφανειακού, μεμονωμένα αλλά η μελέτη αλληλεπίδρασης αυτών των δύο φορέων για την επίτευξη ορθότερων αποτελεσμάτων. Η ανάγκη λοιπόν δημιουργίας μοντέλου που να μπορεί να συνδυάσει τα δύο αυτά συστήματα οδήγησε στην δημιουργία της πλατφόρμας OpenMI. Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται η αρχιτεκτονική του OpenMI, η διαδικασία

τροποποίησης των μοντέλων για να αποκτήσουν συμβατότητα με την πλατφόρμα OpenMI μέχρι και την εισαγωγή του μοντέλου στην πλατφόρμα για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων.

Στο 7<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, τα δύο μοντέλα που αναλύθηκαν σε προηγούμενα κεφάλαια, εφαρμόζονται στην περιοχή μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, δηλαδή στην Κάρλα. Για το UTHBAL αναφέρεται πως επιμερίστηκε η λεκάνη σε δύο υψομετρικές ζώνες, πως μετατραπήκαν τα δεδομένα εισόδου από σημειακά σε επιφανειακά και τέλος πως έλαβε χώρα η ρύθμιση του μοντέλου. Στη συνέχεια, αναλύεται πως προσομοιώθηκε ο υπόγειος υδροφορέας της Κάρλας για την περίοδο 1-1-87 μέχρι 1-1-97 από το μοντέλο ZOOMQ3D με έναν κάναβο 12.500 κελιών διάστασης 200 x 200 μ. Περιγράφεται πως η περιοχή μελέτης χωρίστηκε σε 7 ζώνες άντλησης και τέλος η ρύθμιση του μοντέλου.

Στο 8<sup>ο</sup> κεφάλαιο καταγράφονται τα εξαγόμενα συμπεράσματα που με τη βοήθεια των αποτελεσμάτων, χάρτες και τομές υδραυλικών φορτίων καθώς και πίνακα υδατικού ισοζυγίου, είναι εύκολο να αποδοθεί μια εικόνα ποσοτικής κατάστασης του υπόγειου υδροφορέα. Μια κατεύθυνση ορθολογικής διαχείρισης διαχείρισης των υπόγειων και επιφανειακών υδάτων, σε επίπεδο λεκάνης απορροής, είναι πολύτιμο εργαλείο για την περαιτέρω αντιμετώπιση του διαχειριστικού προβλήματος της περιοχής.

## **1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

### **1.1 Σκοπός της εργασίας**

Σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η ολοκληρωμένη διαχείριση των υδατικών πόρων της λεκάνης απορροής της λίμνης Κάρλας μέσω ενός συστήματος προσομοίωσης. Το σύστημα αυτό αποτελείται από ένα μοντέλο προσομοίωσης της επιφανειακής απορροής και ένα μοντέλο προσομοίωσης της υπόγειας ροής. Στόχος είναι η ικανότητα πρόβλεψης των επιμέρους διαδικασιών απορροής και των αλληλεπιδράσεων τους. Κατά κανόνα ο σχεδιασμός μεμονωμένου ομοιώματος πρόγνωσης που θα αναπαριστά ικανοποιητικά το σύνολο των διαδικασιών απορροής δεν είναι εφικτός, απομένως είναι απαραίτητο ένα μέσο διασύνδεσης των ομοιωμάτων που περιγράφουν τις επιμέρους διαδικασίες της απορροής. Η απαίτηση αυτή καλύπτεται από την εφαρμογή OpenMI μιας ενιαίας πλατφόρμας σύνδεσης των δύο διαφορετικών ομοιωμάτων που περιγράφουν τις επιμέρους διαδικασίες απορροής

Τα δύο μοντέλα υπόγειας και επιφανειακής απορροής ρυθμίστηκαν επιτυχώς και το σύστημα εφαρμόστηκε για την περίοδο 1987-1997, ώστε να εκτιμηθεί η απόκριση του υπόγειου υδροφορέα και να αξιολογηθούν τα παραγόμενα αποτελέσματα.

### **1.2 Η έννοια της Διαχείρισης των Υδατικών Πόρων**

Με την έννοια «Διαχείριση Υδατικών Πόρων (ΔΥΠ)» νοείται το σύνολο των έργων και των μέτρων που είναι απαραίτητα για να εξασφαλιστεί στο μέγιστο δυνατό βαθμό η κάλυψη των αναγκών του κάθε χρήστη ή στην περίπτωση που αυτό δεν είναι εφικτό, να εξασφαλιστεί η ισόνομη ικανοποίηση όλων των ενδιαφερόμενων σε σχέση με την κοινωνική σημασία της κάθε χρήσης, σήμερα και στο μέλλον.

Στόχος της είναι να προμηθεύσει νερό επαρκούς ποσότητας και κατάλληλης ποιότητας για την ικανοποίηση των οικιακών, αγροτικών, βιομηχανικών, ενεργειακών και άλλων αναγκών, καθώς επίσης να προστατεύσει τους υδατικούς πόρους από τη ρύπανση καθώς και από τα ακραία υδρολογικά φαινόμενα (πλημμύρες, ξηρασίες).

Η διαχείριση των υδατικών πόρων βασίζεται στη βέλτιστη χρήση του νερού τώρα και μελλοντικά με αρχές δικαίου και στόχο τη διατήρηση των πόρων. Προυπόθεση της διαχείρισης αποτελούν η ισομερής κατανομή μεταξύ χρηστών με βάση αντικειμενικά κριτήρια, η οικονομική βελτιστοποίηση της χρήσης νερού τώρα και μελλοντικά, η αποφυγή βλαβών και άλλων αρνητικών συνεπειών καθώς και η βιωσιμότητα της ανάπτυξης.

Η αύξηση των πιέσεων στο υδατικό περιβάλλον καθιστά αναγκαία την εφαρμογή βιώσιμων πολιτικών ανάπτυξης και διαχείρισης των υδατικών πόρων, μέσω σχεδιασμού, υλοποίησης και βέλτιστης λειτουργίας έργων υποδομής και παρεμβάσεων διαχείρισης τόσο της προσφοράς όσο και της ζήτησης, πχ. Μέσω μέτρων εξοικονόμησης και επαναχρησιμοποίησης του νερού.

Η ανάγκη για όλο και μεγαλύτερη αξιοποίηση των υδατικών πόρων είναι άμεσο αποτέλεσμα της αύξησης του πληθυσμού και των διαρκώς αυξανόμενων αναγκών σε νερό και τροφή, καθώς και της γενικότερης ανάπτυξης η οποία δημιουργεί δραστηριότητες και κατά συνέπεια μεγαλύτερες ποσότητες νερού. Αυτά τα φαινόμενα σε συνδυασμό με την εξαιρετικά περιορισμένη ποσότητα γλυκού νερού στον πλανήτη μας κάνουν επιτακτική την ανάγκη ανάπτυξης συστημάτων ελέγχου και διαχείρισης τα οποία αποβλέπουν στη βέλτιστη διάθεση των υδατικών πόρων (Τσακίρης 1995, σελ. 657).

Ευρύτερα αποδεκτή είναι επίσης η διαπίστωση ότι, λόγω ευκολίας, η εκμετάλλευση των υπογείων νερών γίνεται με εντονότερο ρυθμό σε σύγκριση με την εκμετάλλευση των επιφανειακών νερών καθώς στη δεύτερη περίπτωση είναι αναγκαίες σοβαρές και συχνά μακροχρόνιες επενδύσεις.

Μια ορθολογική πολιτική ανάπτυξης οφείλει επίσης να λαμβάνει υπ όψη της και τη διαχείριση ακραίων φαινομένων και κρίσεων όπως τα προβλήματα λειψυδρίας και πλημμυρών αλλά και πιο μακροπρόθεσμους περιβαλλοντικούς στόχους, όπως η σε βάθος χρόνου προστασία των νερών και των σχετιζόμενων με αυτά οικοσυστημάτων, η βελτίωση της ποιότητας και της οικολογικής τους κατάστασης και βέβαια η σταδιακή μείωση απορριπτόμενων ρυπαντικών ουσιών και η προοδευτική εξάλειψη τοξικών αποβλήτων. Ειδικότερα για την Ελλάδα αξίζει να σημειωθεί ότι η χώρα μας είναι μία σχετικά ευνοημένη υδρολογικά χώρα της Μεσογείου, αν και η αναντιστοιχία της χρονικής και κυρίως χωρικής κατανομής των βροχοπτώσεων με τις χρονικές και χωρικές κατανομές της ζήτησης έχουν δημιουργήσει στο παρελθόν και εξακολουθούν να δημιουργούν προβλήματα έλλειψης νερού, ιδιαίτερα σε περιόδους ανομβρίας.

Η ορθολογική διαχείριση των υδατικών πόρων στηρίζεται στον προσδιορισμό της μεταβολής των ποσοτικών και ποιοτικών τους χαρακτηριστικών στη διάρκεια του χρόνου σε διάφορους τομείς ανάπτυξης, έτσι ώστε να αποφεύγεται η καταστροφή και η εξάντλησή τους. Η Διαχείριση των Υδατικών Πόρων προϋποθέτει συστηματική ενημέρωση και ευαισθητοποίηση των πολιτών για την ανάγκη εξοικονόμησης νερού ύδρευσης σε ατομικό και συλλογικό επίπεδο και συστηματική και συντονισμένη προσπάθεια συντήρησης και βελτίωσης της λειτουργίας των δικτύων ύδρευσης από τις ΔΕΥΑ.



Στο πλαίσιο ενός γενικού προγραμματισμού ορθολογικής διαχείρισης των υδατικών πόρων μιας περιοχής είναι απαραίτητο να εκτελεστούν επιμέρους προγράμματα υδρογεωλογικής έρευνας, έτσι ώστε να διαπιστωθούν οι αξιοποιήσιμες ποσότητες του νερού, οι οποίες είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν μακροπρόθεσμα χωρίς αρνητικές επιδράσεις στην υδατική οικονομία.

Η εξασφάλιση των υδατικών πόρων για τις σημερινές ανάγκες, αλλά και για τις ανάγκες των ερχόμενων γενεών, μπορεί να γίνει με την εφαρμογή της σωστής στρατηγικής. Αυτή η στρατηγική πρέπει να είναι προνοητική, δηλαδή μέσω της πρόβλεψης να εφαρμόζεται μια πολιτική διαχείρισης των υδατικών πόρων η οποία να έχει μεγάλη χρονική εμβέλεια και δυναμική μορφή. Εκτός από τη μεγιστοποίηση των διαθέσιμων υδατικών πόρων, που αποτελεί πάγια τακτική, απαραίτητη είναι και η κατανόηση των ισορροπιών του υδρολογικού κύκλου ώστε να εφαρμοστούν διαχειριστικά σχήματα που δεν θα διαταράσσουν αυτή την ισορροπία, έτσι ώστε η διαχείριση των υδάτων να μην επηρεάζει αρνητικά την ποιότητα και ποσότητα των υδατικών πόρων, καθώς και τη φυσική δομή του υδάτινου περιβάλλοντος και να καλύπτονται στο βέλτιστο βαθμό οι υδατικές ανάγκες των ανθρώπων και των χερσαίων οικοσυστημάτων. Είναι αυτονόητο ότι αυτοί οι στόχοι υδατικής πολιτικής δεν θα είναι πάντοτε συμβατοί και ότι μία βιώσιμη υδατική πολιτική είναι αυτή που επιτυγχάνει μια λογική εξισορρόπησή τους

Όσον αφορά τη σημερινή κατάσταση που επικρατεί σήμερα στον τομέα της διαχείρισης του νερού απέχει πολύ από τα χαρακτηριστικά της βιωσιμότητας, καθώς δεν μπορεί να συντηρήσει την οικονομική ανάπτυξη και δεν μπορεί να εγγυηθεί ούτε τη διαχρονική περιβαλλοντική προστασία και διατήρηση των υδατικών συστημάτων ούτε την κοινωνική ευημερία.

Για να εμφανίζονται τα χαρακτηριστικά της βιωσιμότητας στην κατάσταση που επικρατεί σήμερα στον τομέα της διαχείρισης του νερού, θα πρέπει να διασφαλίζονται τόσο η οικονομική ανάπτυξη, με την ικανοποίηση των αναγκών των οικονομικών δραστηριοτήτων σε νερό, όσο και η περιβαλλοντική προστασία, με τη διατήρηση της υγείας και της ακεραιότητας των υδατικών συστημάτων, με τα αρνητικά υδατικά ισοζύγια στις υδρολογικές λεκάνες της χώρας να προκαλούν εξαφάνιση των υγροτόπων, υποβάθμιση των υδροφορέων και εξάντληση των ποταμών και των λιμνών.

Συνεπώς επιτακτική ανάγκη σήμερα αποτελούν ο σχεδιασμός και η εφαρμογή μιας υδατικής πολιτικής με κεντρικό στόχο τη διευθέτηση των ισοζυγίων προσφοράς και ζήτησης του νερού στις υδρολογικές λεκάνες και τα υδατικά διαμερίσματα της χώρας.

Είναι σαφές λοιπόν σήμερα ότι η διαχείριση των υδατικών πόρων θα πρέπει να επαναπροσδιοριστεί προκειμένου να αποκτήσει τα χαρακτηριστικά της βιωσιμότητας

Επομένως θα πρέπει να εδραιωθεί μια ολοκληρωμένη πολιτική νερού στη βάση της ενιαίας θεώρησης και να αντιμετωπιστούν όλα των επιμέρους φυσικών, τεχνικών, οικονομικών, περιβαλλοντικών, διοικητικών και πολιτικών πλευρών και διαστάσεων της διαχείρισης των υδατικών πόρων. Επίσης επιβάλλεται η διαχείριση της ζήτησης του νερού με τη βιώσιμη διευθέτηση του ισοζυγίου προσφοράς και ζήτησης και την προσαρμογή της ζήτησης του νερού στα όρια και τις δυνατότητες της φυσικής προσφοράς του.

Όσον αφορά το Θεσμικό Πλαίσιο για τους υδατικούς πόρους, παρατηρούνται καθυστερήσεις στην ολοκληρωμένη εφαρμογή της Οδηγίας πλαίσιο 2000/60/EK για την κοινοτική δράση στην πολιτική των υδάτων και παρά την έκδοση του Ν.3199/2003 η εναρμόνιση ουσιαστικών θεμάτων της Οδηγίας παραπέμπεται σε μελλοντικά Προεδρικά Διατάγματα.

Με δεδομένη την διοικητική δομή και το νομοθετικό πλαίσιο, είναι σαφές το πλαίσιο των πράξεων της διοίκησης, που πρέπει να στοχεύουν στην επίλυση των κρίσιμων υδατικών προβλημάτων. Πρωταρχική ανάγκη κρίνεται να καθοριστούν με ακρίβεια τα φυσικά μεγέθη, οι πραγματικές ανάγκες, και οι προϋποθέσεις ενός μακροχρόνιου προγραμματισμού.

Για να επιτευχθεί αυτό αρχικά θα πρέπει να καταγραφούν και να αξιολογηθούν συστηματικά τα υδατικά συστήματα και να συγκεντρωθούν στοιχεία υδρολογικά, μετεωρολογικά και υδρολογικά για την καλύτερη μελέτη της περιοχής. Αυτό, θα το διευκόλυνε η δημιουργία μιας ενιαίας βάσης για την καταχώρηση των αποτελεσμάτων από την οποία θα μπορούσαμε να αντλήσουμε πληροφορίες και την ευρύτερη όμορη περιοχή της λεκάνης αλλά και στοιχεία από παλιότερες καταγραφές. Ωστόσο σήμερα, ο χαμηλός βαθμός αξιοπιστίας των δεδομένων που υπάρχουν, ο οποίος οφείλεται σε ασυνεχείς και βραχυχρόνιες παρατηρήσεις, σε έλλειψη τυποποίησης στη λήψη των παρατηρήσεων και στη δειγματοληψία και ανάλυση των ποιοτικών παραμέτρων, καθώς και σε ατελή στατιστική επεξεργασία τους αποτελεί παράγοντα αύξησης του ποσοστού αβεβαιότητας των αποτελεσμάτων. Επιπλέον αρωγός στην προσπάθεια αυτή θα αποτελούσαν η καταγραφή χρήσεων και ποσοτήτων νερού καθώς και η εφαρμογή των μελετών που έχουν παραμείνει ανεφέρμοστες επί δεκαετίες.

Στη συνέχεια θα πρέπει να καλυφθούν οι ελλείψεις, που έχουν άμεσες επιπτώσεις στην εξασφάλιση της δυνατότητας εφαρμογής της επιθυμητής υδατικής πολιτικής, επομένως και της δυνατότητας κάλυψης όλων των αναγκών σε νερό. Για παράδειγμα, η

έλλειψη κοστολόγησης του νερού, καθώς και η έλλειψη τιμολόγησης που να στηρίζεται αφενός σε αυτή την κοστολόγηση και αφετέρου στην προσπάθεια να καλυφθούν και άλλοι στόχοι, κοινωνικοί, εξοικονόμησης πόρων, αναπτυξιακά κίνητρα, διατήρηση επιθυμητών ποιοτικών χαρακτηριστικών στους υδατικούς πόρους, κλπ. Μέχρι σήμερα δεν υπήρχε αποτελεσματική πολιτική που να διασφαλίζει την ανάκτηση του κόστους των υδατικών πόρων.

Επίσης, η έλλειψη κατανομής και απόδοσης των οικονομικών βαρών των έργων πολλαπλού σκοπού στους διάφορους επωφελούμενους τομείς χρήσης και η έλλειψη πρόνοιας και κινήτρων για την εξοικονόμηση νερού σε όλες τις χρήσεις, συμπεριλαμβανομένης της οικιακής, καθώς και συντονισμού μεταξύ των χρήσεων για λόγους οικονομίας πόρων και μέσων. Ακόμα, πρόβλημα αποτελεί και η έλλειψη χωροταξικού σχεδιασμού και καθορισμένων χρήσεων γης, που αποτελεί ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο για την επεξεργασία μελλοντικών σεναρίων ανάπτυξης των υδατικών πόρων

Πρωτίστως ο τομέας που καλείται να αντιμετωπίσει τις νέες προκλήσεις είναι ο αγροτικός καθώς οι αρδευτικές ανάγκες αντιπροσωπεύουν το 85% περίπου των συνολικών αναγκών. Μια παρέμβαση προς την κατεύθυνση της οικονομικά αποδοτικότερης χρήσης του νερού αποτελεί η αναδιάρθρωση των καλλιεργειών, ώστε, χωρίς να εγκαταλείπονται τελείως οι παραδοσιακές καλλιέργειες, να προωθηθούν σύγχρονα και ανταγωνιστικά γεωργικά προϊόντα. Οι νέες πολιτικές για τον αγροτικό τομέα, που επηρεάζονται από τις αντίστοιχες κοινοτικές (ΚΑΠ), αντικειμενικά περιορίζουν την αυξητική τάση των αρδεύσεων. Παράλληλα επιβάλλουν την εφαρμογή μέτρων αντιμετώπισης των σχετικών διαχειριστικών προβλημάτων τόσο σε μεγάλη όσο και σε μικρή κλίμακα, προκειμένου να επιτευχθούν αφ ενός η εξοικονόμηση νερού και αφ ετέρου ο έλεγχος της μη σημειακής ρύπανσης.

Θεωρείται αναγκαίος σήμερα ο επαναπροσδιορισμός του διοικητικού πλαισίου οργάνωσης και λειτουργίας των υπηρεσιών Τοπικής Αυτοδιοίκησης, σύμφωνα με τις απαιτήσεις της ΕΕ και τους όρους της νέας ΚΑΠ. Στόχος πρέπει να είναι η δημιουργία ενός σύγχρονου οργανισμού, οικονομικά βιώσιμου, που παράλληλα θα διαθέτει δυνατότητες χρήσης νέων τεχνολογιών, εκπαίδευσης και καθοδήγησης των αγροτών στις νέες συνθήκες. Απαραίτητη προϋπόθεση οικονομικής βιωσιμότητας των νέων οργανισμών αποτελεί η κοστολόγηση και τιμολόγηση του αρδευτικού νερού.

Επιπρόσθετα θα πρέπει άμεσα να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα ποιοτικής υποβάθμισης που έχουν παρατηρηθεί. Αναφορικά με τους υπόγειους υδροφορείς η ποιοτική υποβάθμιση τους οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στην υπεράντληση, γεγονός που σε

παράκτιους υδροφορείς έχει ως αποτέλεσμα φαινόμενα υφαλμύρισης. Η ρύπανση των υπόγειων νερών επίσης σχετίζεται με την παρουσία υψηλών συγκεντρώσεων νιτρικών, χωρίς να αποκλείεται και η επιβάρυνση των υδάτων με συγκεντρώσεις οργανικών ουσιών (π.χ. φυτοφαρμάκων) και οφείλεται κυρίως στις μη σημειακές πηγές λόγω γεωργικών δραστηριοτήτων. Η αντιμετώπιση του προβλήματος καθιστά σκόπιμη την αύξηση του αριθμού των λεκανών που χαρακτηρίζονται ως ευπρόσβλητες και την επέκταση της εφαρμογής ορθών γεωργικών πρακτικών.

## 2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΤΗΣ ΚΑΡΛΑΣ

### 2.1 Υδρολογικά στοιχεία της Λεκάνης της Κάρλας.

Η λεκάνη της Κάρλας βρίσκεται ανατολική Θεσσαλία και αποτελεί μια κλειστή, επιμήκης λεκάνη, μήκους 35 χλμ. και πλάτους 9 – 15 χλμ. τα όρια της οποίας είναι:

- **στο Βορρά:** ο ποταμός Πηνειός και ο ορεινός όγκος της Όσσας,
- **στην Ανατολή:** οι ορεινοί όγκοι του Μαυροβουνίου και του Πηλίου,
- **στο Νότο:** το Χαλκοδόσιο όρος και το Μεγαβούνι και
- **στη Δύση:** το Φυλλήιον όρος.

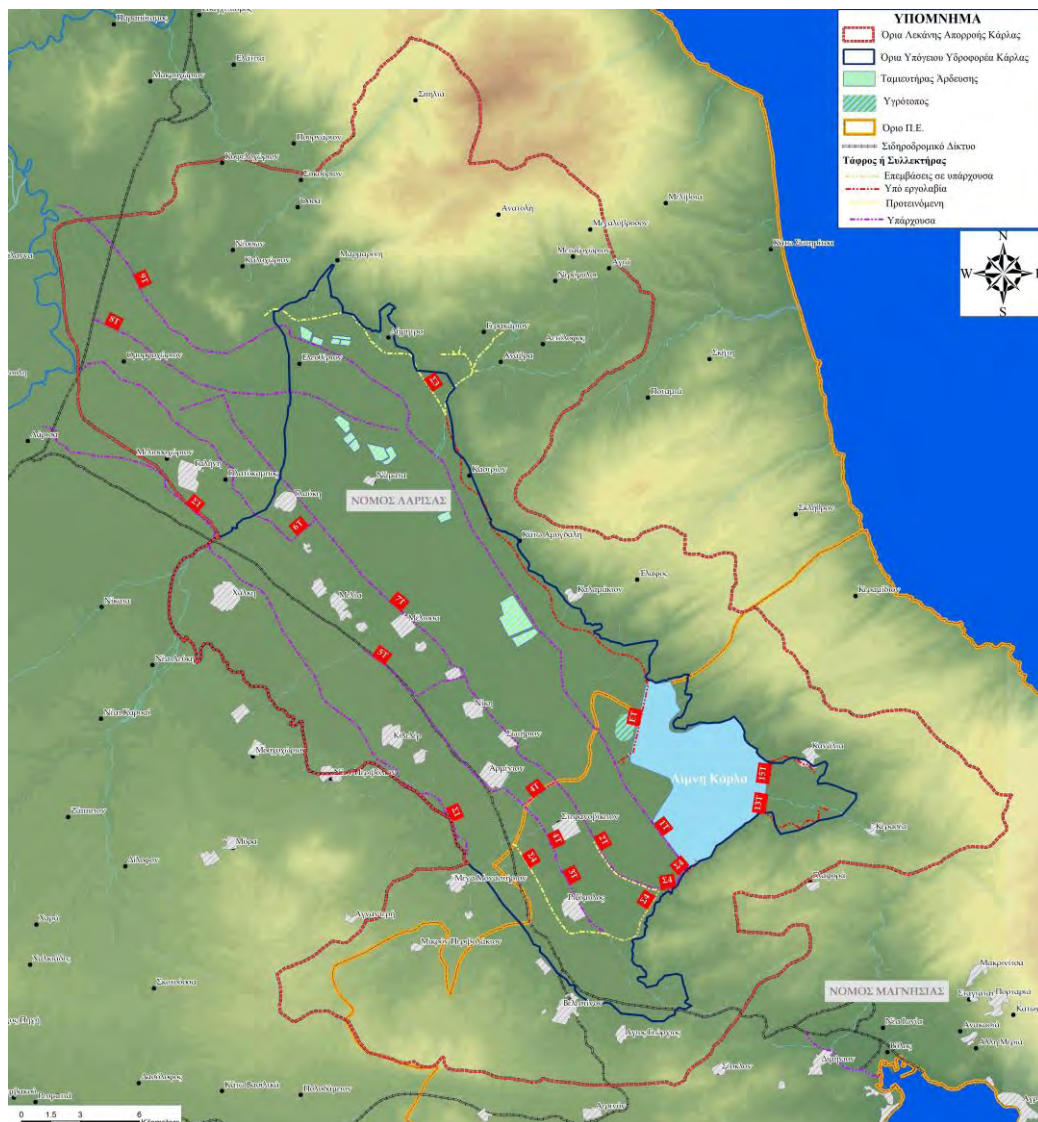
Στο μέσο της λεκάνης αυτής βρίσκεται το βαθύτερο τμήμα της Θεσσαλικής πεδιάδας, τα χαμηλότερα τμήματα της οποίας μέχρι το 1961, καλύπτονταν από τα νερά της λίμνης, που αποτελούσε πριν από την εκτέλεση των έργων και τον κύριο αποδέκτη της. Διοικητικά η περιοχή υπάγεται στους νομούς Λαρίσης και Μαγνησίας.

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' ό,τι στη ΒΔ πλευρά της. Έτσι η ροή των επιφανειακών υδάτων δεν γινόταν πλέον προς την κοιλάδα των Τεμπών. Το ΝΑ τμήμα της ανατολικής Θεσσαλίας κατακλύστηκε 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 φυσική λεκάνη της Κάρλας έχει συνολική έκταση 1663 km<sup>2</sup>. όμως, μεγάλα τμήματά της έχουν αποκοπεί με τεχνητό τρόπο και η επιφανειακή απορροή τους οδηγείται στον Πηνειό. 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). Αναλυτικότερα, μετά το 1950 με την κατασκευή του Συλλεκτήρα Σ1 αποκόπηκε τμήμα της λεκάνης και η έκταση της λεκάνης απορροής της

Κάρλας είναι πλέον 1100 km<sup>2</sup> (Σχήμα 2.1). 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 1T, 2T και διάφορες άλλες δευτερεύουσες τάφροι που αποχετεύουν την πεδιάδα προς τη σήραγγα.



**Σχήμα 2.1** Περιοχή μελέτης με τα όρια της λεκάνης απορροής, του υπόγειου υδροφορέα.

Όσον αφορά το μικροκλίμα της περιοχής κατατάσσεται στο Μεσογειακό, ηπειρωτικό 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. Η μέση θερμοκρασία είναι πάντα πάνω από το μηδέν, αλλά η χαμηλότερη θερμοκρασία που παρατηρήθηκε κατά το χειμώνα είναι  $-21,6^{\circ}$  C. Η μέγιστη θερμοκρασία που παρατηρήθηκε το καλοκαίρι ήταν  $45,2^{\circ}$  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%.

## **2.2 Υδρολογικά στοιχεία της Λεκάνης της Κάρλας.**

Όσον αφορά την στρωματογραφία η ανατολική Θεσσαλία ανήκει κυρίως στην γεωτεκτονική ενότητα της Πελαγονικής ζώνης η οποία συγκροτείται από το υπόβαθρο, που σχηματίζεται από τα ημιμεταμορφωμένα πέρμο- τριαδικά πετρώματα (φυλλίτες) και τη σχιστοκερατολιθική διάπλαση με οφιόλιθους και τα ανθρακικά καλύμματα που αποτελούνται από ελαφρά μεταμορφωμένους ασβεστόλιθους Τριαδικού, Ιουραστικού και Κρητιδικού, που είναι επωθημένοι επάνω στους φυλλίτες και στους οφιόλιθους.

Η περιοχή του Πηλίου πιθανόν να ανήκει στην Αττικοκυκλαδική Μάζα, η οποία αντιπροσωπεύεται από ισχυρώς μεταμορφωμένα πετρώματα (-γενέσιους 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.

Το Νεογενές συνίσταται κυρίως από ερυθρή άργιλο, πηλό και αργιλοαμμώδη υλικά μικρής συνεκτικότητας, με διαστρώσεις κροκαλολατυποπαγών. Οι βαθύτεροι ορίζοντες αποτελούνται από μάργες, οι οποίες εναλλάσσονται με ερυθρά αργιλομαργαικά υλικά. Στην περιοχή Σέσκλου οι αποθέσεις παίρνουν χρώμα κιτρινοκόκκινο, λόγω εμπλουτισμού τους σε έγχρωμα κλαστικά υλικά από τους παρακείμενους γενέσιους. Μέγιστο πάχος 100 μ. περίπου.

Οι πρόσφατες τεταρτογενείς αποθέσεις καταλαμβάνουν το πεδινό τμήμα της λεκάνης Κάρλας (Σχήμα 2.2). Αποτελούνται από υλικά ποικίλης κοκκομετρίας ποταμοχειμαρρώδους, ποτάμιας ή και λιμναίας προέλευσης. Το κοκκομετρικό μέγεθος των υλικών γενικά μειώνεται με την απομάκρυνση από τους κύριους κώνους των χειμάρρων που εκβάλουν στην πεδινή ζώνη μεταφέροντας αδρομερή υλικά.

Η λεκάνη της Κάρλας σχηματίστηκε από ένα τεκτονικό βύθισμα, που συνέβη κατά το Πλειόκαινο ή Πλειστόκαινο, στην περιοχή μεταξύ Λάρισας και Βελεστίνου. 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,

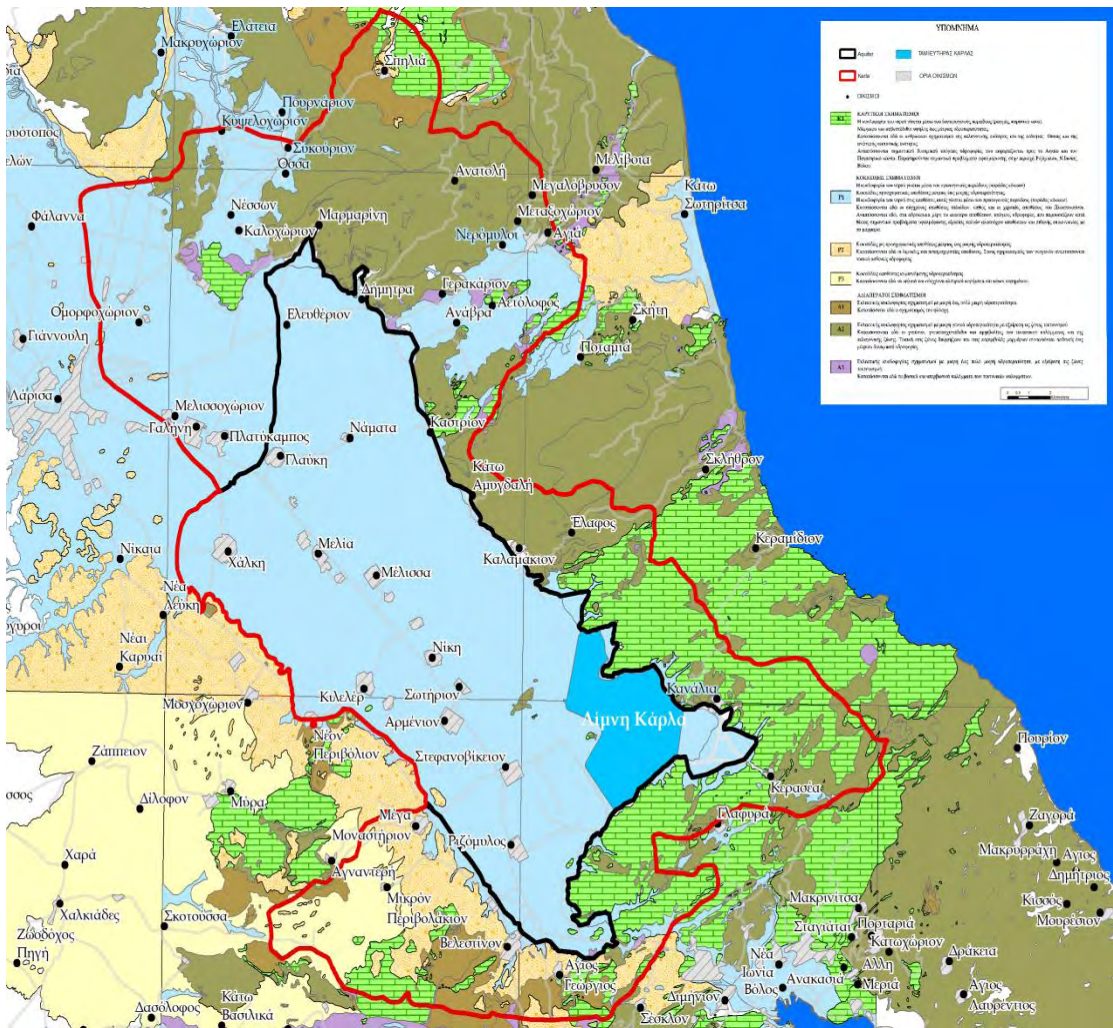
με αποτέλεσμα τα πάχη των ιζημάτων να είναι αρκετά μεγάλο και σε ορισμένα σημεία να ξεπερνά τα 300 μ. Η πεδιάδα, σήμερα, έχει υψόμετρο 44 – 65 m περίπου.

Το υπόβαθρο της λεκάνης αποτελείται από σχιστόλιθους και μάρμαρα. Τα μάρμαρα βρίσκονται κατά κανόνα εναποθεμένα 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 – Αγίας >550 μ. ) εξαρτώμενο από την σύνθετη γεωμετρία του υποβάθρου εξαιτίας του τεκτονισμού.

Στη μελέτη της (SOGREAH, 1974) αναφέρεται ότι νοτιοδυτικά των λόφων της Πέτρας και της Μαγούλας, στην περιοχή Στεφανοβικείου, Ριζόμυλου και Βελεστίνου, σχηματίζεται ένα επίμηκες βύθισμα, του οποίου το υπόβαθρο βρίσκεται σε απόλυτο υψόμετρο -200 m. Νοτιοδυτικά των Καναλιών, στο ανατολικότερο σημείο της λεκάνης, σχηματίζεται ένα άλλο βύθισμα, του οποίου το υπόβαθρο βρίσκεται σε απόλυτο υψόμετρο -200 m. Το δυτικό βύθισμα, στην περιοχή Στεφανοβικείου, λειτούργησε ως φραγμός για τα χονδρόκοκκα υλικά της διάβρωσης, εμποδίζοντας την μεταφορά τους ανατολικότερα. Μεταξύ των δύο αυτών βυθισμάτων παρατηρείται η αναθόλωση του υποβάθρου και η εμφάνιση των λόφων Πέτρας και Μαγούλας. Προφανώς, το έντονο ανάγλυφο του υποβάθρου οφείλεται σε μεγάλα γεωλογικά ρήγματα, που έχουν διεύθυνση ΒΔ – ΝΑ, παράλληλα με τον γενικό άξονα της λεκάνης της Κάρλας.





Σχήμα 2.2 Γεωλογικός Χάρτης της Λεκάνης της Κάρλας. (Μπεζές Κ., 2004)

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.

Στο νοτιοδυτικό τμήμα της λεκάνης, στην περιοχή του Ριζόμυλου, φαίνεται ότι δεν έφθαναν τα υφάλμυρα νερά της λίμνης Κάρλας. Εδώ οι προσχώσεις έχουν πάχος που φθάνει τα 300 m, ενώ βαθύτερα υπάρχουν μάρμαρα και σχιστόλιθοι ή γνεύσιοι, που αποτελούν το βραχώδες υπόβαθρο της λεκάνης. Οι σχηματισμοί του υποβάθρου αναδύονται στην επιφάνεια και εμφανίζονται και στην ορεινή περιοχή που περιβάλλει την πεδιάδα. Στην περιοχή αυτή η ποιότητα των υπογείων νερών είναι πολύ καλή.

Λίγο ανατολικότερα, προς την σήραγγα, λόγω του πολύπλοκου διαμελισμού του υποβάθρου και του μεταβαλλόμενου πάχους των προσχώσεων, παρατηρούνται μεγάλες διαφορές στην στάθμη και στην ποιότητα των νερών των υφιστάμενων γεωτρήσεων. Το φαινόμενο αυτό είναι ιδιαίτερα αισθητό στην μεταξύ Ριζόμυλου και Κάρλας περιοχή, όπου απότομα εμφανίζεται το φαινόμενο της υφαλμύρυνσης.

## **2.3 Χλωρίδα-Πανίδα**

### **2.3.1 Ιχθυοπανίδα**

Τα κυριότερα είδη ψαριών που υπήρχαν στη λίμνη Κάρλα ήταν το γριβάδι, το τσιρώνι, η κοκκινοφτέρα, το σίρκο, το μουστακάτο, η πεταλούδα, το σύρτι, ο γωβιός, η ταινία και το χέλι. Τα είδη που παρουσίαζαν τη μεγαλύτερη οικονομική σημασία ήταν το γριβάδι και το χέλι και ακολουθούσαν το τσιρώνι με την κοκκινοφτέρα. Ο πληθυσμός των άλλων ειδών ήταν μεγάλος, αλλά η εμπορική τους αξία μικρή. Το πλαγκτόν ήταν η τροφή των ψαριών. Σήμερα υπάρχουν κάποιοι πληθυσμοί ψαριών από τα είδη ποπροαναφέρθηκαν στις αρδευτικές διώρυγες και στις στραγγιστικές τάφρους.

### **2.3.2 Ορνιθοπανίδα**

Ανάλογα με τις αυξομειώσεις της στάθμης της λίμνης, μια έκταση ως 4.500 ha πλημμυριζόταν τον χειμώνα και την άνοιξη και αποξηραινόταν το θέρος. Η έκταση αυτή παρείχε ιδανικό ενδιαίτημα για διαχειμάζοντα και μεταναστευτικά υδρόβια πουλιά. Μαζί με την εισροή θρεπτικών ουσιών από τους περιβάλλοντες αγρούς αλλά και τα όρη αυτή η φυσική περιοδική ανοργανοποίηση των θρεπτικών ουσιών ήταν το κύριο αίτιο για την πολύ μεγάλη βιολογική παραγωγικότητα της λίμνης.

Στη λίμνη υπήρχε ακόμα μεγάλος αριθμός βατραχιών, νερόφιδων, νεροχελωνών, σαλιγκαριών και εντόμων που αποτελούσαν και τροφή της πλούσιας ορνιθοπανίδας. Η λίμνη Κάρλα ήταν ένας από τους σπουδαιότερους υγρότοπους για υδρόβια πουλιά στην Ελλάδα και στα Βαλκάνια και μάλιστα όλες τις εποχές του έτους. Είχαν καταγραφεί τουλάχιστον 143 είδη πουλιών πολλά ως αναπαραγόμενα και άλλα ως μεταναστευτικά και

διαχειμάζοντα. Ο αριθμός των ειδών είναι εντυπωσιακός. Τουλάχιστον 55 από τα καταγραφέντα είδη θεωρούνται σήμερα ως «προστατευόμενα» σύμφωνα με την οικεία Οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης περί Πουλιών, η οποία επιβάλλει επίσης την προστασία των βιοτόπων τους. Μερικά από τα ανωτέρω 55 είδη κινδυνεύουν σήμερα στην Ελλάδα να εξαφανισθούν. Η περιοχή φιλοξενούσε πολλά και ποικίλα πανιδικά στοιχεία. Φιλοξενούσε τυπικά πουλιά των υγροτόπων (πάπιες, ερωδιούς, πελεκάνους) και πολλά μέγαρα αναπαράγόμενα αρπακτικά πουλιά (όρνια και αετούς) καθώς και πουλιά ανοιχτής πεδιάδας (αγριόγαλος, στεπόκιρκος). Τα περισσότερα από αυτά ζούσαν σε αποικίες μέσα στους καλαμιώνες ή στα δένδρα των γειτονικών περιοχών.

Κατά τη μετανάστευση παρατηρούνταν μεγάλα σμήνη ιβιδών, είδη που στα Βαλκάνια είναι πολύ σπάνια και κινδυνεύοντα με εξαφάνιση. Για αρκετά είδη πάπιας η Κάρλα αποτελούσε την πρώτη καταγραφή φωλιάσματος στην Ελλάδα. Αναφέρονται μεγάλοι αριθμοί αργυροπελεκάνων οι οποίοι τρέφονταν και κούρνιαζαν στη λίμνη. Οπωσδήποτε, η τακτική παρουσία αυτού του παγκοσμίως κινδυνεύοντος είδους τονίζει την εξαιρετική οικολογική σημασία του υγρότοπου αυτού. Πριν 40-50 έτη η Κάρλα ήταν από τις ελάχιστες τοποθεσίες στην Ευρώπη όπου ήταν παρόντες συγχρόνως οι τρεις μεγαλύτεροι ευρωπαϊκοί αετοί. Μάλιστα, τα είδη αυτά αναπαράγονταν στις γειτονικές ορεινές περιοχές της Κάρλας και τρέφονταν τακτικά στα λιβάδια της περιοχής. Σήμερα έχουν εξαφανισθεί και τα τρία είδη από την ευρύτερη περιοχή της Κάρλας και το ίδιο ισχύει για τον αγριόγαλο, ο οποίος θεωρείται ότι έχει εξαφανισθεί από όλη την Ελλάδα. Ο μακρύς κατάλογος των μεταναστευτικών παρυδάτιων γλάρων, παπιών, ακόμη και γερανών δείχνει την εξαιρετική σπουδαιότητα του υγρότοπου αυτού για τη διεθνή μετανάστευση των πουλιών, ιδίως μάλιστα αν ληφθεί υπόψη ότι η Κάρλα βρισκόταν στη Θεσσαλία, μια περιοχή πολύ φτωχή μεν σε υγροτόπους αλλά τοποθετημένη κάτω από την κύρια οδό πτήσεων, κατά μήκος της ανατολικής ακτής της ηπειρωτικής Ελλάδας. Το μέγεθος του αριθμού των πουλιών που διαβιούσαν στην περιοχή της λίμνης προκύπτει και από μαρτυρίες κατοίκων του Πλατύκαμπου που αναφέρουν ότι «επλήρωναν κόσμο με όπλα να φυλάνε τα σπαρτά από τα χιλιάδες χηνάρια». Ο συνολικός αριθμός των 430.000 πουλιών που καταγράφηκε είναι μοναδικός για την Ελλάδα και αν σήμερα υπήρχε η λίμνη θα είχε οπωσδήποτε κηρυχθεί ως Υγρότοπος Ramsar Διεθνούς σημασίας.

### **2.3.3 Θηλαστικά**

Τα ελάχιστα διαθέσιμα στοιχεία δείχνουν την ύπαρξη ενός μόνο τοπικού υγροτοπικού είδους, της βίδρας. Οι αναφορές για άλλα θηλαστικά περιλαμβάνουν το τσακάλι,

τον λύκο, την αλεπού και το αγριογούρουνο. Τα τέσσερα αυτά είδη ζούσαν στα γειτονικά όρη και κατέβαιναν καμιά φορά προς τις όχθες της λίμνης κατά τους ψυχρούς, ιδίως, χειμώνες. Σημαντική ήταν, ακόμη, και η παρουσία του λύγκα στη γύρω ορεινή περιοχή.

#### **2.3.4 Χλωρίδα - ζώνες φυσικής βλάστησης**

Η φυσική βλάστηση της λεκάνης απορροής της Κάρλας ήταν ποικίλη. Η μισή περίπου επιφάνεια της λεκάνης απορροής αποτελείται από δασικές εκτάσεις οι οποίες καλύπτονται από φυσική βλάστηση. Η χλωρίδα της ευρύτερης περιοχής κατατάσσεται σε τρεις ζώνες βλάστησης που καλύπτουν στο σύνολό της τη λεκάνη απορροής:

1. Ευμεσογειακή ζώνη βλάστησης
2. Τεχνητά γεωργικά οικοσυστήματα στα Β., Β.Δ. της λίμνης με κύριες καλλιέργειες τα σιτηρά, τις αμυγδαλιές, κηπευτικά σε ορισμένες περιοχές και ελιές.
3. Παραμεσογειακή ζώνη βλάστησης

Την εποχή της αποξήρανσης το Ν.Α. τμήμα της λίμνης καλυπτόταν από πυκνή υδροχαρή βλάστηση. Συστάδες υδροχαρούς βλάστησης υπήρχαν και σε άλλες περιοχές περιφερειακά της λίμνης.

#### **2.3.5 Οικοσύστημα**

Από την παραγωγικότητα της λίμνης σε ψάρια, την ποικιλότητα των ειδών ιχθυοπανίδας και ορνιθοπανίδας και τον αριθμό διαχειμαζόντων πτηνών, διαφαίνεται πως η λίμνη ήταν εύτροφη με μεγάλη σταθερότητα του οικοσυστήματος. Οι μηχανισμοί που ευνοούσαν τη μεγάλη πρωτογενή παραγωγή που είχε η λίμνη θα πρέπει να αποδοθούν:

- Στη διακύμανση της στάθμης που διευκόλυνε την αυξομείωση των θρεπτικών συστατικών και την αφαίρεση των καταλοίπων.
- Στο μεταβλητό των φυσικών ειδών, που εξασφάλιζε την συνέχεια της παραγωγής στο χώρο. Τα μεταναστευτικά πουλιά για παράδειγμα αφαιρούσαν ένα μέρος της παραγόμενης βιομάζας (πλαγκτόν, ψάρια) εποχιακά, αλλά με τα περιττώματά τους πρόσφεραν θρεπτικά υλικά για αναπαραγωγή της.
- Η ανάπτυξη σημαντικών διεργασιών προσαρμογής που προκαλούνταν από την ποικιλία των συνθηκών (πλήμμη, άμπωτις).
- Η εύκολη διείσδυση της ηλιακής ενέργειας, εξαιτίας της χαμηλής στάθμης υδάτων.
- Ο συνεχής εμπλουτισμός με θρεπτικές ουσίες που μεταφέρονταν με τις πλημμύρες.

## 2.4 Δημογραφικά – Πληθυσμιακά στοιχεία

Η πληθυσμιακή σύσταση στην Περιφέρεια Θεσσαλίας χαρακτηρίζεται από γηρασμένο πληθυσμό με οριακές τιμές αντικατάστασης των παλαιότερων γενεών από τις νεότερες και μεγάλα ποσοστά εξαρτώμενου πληθυσμού από τον παραγωγικής ηλικίας πληθυσμό. Η εικόνα αυτή διομορφώνεται από τα στοιχεία της απογραφής του 2001 και έχει ιδιαίτερο βάρος στην αναπτυξιακή διάσταση της Περιφέρειας καθώς λίγοι νέοι εισέρχονται στην αγορά εργασίας και οι ήδη εργαζόμενοι επιβαρύνονται με τη συντήρηση μεγάλου αριθμού εξαρτώμενων ατόμων κυρίως μεγάλης ηλικίας.

Η τάση μεταβολής του πληθυσμού στην Περιφέρεια Θεσσαλίας μετά την απογραφή του 2001 είναι φθίνουσα σε αντίθεση με την ελαφρά ανοδική τάση στο σύνολο της Χώρας. Η πτωτική τάση συνδέεται με μείωση του νεαρής ηλικίας πληθυσμού γεγονός που φανερώνουν και οι τάσεις μεταβολής των δομικών δεικτών γήρανσης και αντικατάστασης.

Το εκπαιδευτικό επίπεδο του πληθυσμού της Περιφέρειας Θεσσαλίας σύμφωνα με τα στοιχεία της απογραφής του 2001 είναι χαμηλότερο σε σχέση με αυτό στο σύνολο της Χώρας. Οι κάτοχοι μεταπτυχιακών τίτλων εκπαίδευσης κυμαίνονται χαμηλότερα του 0,2% ενώ οι κάτοχοι τίτλων τριτοβάθμιας εκπαίδευσης κυμαίνονται συνολικά στο 10%.

Οι αλλοδαποί κάτοικοι στην Περιφέρεια Θεσσαλίας αποτελούν ποσοστό περίπου 6% του συνολικού πληθυσμού, κατά τα μεγαλύτερα ποσοστά τους κατοικούν στη Λάρισα και τη Μαγνησία και οφείλουν την παρουσία τους στα πρόσφατα μεταναστευτικά ρεύματα από τις χώρες της ανατολικής Ευρώπης και των Βαλκανίων. Είναι χαμηλού εκπαιδευτικού επιπέδου στην πλειοψηφία τους και απασχολούνται σε δραστηριότητες έντασης εργασίας.

## 2.5 Δεδομένα χρήσεως γης

Από τον Πίνακα 2.1 προκύπτει ότι στην λεκάνη της Κάρλας η γη χρησιμοποιείται κυρίως από αγρότες, συνεπώς πρόκειται για γεωργική γη. Στην περιοχή οι δασικές εκτάσεις είναι μικρές και παρατηρείται απουσία οικισμών. Οι χρήσεις γης που εμφανίζονται στον παρακάτω πίνακα εμφανίζουν μικρές διαφορές ως προς τα μεγέθη που παρουσιάζονται στις Υποστηρικτικές Μελέτες (Υδραυλική και Γεωργική). Μικρή διαφορά υπάρχει επίσης και προς τη συνολική έκταση της λεκάνης που αναφέρεται στην υδραυλική μελέτη ( $\approx 1.050.000$  στρέμματα). Οι χρήσεις γης στη λεκάνη απορροής της Κάρλας εμφανίζονται στον Πίνακα 2.1 που ακολουθεί και στο Σχήμα 2.3 φαίνονται σε χάρτη οι χρήσεις γης στην ευρύτερη περιοχή.

**Πίνακας 2.1** Χρήσεις γης λεκάνης απορροής

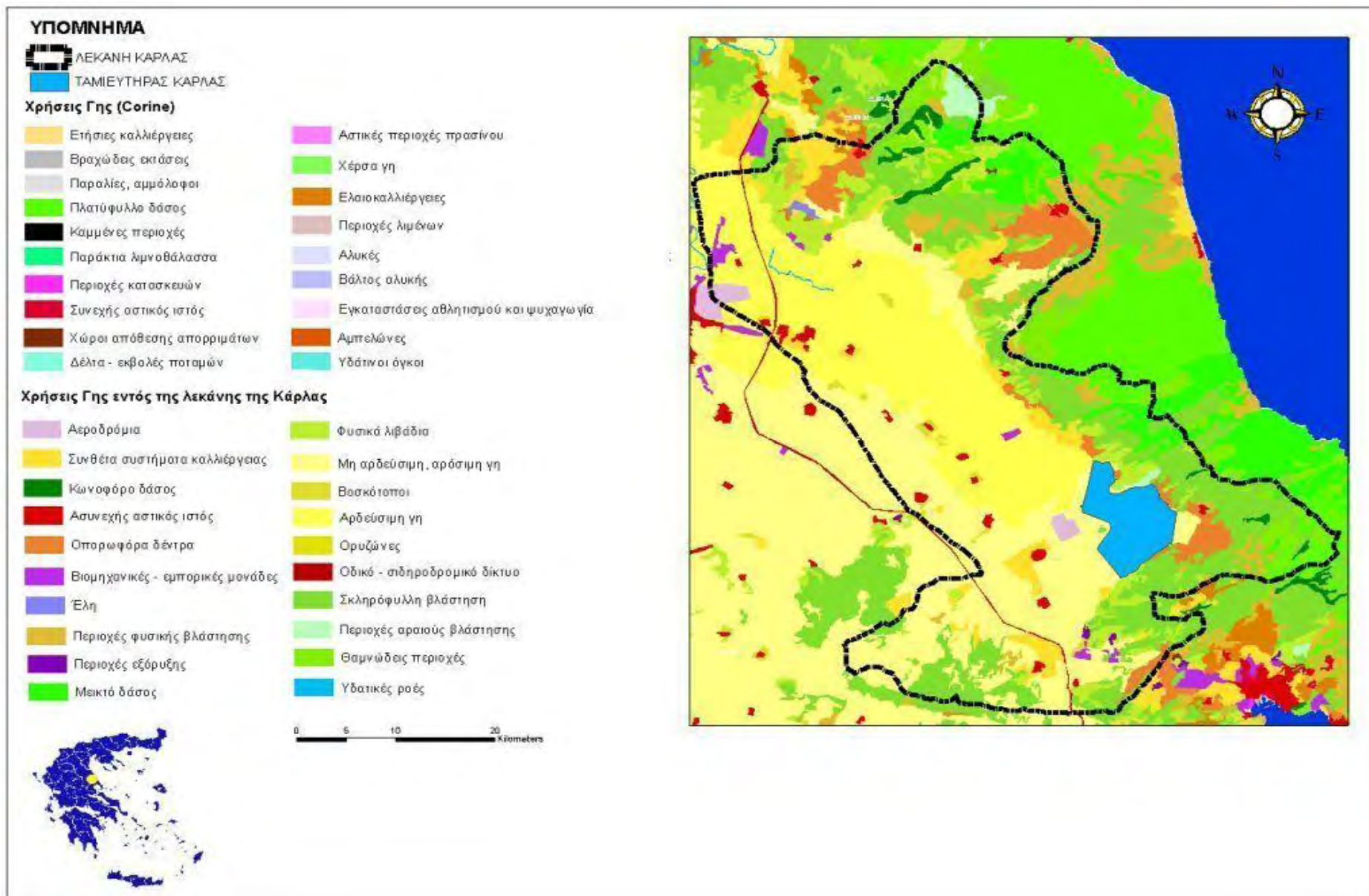
α/α	Χρήσεις γης	Έκταση (στρ.)	Ποσοστό κατανομής
1	Αστικές Δραστηριότητες	22.789	1,98%
2	Μη Αρδεύσιμη – Αρόσιμη Γη	153.146	13,28%
3	Μόνιμα Αρδεύσιμη Γη	394.967	34,24%
4	Αμπελώνες	1.498	0,13%
5	Δενδρώδεις Καλλιέργειες	43.454	3,77%
6	Ελαιώνες	885	0,08%
7	Λιβάδια	9.521	0,83%
8	Παραλίες – Αμμόλοφοι – Αμμουδιές	265	0,02%
9	Εκτάσεις με αραιή βλάστηση	10.319	0,89%
10	Αποτεφρωμένες εκτάσεις	4.126	0,36%
11	Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας	123.206	10,68%
12	Γεωργικοδασικές περιοχές	1.168	0,10%
13	Δάσος πλατύφυλλων	8.858	0,77%
14	Δάσος Κωνοφόρων	8.414	0,73%
15	Μικτό Δάσος	24.080	2,09%
16	Βοσκότοποι	71.436	6,19%
17	Θάμνοι και Χερσότοποι	6.600	0,57%
18	Σκληροφυλλική Βλάστηση	236.696	20,52%
19	Μεταβατικές δασώδεις – Θαμνώδεις εκτάσεις	31.552	2,74%
20	Ροές Υδάτων	460	0,04%
	<b>Σύνολο</b>	<b>1.153.440</b>	<b>100,00%</b>

Στην περιοχή μελέτης υπάρχουν δημόσιες και ιδιωτικές εκτάσεις, οι οποίες χωρίζονται σε αγροτικές και δασικές. Η μεγαλύτερη έκταση δασικής γης της περιοχής μελέτης ανήκει στο Δημόσιο. Αυτή υπολογίζεται περίπου στο 80% των ορεινών εκτάσεων. Στην περιοχή συναντώνται επίσης και Κοινοτικά Δάση, το Μοναστηριακό Δάσος Φλαμουρίου, καθώς και περιοχές διακατεχόμενες από Κοινότητες και ιδιώτες που καλύπτουν μικρότερες εκτάσεις.

**Πίνακας 2.2 :** Καθεστώς ιδιοκτησίας δασών στην λεκάνη απορροής

Όνομασία περιοχής	Έκταση (ha)	Κατάληψη επί της περιοχής μελέτης (%)
Κοινοτικό Δάσος Αγιάς	296	0,23
Κοινοτικό Δάσος Ποταμιάς	539	0,42
Κοινοτικό Δάσος Σκλήθρου	581	0,42
Μοναστηριακό Δάσος Ι.Μ. Φλαμουρίου	4.648	3,63
Διακατεχόμενη έκταση από ιδιώτες	824	0,64
Διακατεχόμενη έκταση από Κοινότητα Κεραμιδίου	585	0,46
Κοινοτική έκταση Κοινότητας Κεραμιδίου	658	0,51
Κοινοτική έκταση Κοινότητας Καναλίων	421	0,33
Διακατεχόμενη έκταση Κοινότητας Καναλίων	1.674	1,31
Δημόσιες εκτάσεις και αγροτικές καλλιέργειες	21.806	17,03

Όπως είναι γνωστό, στο το υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας, οι χρήσεις γης που κυριαρχούν είναι οι καλλιέργειες. Αυτό μπορούμε να το εντοπίσουμε και στην περιοχή μελέτης από το παρακάτω σχήμα 2.3 όπου αποτελεί τον χάρτη ευρύτερων χρήσεων γης.



Σχήμα 2.3 : Χάρτης χρήσεων γης λεκάνης Κάρλα.



Το σύνολο σχεδόν του πεδινού τμήματος της λεκάνης απορροής αποτελείται από αγροτικές εκτάσεις. Εξαιρέση αποτελούν οι περιοχές οικισμών και βιομηχανικών δραστηριοτήτων, οι περιοχές λατομείων και λατομικών ζωνών, καθώς και οι εκτάσεις που καταλαμβάνουν τεχνικά έργα οδοποιίας και μεταφοράς νερού (τάφροι, λιμνοδεξαμενές και ταμιευτήρες).

Οι αγροτικές εκτάσεις περιλαμβάνουν γεωργική και κτηνοτροφική χρήση. Το ιδιοκτησιακό τους καθεστώς είναι σύνθετο. Υπάρχουν αμιγώς ιδιωτικές εκτάσεις οι οποίες ανά περιόδους μεταβάλλονται μέσω της διαδικασίας αναδάσμου, καθώς και επίσης δημόσιες εκτάσεις οι οποίες παραχωρούνται από το ελληνικό δημόσιο, μέσω των νομαρχιακών υπηρεσιών σε ακτήμονες, σε κτηνοτρόφους ή στους δήμους της περιοχής μελέτης για εκμετάλλευση.

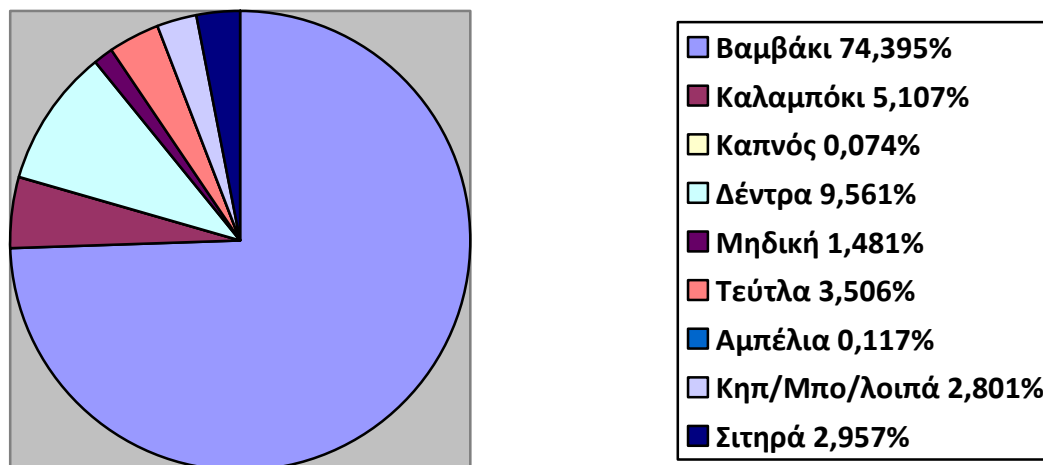
Με βάση τα διαθέσιμα στοιχεία των τοπογραφικών υπηρεσιών των Ν.Α. Λάρισας και Μαγνησίας, προκύπτει ότι η πρώτη διαχειρίζεται για λογαριασμό του Ελληνικού Δημοσίου περίπου 8300 στρ. γεωργικής γης, ενώ η δεύτερη περίπου 9000 στρ. που χωρίζονται σε 8000 στρ. γεωργικής γης και 1000 στρ. κτηνοτροφικής γης στην ευρύτερη περιοχή της λίμνης Κάρλας.

Όσον αφορά τις καλλιέργειες, δεδομένα κατανομής υφιστάμενων καλλιεργειών, αντλήθηκαν μέσα από διαθέσιμες γεωργικές καταγραφές της ΕΣΥΕ (2005) ενώ έχουν ληφθεί υπ' όψιν τα στοιχεία που παρουσίασε η μελέτη ΔΥΠ Κεντρικής Ελλάδας. Από τα δεδομένα αυτά προκύπτει πως οι κύριες καλλιέργειες εντός λεκάνης απορροής είναι το βαμβάκι και τα φθινοπωρινά σιτηρά, όμως υπάρχουν μεγάλες εκτάσεις με θερμοκήπια. Συνολικά τα δεδομένα κατανομής καλλιεργειών παρατίθενται στον Πίνακα 2.3 και στο Σχήμα 2.4.

**Πίνακας 2.3 :** Είδη καλλιέργειας στην λεκάνη απορροής

<b>Καλλιέργεια</b>	<b>Έκταση (Κμ<sup>2</sup>)</b>	<b>Ποσοστό (%)</b>
Βαμβάκι	279.27338	74.395%
Καλαμπόκι	19.17250	5.107%
Καπνός	0.27687	0.074%
Δέντρα	35.89168	9.561%
Μηδική	5.56020	1.481%
Τεύτλα	13.16125	3.506%
Αμπέλια	0.44084	0.117%

Κηπ/Μπο/λοιπα	10.51660	2.801%
Σιτηρά	11.10077	2.957%



**Σχημα 2.4** Τα ποσοστά καλλιεργιών του πίνακα 2.3 σε διάγραμμα.

### 3. ΑΠΟΞΗΡΑΝΣΗ ΚΑΙ ΕΠΑΝΑΣΥΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ

#### 3.1 Αποξήρανση της Λίμνης Κάρλας

Η περιοχή της Κάρλας αποτελεί τεκτονικό βύθισμα που έγινε κατά την πρώτη περίοδο της τεταρτογενούς εποχής και στο οποίο εναποτέθηκαν τα πρώτα λιμναία ιζήματα. Ακολούθησε πλήρωση αυτού με προϊόντα διάβρωσης που μετέφεραν ο Πηνειός και άλλοι χείμαρροι από τη λεκάνη απορροής τους.

Οι διακυμάνσεις της στάθμης της λίμνης ήταν έντονες κατά τη διάρκεια των προϊστορικών χρόνων, αποτέλεσμα των διάφορων προσχώσεων σε αυτή. Κατά το 1938-9 πραγματοποιείται η πρώτη οριοθέτηση ανώτερου (48,50μ) και κατώτερου (47,30μ) υψομέτρου της στάθμης με το Ν. 5800/33, ενώ κατά τα επόμενα έτη έλαβε χώρα νέος περιορισμός της έκτασης της λίμνης απόρροια των αντιπλημμυρικών αναχωμάτων στον ποταμό Πηνειό. Το μέγιστο βάθος της από 5,5 μέτρα που ήταν πριν το 1940 μειώθηκε στα 2 μέτρα το 1950-5.

Σύμφωνα με τα στοιχεία του ΥΠΕΧΩΔΕ, η έκτασή της μεταβαλλόταν από έτος σε έτος, ανάλογα με τις βροχοπτώσεις, και κάλυπτε εκτάσεις 65.000-130.000 στρεμμάτων. Ήταν αβαθής (το νερό κάλυπτε δύο-έξι μέτρα) και είχε πλούσια υδρόβια βλάστηση με μεγάλη σημασία για όλα σχεδόν τα είδη πουλιών. Το 1962, λίγο προτού αποξηρανθεί η λίμνη, 430.000 πουλιά ζούσαν εκεί. Είχαν καταγραφεί 143 είδη πουλιών, από τα οποία τουλάχιστον 55 θεωρούνται σήμερα προστατευόμενα.

Οι διακυμάνσεις της στάθμης, η απόπλυση των εδαφών, το ιδιόμορφο ιδιοκτησιακό καθεστώς και η μείωση των αλιευμάτων οδήγησαν στο να αποξηρανθεί η λίμνη εντελώς, παρά τις σχετικές μελέτες που δεν προέβλεπαν κάτι τέτοιο.

Τα πρώτα συντονισμένα έργα για στη λεκάνη απορροής γίνονται το 1949-1950 όταν κατασκευάστηκαν τα αναχώματα εγκιβωτισμού του Πηνειού και οι συλλεκτήρες ορεινών υδάτων Π1+ Ι3 και Ι5+ Ι6. Οι συλλεκτήρες αυτοί στις μελέτες πήραν τις ονομασίες Σ1 και Σ5.

Η συστηματική αποτύπωση των εκτάσεων της λίμνης, ο σχεδιασμός τοπογραφικών διαγραμμάτων καθώς και κτηματολογικού χάρτη διαμορφώνεται το 1952. Το 1953 ανατίθεται στον Μηχανικό κ. Παπαδάκη από το υπουργείο Γεωργίας η εκπόνηση «προμελέτης εγγειοβελτιωτικών έργων Παρακάρλιου περιοχής». Η μελέτη αυτή αφορά την αξιοποίηση του μεγαλύτερου τμήματος της Πρακαρλίου περιοχής

που εκτείνεται μεταξύ της ΝΔ όχθης της λίμνης Κάρλας και μέχρι του εθνικού δρόμου Βόλου- Λάρισας, ΒΔ μέχρι την οδό Λάρισας-Αγιάς και ΝΑ ορίζεται από το κοινοτικό όριο του χωριού Ριζόμυλος. Η συνολική έκταση της περιοχής αυτής είναι 197.000 στρέμματα.

Η μελέτη ολοκληρώνεται το 1954 και προβλέπει κατασκευή αρδευτικού και αποστραγγιστικού δικτύου αποτελούμενο από τάφρους και διώρυγες. Η λίμνη θα περιορίζεται σε μία έκταση 64.700 στρέμματα στο ΝΑ τμήμα της. Στο δυτικό όριο της λίμνης θα κατασκευάζονταν ανάχωμα για την προστασία της περιοχής από υπερχειλίσσεις της λίμνης. Η λίμνη θα χρησιμοποιούνταν για άρδευση με δίκτυο από διώρυγες και αρδευτικά κανάλια. Θα τροφοδοτούνταν από το υδρολογικό δίκτυο της απομένουσας λεκάνης απορροής. Προβλέπονταν ακόμα, δυνατότητα τροφοδοσίας της λίμνης από νερά που αντλούνταν από τον Πηνειό.

Τα αποστραγγίσματα της περιοχής με δίκτυο αποστραγγιστικών τάφρων θα εκκενώνονταν στον Παγασητικό μέσω αποχετευτικής σήραγγας, μήκους 11,5 χλμ και παροχετευτικής ικανότητας 5,8 m<sup>3</sup>/sec. Υπήρχε ακόμα πρόβλεψη η υπερχειλίση της λίμνης να αποχετεύεται στη σήραγγα.

Δηλαδή δεν προβλέπονταν η ολική αποξήρανση της Κάρλας, αλλά αντίθετα προβλέπονταν ταμιευτήρας. Ακόμα οι αποστραγγίσεις της λεκάνης δεν θα οδηγούνταν στη λίμνη, αλλά θα αποχετεύονταν κατευθείαν στον Παγασητικό καθώς και τα πιθανά υπερχειλίσματα από τον ταμιευτήρα.

Μ' αυτόν τον τρόπο η μελέτη εξασφάλιζε τόσο την αποστράγγιση και άρδευση της περιοχής όσο και τη βελτίωση των αλατωμένων και αλκαλιωμένων εδαφών που είχαν ήδη εντοπιστεί στη μελέτη με σειρά εδαφολογικών αναλύσεων. Έτσι, η λίμνη προστατεύονταν από τις αποπλύσεις που δεν οδηγούνταν σ' αυτήν.

Η περιοχή η οποία θα ευνοούνταν από τα εγγειοβελτιωτικά έργα, την εποχή εκείνη αφορούσε 1.780 οικογένειες ή 8.100 άτομα που είχαν ιδιοκτησίες στην υπο αξιοποίηση περιοχή σε ένα σύνολο 2.639 οικογενειών στην περιοχή μελέτης ή 11.876 άτομα.

Οι οικονομικές επιπτώσεις από τον περιορισμό της λίμνης και τη μείωση της ιχθυοπαραγωγής από την τεχνητή πια ρύθμιση της στάθμης της λίμνης ανάλογα με τις αρδευτικές ανάγκες για τους θιγόμενους πληθυσμούς δεν εκτιμήθηκαν και ούτε έγινε καμιά εναλλακτική πρόβλεψη για την αντικατάστασή τους.

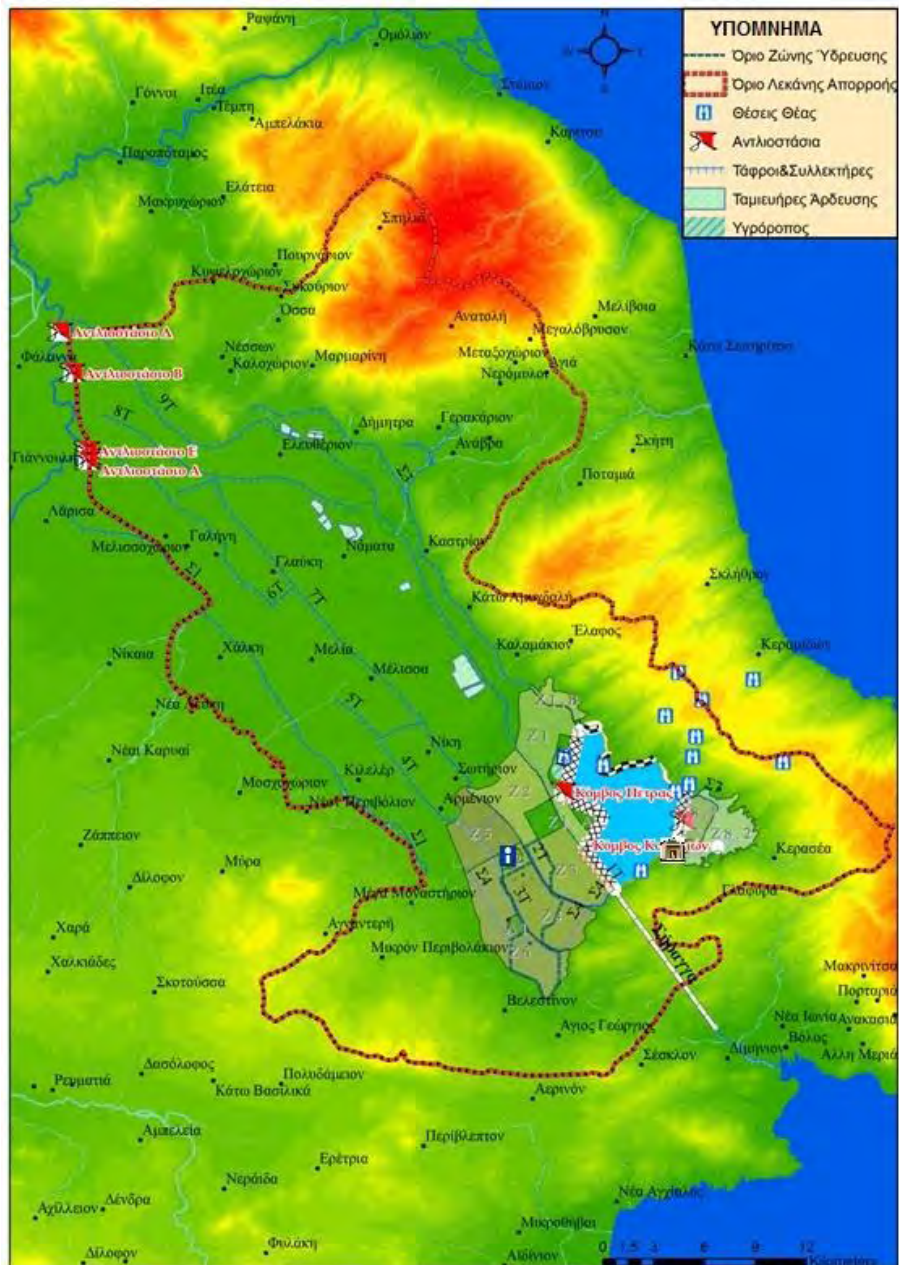
Η μελέτη Παπαδάκη προέβλεπε τόσο στη δαπάνη κατασκευής όσο και λειτουργίας και συντήρησης των έργων την ενεργό συμμετοχή των ωφελούμενων από τα έργα γεωργών με προσφορά προσωπικής εργασίας κεφαλαίων.

Τα αμέσως επόμενα χρόνια εκπονείται από τη Διεύθυνση Μελετών του Υπ. Δημοσίων Έργων η οριστική μελέτη των έργων με βάση την προμελέτη Παπαδάκη και αρχίζει η κατασκευή του φράγματος για μετατροπή της λίμνης σε υδαταποθήκη.

Έτσι το 1961 που ολοκληρώνεται η κατασκευή της σήραγγας, αρχίζει και η εκκένωση της υδάτινης μάζας της λίμνης στον Παγασητικό κόλπο. Η αποξήρανση ολοκληρώθηκε το 1962. Παράλληλα έγινε διάνοιξη των τάφρων αποστράγγισης των υδάτων 2Τ, 3Τ, 4Τ, 5Τ και 6Τ που πρότεινε η μελέτη Παπαδάκη.

Οι λόγοι για τους οποίους αποξηράνθηκε όλη η λίμνη (και όχι τα 18.000 στρέμματα μόνο που πρότεινε η μελέτη Παπαδάκη) δεν είναι γνωστοί με ακρίβεια, αλλά θα πρέπει να αναζητηθούν μάλλον σε πολιτικές σκοπιμότητες παροχής κλήρων προς εκμετάλλευση στην περιοχή και για εξοικονόμηση δαπανών που η κατασκευή του συνόλου του έργου που απαιτούσε.

Φαίνεται πάντως ότι στο Υπ. Γεωργίας μέχρι το 1959 κυριαρχούσε η αντίληψη πιστής εφαρμογής των έργων που πρότεινε η μελέτη Παπαδάκη, γιατί το 1959 συντάχθηκε προμελέτη και στη συνέχεια ανατέθηκε οριστική μελέτη στο γραφείο Ν. Νικολαΐδη με αντικείμενο την πλήρη αξιοποίηση της πεδιάδας Λάρισας- Κάρλας και με δεδομένο την κατασκευή του ταμιευτήρα (64.700 στρέμματα) καθώς και των άλλων έργων (σήραγγα, συλλεκτήρες ορεινών υδάτων, Σ2, Σ2... ανάχωμα Πηνειού, τάφροι πεδινών υδάτων 1Τ, 2Τ...). Με βάση τη μελέτη του Νικολαΐδη κατασκευάστηκαν οι τάφροι 1Τ, 2Τ, 3Τ, κ.λ.π. (σχήμα 3.1)



**Σχήμα 3.1** Υπάρχοντα έργα στη λεκάνη απορροής της Κάρλας.

Παρακάτω περιγράφονται τα έργα που έχουν κατασκευαστεί στην περιοχή.

### 3.2 Έργα αποξήρανσης

#### 3.2.1 Αναχώματα Πηνειού από Λάρισα μέχρι Γυρτώνη

Πρόκειται για αναχώματα εγκιβωτισμού του ποταμού του Πηνειού τα οποία κατασκευάστηκαν με σκοπό την προστασία της πεδιάδας Λάρισας – Κάρλας από τα νερά του ποταμού που ξεχειλίζουν και κατέκλυζαν μεγάλες εκτάσεις. Η διαμόρφωση των αναχωμάτων αυτών στο τμήμα του ποταμού από Λάρισα μέχρι Γυρτώνη έχει

γίνει με τέτοιο τρόπο ώστε η δημιουργούμενη κοίτη να έχει παροχετευτική ικανότητα 2000 m<sup>3</sup>/s. Τα αναχώματα αυτά λειτουργούν ικανοποιητικά από την κατασκευή τους μέχρι σήμερα και προστατεύουν την περιοχή από τις πλημμύρες του Πηνειού.

### **3.2.2 Συλλεκτήρας Σ1**

Ο συλλεκτήρας Σ1, συλλέγει τα νερά των περισσότερων ρευμάτων της Ν.Δ. λεκάνης και τα κατευθύνει στον ποταμό Πηνειό, στις βόρειες παρυφές της Λάρισας. Το συνολικό μήκος του συλλεκτήρα αυτού είναι 37 χλμ. περίπου. Στον συλλεκτήρα Σ1 συμβάλλουν : α) ο συλλεκτήρας 18 της ΒΟΟΤ και β) ο χειμάρδος Νέας Λεύκης, ο οποίος λίγο προ της συμβολής του στον Σ1, δέχεται τα νερά του χειμάρρου Νέας Καρυάς. Ο συλλεκτήρας αυτός διευρύνθηκε από τη Χ.Θ. 0+200 έως τη Χ.Θ. 11+925 με ενιαία κατά μήκος κλίση πυθμένα  $J= 0.06\%$  και πλάτος πυθμένα κυμαινόμενο από  $b=30$  μ. ως  $b=35$  μ. Αλλά και η διευρυμένη διατομή του συλλεκτήρα δε φαίνεται να εξασφαλίζει την πλήρη προστασία της περιοχής, κυρίως στο τελευταίο τμήμα του αμέσως ανάντη της συμβολής του με τον ποταμό Πηνειό. Υπάρχει επομένως ανάγκη επανεξέτασης του στο τμήμα μεταξύ της διασταύρωσής του με τη Σιδηροδρομική Γραμμή μέχρι την εκβολή του στον ποταμό Πηνειό.

### **3.2.3 Τάφρος 1Τ**

Η τάφρος 1Τ ή Κύρια Τάφρος της Κάρλας συλλέγει τα νερά των χαμηλών εκτάσεων της πεδιάδας και τα κατευθύνει στην Σήραγγα της Κάρλας. Στο αρχικό τμήμα της τάφρου συμβάλλουν οι τάφροι 8Τ και 9Τ. Η τάφρος αυτή κατασκευάστηκε μεταγενέστερα από τις τάφρους 2Τ κ.λ.π. και οι διαστάσεις της κοίτης της αποδείχθηκαν επαρκείς για την εκπλήρωση των σκοπών της.

### **3.2.4 Τάφρος 2Τ**

Η τάφρος 2Τ ή Κύρια Τάφρος της Νίκης συλλέγει τα νερά των Ν.Δ. μεσαίων εκτάσεων της πεδιάδας και τα κατευθύνει στην Σήραγγα της Κάρλας. Στην τάφρο αυτή συμβάλλουν οι τάφροι 3Τ, 4Τ, 5Τ, 6Τ και 7Τ που συγκεντρώνουν τα νερά διάφορων τμημάτων όλης της έκτασης. Αργότερα οι διατομές των τάφρων διευρύνθηκαν, με αποτέλεσμα να έχουν σήμερα επαρκή αποχετευτική ικανότητα.

### 3.2.5 Σήραγγα Κάρλας

Η σήραγγα της Κάρλας κατασκευάστηκε με βάση μελέτη της Υπηρεσίας Υδραυλικών Έργων του Υπουργείου Δημοσίων Έργων και αποτελεί την μοναδική διέξοδο για τα νερά της κλειστής λεκάνης της πεδιάδας Λάρισας – Κάρλας, τα οποία κατευθύνει στον Παγασητικό κόλπο. Τα χαρακτηριστικά της σήραγγας παρουσιάζονται στον πίνακα 2.7.

**Πίνακας 2.1** Τα χαρακτηριστικά της σήραγγας της Κάρλας.

Χαρακτηριστικά	Μονάδες	Τιμές
Μήκος	M	10.12
Επιφάνεια πεταλοειδούς διατομής	m <sup>2</sup>	4.35
Υψόμετρο εισόδου	M	38.23
Κλίση	%	0.15
Παροχευτική ικανότητα	m <sup>3</sup> /sec	8.5

### 3.2.6 Αρδευτικά Έργα

Στην ευρύτερη περιοχή της πεδιάδας Κάρλας δεν υπάρχουν συστηματικά αρδευτικά έργα, δηλαδή έργα που περιλαμβάνουν δίκτυα άρδευσης, αποχέτευσης-στράγγισης και αγροτικής οδοποιίας. Τα υπάρχοντα αρδευτικά έργα είναι απλά έργα (κινητά σωληνωτά δίκτυα, χάνδακες, μικρά αντλιοστάσια κ.λ.π.) που αποτελούν ατομικές ή ομαδικές προσπάθειες για άρδευση περιορισμένων εκτάσεων με τη χρησιμοποίηση νερού ιδιωτικών γεωτρήσεων ή γεωτρήσεων του Π.Α.Υ.Υ.Θ. ή του νερού των αποχετευτικών ή αποστραγγιστικών τάφρων. Επίσης χρησιμοποιείται το νερό ορισμένων υδατοδεξαμενών που έχουν κατασκευασθεί και είναι οι ακόλουθες:

- Οι υδατοξεμανές Ελευθερίου και Δήμητρας που καλύπτουν έκταση 0,3 τ. χλμ. και έχουν ωφέλιμη χωρητικότητα 0,7 εκ. κυβ. μέτρα.
- Η υδατοξεμανή Πλατυκάμπου που καλύπτει έκταση 0,25 τ. χλμ. και έχει ωφέλιμη χωρητικότητα 0,5 εκ. κυβ. μέτρα.
- Η υδατοξεμανή Ναμάτων που καλύπτει έκταση 0,57 τ. χλμ. και έχει ωφέλιμη χωρητικότητα 1,5 εκ. κυβ. μέτρα.
- Η υδατοξεμανή Στεφανοβικείου που καλύπτει έκταση 4 τ. χλμ. και έχει ωφέλιμη χωρητικότητα 10 εκ. κυβ. μέτρα.



- Η υδατοξεμανή Καλαμακίου που καλύπτει έκταση 2 τ. χλμ. και έχει ωφέλιμη χωρητικότητα 6 εκ. κυβ. μέτρα.

Είναι φανερό ότι τα έργα που κατασκευάστηκαν με βάση τις παραπάνω μελέτες ήταν ελλιπή καθώς τα προτεινόμενα από τους μελετητές έργα προϋπόθεταν την ύπαρξη ταμιευτήρα. Αποτέλεσμα αυτών των έργων καθώς και η κατασκευή σήραγγας παροχής 8,5 m<sup>3</sup>/s μόνο ήταν το συχνό πλημμύρισμα των χαμηλότερων εκτάσεων, εκεί δηλ. όπου προβλεπόταν η κατασκευή ταμιευτήρα. Από τα παραπάνω έργα δεν επιτεύχθηκε η πλήρης γεωργική αξιοποίηση της πεδιάδας της Κάρλας και απαιτήθηκαν νέες μελέτες και έργα.

Έτσι, ανατίθεται μελέτη στο γραφείο Ν. Νικολαΐδη- Μ. Εξάρχου, για την κατασκευή αποχετευτικού- αποστραγγιστικού δικτύου και αγροτικού οδικού δικτύου σε έκταση 185.000 στρέμματα στην περιοχή Πλατυκάμπου που θα εξυπηρετούσε παράλληλα και την άρδευση 60.000 στρεμμάτων της περιοχής αυτής με νερά του Πηνειού.

Το 1977 και αφού είχαν κατασκευαστεί τα έργα στην περιοχή Πλατυκάμπου, εκπονείται προκαταρκτική Μελέτη Αντιπλημμυριστικών και Αποστραγγιστικών έργων μείζονος περιοχής Κάρλας από το γραφείο ΑΛΦΑ-ΩΜΕΓΑ.

Με τη σύμβαση 14-5-80 το Υπουργείο Δημοσίων έργων ανέθεσε ξανά στα συνεργαζόμενα γραφεία ΑΛΦΑ-ΩΜΕΓΑ και Ν. Νικολαΐδη τη σύνταξη προμελέτης του ταμιευτήρα της Κάρλας μαζί με τα έργα υδροδότησής του και με σχέδια διάταξης των ζωνών κατάληψης από τα αρδευτικά κ.λ.π. δίκτυα της περιοχής με τίτλο «ΠΡΟΜΕΛΕΤΗ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ ΚΑΡΛΑΣ & ΣΥΝΑΦΩΝ ΕΡΓΩΝ».

Οι μελετητές αναφέρουν ότι ο ταμιευτήρας θα επιδράσει ευνοϊκά στο μικροκλίμα και την πανίδα της περιοχής, προδιαγράφουν την ιχθυολογική του αξιοποίηση και τονίζουν παράλληλα τη δυσμενή επίδραση που τα αποστραγγίσματα των αρδεύσεων θα προκαλούσαν στον ταμιευτήρα.

Οι επιπτώσεις από την αποχέτευση στον Παγασητικό αποπλυμάτων δεν εξετάστηκε, ούτε αντιμετωπίστηκε το κοινωνικό πρόβλημα από την αποστέρηση 42.000 στρεμμάτων από την καλλιέργεια.

### **3.3 Επιπτώσεις της αποξήρανσης και Επανασύσταση της Λίμνης Κάρλας**

#### **3.3.1 Λόγοι και στόχοι του έργου επανασύστασης της λίμνης Κάρλας**

Η αποξήρανση της λίμνης είχε σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία πλήθους προβλημάτων στην Περιφέρεια τα οποία αποτέλεσαν αιτία για την έναρξη της διαδικασίας της επανασύστασης.

Εκτος από τα προβλήματα που δημιουργήθηκαν στο οικοσύστημα της περιοχής, χλωρίδα και πανίδα υποβαθμίστηκε η αισθητική του τοπίου. Λόγω της υπεράντλησης για την καλυψη των αρδευτικών απαιτήσεων γεγονός που επιβάρυνε την ποιότητα των υπόγειων νερών, υπερεξαντλήθηκαν τα αποθέματα του υπόγειου υδροφορέα. Σήμερα, αξίζει να αναφερθεί ότι υπάρχουν περιοχές στις οποίες αντλούν νερό για άρδευση 40-50 μέτρα κάτω από τη στάθμη της θάλασσας.

Όσον αφορά τον επιφανειακό υδροφορέα, οι αρνητικές επιπτώσεις στην ποιότητα και στην ποσότητα του νερού είχαν σαν αποτέλεσμα την εξαφάνιση της αλιείας γεγονός που οδήγησε στη πληθυσμιακή συρρίκνωση των ασθενέστερων οικονομικά οικισμών. Επίσης, παρουσιάστηκαν ρηγματώσεις και καθιζήσεις στην περιοχή φαινόμενο το οποίο προκάλεσε μέχρι και καταστροφές σε κτίρια.

Επιπλέον, με την αποξήρανση την λίμνης παρουσιάστηκαν και επιπτώσεις στον Παγασητικό Κόλπο ο οποίος δέχεται το σύνολο του ρυπαντικού φορτίου από την περιοχή της Κάρλας με αποτέλεσμα την εμφάνιση φυτοπλαγκτού.

Τέλος, μελέτες που έγιναν στην περιοχή πριν και μετά την αποξηράνση σχετικά με το κλίμα της περιοχής έδειξαν ότι υπήρξαν αλλαγές στο μικροκλίμα, δηλαδή ότι το κλίμα μεταβάλλεται και γίνεται ηπειρωτικότερο, με μείωση της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας και της μέσης ελάχιστης ενώ η μέγιστη θερμοκρασία παρουσιάζει μικρή αύξηση.

Τα παραπάνω προβλήματα αναμένεται να αμβλυνθούν και κατά περίπτωση να αποκατασταθούν πλήρως με την ολοκλήρωση των έργων. Ειδικότερα οι βασικοί στόχοι των έργων περιγράφονται στη συνέχεια:

Αρχικά η αποκατάσταση του υπάρχοντος οικοσυστήματος που θα επιτευχθεί με την σωστή και βασισμένη σε κανόνες αειφόρο διαχείριση του. Αυτό θα συμβάλει και στην αναδιάταξη της διαχείρισης των υδατικών πόρων διότι η σωστή διαχείριση συμπεριλαμβάνει τη συλλογή και την αξιοποίηση των επιφανειακών νερών απορροής από τις γύρω λεκάνες, με σημαντικό περιορισμό των πλημμυρικών

φαινομένων και των ποιοτικά βεβαρημένων απορροών στον Παγασητικό Κόλπο μέσω της σήραγγας. Επίσης θα εφαρμοστεί ελεγχόμενα διατηρήσιμη (sustainable) εκμετάλλευση του υπόγειου υδροφορέα με δραστικό περιορισμό των υπεραντλήσεων για άρδευση και θα καταστεί δυνατή η ύδρευση της μείζονος περιοχής του Βόλου (εξυπηρέτηση 140.000 κατοίκων) από υπόγεια νερά.

Επίσης,εξίσου βασικοί στόχοι του έργου είναι η δημιουργία συνθηκών βιώσιμης ανάπτυξης της περιοχής (35.000 νοικοκυριά), η δημιουργία ενός πρότυπου χώρου για την ανάδειξη της δυνατότητας αρμονικής ανάπτυξης ανθρώπινων δραστηριοτήτων σε ισορροπία με το φυσικό περιβάλλον και τέλος η ανάδειξη της ιστορικής σημασίας της περιοχής και της σχέσης των παλαιότερων (π.χ. παλαιολιθικών) οικισμών της περιοχής με την λίμνη.

### **3.3.2 Περιγραφή του Έργου Επαναδημιουργίας της Λίμνης Κάρλας (ΕΕΛΚ)**

Το έργο Επαναδημιουργίας της λίμνης Κάρλας αφορά στη δημιουργία μιας μεγάλης υγροτοπικής έκτασης (λίμνης περιβαλλόμενη από ζώνες ειδικής διαχείρισης).

Το έργο περιλαμβάνει τη δημιουργία τεχνητής λίμνης, μέσου βάθους 4,5m, έκτασης 38.000 στρ., στο χαμηλότερο τμήμα της άλλοτε λίμνης Κάρλας, τροφοδοτούμενης από τις απορροές των πέριξ λεκανών και από τα χειμερινά νερά του Πηνειού. Η τροφοδοσία της λίμνης από τις απορροές των γύρω περιοχών σύμφωνα με το έργο επιτυγχάνεται με συλλεκτήρες και αντλιοστάσια τα οποία συμβάλλουν και στην αντιπλημμυρική προστασία των πεδινών περιοχών. Τα νερά του Πηνειού θα τροφοδοτούν τη λίμνη με αντλιοστάσιο για την ανύψωση των νερών πάνω από τα αναχώματα αντιπλημμυρικής προστασίας του ποταμού.

Επίσης, για τη βελτιστοποίηση των λειτουργιών της λίμνης ως υγροβιότοπου θα γίνουν έργα όπως 3 νησίδες, αβαθής υγρότοπος καθαρισμού νερών αποστράγγισης έκτασης περίπου 45ha, υγρότοπος στήριξης της φυσικής αναπαραγωγής ψαριών και αναπαράστασης του παραδοσιακού τρόπου διαβίωσης και αλιείας, παρόχθια φυτικά οικοσυστήματα, όπως καθορίζονται στους εγκεκριμένους Περιβαλλοντικούς Όρους του έργου.

Η ολοκλήρωση της διαμόρφωσης του υγροτόπου θα επιτευχθεί με τη 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.

Επίσης περιλαμβάνει 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 και 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.

Επίσης, έχουν μελετηθεί 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 και έργα ενίσχυσης της ύδρευσης μείζονος περιοχής Βόλου από τα εξοικονομούμενα νερά του υπόγειου υδροφόρα.

Τέλος, προτάθηκαν και 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.

### **3.4 Εναλλακτικές Προτάσεις**

Η αποξήρανση της λίμνης Κάρλας ήταν ένα έργο το οποίο έγινε χωρίς να προηγηθεί μια εκτεταμένη, σοβαρή μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Οι λαθεμένοι και πρόχειροι υπολογισμοί ενός τόσο σημαντικού έργου αποδείχτηκαν εκ των υστέρων στην πράξη, πόσο λανθασμένοι ήταν. Ωστόσο, οι υπεύθυνοι δεν άφησαν την πρώην Κάρλα στην τύχη τους, έσπευσαν να κρούσουν τον κώδωνα του κινδύνου.

Σε αυτό το σημείο θεωρούμε απαραίτητη την αναφορά προσπαθειών που έγιναν και των αποφάσεων που πάρθηκαν πριν από αρκετά χρόνια από μια ομάδα Ελλήνων και ξένων ειδικών για τους ελληνικούς υγρότοπους, που δρουν στο πλαίσιο «Στρατηγική και σχέδιο δράσης για τους ελληνικούς υγρότοπους».

Πρόκειται για ένα σχέδιο αποκατάστασης και επίλυσης των προβλημάτων που προέκυψαν από την αποξήρανση που έγινε βάση κριτηρίων που θεωρούμε απαραίτητο να αναφέρουμε:

- Προστασία του φυσικού περιβάλλοντος όχι ως αυτοσκοπός, αλλά σαν μέσο ορθολογικής διαχείρισης φυσικών πόρων και εξασφάλισης της υγείας, της άνεσης και της ευημερίας των πληθυσμών.

- Σε κάθε αναπτυξιακό έργο πρέπει να συνυπολογίζεται το αναντίρρητο γεγονός πως κάθε ανθρώπινη δραστηριότητα έχει επίπτωση στο περιβάλλον και ότι από τη στιγμή που κατασκευάστηκαν παραμένει στον πλανήτη μας επιδρώντας σε τοπικό και γενικό επίπεδο.

- Οι δυνατότητες της τεχνικής και της επιστήμης πρέπει να χρησιμοποιούνται όχι μόνο για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης και ελαχιστοποίησης του κόστους παραγωγής αγαθών, αλλά και για τη μείωση των αρνητικών επιπτώσεων των παραγωγικών διαδικασιών.

- Οι περιβαλλοντικές εκτιμήσεις πρέπει να γίνονται στα επίπεδα που ξεφεύγουν των διοικητικών διαιρέσεων της χώρας μας.

- Η αποδοχή του έργου και η εκτίμηση των θετικών – αρνητικών επιπτώσεων που θα έχει, δεν μπορεί να γίνει ερήμην των ενδιαφερομένων πληθυσμών και των φορέων συμφερόντων σε τοπικό, επαρχιακό, νομαρχιακό και περιφερειακό επίπεδο.

- Εξασφάλιση ισόρροπης οικονομικής ανάπτυξης και διαχείρισης των φυσικών πόρων.

Πρωταρχικός όμως στόχος αυτού του είδους του σχεδίου είναι η δυνατότητα εφαρμογής του από άποψη χρηματοδοτική, πολιτική, κοινωνική και οικολογική. Πρέπει να συνδυάζει ελάχιστο οικονομικό κόστος και μέγιστες μακροπρόθεσμες οικονομικές, κοινωνικές και περιβαλλοντικές ωφέλειες. Η εφαρμογή του θα πρέπει να επιφέρει μεταφορά περιβαλλοντικών προβλημάτων σε άλλες περιοχές, γιατί θα θεωρούνταν απαράδεκτη η λύση του προβλήματος της Κάρλας με απλή μεταφορά του αλλού.

Με συνάντηση εργασίας των ειδικών που έγινε στη Θεσσαλονίκη τον Απρίλιο του 1989 υποβλήθηκαν για την Κάρλα, στα πλαίσια της προετοιμασίας αυτής της συνάντησης, πολλές προτάσεις για τη μελλοντική διαχείριση της περιοχής.

Πολλές από αυτές ήταν συγκρουόμενες μεταξύ τους και άλλες αποτελούσαν μεμονωμένες λύσεις σε μεμονωμένα προβλήματα.

Ωστόσο, έπειτα από αξιόλογη εργασία των μελών της προήλθε ένα πλήρες ολοκληρωμένο σχέδιο αποκατάστασης, το οποίο θα λάβει υπόψη του όλα τα προβλήματα και τις ευκαιρίες για τη δημιουργική διαχείριση της περιοχής της τ έως

λίμνης Κάρλας και παρακάρλιων περιοχών. Το σχέδιο αυτό περιλαμβάνει μεταξύ των άλλων τα ακόλουθα σημεία:

- Τα βιομηχανικά απόβλητα της περιοχής της Λάρισας πρέπει να υφίστανται αποτελεσματική επεξεργασία επί τόπου.

- Χαρτογράφηση εδαφών σε επίπεδο αγροτικής ιδιοκτησίας.

- Σωστή ενημέρωση των αγροτών για ορθή χρήση των γεωργικών φαρμάκων και φυγή της άμεσης ρύπανσης του νερού του στραγγιστικού- αρδευτικού δικτύου από αμελείς πράξεις

- Πλήρη καθαρισμό των αστικών λυμάτων του Βόλου πριν από τη διάθεσή τους στον Παγασητικό.

- Επεξεργασία των βιομηχανικών λυμάτων του Βόλου πριν από τη διάθεσή τους στον Παγασητικό.

- Κατασκευή πέντε περίπου ταμιευτήρων νερού (reservoirs) για άρδευση στην τέως λίμνη Κάρλα και στην παρακάρλια περιοχή. Αυτοί θα διαφέρουν σε βάθος και κατατομή και θα γεμίζουν με βαρύτητα, όχι με άντληση και θα βρίσκονται στα υψηλότερα σημεία της περιοχής. Στο χαμηλότερο τμήμα της λίμνης θα υπάρχει ένας μερικώς διασωμένος ταμιευτήρας (sump) αποθήκευσης νερού πλημμύρων και αρδύσεως. Η προσεκτική κατασκευή των ταμιευτήρων (reservoirs) θα δημιουργήσει ευνοϊκές προϋποθέσεις για την εγκατάσταση και διαβίωση άγριας πανίδας και ιχθυοπανίδας, ίσως να ήταν εφικτή και η εκτροφή ψαριών.

- Οι στραγγιστικές τάφροι θα στραγγίζουν σε καλαμιώνες που θα εγκατασταθούν ίσως και με φύτευση, γύρω από τους ταμιευτήρες και κατά μήκος των κυρίων τάφρων.

- Όταν συμβαίνουν μεγάλες βροχοπτώσεις, η επιπλέον απορροή από την περιοχή θα οδηγείται σε ταμιευτήρες νοτιοανατολικού τμήματος της περιοχής, έτσι θα εμπλουτίζονται οι υπόγειοι υδροφορείς.

- Πιθανή είναι η άντληση επιπρόσθετων ποσοτήτων νερού στους ταμιευτήρες από τον Πηνειό κατά τον χειμώνα, όταν ο ποταμός έχει αποδεχτεί ποσότητα νερού

Στην πραγματοποίηση όμως των σχεδίων αποκατάστασης της λίμνης Κάρλας υπεισέρχονται διάφορες δυσκολίες και προβλήματα, τα οποία όμως έχουν ληφθεί υπόψη και αντιμετωπιστεί στον καλύτερο δυνατό βαθμό. Αυτά αφορούν:

- Το κόστος πραγματοποίησης.

- Την αποτυχία αντιμετώπισεων κοινωνικών και οικονομικών πλευρών.

- Απώλεια καλλιεργημένων εκτάσεων.

- Ποιότητα νερού ταμιευτήρων.
- Απορροή θρεπτικών στοιχείων από τις καλλιεργούμενες εκτάσεις.
- Προστασία καλλιεργημένων εκτάσεων από πλημμύρες.
- Προβλήματα διαπερατότητας των ταμιευτήρων που θα δημιουργηθούν με εκσκαφή.
- Πρόβλημα ρύπανσης του Αιγαίου μέσω των σηράγγων παρουσιάστηκε μέσα σε εθνικά και διεθνή πλαίσια, δηλαδή πάρθηκαν υπόψη τα εξής:
  - ❖ Η πολιτική της Ελλάδας για την προστασία του περιβάλλοντος.
  - ❖ Η αγροτική πολιτική της Ελλάδας και ιδίως σε ότι αφορά τις αρδεύσεις.
  - ❖ Τα ολοκληρωμένα Μεσογειακά Προγράμματα της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Ο λόγος για τον οποίο αναφέρουμε αναλυτικά αυτό το σχέδιο αποκατάστασης είναι ότι αποτελεί, σε εθνικό επίπεδο, την πιο πρόσφατη, ολοκληρωμένη, σοβαρή και υπεύθυνη απόφαση σχετικά με το εκκρεμές πρόβλημα της Κάρλας. Θεωρείται, ότι αποτελεί ένα αρκετά σωστό σχέδιο που εξετάζει τις επιπτώσεις της αποξήρανσης της Κάρλας από πολλές απόψεις συνυπολογίζοντας πολλούς αρνητικούς παράγοντες, ότι βλέπει αντικειμενικά τα πράγματα και τις επιπτώσεις που μπορεί να έχει από σκοπιά περιβαλλοντική, οικονομοτεχνική και κοινωνική – πολιτική. Το σχέδιο αποκατάστασης της λίμνης Κάρλας είναι πρώτα και κύρια περιβαλλοντικό.

Ωστόσο, και σε διεθνές επίπεδο, κύρια επιδίωξη της Ευρωπαϊκής Ένωσης στην ανάπτυξη και διαχείριση των υδατικών πόρων, αποτελεί ο στόχος ότι οποιαδήποτε επέμβαση ή σχεδιασμός σε ένα σύστημα θα πρέπει να εξασφαλίζει τη βιωσιμότητα και την αειφορία του συστήματος αυτού. Στην επίτευξη του στόχου αυτού συμβάλλει και η οδηγία 2000/60/ΕΚ, η οποία αποβλέπει στην ολοκληρωμένη διαχείριση των υδατικών πόρων. Ο αποτελεσματικότερος τρόπος διαχείρισης των υδατικών πόρων περιλαμβάνει ένα συνδυασμό μοντέλων προσομοίωσης και βελτιστοποίησης και υλοποιείται με τα μοντέλα διαχείρισης.

Ως διαχείριση των υπόγειων υδάτων θεωρείται η λήψη σημαντικών αποφάσεων και η πραγματοποίηση υπεύθυνων χειρισμών, με σκοπό τον έλεγχο της ισορροπίας ενός συστήματος. Ως έλεγχος της ισορροπίας του νερού θεωρείται η διαδικασία κατά την οποία ο ρυθμός απόληψης του νερού από το υπέδαφος δεν πρέπει να υπερβαίνει τον αντίστοιχο ρυθμό αναπλήρωσής του. Η διαχείριση των υδατικών πόρων γενικά αποτελεί μια δυναμική διαδικασία που αποβλέπει στην πληρέστερη κάλυψη των

σημερινών, αλλά και των μελλοντικών αναγκών, με βάση έναν ορθολογικό προγραμματισμό, που στηρίζεται σε αντικειμενικά κριτήρια και διαδικασίες.



## 4. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ

### 4.1 Υδρολογικό μοντέλο UTHBAL.

Το μηνιαίο εννοιολογικό μοντέλο (UTHBAL) έχει χρησιμοποιηθεί, για την ημικατανεμημένη μηνιαία προσομοίωση του υδρολογικού ισοζυγίου και την εκτίμηση της κατείσδυσης στον υπόγειο υδροφόρο ( Loukas et al. 2007 ), επιτυχώς σε λεκάνες απορροής στην Κύπρο (Loukas et al. 2003), στην Κρήτη (Christodoulaki et al. 2003; Christodoulaki et al. 2004), στη Θεσσαλία (Loukas et al. 2005a; Loukas et al. 2006) και στην διασυνοριακή λεκάνη του Ποταμού Νέστου/Mesta (Kampragou 2006). Το μοντέλο χρησιμοποιεί χωρικά κατανεμημένα υδρομετεωρολογικά δεδομένα εισόδου σε υψομετρικές ζώνες. Τα αποτελέσματα εξόδου του μοντέλου παρέχουν χωρικά ημικατανεμημένη πληροφορία των συνιστωσών του υδρολογικού κύκλου.

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):

$$\%S = -4.5 \cdot T + 55 \quad \text{για } -10^{\circ}\text{C} \leq T \leq 12.22^{\circ}\text{C} \quad (4.1)$$

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:

$$\begin{aligned} \%S &= 0 && \text{για } T \geq 12.22^{\circ} \text{ C} \\ \%S &= \frac{100}{1.35^T \cdot 1.61 + 1} && \text{για } -10^{\circ} \text{ C} \leq T \leq 12.22^{\circ} \text{ C} \\ \%S &= 100 && \text{για } T \leq -10^{\circ} \text{ C} \end{aligned} \quad (4.2)$$

Όπου  $T$  είναι 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):

$$SM = C_m \cdot T \cdot N \quad (4.3)$$

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:

$$SM = C_m \cdot T_{\mu\eta\nu\iota\acute{\alpha}\alpha} (J) \quad (4.4)$$

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:

$$SWE_{sp}(J) = SWE_{sp}(J-1) + S(J) - SM(J) \quad (4.5)$$

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

$$S(J) = \%S \cdot P(J) \quad (4.6)$$

Όπου  $P(J)$  είναι η συνολική 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):

$$E_a(J) = \min \{ E_p(J) * (1 - \alpha^{S_{moist}(J)/E_p(J)}), S_{moist}(J) \} \quad (4.7)$$

όπου  $S_{moist}(J)$  είναι η διαθέσιμη εδαφική εργασία του μήνα  $J$  για πλήρωση της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής,  $\alpha$  ένας συντελεστής πραγματικής εξατμισοδιαπνοής ( $0 \leq \alpha \leq 1$ ) και  $E_p(J)$  η δυνητική εξατμισοδιαπνοή του μήνα  $J$ .

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

$$SR(J) = (1 - K) * (AS_{moist}(J) - S_{max}) \quad \text{εάν } AS_{moist}(J) > S_{max} \quad (4.8)$$

ή

$$SR(J) = 0 \quad \text{εάν } AS_{moist}(J) \leq S_{max} \quad (4.9)$$

όπου:

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

ικανοποίηση της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής

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

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

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

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

$$D(J) = K * (AS_{moist}(J) - S_{max}) \quad \text{εάν } AS_{moist}(J) > S_{max} \quad (4.10)$$

ή

$$D(J) = 0 \quad \text{εάν } AS_{moist}(J) \leq S_{max} \quad (4.11)$$

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

$$N_{\text{moist}}(J) = AS_{\text{moist}}(J) - SR(J) - D(J) \quad (4.12)$$

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

$$MR(J) = \beta * [N_{\text{moist}}(J-1) + N_{\text{moist}}(J)] \quad (4.13)$$

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

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

$$NS_{\text{moist}}(J) = N_{\text{moist}}(J) - MR(J) \quad (4.14)$$

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

$$S_{\text{moist}}(J+1) = P(J+1) + NS_{\text{moist}}(J) \quad (4.15)$$

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:

$$Q_g(J) = \gamma * D(J-1) \quad (4.16)$$

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

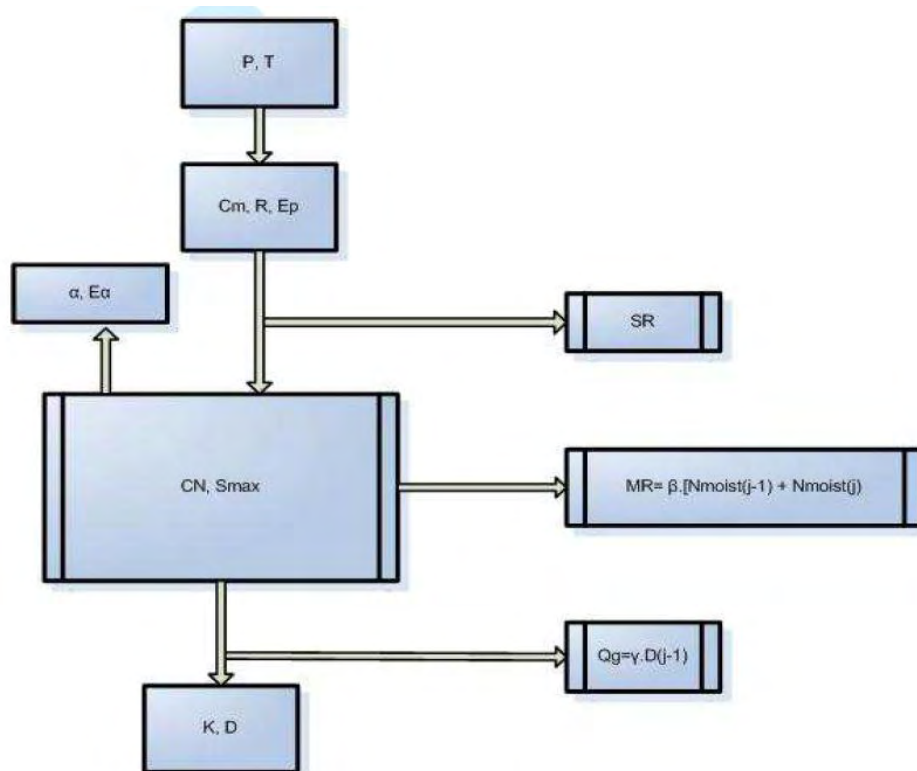
Η επαναφόρτιση του υδροφορέα,  $R_g$ , είναι ίση με:

$$R_g = (1 - \gamma) * D(J - 1) \quad (4.17)$$

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

$$Q_c(J) = SR(J) + MR(J) + Q_g(J) \quad (4.18)$$

Το παραπάνω μοντέλο υδρολογικού ισοζυγίου είναι ένα μοντέλο έξι παραμέτρων, Σχήμα 4.1. 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.



Σχήμα 4.1 UTHBALL-Μοντέλο έξι παραμέτρων.

## 5. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ

### 5.1 Εισαγωγή.

Αρκετά μοντέλα προσομοίωσης υπόγειας ροής έχουν αποτελέσει σημαντικό εργαλείο στην επίλυση των υδρολογικών προβλημάτων. Το πόσο σημαντικά είναι προκύπτει από το γεγονός ότι μπορούν να μετέχουν στην εξαγωγή συμπερασμάτων ύστερα από τη χρήση υποθετικών στοιχείων. Δημιουργούνται μοντέλα τα οποία προσομοιώνουν διεργασίες που πιθανολογούνται ότι συμβαίνουν στο υπόγειο σύστημα. Ωστόσο, για να είναι αξιόπιστα τα αποτελέσματα είναι σημαντικό να παράγονται αποτελέσματα από ένα μοντέλο βασιζόμενο περισσότερο σε πραγματικά στοιχεία έτσι ώστε τα αποτελέσματα του να συγκρίνονται με στοιχεία πεδίου. Αν τότε δεν υπάρχει μεγάλη απόκλιση ανάμεσα στην πραγματικότητα και στα αποτελέσματα του μοντέλου τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί το μοντέλο με αξιοπιστία. Αριθμητικά μοντέλα παράγουν πληροφορίες βασιζόμενα σε υποθετικές διεργασίες και είναι επομένως η καλύτερη προσομοίωση με ένα ρεαλιστικό μοντέλο.

Για την κατασκευή ενός αριθμητικού μοντέλου το οποίο να προσομοιώνει βέλτιστα ποιοτικώς τον υδροφόρο προκύπτουν πολλές δυσκολίες. Ανάμεσα σε αυτές είναι να γίνει κατανοητός ο πραγματικός μηχανισμός λειτουργίας του υδροφόρου και να βρεθεί μια αποδεκτή και συμβατή αριθμητική εφαρμογή. Επίσης, θα πρέπει να επιλεγεί η κατάλληλη κλίμακα καννάβου. Δηλαδή, το να μελετάς την υπόγεια ροή μιας περιοχής μεγάλης έκτασης θα ήταν επαρκής ένας κανάβος ανά εκατοντάδες μέτρα, ενώ ο ίδιος κανάβος θα ήταν ανεπαρκής για τη μελέτη ενός μικρού ρεύματος ή ενός πηγαδιού.

Το ZOOMQ3D είναι ένα αριθμητικό μοντέλο το οποίο μπορεί να υστερεί σε σχέση με άλλα μοντέλα στη γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων αλλά, εξαλείφει προβλήματα που αφορούν την κλίμακα της περιοχής μελέτης καθώς επίσης έχει απλό μη παραθυρικό περιβάλλον, εύκολο και κατανοητό στη χρήση. Η φιλοσοφία του μοντέλου είναι να διαχωρίζει τα δεδομένα σε διαφορετικά απλά αρχεία καθένα από τα οποία περιέχει πληροφορίες μόνο για ένα δεδομένο και συνεπώς ο έλεγχος των δεδομένων μπορεί να γίνει ευκολότερα.

## 5.2 Κώδικας ZOOMQ3D

Για την προσομοίωση της υδροδυναμικής κατάστασης των υδροφορέων χρησιμοποιείται από πολλούς ερευνητές ο κώδικας ZOOMQ3D (quasi-three-dimensional ground water flow model) της Βρετανικής Υπηρεσίας Γεωλογικών Ερευνών (B.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 κατείδυσης, της επίδρασης στραγγιστηριών και ποταμών και λιμνών κ.α όπως θα παρουσιαστούν παρακάτω.

## 5.3 Μαθηματικό Υπόβαθρο του ZOOMQ3D

Έστω ένας στοιχειώδης όγκος  $\delta V$  με περιεχόμενη μάζα  $\delta M$ . Η μεταβολή της μάζας αυτής ανά μονάδα όγκου και χρόνου είναι :

$$\frac{\partial(\delta M)}{\partial t} / \delta V \quad (5.1)$$

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

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 :

$$\oint_{\delta V} \rho \cdot \vec{q} \cdot d\vec{S} + \iiint_V \rho \cdot W \cdot dV + \iiint_V \left( \frac{\partial(\delta M)}{\partial t} / \delta V \right) \cdot dV = 0 \quad (5.2)$$

Όπου ο πρώτος όρος είναι το επιφανειακό ολοκλήρωμα, που λαμβάνεται σε όλη την κλειστή επιφάνεια του  $\delta V$  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 :

$$-\oint \rho \cdot \vec{q} \cdot d\vec{S} = -\iiint \nabla(\rho \cdot \vec{q}) \cdot dV \quad (5.3)$$

Κατά τον Hantush (1964) :

$$\frac{d(\delta M)}{\rho \cdot \delta V} = \frac{d(\delta V_w)}{\delta V} = S_s \cdot d\phi \quad (5.4)$$

όπου  $S_s$  είναι η ειδική αποθηκευτικότητα με διαστάσεις  $L^{-1}$ . Έτσι η Εξ. 4.2 γράφεται:

$$-\iiint \left\{ \nabla(\rho \cdot \vec{q}) - \rho \cdot W + \rho \cdot S_s \cdot \frac{\partial \phi}{\partial t} \right\} \cdot dV = 0 \quad (5.5)$$

ή

$$-\left[ \frac{\partial(\rho \cdot q_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot q_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \cdot q_z)}{\partial z} \right] + \rho \cdot W = \rho \cdot S_s \cdot \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (5.6)$$

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. 4.6. Οι συνιστώσες της ταχύτητας Darcy στις τρεις διαστάσεις, δίνονται από τη σχέση :

$$\left. \begin{aligned} q_x &= -K_{xx} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x} = -K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \\ q_y &= -K_{yy} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial y} = -K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \\ q_z &= -K_{zz} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial z} = -K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad (5.7)$$

Η Εξ. 5.6, λόγω της Εξ.5.7 γίνεται :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \cdot \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \cdot \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \quad (5.7)$$

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.5.8 είναι η τρισδιάστατη διαφορική εξίσωση με μερικές παραγώγους, που περιγράφει την κίνηση του υπόγειου νερού σε υπό πίεση υδροφορείς και χρησιμοποιείται από το μοντέλο **ZOOMQ3D**. 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.5.8 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.5.8 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 ZOOMQ3D με τη βοήθεια του οποίου γίνεται η επίλυση της Εξ.5.8, χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών στις τρεις διαστάσεις όπου το συνεχές σύστημα που περιγράφεται από την Εξ.5.8, 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.

#### **5.4 Χαρακτηριστικά του μοντέλου ZOOMQ3D.**

Σε αυτή την ενότητα θα αναληθούν τα χαρακτηριστικά και οι δυνατότητες του μοντέλου ZOOMQ3D.

##### **5.4.1 Στρώματα μοντέλου με διαφορετικά υψόμετρα (layers)**

Το ZOOMQ3D μπορεί να ενσωματώσει πολλαπλά στρώματα πεπερασμένων κόμβων τα υψόμετρα των οποίων μπορούν να διαφέρουν στο μοντέλο προσομοίωσης καθώς η βάση ενός στρώματος μπορεί να είναι υψηλότερα από τη βάση του υπερκειμένου στρώματος ή και το αντίστροφο. Αυτό έχει και σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία ανάγκης διαχωρισμού των στρωμάτων του μοντέλου ώστε να απλοποιείται η παρουσίαση του υπόγειου υδροφορέα που μελετάται, ο οποίος αποτελείται από τμήματα χαμηλής διαπερατότητας κατά μήκος του στρώματος. Αυτό συμβαίνει γιατί η ροή μέσω στρωμάτων χαμηλής περιεκτικότητας η οποία θεωρείται κάθετη, αντιπροσωπεύεται από τον κατακόρυφο όρο διαρροής που συνδέει δύο πεπερασμένα στοιχεία-κόμβους άναμεσα στον άνω και κάτω υδροφόρο ορίζοντα.

##### **5.4.2 Διακριτοποίηση του κανάβου.**

Το ZOOMQ3D περιέχει μια διαδικασία διακριτοποίησης του κανάβου η οποία βοηθά στην επίλυση των προβλημάτων που σχετίζονται με την υπο κλίμακα μέλετη.

Ο αριθμός των υπό μελέτη πεπερασμένων κόμβων μπορεί να αυξηθεί προσθέτοντας επιτυχώς διαδοχικά ενδιάμεσα ορθογωνικά κελιά σε συγκεκριμένες περιοχές. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τον επιμερισμό του κανάβου σε περισσότερα κελιά, υποπεριοχές, και συνεπώς κόμβους και έτσι επιτυγχάνεται η καλύτερη μελέτη της περιοχής. που μας ενδιαφέρει.

#### **5.4.3 Μοντέλα κατανεμημένα και μη.**

Στο ZOOMQ3D μπορούν να προσομοιωθούν τόσο τα κατανεμημένα όσο και τα μη κατανεμημένα μοντέλα. Στους κόμβους των κατανεμημένων μοντέλων οι τιμές των μεγεθών που αφορούν τους κόμβους είναι ανεξάρτητες και διακριτές ενώ στα μη κατανεμημένα οι τιμή είναι μία, ενιαία και άρα ολόκληρη η λεκάνη αποτελεί μια ενιαία χωρική οντότητα. Συνεπώς, σε κάθε είδους μοντέλο θα πρέπει να δίνονται τιμές στους κόμβους είτε τα μοντέλα μπορούν να διακριτοποιηθούν είτε όχι.

#### **5.4.4 Ανομοιογένεια και ανισοτροπία**

Τα μοντέλα μπορεί να είναι ανομοιογενή και ανισότροπα. Διαφορετικές τιμές υδραυλικών παραμέτρων μπορούν να προσδιορίζονται σε κάθε κόμβο. Για παράδειγμα η υδραυλική αγωγιμότητα μπορεί να διαφέρει στις δύο διευθύνσεις (x,y) θεωρώντας ότι οι κύριοι άξονες του τανυστή της υδραυλικής αγωγιμότητας ταυτίζεται με το καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων.

#### **5.4.5 Οριακές συνθήκες**

Για τις ανάγκες της εξομοίωσης των οριακών συνθηκών του εκάστοτε προβλήματος, ορίζονται κόμβοι σταθερού φορτίου, όπου το υδραυλικό φορτίο καθορίζεται εκ των προτέρων και παραμένει σταθερό σε όλα τα βήματα της προσομοίωσης, ανενεργοί ή αδιαπέρατοι κόμβοι, όπου η ροή δεν επιτρέπεται από ή προς αυτά καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης και κόμβοι μεταβλητού φορτίου όπου τα φορτία δεν καθορίζονται, αλλά μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

#### **5.4.6 Φόρτιση υδροφόρου ορίζοντα**

Προσομοιώνεται η επιφανειακή κατανομή του εμπλουτισμού προς το υπόγειο υδροφόρο σύστημα. Ο εμπλουτισμός αναφέρεται, είτε στην κατείσδυση από τις βροχοπτώσεις, είτε σε τεχνητό εμπλουτισμό.

#### **5.4.7 Ποτάμια**

Οι διακλαδώσεις των ποταμών προσομοιώνονται χρησιμοποιώντας μια σειρά αλληλοσυνδεόμενων μικρότερων ποταμών. Οι υδραυλικές παράμετροι που χαρακτηρίζουν ένα παρακλάδι μπορούν να τροποποιούνται κατά μήκος του ποταμού ανάλογα με το πώς συνδέεται το τμήμα αυτό με τον υδροφόρο ορίζοντα. Η μεταφορά του νερού στο ποτάμι προσομοιώνεται με την αύξηση της βασικής ροής του νερού στον υδροφόρο κατά μήκος του ποταμού. προσομοιώνει τη ροή νερού μεταξύ υδατορρεύματος (ποταμού, λίμνης) και υδροφορέα. Τα υδατορεύματα τροφοδοτούν τον υδροφορέα ή τροφοδοτούνται από αυτόν ανάλογα με την υδραυλική κλίση μεταξύ του επιφανειακού υδάτινου σώματος και του υδροφορέα.

#### **5.4.8 Όρια διαρροής (head-dependent leakages nodes)**

Η ροή στους κόμβους είναι εξαρτώμενη της υψομετρικής διαφοράς του και του υδραυλικού ύψους από κόμβο σε κόμβο

#### **5.4.9 Πηγάδια-Ξηραντήρια (Drains)**

Η ροή έξω από τα πηγάδια εξαρτάται από την ιδιότητα του υδροφορέα να επιτρέπει τη μεταφορά του νερού σε περιοχές γύρω από τα πηγάδια. Η ροή των πηγαδιών προσομοιώνεται τοποθετώντας γεωτρήσεις οι οποίες αντλούν νερό από τον υδροφορέα μέχρι το επίπεδο του νερού να πέσει κάτω από το επίπεδο της επιφάνειας του εδάφους. Θετικές τιμές της παροχής υποδηλώνουν εμπλουτισμό, ενώ οι αρνητικές κατάσταση άντλησης. Ο ρυθμός άντλησης θεωρείται ανεξάρτητος, τόσο από την έκταση της κυβελίδας, όσο και από την πιεζομετρική στάθμη σε αυτή.

#### **5.4.10 Χρονική διακριτοποίηση.**

Η προσομοίωση γίνεται σε time steps, stress periods και blocks ο ορισμός των οποίων αναφέρεται παρακάτω:

time step: το χρονικό βήμα που χρησιμοποιεί το μοντέλο για την επίλυση της διαφορικής εξίσωσης

stress period: είναι η περίοδος όπου παράμετροι όπως η επαναφόρτιση (recharg), άντληση κτλ. μένουν σταθερές και χωρίζεται σε ένα ή περισσότερα times steps.

block: αποτελείται από μία ή περισσότερες stress-periods

#### 5.4.11 Κατασκευάζοντας το μοντέλο

Για την εκτέλεση του ZOOMQ3D απαιτείται η δημιουργία του μοντέλου στο ZETUP το οποίο χρησιμοποιείται για τη δημιουργία του κανάβου. Το ZETUP δημιουργεί όλα τα αρχεία τα οποία είναι απαραίτητα για το ZOOMQ3D. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα αρχεία αυτά είναι της μορφής .txt και συνεπώς είναι εύκολο να τροποποιηθούν. Επίσης με αυτό τον τρόπο δύναται να γίνουν αλλαγές στην κατασκευή του μοντέλου. (Σχήμα 5.1)



**Σχήμα 5.1** Διαδικασία κατασκευής του μοντέλου και εκκίνηση του ZOOMQ3D.

Η φιλοσοφία κατασκευής ενός μοντέλου του ZOOQ3D είναι η δημιουργία αρχείων τα οποία θα περιέχουν διαφορετικά δεδομένα. Με άλλα λόγια κάθε φάκελος περιέχει ένα συγκεκριμένο είδος πληροφορίας. Για παράδειγμα, ένα αρχείο περιέχει πληροφορίες για τα πηγάδια παρατήρησης, άλλο αρχείο για τα υδραυλικά ύψη κτλ. στη συνέχεια παραθέτονται τα αρχεία του ZOOMQ3D.

- grids.dat: περιέχει πληροφορίες για τον κানাβο κόμβο-κόμβο, συντεταγμένες των κόμβων, διαπερατότητα κόμβων, θέση αυτών (x,y,z) κτλ

- aquifer.map: περιέχει πληροφορίες για το αν είναι κατανεμημένο ή μη το μοντέλο

- ztop.map & ztop.cod ή ztop.dat και zbase.map & zbase.cod ή zbase.dat : περιγράφει το υψόμετρο των κόμβων μεταξύ των οποίων βρίσκεται η επιφάνεια μελέτης

- hydcond.map & hydcond.cod ή hydcond.dat: τιμές για την υδραυλική αγωγιμότητα κατά την διεύθυνση x. Για την διεύθυνση y, οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας είναι αποτέλεσμα της αναλογίας  $K_y/K_x$

- anisotropy.map & anisotrop.cod ή anisotrop.dat: δηλώνεται η αναλογία  $K_y/K_x$  για τον υπολογισμό της υδραυλικής αγωγιμότητας κατά τη διεύθυνση y

- spector.map & spector.cod ή spector.dat: δηλώνεται η ειδική αποθηκευτικότητα που είναι ο όγκος του νερού που απελευθερώνεται ανά μονάδα όγκου του υδροφόρου όταν μειωθεί το ύψος πίεσης κατά μία μονάδα και έχει διαστάσεις  $L^{-1}$ .

- syield.map & syield.cod ή syield.dat: Ειδική απόδοση ενός γεωλογικού σχηματισμού είναι ο λόγος του βαρυτικού νερού (Vw) προς τον όγκο του σχηματισμού αυτού (V):  $S_y=Vw/V$ . Η ειδική απόδοση ταυτίζεται με το ενεργό πορώδες.

- vcond.map & vcond.cod ή vcond.dat: Η κατακόρυφη υδραυλική αγωγιμότητα χρησιμοποιείται για να επιτρέψει την ενοποίηση, κατά κάποιο τρόπο, των χαμηλών στρωμάτων διαπερατότητας μεταξύ των υδροφόρων ορίζοντων, όπου η ροή θεωρείται ότι είναι κατά κύριο λόγο κάθετη, χωρίς να χρειάζεται να ενσωματωθούν πρόσθετα στρώματα πεπερασμένων κόμβων.

- initialh.map & initialh.cod ή initialh.dat: αρχικά υδραυλικά ύψη του υπλογείου υδροφορέα

- boundary.dat: καθορίζονται οι κόμβοι των ορίων του υδροφορέα με συντεταγμένες καθώς επίσης και αν οι κόμβοι είναι διαπερατοί ή μη.
- fixedheads.dat: καθορίζονται οι κόμβοι του υδροφορέα εσωτερικά των ορίων
- noflow.map: δηλώνονται οι κόμβοι που προσωρινά απενεργοποιούνται και δεν μελετώνται
- leakage.dat: δηλώνονται οι διαρροές προς τον υπόγειο υδροφορέα από τα επιφανειακά υδάτινα σώματα
- springs.dat: δηλώνονται τα πηγάδια
- rivers.dat: δηλώνονται τα ποτάμια
- recharge.dat: δηλώνονται οι τιμές της κατεισδυσης για κάθε κόμβο ανά χρονική περίοδο ( $\text{mm day}^{-1}$ )
- pumping.dat: δηλώνονται τα πηγάδια άντλησης, οι συντεταγμένες τους, το στρώμα του υδροφορέα στο οποίο βρίσκονται και οι παροχές τους ανα περίοδο μελέτης
- obswells.dat: δηλώνονται τα πηγάδια παρατήρησης,
- αρχεια vkd###.dat: αφορούν υδροφορείς με ρηγματώσεις
- clock.dat: σε αυτό το αρχείο γίνεται διακριτοποίηση του χρόνου, καθορίζεται η συχνότητα εμφάνισης αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, καθορίζεται αν η προσομοίωση γίνεται με σταθερές ή μη μεταβλητές και τέλος αν η προσομοίωση θα ξαναγίνει χρησιμοποιώντας στοιχεία προηγούμενου τρεξίματος.
- Contour\_times.dat: αποθηκεύονται τα υδραυλικά ύψη του υπόγειου υδροφορέα
- Zoomq3d.dat: περιλαμβάνει όλα τα αρχεία που θα πρέπει να τρέξει το ZOOMQ3D.



## **6. ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗ ΤΩΝ ΟΜΟΙΩΜΑΤΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑΣ ΜΕΣΩ ΤΟΥ OpenMI**

### **6.1 Εισαγωγή.**

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενα κεφάλαια για να γίνει σωστή διαχείριση των υδατικών πόρων δεν είναι επαρκής η μελέτη του κάθε υδροφορέα, υπόγειου και επιφανειακού, μεμονωμένα αλλά η μελέτη αλληλεπίδρασης αυτών των δύο φορέων για την επίτευξη ορθότερων αποτελεσμάτων.

Συνεπώς, είναι αναγκαία η δημιουργία μοντέλων που να μπορούν να συνδυάσουν τα μέσα τα οποία περιγράφουν τις επιμέρους διαδικασίες απορροής. Ένα από τα πρώτα μοντέλα που αναπτύχθηκαν για τον συνδυασμό των επιμέρους είναι το SHE, το Ευρωπαϊκό Υδρολογικό Μοντελο (Abbot et al. 1986) το οποίο συνδυάζει την επιφανειακή ροή και την υπόγεια ροή. Από τότε έχουν αναπτυχθεί διάφορα άλλα μοντελα τα οποία υποστηρίζουν τον συνδυασμό υδρολογικών και υδραυλικών μοντέλων. Σε αρκετές περιπτώσεις, αυτά τα συστήματα εκπληρώνουν την ανάγκη για προσομοίωση των υδροφορέων. Όμως αυτό απαιτεί μια ακριβή αναπαράσταση του φυσικού φαινομένου σε κάθε ένα από τα μοντελα που πρόκειται να αλληλεπιδράσουν. Οποιοδήποτε ατομικό μοντέλο μπορεί να το κάνει αυτό, απλά η δυσκολία εξαρτάται από την αρχιτεκτονική του προγράμματος καθώς επίσης και από το ποιο φυσικό φαινόμενο περιγράφει το μοντέλο. Ακόμα και αν γίνει προσομοίωση διαφορών φυσικών φαινομένων οι συνδυασμοί αυτών για την εξαγωγή ενός ασφαλούς συμπεράσματος είναι άπειροι και ασφαλώς δεν είναι οικονομικά εφικτό, εφόσον για να γίνει η προσομοίωση ενός φυσικού φαινομένου σε περισσότερα του ενός μοντέλου απαιτούνται περισσότερες της μίας προσομοίωσης και άρα περισσότερα του ενός μοντέλα.

Αυτού του είδους τα προβλήματα είχε σκοπό να αντιμετωπίσει το ερευνητικό πρόγραμμα HarmonIT μέσω του OpenMI, μίας πλατφόρμας που θα μπορούσε να συνδυάσει εύκολα ατομικά μοντέλα που το καθένα θα προσομοίозε ένα διαφορετικό φυσικό μοντέλο, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα σε εταιρίες, δημόσιους οργανισμούς και πανεπιστήμια που ενδιαφέρονται για την ανάλυση συστημάτων και προσομοίωση ομοιωμάτων, να συνειφέρουν επιτυχώς στην ανάπτυξη του Προτύπου Διασύνδεσης OpenMI. Το OpenMI βασικά είναι το μέσο συνδυασμού ενός υδραυλικού και ενός υδρολογικού μοντέλου. Μέσω αυτής της πλατφόρμας τα δυο αυτά μοντέλα μπορούν

να ανταλλάξουν δεδομένα κατά τη διάρκεια του τρεξίματος χωρίς κανέναν προγραμματισμό, κάτι που σημαίνει ότι ο μελετητής μπορεί για κάθε φαινόμενο που θέλει να προσομοιώσει να χρησιμοποιήσει το πιο κατάλληλο πρόγραμμα για το συγκεκριμένο φαινόμενο και στη συνέχεια να τα συνδυάσει μέσω του OpenMI.

Η πλατφόρμα OpenMI (Moore and Tindall 2005) είναι ένα πρωτόκολλο που καθορίζει μια διεπιφάνεια ανταλλαγής δεδομένων σε πραγματικό χρόνο μεταξύ μοντέλων τα οποία χρησιμοποιούν χρονικά μεταβαλλόμενα αποτελέσματα. Όταν εφαρμοστεί η πλατφόρμα αυτή, υφιστάμενα μοντέλα, ακαδημαϊκά ή εμπορικά, ελαφρώς τροποποιημένα (Makropoulos et al., 2009) μπορούν να εκτελούνται παράλληλα και να ανταλλάσσουν δεδομένα ή να επιτρέπουν πρόσβαση στα δεδομένα ή τα αποτελέσματά τους σε τρίτα προγράμματα σε κάθε χρονικό βήμα.

Η σημασία αυτής της διαδικασίας είναι μεγάλη διότι η ενοποίηση αυτή των διαφορετικών προγραμμάτων βοηθάει στην κατανόηση και την πρόβλεψη της αλληλεπίδρασης των μεθόδων που εφαρμόζονται από τα μοντέλα και αποτελεί βασική προϋπόθεση για την πραγματοποίηση μιας ολοκληρωμένης προσέγγισης όσον αφορά τη διαχείριση των υδάτων.

Ιδιαίτερα σημαντική είναι η δυνατότητα που προσφέρεται μέσω της πλατφόρμας αυτής για την αντικατάσταση ενός ή περισσότερων μοντέλων, διατηρώντας παράλληλα τα υπόλοιπα. Με τον τρόπο αυτόν μπορούν να συγκριθούν άμεσα διαφορετικές υλοποιήσεις υπολογισμού φυσικών μεγεθών, να προστεθούν δυνατότητες ή να διορθωθούν προβλήματα στην προσομοίωση ενός συστήματος, χωρίς να παιτηθούν ο εκ νέου σχεδιαδιαμός και υλοποίηση του (Makropoulos, 2010).

Οι λόγοι που οδήγησαν στην χρήση αυτής της πλατφόρμας στην παρούσα εργασία είναι η πολυπλοκότητα της προσομοίωσης, η ανάγκη τροφοδότησης των μοντέλων με διαφορετικά πρωτογενή δεδομένα και η επεκτασιμότητα και παραμετροποίηση του όλου συστήματος προσομοίωσης.

Όσον αφορά την πολυπλοκότητα της προσομοίωσης, είναι γεγονός ότι η μελέτη μικρότερων τμημάτων της περιοχής μελέτης είναι ευκλότερη εφόσον η μελέτη ενός μεγαλύτερου τμήματος θα εγκυμονούσε κινδύνους σφαλμάτων. Συνεπώς η δημιουργία ενός μόνο προγράμματος το οποίο θα αναλάμβανε να εκτελέσει όλες τις εργασίες που περιγράφονται σε προηγούμενα κεφάλαια, θα αποτελούσε πολύ δύσκολη εργασία.

Η ανάγκη τροφοδότησης των μοντέλων προσομοίωσης με διαφορετικά πρωτογενή δεδομένα ικανοποιείται με την πλατφορμα OpenMI γιατί σε αυτή

χρησιμοποιείται το επιθυμητό υποπρόγραμμα το οποίο περιέχει τα πρωτογεννή δεδομένα που έχει αποφασίσει ο χρήστης να χρησιμοποιήσει στην προσομοίωση.

Τέλος, ο τρίτος και καθοριστικός παράγοντας που οδήγησε στην υιοθέτηση της πλατφορμας OpenMI στην παρούσα διατριβή είναι η επεκτασιμότητα και η παραμετροποίηση του όλου συστήματος προσομοίωσης. Η επεκτασιμότητα επιτρέπει στον τελικό χρήστη να χρησιμοποιήσει οποιοδήποτε σύνολο μετρήσεων επιθυμεί, χωρίς τα ίδια τα μοντέλα να έχουν σχεδιαστεί με εγγενή υποστήριξή τους. Ανεξάρτητα από τη χωρική κλίμακα και τη χρονική διακριτότητα των νεότερων δεδομένων, το σύστημα θα μπορεί επιτυχώς να προγνώσει την υδρολογική κατάσταση σε οποιαδήποτε λεκάνη απορροής του ζητηθεί. Στο σημείο αυτό υπεισέρχεται και η δυνατότητα παραμετροποίησης του συστήματος, δηλαδή ο προσδιορισμός των γεωγραφικών συντεταγμένων που περικλείουν το ιδεατό ορθογώνιο εντός του οποίου λαμβάνουν χώρα οι υπολογισμοί αλλά και οι συνδεσμοί στο διαδίκτυο για τον ορισμό των εξυπηρετητών παροχής πρωτογενών δεδομένων.

## **6.2 Προσομοίωση διαδικασιών**

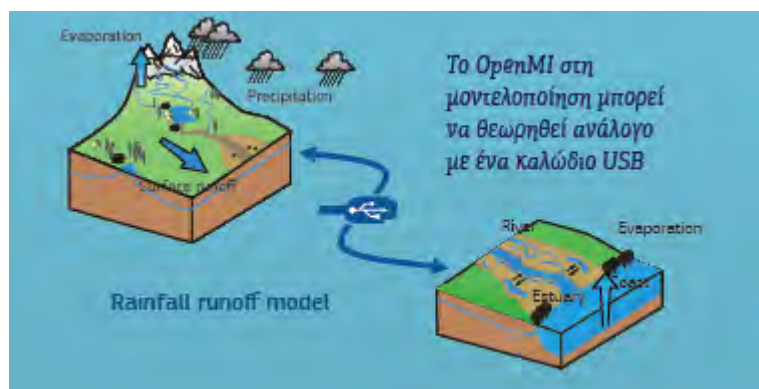
Η ολοκληρωμένη διαχείριση υδατικών πόρων μπορεί να πραγματοποιηθεί με την προσομοίωση των υδρολογικών διεργασιών σε επίπεδο λεκάνης απορροής. Τα επιφανειακά νερά δεν διαχωρίζονται πλέον από τα υπόγεια ύδατα θα πρέπει να αντιμετωπίζονται σαν ενιαία.

Η σύνταξη ενός και μόνο προγράμματος το οποίο θα προσομοίωνε επιτυχώς όλες τις φυσικές διεργασίες που περιλαμβάνει ο παραπάνω ορισμός της ολοκληρωμένης διαχείρισης, αφενός μεν θα οδηγούσε σε ένα νέο πρόγραμμα που δεν θα χρησιμοποιούσε υφιστάμενα μοντέλα και αφετέρου το πρόγραμμα αυτό δεν θα ήταν ευέλικτο στην χρήση εναλλακτικών προγραμμάτων για την προσομοίωση ορισμένων διεργασιών.

Στην πραγματικότητα όμως, λόγω του μεγάλου πλήθους και της πολυπλοκότητας των φυσικών διεργασιών, η δημιουργία ενός και μόνο προγράμματος είναι ανέφικτη. Επιπλέον, ένα τέτοιο πρόγραμμα θα ήταν δύσκολο να συντηρηθεί αλλά και να χρησιμοποιηθεί, εφόσον θα απαιτούνταν περισσότερος χρόνος συγκριτικά με τα συνήθη προγράμματα, λόγω της δυσκολίας επέμβασης στον κώδικά του.

Εξάλλου, υπάρχουν και χρησιμοποιούνται αρκετά αξιόπιστα προγράμματα προσομοίωσης τα οποία μπορεί να μην καλύπτουν όλο το φάσμα των φυσικών διεργασιών αλλά το καθένα από αυτά περιγράφει μία ή κάποιες από αυτές. Συνεπώς, αν μία διεργασία δεν προσομοιώνεται επιτυχώς ή αγνοείται από ένα πρόγραμμα, μπορεί να προσομοιώνεται επιτυχώς από ένα άλλο.

Άρα, ο μοναδικός τρόπος για την προσομοίωση του υδατικού ισοζυγίου σε επίπεδο λεκάνης απορροής (Σχήμα 6.1) , λαμβάνοντας υπόψη τόσο τα υπόγεια όσο και τα επιφανειακά ύδατα, είναι η διασύνδεση υφιστάμενων μοντέλων. Με την προσομοίωση αυτή είναι εφικτή η σύνδεση μοντελων που περιγράφουν διαφορετικές διεργασίες, επομένως και η προσομοίωση σύνθετων συστημάτων.



**Σχήμα 6.1:** Προσομοίωση υδατικού ισοζυγίου λεκάνης απορροής.

### 6.3 Αρχιτεκτονική του OpenMI

Τα προβλήματα που αντιμετωπίστηκαν μέχρι τη δημοσίευση της πρώτης πλατφορμας OpenMI ήταν πάρα πολλά και ορισμένα από αυτά φαινότουσαν ανυπέρβλητα. Μερικά από τα σημαντικότερα προβλήματα που αντιμετωπιστήκαν αναλύονται στη συνέχεια.

Τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται σήμερα έχουν γραφτεί σε πολλές διαφορετικές γλώσσες προγραμματισμού. Υπάρχουν επίσης μερικά μοντέλα που έχουν γραφτεί σε περισσότερες από μια γλώσσες προγραμματισμού. Η μετάφραση όμως των υπολογιστικών πυρήνων σε μία νεότερη γλώσσα, ναι μεν θα διευκόλυνε τους χρήστες αλλά θα είχε αρκετά μειονεκτήματα, όπως η ασυμβατότητα πολλών εντολών με τη νεότερη γλώσσα καθώς επίσης θα ήταν δύσκολο να εντοπιστούν λάθη κατά τη διάρκεια της μετάφρασης, κάτι που θα απαιτούσε πολλές ώρες χρήσης του προγράμματος.

Ένα άλλο σύνηθες πρόβλημα είναι η μετατροπή των μονάδων. Τις περισσότερες φορές τα μοντέλα χρησιμοποιούν το αγγλικό σύστημα μονάδων ενώ τα δεδομένα του χρήστη είναι στο μετρικό (SI). Συνεπώς, ο χρήστης καλείται να μετατρέψει καταρχήν τα δεδομένα του από το μετρικό στο αγγλικό σύστημα, να εφαρμόσει το μοντέλο και στη συνέχεια να μετατρέψει τα αποτελέσματα από το αγγλικό σύστημα στο μετρικό. Η διαδικασία αυτή φαίνεται απλή, ωστόσο γίνεται ιδιαίτερα πολύπλοκη όταν τα δεδομένα δίνονται υπό την μορφή διαγραμμάτων.

Πολύ συνηθισμένη είναι η συμβατότητα χωρικής πληροφορίας, που γίνεται ιδιαίτερα έντονη όταν για παράδειγμα συνεργάζεται ένα μονοδιάστατο μοντέλο με ένα δισδιάστατο ή τρισδιάστατο. Τα δεδομένα διαφοροποιούνται όσον αφορά τις διαστάσεις του χώρου απεικόνισης τους. Υπάρχουν δεδομένα χωρίς χωρική πληροφορία, δεδομένα που αναφέρονται σε μονοδιάστατους, δισδιάστατους ή τρισδιάστατους χώρους. Τέλος μπορεί τα χωρικά ισοδιαστήματα να διαφέρουν από δεδομένα, όπως για παράδειγμα σε δύο δισδιάστατα πλέγματα διαφορετικών διαστάσεων.

Σε πολλές περιπτώσεις η χρονική ασυμβατότητα εμποδίζει την άμεση ανταλλαγή πληροφοριών. Ένα μοντέλο βροχής απορροής που χρησιμοποιεί ημερήσιο βήμα υπολογισμών δεν μπορεί να επικοινωνήσει άμεσα με ένα μοντέλο υπολογισμού της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής που υπολογίζει το μέγεθος αυτό κάθε πρώτο λεπτό της ώρας. Συνεπώς για να γίνει εφικτή η ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ μοντέλων που χρησιμοποιούν διαφορετικά χρονικά βήματα θα πρέπει να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της χρονικής συμβατότητας μεταξύ τους.

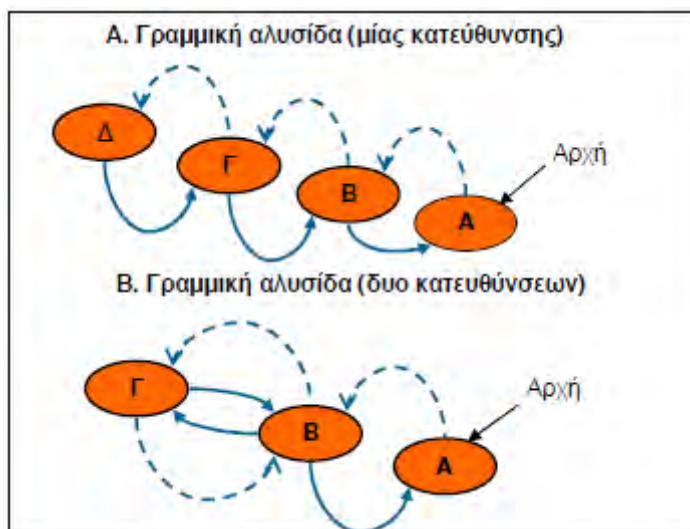
Όταν εφαρμόζεται ένα μοντέλο, οι τιμές των εσωτερικών μεταβλητών του σε μια χρονική στιγμή υπολογίζονται με βάση τις αντίστοιχες τιμές τους την προηγούμενη χρονική στιγμή και τις εξωτερικές συνθήκες. Μόλις υπολογιστούν, οι τιμές που είχαν οι μεταβλητές την προηγούμενη χρονική στιγμή αντικαθίστανται με τις νέες τιμές που υπολογίστηκαν. Η μέθοδος αυτή επιταχύνει την εκτέλεση των προγραμμάτων και επιτρέπει τη διενέργεια εύθετων υπολογισμών, καθώς οι απαιτήσεις σε μνήμη ελαχιστοποιούνται. Σε πιο σύνθετα προβλήματα, ενδέχεται να διατηρούνται στη μνήμη του προγράμματος οι τιμές ενός ή περισσότερων προηγούμενων βημάτων, ιδιαίτερα αν οι φυσικές διεργασίες βασίζονται στη «μνήμη» του συστήματος.

Όταν περισσότερα του ενός μοντέλα εφαρμόζονται στο πλαίσιο της πλατφόρμας OpenMI θα πρέπει να μπορούν να παράσχουν σε άλλα μοντέλα τις τιμές των μεταβλητών που ζητούνται την τρέχουσα χρονική στιγμή ή προηγούμενων

χρονικών στιγμών ανά πάσα στιγμή. Αν δε τα χρονικά βήματα δεν ταυτίζονται, ενδέχεται η χρονική στιγμή που ζητείται να βρίσκεται ενδιάμεσα των χρονικών στιγμών υπολογισμού του μοντέλου οπότε στην περίπτωση αυτή απαιτείται κάποιου είδους παρεμβολή. Τέλος υπάρχει περίπτωση να ζητούνται οι τιμές των μεταβλητών σε μελλοντικές χρονικές στιγμές.

Για αυτό το λόγο, το OpenMI χρησιμοποιεί ένα είδος αποθηκευτικού χώρου (buffer), στον οποίο αποθηκεύονται οι τιμές των μεταβλητών από όλα τα προγράμματα που εφαρμόζονται στην πλατφόρμα. Εκεί το OpenMI μπορεί να υπολογίσει και ενδιάμεσες τιμές των μεταβλητών που δεν είχαν υπολογιστεί με γραμμική ή με εκθετική παρεμβολή στην απλούστερη των περιπτώσεων. Με τον αποθηκευτικό χώρο, η πλατφόρμα αποκτά ένα είδος μνήμης που της επιτρέπει να τη διευκόλυνση της ανταλλαγής δεδομένων μεταξύ διαφορετικών προγραμμάτων.

Επιπλέον, η φορά ανταλλαγής των δεδομένων μπορεί να ακολουθεί τη μορφή γραμμικής αλυσίδας μίας ή δυο κατευθύνσεων (Σχήμα 6.2), οπότε η σύνδεση των μοντέλων μεταξύ τους θα πρέπει να είναι κατά το δυνατόν, ευέλικτη και παραμετροποιήσιμη από τον τελικό χρήστη.



**Σχήμα 6.2** Συνήθειες διατάξεις σύνδεσης μοντέλων

Στην πρώτη διάταξη μίας κατεύθυνσης, το μοντέλο Α ζητάει ένα δεδομένο από το Β. Το Β για να κάνει τους υπολογισμούς και να επιστρέψει το δεδομένο που του ζητήθηκε πίσω στο μοντέλο Α, ζητάει ένα δεδομένο από ένα τρίτο πρόγραμμα Γ. Το πρόγραμμα Γ με τη σειρά του ζητάει στοιχεία από το Δ. Το Δ εκτελεί τους υπολογισμούς και επιστρέφει την τιμή που του ζητήθηκε από το μοντέλο Γ στο τελευταίο. Ομοίως το Γ επιστρέφει την τιμή που του ζητήθηκε από το μοντέλο Β και

τέλος το Β επιστρέφει την τιμή στο μοντέλο από το οποίο άρχισε η διαδικασία ανταλλαγής, το Α.

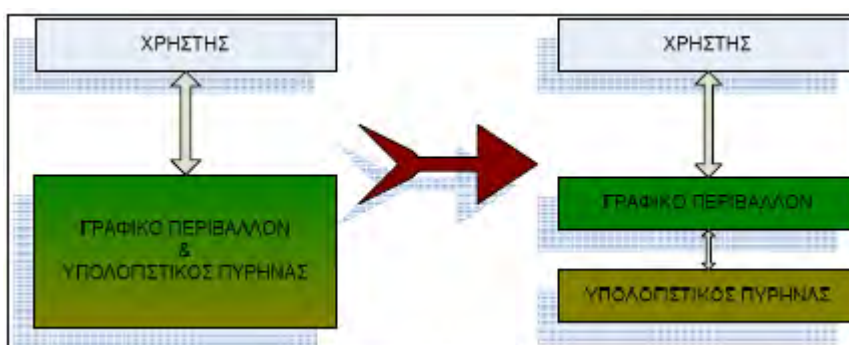
Στη δεύτερη διάταξη δύο κατευθύνσεων, το μοντέλο Α ζητάει ένα δεδομένο από το μοντέλο Β. Το μοντέλο Β ζητάει με τη σειρά του ένα δεδομένο από το Γ για να υπολογίσει το δεδομένο που του ζητήθηκε από το Α. Αρχίζει μια σειρά ανταλλαγών μεταξύ των μοντέλων Β και Γ έως ότου υπολογιστεί η τιμή που ζήτησε το Β από το Γ. Τέλος το μοντέλο Β επιστρέφει την τιμή που ζητήθηκε αρχικά από το Α. Η διάταξη αυτή περιγράφηκε στην απλούστερη μορφή της χωρίς να υπάρχει περιορισμός στον αριθμό των μοντέλων.

#### 6.4 Διαδικασία τροποποίησης των μοντέλων.

Για να αποκτήσουν τα μοντέλα συμβατότητα με την πλατφόρμα OpenMI πρέπει να υπάρξουν επεμβάσεις στον πηγαίο κώδικα των μοντέλων και γι αυτό το λόγο απαιτείται η πρόσβαση σε αυτόν [Goodall et al., 2008] με τη χρήση ενσωματωμένων εργαλείων στην πλατφόρμα και ταυτόχρονα με την τήρηση γενικών κανόνων και προαιρετικών μεν αλλά σημαντικών οδηγιών.

##### 6.4.1 Διαχωρισμός γραφικού περιβάλλοντος και υπολογισμών

Στην περίπτωση που ο υπολογιστικός πυρήνας του μοντέλου και το γραφικό του περιβάλλον έχουν υλοποιηθεί μαζί, απαιτείται ο διαχωρισμός τους (Σχήμα 6.3)



Σχήμα 6.3 Διαχωρισμός γραφικού περιβάλλοντος και υπολογισμών.

Σκοπός του διαχωρισμού είναι η απομόνωση του υπολογιστικού πυρήνα και η αυτόνομη λειτουργία του με τέτοιο τρόπο ώστε αν τροφοδοτηθεί με δεδομένα από μια άλλη πηγή να επιστρέψει αποτελέσματα στην καλούσα πηγή ή σε κάποιο άλλο πρόγραμμα. Η αλληλεπίδραση αυτή με άλλο ή με άλλα προγράμματα θα πρέπει να

μην είναι ορατή στο χρήστη, να μην πραγματοποιείται μέσω ενός γραφικού περιβάλλοντος.

Επομένως μετά τον διαχωρισμό, το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε μεμονωμένα, δηλαδή με αλληλεπίδραση του χρήστη με το γραφικό περιβάλλον και με αυτόματη διασύνδεση του περιβάλλοντος αυτού με το τμήμα των υπολογισμών, είτε ως τμήμα της πλατφόρμας OpenMI, η οποία θα αναλάβει την τροφοδοσία του υπολογιστικού πυρήνα με δεδομένα που θα προέρχονται από το χρήστη ή από άλλα μοντέλα και την συγκομιδή των αποτελεσμάτων που θα παράγονται από το πρόγραμμα εκ μέρους των καλούντων μοντέλων.

Στις περισσότερες των περιπτώσεων, τα διάφορα προγράμματα μεταγλωττίζονται από πηγαίο κώδικα σε εκτελέσιμα αρχεία. Τα εκτελέσιμα αρχεία είναι εξ ορισμού αυτόνομα και δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν από άλλα προγράμματα όπως για παράδειγμα από την πλατφόρμα OpenMI. Επομένως είναι αναγκαίο οι υπολογιστικοί πυρήνες να μεταγλωτιστούν σε αρχεία δυναμικών βιβλιοθηκών (dynamic link libraries, DLL).

Η διαδικασία διαχωρισμού είναι μια αρκετά πολύπλοκη διαδικασία. Αρχικά απομακρύνεται ο υπολογιστικός πυρήνας από το πρόγραμμα ώστε να μπορεί να μεταγλωτιστεί σε δυναμική βιβλιοθήκη. Στην συνέχεια προστίθεται στον υπολογιστικό πυρήνα μια λειτουργία που θα μπορεί να χρησιμοποιείται ο πυρήνας για μια πλήρη προσομοίωση και τέλος καλείται η λειτουργία αυτή από το γραφικό περιβάλλον και ελέγχονται τα αποτελέσματα ως προς την ορθότητά τους.

#### **6.4.2 Τροποποίηση του υπολογιστικού πυρήνα.**

Κάθε φορά που χρησιμοποιείται ο υπολογιστικός πυρήνας ενός μοντέλου μέσα από την πλατφόρμα OpenMI, απαιτείται η αρχικοποίηση του μοντέλου, η εκτέλεση ενός ή περισσότερων χρονικά μεταβαλλόμενων υπολογισμών και ο τερματισμός του με απελευθέρωση της καταλαμβανόμενης στον Η\Υ μνήμης. Μια λογική προσέγγιση για την επίτευξη των παραπάνω είναι να τροποποιηθεί ο υπολογιστικός πυρήνας την περίπτωση που δεν υποστηρίζει τα προαναφερόμενα, προσθέτοντας τέσσερις τουλάχιστον λειτουργίες.

Με την πρώτη λειτουργία θα πρέπει το πρόγραμμα να διαβάζει τα δεδομένα και να αρχικοποιεί τους πίνακες και τις μεταβλητές που χρησιμοποιούνται κατά τους υπολογισμούς.



Με τη δεύτερη λειτουργία θα πρέπει να εκτελούνται οι υπολογισμοί για ένα μόνο χρονικό βήμα. Η λειτουργία αυτή μπορεί να επαναλαμβάνεται πολλές φορές, έως ότου ολοκληρωθούν οι υπολογισμοί σε όλο το χρονικό διάστημα που αφορά την επίλυση. Είναι δε η μόνη λειτουργία που μπορεί να χρησιμοποιηθεί περισσότερες της μίας φορές κατά τη διάρκεια κλήσης του μοντέλου.

Χρησιμοποιώντας την τρίτη λειτουργία, το πρόγραμμα θα κλείνει όποια αρχεία δεδομένων έχει ανοίξει και θα παράγει ένα αρχείο αποτελεμάτων. Τέλος με την τέταρτη λειτουργία, το μοντέλο θα απελευθερώνει τη μνήμη του Η/Υ που έχει καταλάβει με τους πίνακες και τις μεταβλητές που χρησιμοποιεί και θα διαγράφει τον εαυτό του από τη μνήμη του συστήματος.

Ο υπολογιστικός πυρήνας επιδέχεται περαιτέρω τροποποιήσεων, όμως οι προαναφερόμενες αλλαγές είναι οι βασικές αλλαγές που θα πρέπει σε κάθε περίπτωση να γίνουν ώστε το μοντέλο να αποκτήσει συμβατότητα με την πλατφόρμα OpenMI.

### 6.4.3 Καθορισμός αντικειμένων ανταλλαγής

Για την επίτευξη της μετατροπής ενός μοντέλου είναι ο καθορισμός των αντικειμένων ανταλλαγής, δηλαδή του είδους της πληροφορίας που το μοντέλο μπορεί να δεχτεί από άλλες πηγές ή να δώσει σε άλλα μοντέλα. Κάθε αντικείμενο ανταλλαγής, δηλαδή κάθε φυσικό μέγεθος που αναπαριστάνεται εσωτερικά στο μοντέλο με μια μεταβλητή, θα πρέπει να συνοδεύεται από ορισμένες απαραίτητες πληροφορίες (πίνακας 6.1)

**Πίνακας 6.1.:** Πληροφορίες αντικειμένων ανταλλαγής (Gijssbers et al.,2007)

Ιδιότητα	Περιγραφή
Ονομασία	Μία αλφαριθμητική ονομασία του αντικειμένου, π.χ. παροχή
Διαστάσεις	Σημείο, πολυγωνική, πολύγωνο ή χωρίς διαστάσεις
Κωδικός	Μία μοναδική ονομασία του αντικειμένου, π.χ. Q
Μονάδες	Οι μονάδες μέτρησης της μεταβλητής, π.χ. m <sup>3</sup> /s
Θέση	Προσδιορίζεται αν μπορεί να εισαχθεί, εξαχθεί ή και τα δυο

Ένα μοντέλο μπορεί να περιέχει μεταβλητές εισόδου ή μεταβλητές εξόδου ή μεταβλητές και των δύο κατηγοριών. Επίσης μπορεί να παρέχει πρόσβαση σε εσωτερικά υπολογιζόμενες μεταβλητές, δίνοντας έτσι στο χρήστη τη δυνατότητα να παρακάμπτει ολόκληρα υπολογιστικά του τμήματα.

Για παράδειγμα, ένα μοντέλο υδατικού ισοζυγίου μπορεί να έχει ως μεταβλητές εισόδου την κατακρήμνιση και τη θερμοκρασία μεταξύ άλλως και ως μεταβλητή εξόδου την απορροή. Ωστόσο μπορεί να δώσει στο χρήστη πρόσβαση στην ενδιάμεση μεταβλητή της εξάτμισης, η οποία υπολογίζεται από το πρόγραμμα με βάση κάποιον τύπο και τις μετεωρολογικές μεταβλητές. Ο χρήστης μπορεί να παρέχει στο πρόγραμμα τις τιμές της εξάτμισης, όπως αυτές έχουν υπολογιστεί με τη βοήθεια ενός τρίτου μοντέλου, παρακάμπτοντας τον ενσωματωμένο τρόπο υπολογισμού τους.

#### **6.4.4 Δημιουργία κελύφους επικοινωνίας**

Το κέλυφος επικοινωνίας είναι το πρωτοποριακό τμήμα της πλατφορμας με τη βοήθεια του οποίου γεφυρώνεται το τεχνολογικό χάσμα μεταξύ του υφιστάμενου μοντέλου που έχει γραφεί σε παλαιότερη γλώσσα προγραμματισμού (Basic, Fortran, C, κλπ.) και της πλατφόρμας OpenMI που έχει γραφεί σε νεότερη γλώσσα προγραμματισμού .NET. Το βήμα αυτό είναι απαραίτητο μόνο για μοντέλα που δεν είναι γραμμένα στη νεότερη γλώσσα προγραμματισμού αλλά σε κάποια παλιότερη.

Το κέλυφος επικοινωνίας είναι μια κλάση γραμμένη σε C# -μια εκ των ενσωματωμένων γλωσσών προγραμματισμού .NET- η οποία από τη μία συνδέει την πλατφόρμα OpenMI και από την άλλη τον υπολογιστικό πυρήνα του μοντέλου. Ο τελικός χρήστης δεν αντιλαμβάνεται την ύπαρξη του κελύφους επικοινωνίας, καθώς αυτό χρησιμοποιείται αυτόματα από την πλατφόρμα κάθε φορά που είναι αναγκαία η επικοινωνία με τον υπολογιστικό πυρήνα του μοντέλου.

Τα πλεονεκτήματα από τη χρήση κελύφους επικοινωνίας είναι (Gijssbers et al., 2007):

- Δυνατότητα χρήσης μοντέλων που έχουν γραφτεί σε παλαιότερες γλώσσες προγραμματισμού.
- Διαχωρισμός του τμήματος που σχετίζεται με την πλατφόρμα OpenMI από το υπολογιστικό τμήμα. Έτσι κάθε φορά που αναβαθμίζεται η πλατφόρμα, δεν είναι απαραίτητο να αλλάξει ο πηγαίος κώδικας στο υπολογιστικό τμήμα παρά μόνο στο κέλυφος επικοινωνίας.

- Το μοντέλο μπορεί να εφαρμόζεται αυτόνομα χωρίς τη χρήση της πλατφόρμας, όπως ακριβώς συνέβαινε πριν τη μετατροπή του. Φυσικά για την αυτόνομη εφαρμογή του, προϋπόθεση είναι η ύπαρξη ενός γραφικού περιβάλλοντος εργασίας.

Το κέλυφος επικοινωνίας υπάρχει ήδη σε μια βασική του μορφή στην πλατφόρμα OpenMI. Αυτό κατέστη δυνατό γιατί τα υδραυλικά και τα υδρολογικά μοντέλα παρουσιάζουν πολλές ομοιότητες (Moore et al., 2005). Σε κάθε περίπτωση όμως, το ενσωματωμένο κέλυφος επικοινωνίας θα πρέπει να τροποποιηθεί ώστε να αντικατοπτρίζει τις απαιτήσεις του μοντέλου.

#### **6.4.5 Εισαγωγή του μοντέλου στην πλατφόρμα.**

Η εισαγωγή του μοντέλου στην πλατφόρμα και η αντίληψη της εισαγωγής από την πλατφόρμα αποτελούν το τελευταίο στάδιο για την απόκτηση συμβατότητας με το OpenMI.

Λόγω του σχεδιασμού της, η πλατφόρμα περιέχει πληροφορίες για όλα τα μοντέλα που αφενός με έχουν εγκατασταθεί επιτυχώς στον υπολογιστή του χρήστη και αφετέρου είναι συμβατά με αυτή και μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις προσομοιώσεις. Μόλις ολοκληρωθούν οι απαραίτητες προαναφερόμενες διαδικασίες τροποποίησης, θα πρέπει να εισαχθεί το μοντέλο στην πλατφόρμα, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί από αυτή σε μελλοντικές προσομοιώσεις.

Η ενταξη του μοντέλου γίνεται με τη χρήση ενός XML αρχείου που έχει την κατάληξη .omi και βρίσκεται στον ίδιο φάκελο με τον υπολογιστικό πυρήνα του μοντέλου. Ο υπολογιστικός πυρήνας είναι μια δυναμική βιβλιοθήκη (.dll) που ονομάζεται model.dll και βρίσκεται στον ίδιο φάκελο με το εν λόγω αρχείο ένταξης.

## **7. ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΣΤΟΝ ΥΠΟΓΕΙΟ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΤΗΣ ΚΑΡΛΑΣ.**

### **7.1 Προσομοίωση επιφανειακής απορροής.**

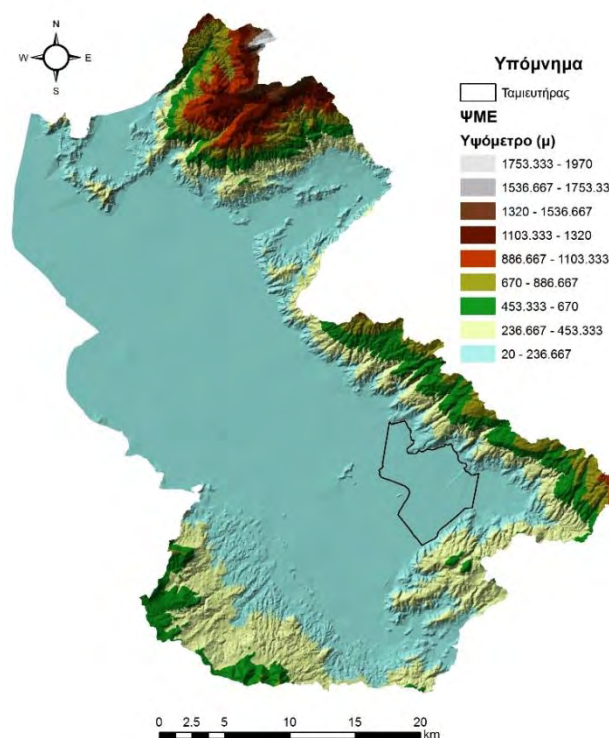
Για την προσομοίωση του επιφανειακού υδροφορέα της λίμνης Κάρλας χρησιμοποιήθηκε το μηνιαίο υδρολογικό μοντέλο UTHBAL (Loukas et. al., 2007) για την ημικατανεμημένη μηνιαία προσομοίωση του υδρολογικού ισοζυγίου και την εκτίμηση της κατείσδυσης στον υπόγειο υδροφορέα της περιοχής μελέτης. Το μοντέλο χρησιμοποιεί 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 εφαρμόστηκε στη λεκάνη απορροής της λίμνης Κάρλας της Θεσσαλίας, έκτασης περίπου 1220 km<sup>2</sup>, ανάντη του σημείου εισόδου του νέου ταμιευτήρα, έκτασης περίπου 38 km<sup>2</sup>. Η υδρολογική λεκάνη χωρίστηκε σε δύο ομοιογενείς υψομετρικές ζώνες με βάση το ψηφιακό μοντέλο εδάφους της περιοχής μελέτης. Η περίοδος προσομοίωσης για την εκτίμηση του υδρολογικού ισοζυγίου και της κατείσδυσης στον υπόγειο υδροφορέα έγινε σε μηνιαία βάση για τη χρονική περίοδο Οκτώβριος 1987 έως Σεπτέμβριος 1997. Η επιλογή αυτής της χρονικής περιόδου έγινε γιατί οι συνέπειες της υπεράντλησης του υδροφορέα είναι εμφανής από τα μέσα της δεκαετίας του '80 και έπειτα.

Σκοπός του σταδίου αυτού της μελέτης είναι η εκτίμηση της μηνιαίας απορροής υδρολογικής λεκάνης χρησιμοποιώντας υδρομετεωρολογικά και γεωμορφολογικά δεδομένα καθώς και ο επιμερισμός της απορροής σε υψομετρικές ζώνες. Για το σκοπό αυτό αναπτύχθηκε ένα ημικατανεμημένο υδρολογικό μοντέλο, το οποίο προσομοιώνει τις χωρικά μεταβαλλόμενες υδρολογικές διεργασίες χρησιμοποιώντας μικρό αριθμό παραμέτρων, οι οποίες εκτιμώνται με ευκολία από τη βαθμονόμηση της ημικατανεμημένης μορφής του μοντέλου.

#### **7.1.1 Εφαρμογή του μοντέλου στην Κάρλα**

Το UTHBAL model εφαρμόστηκε ημι-κατανεμημένα στην υδρολογική λεκάνη της Κάρλας. Τα δεδομένα που ήταν διαθέσιμα για την υλοποίηση της εφαρμογής διακρίνονται σε γεωγραφικά και υδρομετεωρολογικά. Τα γεωγραφικά δεδομένα ήταν

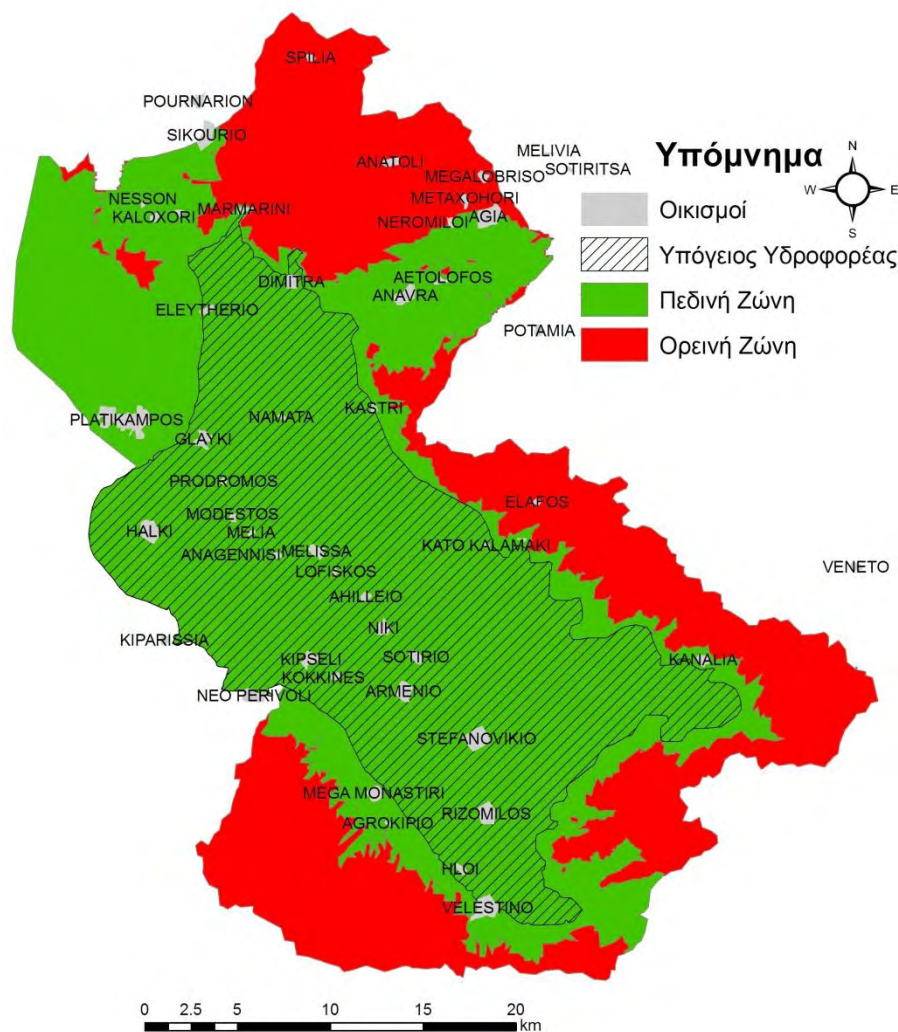
το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (Digital Terrain Model, DTM) (Σχήμα 7.1), το οποίο δημιουργήθηκε από την ψηφιοποίηση των ισοϋψών καμπυλών από τοπογραφικούς χάρτες κλίμακας 1:50000, ο ψηφιακός χάρτης των γεωλογικών σχηματισμών που προήλθε από ψηφιοποίηση γεωλογικών χαρτών κλίμακας 1:50000, το υδρογραφικό δίκτυο 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 1987 έως Σεπτέμβριος 1997 (10 υδρολογικά έτη) και 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. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι υδρομετρικές παρατηρήσεις είναι μη συνεχόμενες με μεγάλα κενά ανάμεσα στις παρατηρήσεις.



**Σχήμα 7.1.** Ψηφιακό μοντέλο εδάφους (ΨΜΕ) λεκάνης απορροής της λίμνης Κάρλας.

### Επιμερισμός λεκάνης σε υψομετρικές ζώνες

Όσον αφορά την γεωμορφολογία της υδρολογικής λεκάνης της Κάρλας συναντάμε μέσο υψόμετρο στα 230μ. ελάχιστο στα 40 και μέγιστο στα 1970 μ. Η λεκάνη χωρίστηκε σε υψομετρικές ζώνες λαμβάνοντας 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 7.2 δείχνει τις δύο υψομετρικές ζώνες (υπολεκάνες) της λεκάνης απορροής της Κάρλας που είναι η ορεινή ζώνη (με υψόμετρο  $\geq 200$  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.



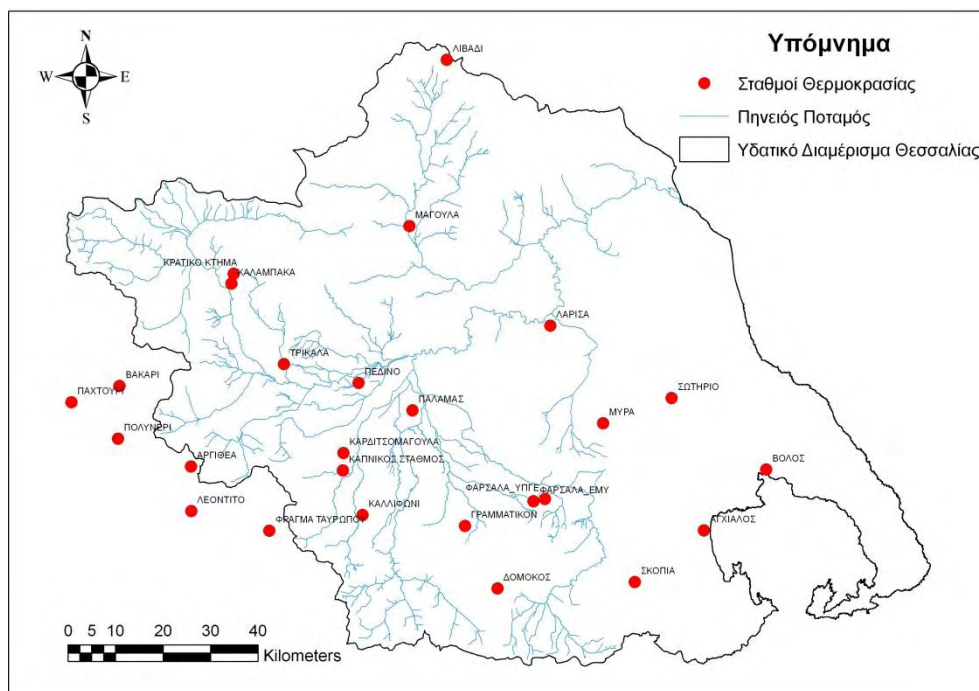
**Σχήμα 7.2.** Ψηφιακό μοντέλο εδάφους (ΨΜΕ) λεκάνης απορροής της λίμνης Κάρλας

### Δεδομένα εισόδου στις ζώνες μελέτης

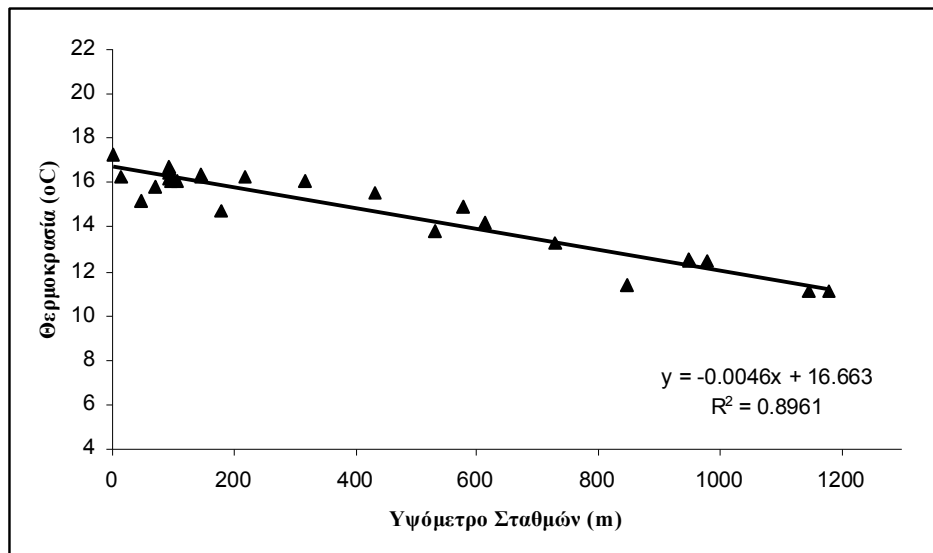
Για τη δημιουργία δεδομένων εισόδου στις δύο υψομετρικές ζώνες χρησιμοποιήθηκαν τυπικές μεθοδολογίες για την μετατροπή της σημειακής πληροφορίας σε εμφανειακή.

- **Θερμοκρασία**

Μέσω της μεθόδου της θερμοβαθμίδας μετρατρέπεται η σημειακή τιμή της θερμοκρασίας, η οποία λαμβάνεται από τους μετεωρολογικούς βαθμούς που φαίνονται στο σχήμα 7.3, σε επιφανειακή, στο μέσο υψόμετρο των δύο ζωνών. Η μέθοδος θερμοβαθμίδας βασίζεται στην παρατήρηση ότι η θερμοκρασία μειώνεται με την αύξηση του υψόμετρου και χρησιμοποιεί την ετήσια θερμοβαθμίδα που περιγράφει την μείωση της ετήσιας θερμοκρασίας ανά 100 μέτρα αύξηση του υψόμετρου. Ο υπολογισμός της θερμοβαθμίδας υπολογίστηκε από όλους τους σταθμούς θερμοκρασίας της ευρύτερης περιοχής της Θεσσαλίας (Σχήμα 7.4).



**Σχήμα 7.3.** Σταθμοί μέτρησης μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας στην ευρύτερη περιοχή μελέτης.



**Σχήμα 7.4.** Γραμμική σχέση της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας με το υψόμετρο των μετεωρολογικών σταθμών για τις δύο υψομετρικές ζώνες.

- Βροχόπτωση

Στο σχήμα 7.4 φαίνονται οι βροχομετρικοί σταθμοί υετόπτωσης οι οποίοι τοποθετήθηκαν στην ευρύτερη περιοχή της λεκάνης και απο αυτούς αντληθήκαν πληροφορίες για τον υπολογισμό της επιφανειακής μηνιαίας βροχόπτωσης με τη μέθοδο Thiessen καθώς και της βροχοβαθμίδας για την αναγωγή των τιμών στο μέσο υψόμετρο των δύο ζωνών. Με τη μέθοδο των πολυγώνων Thiessen υπολογίστηκαν οι συντελεστές στάθμισης για κάθε σταθμό που αντιστοιχούν στα εμβαδά των πολυγώνων επηρεασμού των σταθμών κάθε υπολεκάνης όπως προκύπτει με την χάραξη των μεσοκαθέτων επί των αποστάσεων των σταθμών μεταξύ τους (Σχήμα 7.5). Η μέση επιφανειακή βροχόπτωση της υπολεκάνης (υψομετρικής ζώνης) προκύπτει ως το άθροισμα των επιμέρους μηνιαίων υψών βροχόπτωσης των σταθμών πολλαπλασιαζόμενες επί τους αντίστοιχους συντελεστές στάθμισης σύμφωνα με την εξίσωση:

$$P_0 = \sum_{n=1}^i \left( \frac{A_i \times P_i}{A} \right) \quad (7.1)$$

όπου  $P_i$  το μηνιαίο ύψος βροχόπτωσης των σταθμών που επηρεάζουν την λεκάνη και  $A_i/A$  το ποσοστό επηρεασμού του κάθε σταθμού. Η τροποποιημένη μέθοδος Thiessen ολοκληρώνεται με την αναγωγή στο μέσο υψόμετρο της κάθε μία υψομετρικής ζώνης με τη χρήση της βροχοβαθμίδας, η οποία βασίζεται στην παρατήρηση ότι το ύψος βροχής αυξάνει με την αύξηση του υψομέτρου και

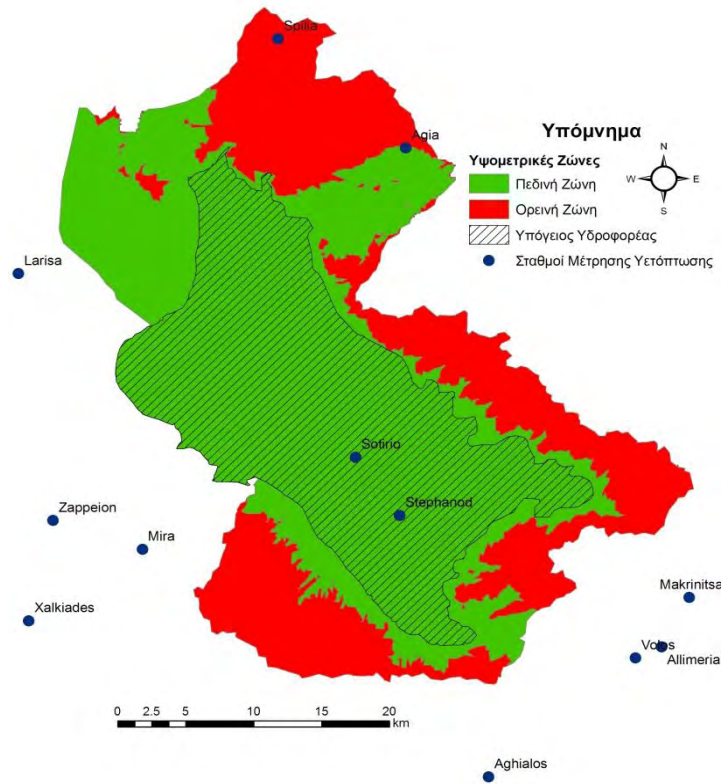


χρησιμοποιεί τη βροχοβαθμίδα που είναι ο όρος που περιγράφει την αύξηση του ετήσιου ύψους ανά 100 μέτρα αύξηση του υψομέτρου (Σχήμα 7.5). Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί μια απλή γραμμική σχέση που συσχετίζει τα υψόμετρα των σταθμών με το μέσο ετήσιο ύψος βροχής κάθε σταθμού και εφόσον υπάρχει ικανοποιητική συσχέτιση (συντελεστής συσχέτισης  $r > 0.70$ ), η σχέση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση του ύψους βροχής σε οποιοδήποτε υψόμετρο (Παπαμιχαήλ, 2001). Για την εκτίμηση της επιφανειακής βροχόπτωσης των δύο υψομετρικών ζωνών της χρησιμοποιούνται τα επιφανειακά δεδομένα που προέκυψαν από τη μέθοδο Thiessen. Η εκτίμηση των μηνιαίων υψών βροχόπτωσης που αντιστοιχούν στα μέσα υψόμετρα των δύο ζωνών, για κάθε έτος, γίνεται με τις σχέσεις:

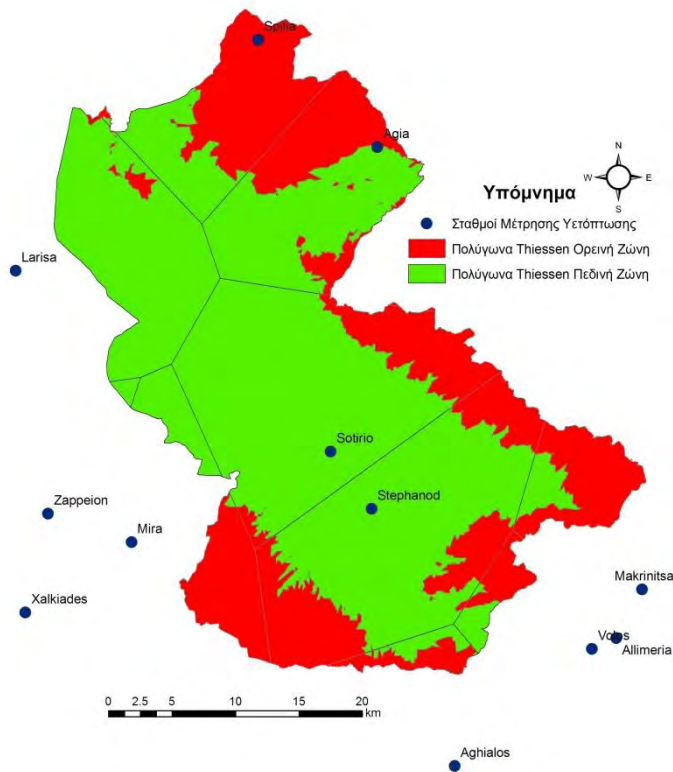
$$P_k = P_{T(k)} - \frac{(H_{thies} - H_{mz}) * 52.04}{100}, \text{ και} \quad (7.2)$$

$$P_i^k = \frac{P_k * P_{T(i)}^k}{P_{T(k)}} \quad (7.3)$$

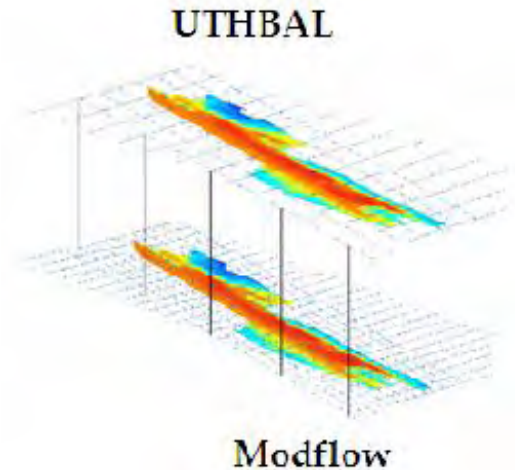
όπου,  $P_{T(k)}$  το ετήσιο ύψος βροχόπτωσης κατά Thiessen, κατά το έτος  $k$  σε mm,  $P_k$  το ετήσιο ύψος της μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης στην υψομετρική ζώνη, κατά το έτος  $k$  σε mm,  $P_i^k$  το μηνιαίο ύψος επιφανειακής βροχόπτωσης, κατά το μήνα  $i$  και το έτος  $k$ , στη υπό εξέταση υψομετρική ζώνη της Κάρλας σε mm,  $P_{T(i)}^k$  το επιφανειακό μηνιαίο ύψος βροχόπτωσης, κατά το μήνα  $i$  και το έτος  $k$ , της μεθόδου Thiessen σε mm, 52.04 η βροχοβαθμίδα που υπολογίστηκε (Σχήμα 7.7),  $(H_{thies} - H_{mz})$  η διαφορά ανάμεσα στο σταθμισμένο υψόμετρο των σταθμών Thiessen και του μέσου υψομέτρου της υψομετρικής ζώνης της Κάρλας.



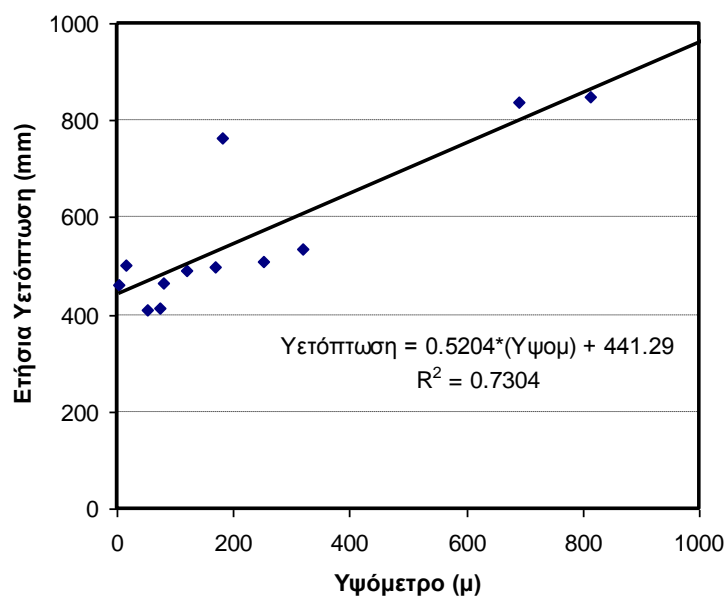
**Σχήμα 7.4** Σταθμοί μέτρησης μηνιαίας υετόπτωσης στην ευρύτερη περιοχή μελέτης.



**Σχήμα 7.5** Πολύγωνα Thiessen στην πεδινή και ορεινή ζώνη της υδρολογικής λεκάνης Κάρλας.



**Σχήμα 7.6** Σύνδεση κατείδυσης από το επιφανειακό μοντέλο υδρολογίας στο μοντέλο προσομοίωσης υπόγειου υδροφορέα.



**Σχήμα 7.7** Γραμμική σχέση της μέσης ετήσιας υετόπτωσης με το υψόμετρο των μετεωρολογικών σταθμών για τις δύο υψομετρικές ζώνες της υδρολογικής λεκάνης της Κάρλας.

Το υδρολογικό μοντέλο UTHBAL εφαρμόστηκε ημι-κατανεμημένα (semi) στην υδρολογική λεκάνη της Κάρλας και εκτιμήθηκε η κατείδυση στον υπόγειο υδροφορέα από την πεδινή υποπεριοχή της λεκάνης της Κάρλας (Σχήμα 7.6). 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.

- Δυνητική Εξατμισοδιαπνοή

Η δυνητική εξατμισοδιαπνοή δίνεται από τον τύπο 7.4. σύμφωνα με τη μέθοδο Thornthwaite χρησιμοποιώντας τα επιφανειακά δεδομένα της θερμοκρασίας των δύο υψομετρικών ζωνών:

$$E_p = 16 \left( \frac{10 T_a}{I} \right)^a \frac{\mu N}{360} \quad (7.4)$$

όπου  $E_p$  η δυνητική εξατμισοδιαπνοή σε mm/μήνα,  $T_a$  η μέση θερμοκρασία του μήνα σε °C,  $\mu$  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:

$$I = \sum_{n=1}^{12} \left( \frac{T_n}{5} \right)^{1.514} \quad (7.5)$$

$$a = 0.000000675I^3 - 0.000077I^2 + 0.01792I + 0.49239 \quad (7.6)$$

όπου,  $T_n$  η κανονική θερμοκρασία κάθε μήνα.

### 7.1.2 Ρύθμιση του υδρολογικού μοντέλου στην λεκάνη απορροής της Κάρλας

Για τη ρύθμιση του μοντέλου απαιτείται να γίνει βαθμονόμηση (calibration), μία συστηματική διαδικασία αξιολόγησης εναλλακτικών συνδυασμών λόγω του ότι οι παράμετροι των εννοιολογικών υδρολογικών μοντέλων δεν είναι μετρήσιμα

μεγέθη αλλά έμμεσα εκτιμώμενα. Η βαθμονόμηση επιτυγχάνεται συγκρίνοντας τις παρατηρούμενες αποκρίσεις με τις προσομοιωμένες και επιλέγοντας τον συνδυασμό εκείνο που επιτυγχάνει την καλύτερη προσαρμογή.

Η βαθμονόμηση των 6 παραμέτρων του μοντέλου πραγματοποιήθηκε στις παρατηρούμενες τιμές απορροής που υπήρχαν στην έξοδο της τέως λίμνης Κάρλας προς τον Παρασητικό 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 προσαρμόστηκαν στις βέλτιστες τιμές τους χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο γενικευμένης ανηγμένης 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:

$$Eff = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - Q_{sim_i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (7.7)$$

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:

$$\%DV = \frac{Vsim - Vobs}{Vobs} \times 100 \quad (7.8)$$

όπου,  $Vobs$  ο παρατηρημένος όγκος απορροής για την περίοδο της προσομοίωσης,  $Vsim$  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). Με τους συντελεστές του μοντέλου βελτιστοποιημένους και με τα δεδομένα εισόδου το μοντέλο εφαρμόστηκε για την προσομοίωση του υδρολογικού ισοζυγίου και τον υπολογισμό της κατείδυσης στον υπόγειο υδροφόρο. Στον Πίνακα 7.1 παρουσιάζονται οι τιμές των βαθμονομημένων παραμέτρων. Στον Πίνακα 7.2 φαίνονται τα αποτελέσματα του ισοζυγίου για τις δύο υψομετρικές ζώνες.

**Πίνακας 7.1:** Τιμές παραμέτρων του υδρολογικού μοντέλου για τη λεκάνη απορροής της Κάρλας

Συντελεστής δυναμικής τήξης χιονιού <b>Cm</b>	Curve Number <b>CN</b>	Συντελεστής κατείδυσης <b>K</b> ( $0 \leq K \leq 1$ )	Συντελεστής πραγματικής εξατμισοδιαπνοής <b>a</b> ( $0 \leq a \leq 1$ )	Συντελεστής ενδιάμεσης απορροής <b>β</b> ( $0 \leq \beta \leq 1$ )	Συντελεστής βασικής απορροής <b>γ</b> ( $0 \leq \gamma \leq 1$ )
6,000	30,00	0,77	0,86	0,003	0,229

**Πίνακας 7.2** Αποτελέσματα μετά την εφαρμογή του ημικατανομημένου υδρολογικού μοντέλου.

<b>Γεωμορφολογικά Χαρακτηριστικά και Υδρολογικό ισοζύγιο</b>	<b>Πεδινή Ζώνη</b>	<b>Ορεινή Ζώνη</b>
Έκταση (km <sup>2</sup> )	411.68	808.2
Μέσο Υψόμετρο (m)	81.5	521.0

Μέση Ετήσια Θερμοκρασία (°C)	15	12.9
Μέση Ετήσια Υετόπτωση (mm)	483.3	741.5
Μέση Ετήσια Δυνητική Εξατμισοδιαπνοή (mm)	832.3	735.8
Μέση Ετήσια Πραγματική Εξατμισοδιαπνοή (mm)	413.4	423.0
Μέση Ετήσια Κατείδυση (mm)	93	239.1
Μέση Ετήσια Απορροή (mm)	59.6	75.0

## 7.2 Υδρολογικό μοντέλο ZOOMQ3D.

Ο υπόγειος υδροφορέας της Κάρλας προσομοιώθηκε από τον κώδικα ZOOMQ3D με ένα κάναβο 12.500 κελιών, με βασική διάσταση 200 m X 200 m.

Αφού εισήχθη στο ZOOMQ3D η εικόνα του υπόγειου υδροφορέα ξεκίνησε η δόμηση του μοντέλου μέσω της εννοιολογικής προσέγγισης.

Για το κατακόρυφο επίπεδο διακρίνονται τρεις τύποι υδροφορέων:

1. Οι αργιλοαμμώδεις λιμναίες αποθέσεις
2. Οι αδρομερείς προσχώσεις
3. Τα κορήματα με τα μάρμαρα

Οι τρεις παραπάνω υδροφόροι ορίζοντες είναι τοποθετημένοι ο ένας επάνω στον άλλον (επάλληλοι ορίζοντες). Η προσομοίωση περιορίστηκε στα δύο πρώτα στρώματα γιατί η υδραυλική επικοινωνία αυτών των δύο υδροφορέων με τον υδροφορέα των μαρμάρων είναι αρκετά μικρή σε σχέση με την μεταξύ τους υδραυλική επικοινωνία και επιπλέον ο υδροφορέας των μαρμάρων δεν συνεισφέρει στις απολήψεις των γεωτρήσεων, για τις αρδευτικές και υδρευτικές ανάγκες.

Αφού επιλέχτηκε η περιοχή μελέτης εισήχθη στο μοντέλο για να ξεκινήσει η δόμηση του μοντέλου.

Αρχικά, όσον αφορά τις οριακές συνθήκες, κατά μήκος του ανατολικού ορίου της περιοχής, λόγω παρουσίας στεγανών σχηματισμών (γνεύσιοι, αμφιβολιτικοί σχιστόλιθοι) εντοπίζονται συνθήκες μηδενικής ροής, συνθήκες Newman.

Κατά μήκος των δυτικών παρυφών της περιοχής προσομοίωσης εντοπίζονται οι συνθήκες Cauchy. Εκφράζουν ροή εξαρτώμενη από το εκάστοτε υδραυλικό φορτίο, χρησιμοποιώντας το πακέτο General Head Boundary. Η ροή αυτή προέρχεται από την πλευρική τροφοδοσία από τη ζώνη ανάπτυξης των πλειοκαινικών λόφων και των κώνων κορημάτων που σχηματίζουν οι παραπόταμοι του Πηνειού.

Όσον αφορά την περίοδο προσομοίωσης, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, είναι από την 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου 1987 έως την 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου 1997. Ως αρχική συνθήκη επιλέχθηκε η 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου 1987. Η επιλογή οφείλεται στο γεγονός ότι ήδη από τα μέσα της δεκαετίας του '80 και έπειτα, οι συνέπειες της υπέραντλησης είναι εμφανής στον υπόγειο υδροφορέα. Με άλλα λόγια η περίοδος του καθεστώτος υπερεκκατάλλευσης του υπόγειου υδροφορέα ξεκινά αμέσως μετά από αυτήν την περίοδο.

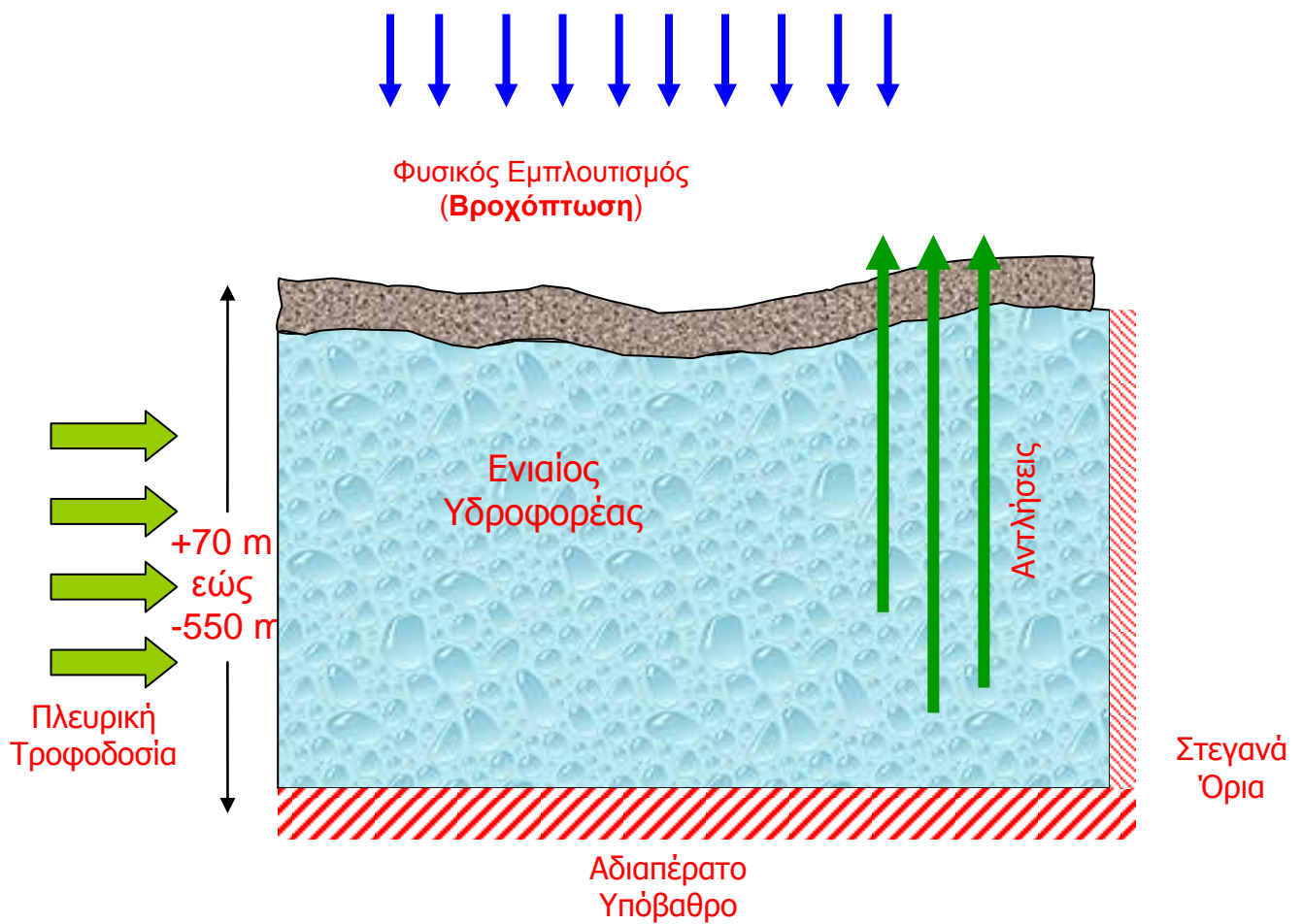
Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις από 27 πηγάδια παρατήρησης. Τα πηγάδια μέτρησαν το βάθος που παρατηρήθηκε ο υπόγειος υδροφορέας και με αφαίρεση από το υψόμετρο της περιοχής προέκυψαν τα αρχικά απόλυτα ύψη, όπως φαίνονται στον Πίνακα 7.3, ενώ οι θέσεις στους φαίνονται στο Σχήμα 7.9.

**Πίνακας 7.3** Πηγάδια παρατήρησης των αρχικών υψών της 1<sup>ης</sup> Ιανουαρίου 1987.

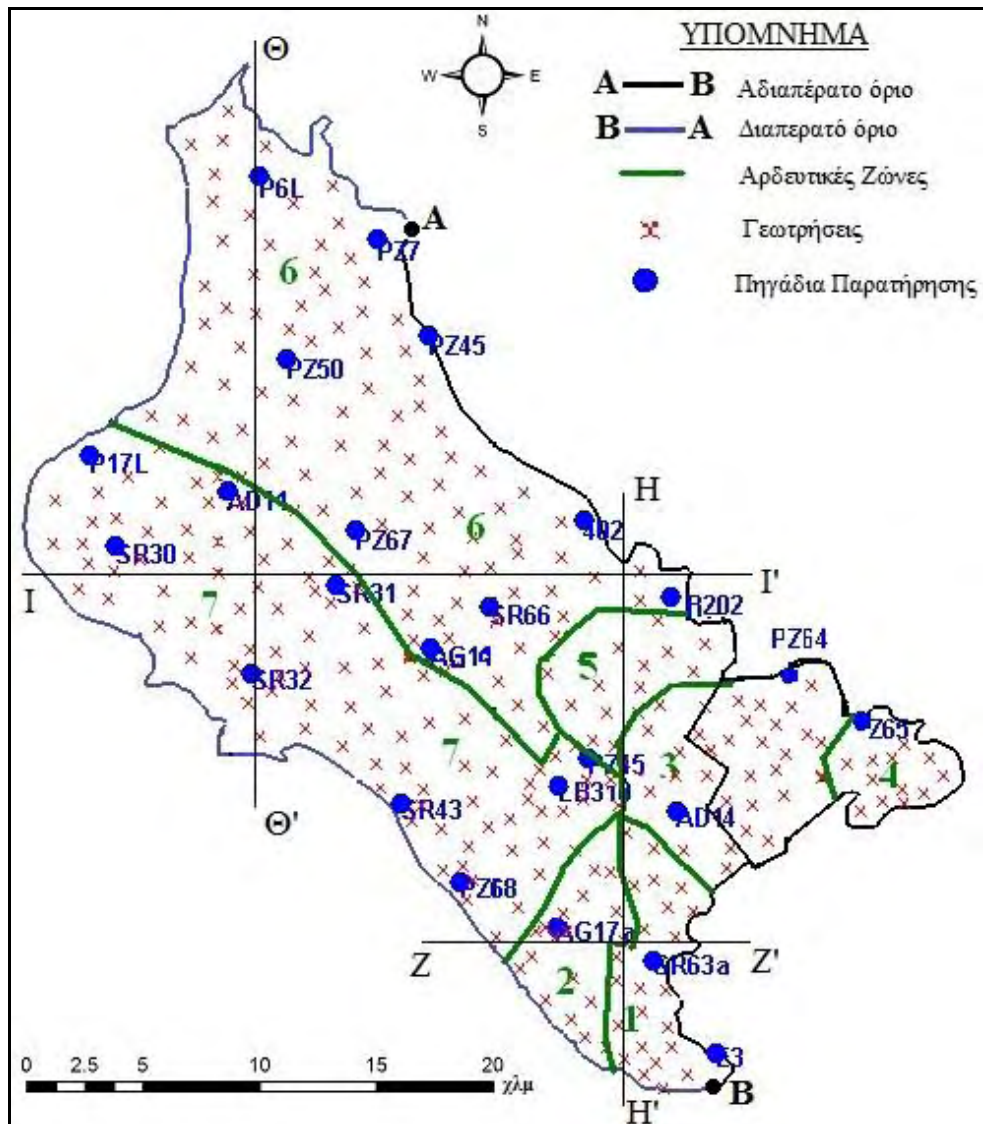
<b>Πηγάδι</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Αρχικά Ύψη (m)</b>
P6L	637874	4394211	52.82
LB310	649089	4371386	48.93
AD15	653522.3	4370390	40.8
SR63a	652594.2	4364801	34.68
SR63b	652600	4364806	44.45
AG17a	649002	4366046	59.82
AD13a	653349.3	4370961	43.15
PZ15	650170.5	4372364	40.62
AD13	653227.5	4370877	37.2
AG14	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 7.8.** Τομή της υπό προσομοίωση περιοχής, όπως αυτή αναπαρίσταται από το εννοιολογικό μοντέλο που καταρτίστηκε



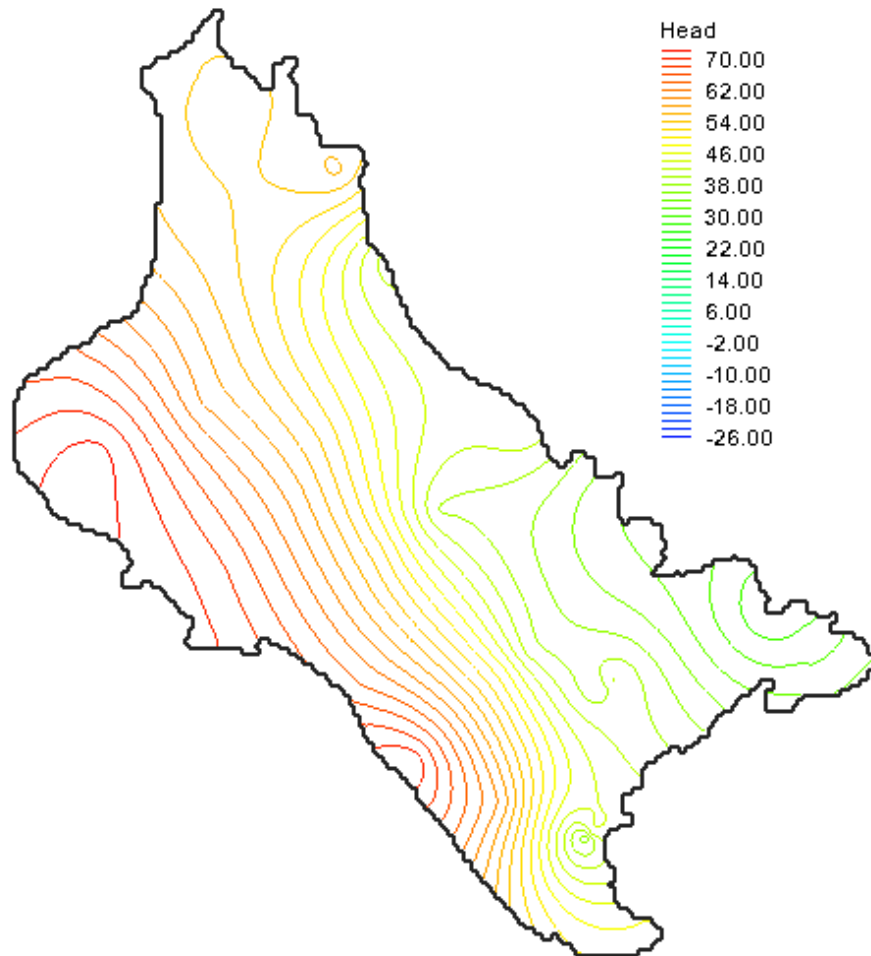
**Σχήμα 7.9.** Ο υπόγειος υδοφορέας της Κάρλας όπως αυτός προσομοιώθηκε με τις χαρακτηριστικές τομές του.

Οι εισροές στο πεδίο προέρχονται από την κατείσδυση, λόγω βροχόπτωσης και από τις πλευρικές εισροές στο δυτικό όριο του. Να πισημανθεί ότι ένα μικρό ποσοστό εισροών προέρχεται από την άρδρευση το οποίο όμως έχει συνυπολογιστεί στην κατείσδυση. 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 αυτής αυξήθηκαν κατά 10% εκφράζοντας την επιστροφή στον υπόγειο υδροφόρο 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).

Η εκροή από τον υπόγειο υδροφορέα 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 χωρίστηκε σε επτά ζώνες άντλησης (Σχήμα 7.9, Πίνακας 7.3), 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. Η τελευταία έχει να κάνει με τη γεωμορφολογία της ζώνης.



**Σχήμα 7.10** Αρχικά απόλυτα υψόμετρα του υπόγειου υδροφορέα για την 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου 1987

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  $19,04 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>. 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 m<sup>3</sup>/h, ενώ έχουν καταγραφεί παροχές της τάξεως των 300 m<sup>3</sup>/h σε περιόδους αιχμής.

Η ζώνη 2 εκτάσεως 14910 στρεμμάτων περιλαμβάνει τα Δ-ΝΔ περιθώρια της ζώνης 1 με όριο τη νοτιή γραμμή μεταξύ των χωριών ΜέγαΜοναστήρι – Χλόη – Βελεστίνο - Αγ. Γεώργιος. Αντλούνται από τον υπόγειο υδροφορέα από  $1,4 \cdot 10^6$  έως  $3 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>. Ανήκει και αυτή στην τρίτη ομάδα πιεζόμετρων. Οι παροχές των

γεωτρήσεων δεν είναι μεγάλες, με αυτές να φτάνουν σε ώρες μη αιχμής τα  $30 \text{ m}^3/\text{h}$  και σε ώρες αιχμής να μην ξεπερνούν τα  $100 \text{ m}^3/\text{h}$ .

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 πιεζόμετρων, 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 πιεζόμετρων. 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 – Αγχίλειον – Γλαύκη – Ελευθέριο – Δήμητρα και Νεοχώρι. Έχει έκταση 210263 στρέμματα και το βόρειο τμήμα της ανήκει στην πρώτη ομάδα πιεζόμετρων, ενώ το νότιο στη δεύτερη. Είναι η περιοχή η οποία αρδεύεται από το ΤΟΕΒ Πηνειού. Η ποσότητα που αντλείται είναι της τάξης 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 ύδρευση καλύπτονται αποκλειστικά από γεωτρήσεις. Ανήκει στην τρίτη ομάδα πιεζόμετρων 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–Grenoble 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  $220 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Ακολουθεί ο ο πίνακας 7.4 στον οποίο παρουσιάζονται συνοτικά οι αντλήσεις των ζωνών που περιγράφονται παραπάνω.

**Πίνακας 7.4** Αντλήσεις ζωνών για την περίοδο προσομοίωσης.

<b>ΖΩΝΗ</b>	<b>ΕΚΤΑΣΗ (στρεμ.)</b>	<b>ΑΡΙΘΜΟΣ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ</b>	<b>ΠΑΡΟΧΕΣ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>ΑΝΤΛΗΣΕΙΣ (*10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>)</b>
1	36267	34	100-300	~ 15,23-19,04
2	14910	17	30-100	~ 1,40-3,00
3	492923	28	35-105	~ 1,50-1,88
4	15000	15	20-70	~ 1,88-2,80
5	306419	13	20-60	~ 1.20-1,50
6	210263	60	55-220	~ 2,20
7	143840	69	70-220	~ 37,95-43,70

Η υδραυλική αγωγιμότητα είναι χωρικά μεταβαλλόμενη και αποτελεί την παράμετρο για την οποία ρυθμίστηκε το μοντέλο. Ελήφθησαν 15 τιμές από δειγματοληπτικές γεωτρήσεις και με τη μέθοδο Simple Kriging πραγματοποιήθηκε η χωρική της παρεμβολή (Σιδηρόπουλος, 2007).

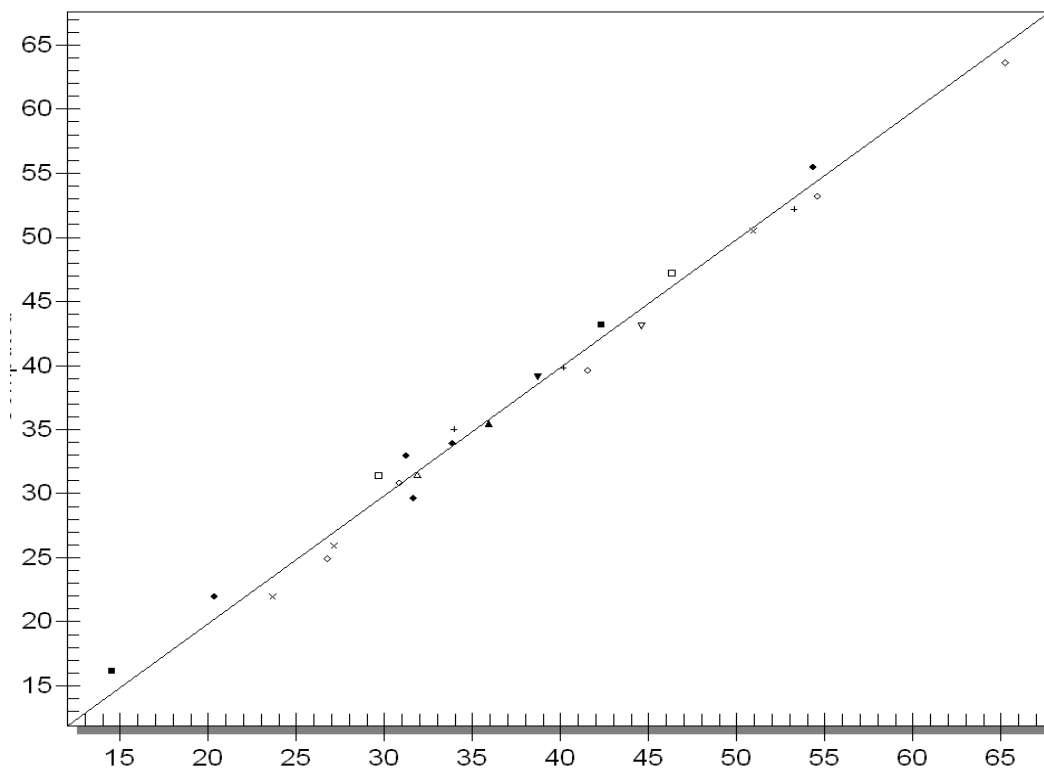
Ο συντελεστής αποθήκευσης (Specific Storage) ελήφθη ίσος με 0.02 και ο συντελεστής απόδοσης (Specific Yield) ίσος με 0.1 (SOGREAH–Grenoble 1979; Κωνσταντινίδης και Περγαλιώτης, 1984; Constandinidis, 1978). Η ρύθμιση του μοντέλου έγινε για την 1/1/1997 χρησιμοποιώντας ως πηγάδια παρατήρησης τα ίδια που επιστρατεύτηκαν για τον καθορισμό των αρχικών υψών. Στο σχήμα 7.11 παρουσιάζονται οι παρατηρούμενες και οι προσομοιωμένες τιμές των υδραυλικών υψών στο διάγραμμα διασποράς και η σχέση τους ως προς τη γραμμή 1:1. Η σύγκλιση των τιμών είναι αρκετά ικανοποιητική δίνοντας τιμή ίση με 0.98 για τον συντελεστή προσδιορισμού ( $0 < R^2 < 1$ ) της γραμμής τάσης. Οι τιμές αυτές φαίνονται και στον πίνακα 7.5. Επομένως το μοντέλο υπόγειας ροής είναι κατάλληλο και ορθώς δομημένο να εξάγει ασφαλή και αξιόπιστα αποτελέσματα.

**Πίνακας 7.5** Προσομοιωμένες και παρατηρούμενες τιμές για την 01/1997

<b>Πηγάδι</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Προσομοιωμένα 01/1997 (μ.)</b>	<b>Παρατηρούμενα 01/1997 (μ.)</b>
P6L	637874	4394211	52.168	53.15
LB310	649089	4371386	22	23.48

AD14	653522.3	4370390	39.607	41.44
SR63a	652594.2	4364801	22.004	20.2
AG17a	649002	4366046	31.401	29.5
PZ15	650170.5	4372364	16.145	14.4
AG14	644246	4376506	24.94	26.58
SR43	643202	4370724	29.668	31.47
SR32	637576.8	4375596	31.524	31.7
SR31	640758.1	4378887	35.461	35.78
PZ67	641486	4380913	43.135	44.42
402	650046.8	4381276	39.132	38.56
SR66	646465.5	4378039	35.022	33.83
PZ50	638888	4387371	50.543	50.78
P17L	631492	4383752	53.208	54.43
PZ7	642281.8	4391853	55.449	54.22
SR30	632522.3	4380364	47.221	46.17
AD11	636705.3	4382399	43.179	42.18
PZ68	645376.4	4367725	63.673	65.1
E3	654937	4361328	33.948	33.67
LB202	653280	4378456	39.804	40
PZ65	660104.5	4373872	25.968	27
PZ45	644182	4388225	30.791	30.68
PZ64	657371.6	4375602	32.93	31.1

## Συσχετισμός προσομοιούμενων τιμών( $\gamma$ ) με παρατηρούμενων( $x$ )



**Σχήμα 7.11** Ρύθμιση του μοντέλου προσομοίωσης του υπόγειου υδροφορέα για την 1/1/1997

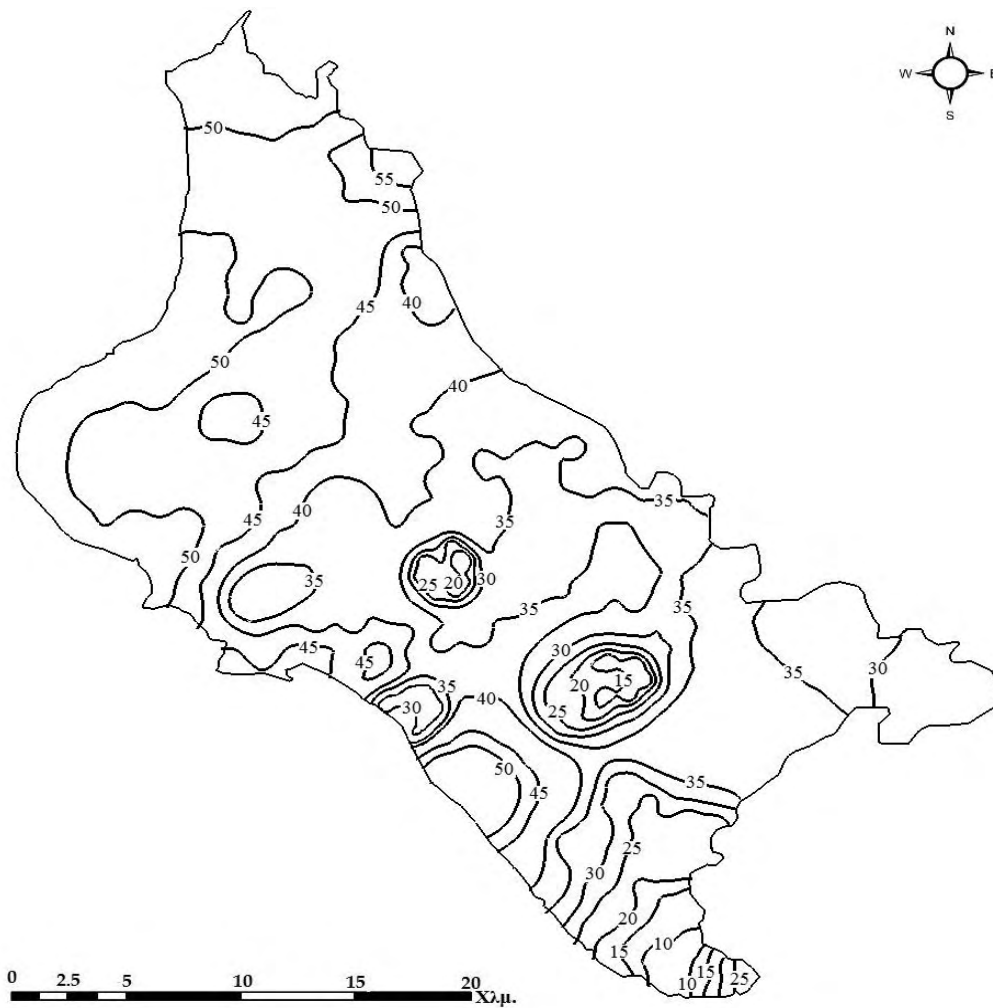
## 8. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

### 8.1 Αποτελέσματα.

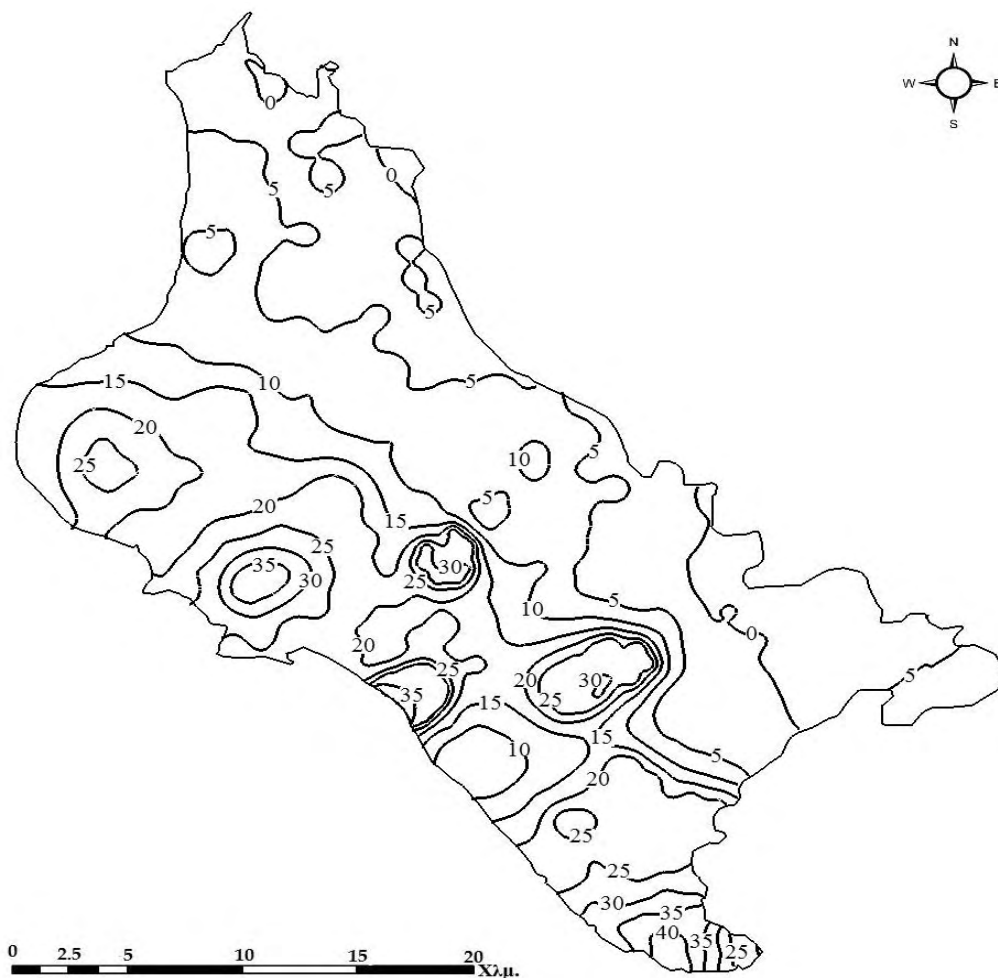
Εφόσον το μοντέλο ρυθμίστηκε επιτυχώς γεγονός το οποίο αποδεικνύεται από τα προηγούμενα στατιστικά στοιχεία (σχήμα 7.11) είναι κατάλληλο για την εξαγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων. Δύο είναι οι κατηγορίες των αποτελεσμάτων, οι οποίες αρκούν για να αποδοθεί μια εικόνα της ποσοτικής κατάστασης του υπόγειου υδροφορέα.

- Χάρτες και τομές υδραυλικών φορτίων, από τα οποία αποτυπώνεται το ύψος στάθμης του υπόγειου υδροφορέα σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή, τόσο για όλο το πεδίο μελέτης, όσο και για κάποια συγκεκριμένα κελιά
- Πίνακας υδατικού ισοζυγίου, από τον οποίο φαίνεται αν τα μη ανανεώσιμα αποθέματα του υπόγειου υδροφορέα είναι υπό εκμετάλλευση.





**Σχήμα 8.1** Χάρτης υπόγειου υδροφορέα με τις ισοπιεζομετρικές καμπύλες των υδραυλικών υψών για την 1-1-1997.



**Σχήμα 8.2** Χάρτης υπόγειου υδροφορέα με τις ισοπιεζομετρικές καμπύλες που προκύπτουν από την διαφορά των υδραυλικών υψών των χρονολογιών 1-1-87 και 1-1-97.

Στο σχήμα 8.1 παρουσιάζεται ο χάρτης του υπόγειου υδροφορέα με τις ισοπιεζομετρικές καμπύλες των υδραυλικών υψών για την 1-1-97, δηλαδή στο τέλος της περιόδου προσομοίωσης. Παρατηρείται πτώση της στάθμης του υπόγειου υδροφορέα σε όλο το πεδίο μελέτης, με εντονότερη στο κεντρικό, δυτικό και νότιο τμήμα. Μάλιστα στο νότιο μέρος παρατηρούνται οι μέγιστες πτώσεις στάθμης. Αυτό οφείλεται στην έλλειψη διαχειριστικής στρατηγικής των υδατικών πόρων της λεκάνης για την αντιστροφή του φαινομένου υπεράντλησης του υδροφορέα.

Επίσης, για συγκριτικούς λόγους παρουσιάζεται στο σχήμα 8.2 η διαφορά των υδραυλικών υψών για τις χρονολογίες 1-1-87 και 1-1-97. Η διαφορά αυτή δείχνει την πτώση στάθμης του υδροφορέα για αυτές τις δύο χρονολογίες. Προκύπτει ότι ο

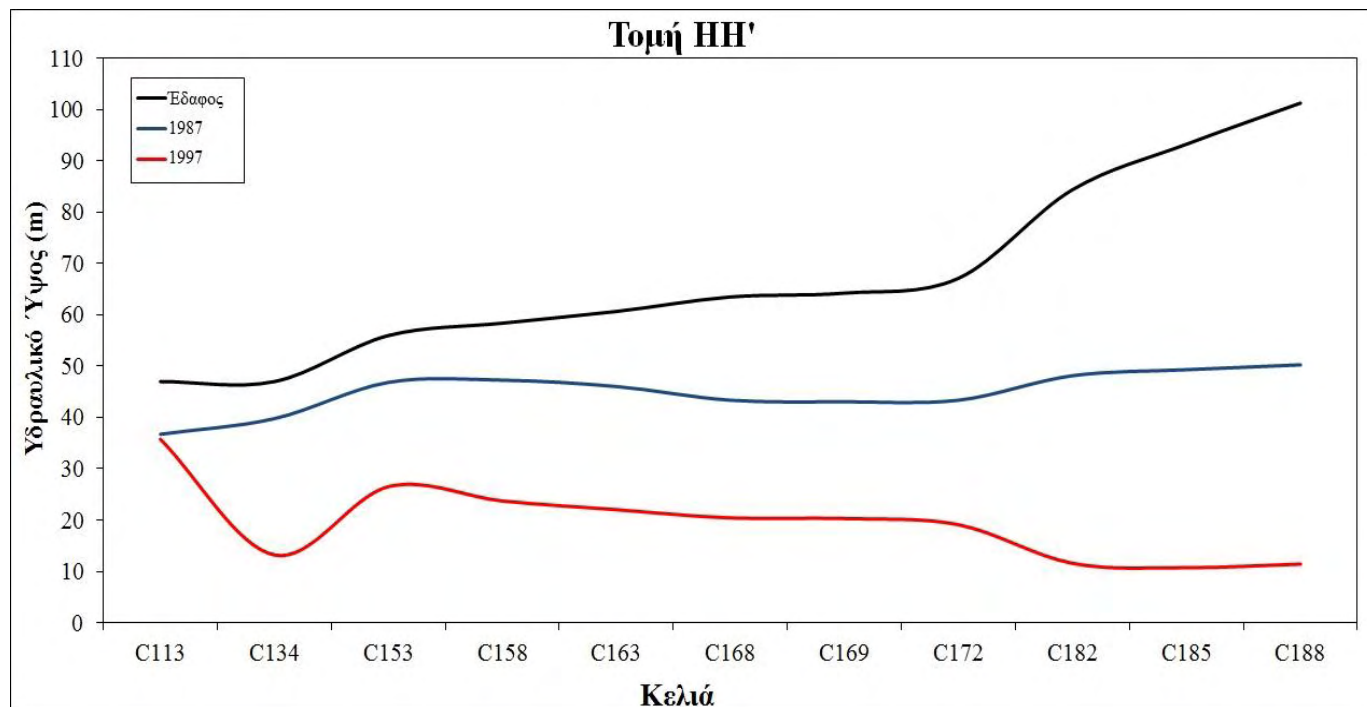
υπόγειος υδροφορέας του ευρύτερου πεδινού τμήματος βρίσκεται υπό κεθεστώσ εντατικής υπέρ-εκμετάλλευσης.

Από τα δύο παραπάνω σχήματα φαίνεται ότι στο βορινό τμήμα της περιοχής δεν υπάρχει ουσιαστική πτώση στάθμης και αυτό οφείλεται – εν μέρει - στην ύπαρξη του ΤΟΕΒ Πηνείου, απο το οποίο αρδρεύεται η περιοχή αυτή. Στα δυτικό και νότιο τμήμα παρατηρείται η μεγαλύτερη πτώση η οποία φτάνει και τα 40μ. και οφείλεται στο ότι τα μη αναμεώσιμα αποθέματα εκμεταλλεύονται, γεγονός που επιβεβαιώνεται στην συνέχεια και απο την εξέταση του υδατικού ισοζυγίου.

Στη συνέχεια αναλύονται τομές η θέση των οποίων φαίνεται στο σχήμα 7.9 του πρηγούμενου κεφαλαίου, οι οποίες προέρχονται από επιλεγμένα κελιά και οριοθετήθηκαν έτσι για να καλύπτουν τα σημαντικά προς μελέτη τμήματα του υπόγειου υδροφορέα.

Στα παρακάτω γραφήματα αποτυπώνεται το υδραυλικό ύψος για επιλεγμένα κελιά κάθε φορά για τις περιόδους 1997 (με κόκκινο χρώμα) και 1987 (με μπλε χρωμα) καθώς και το υψόμετρο εδάφους στο συγκεκριμένο κελί (με μαύρο χρώμα).

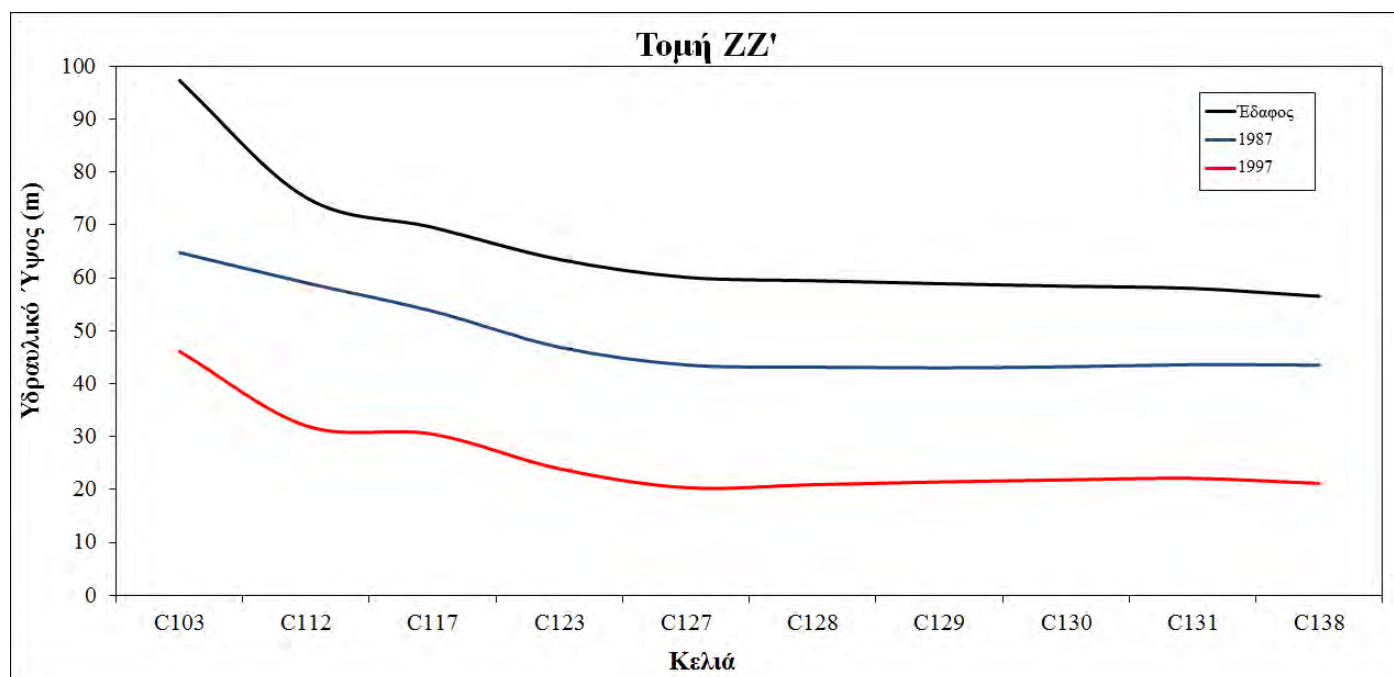
- Τομή Η-Η'



**Σχήμα 8.3** Τομή Η-Η' στο νοτιοανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης.

Στην παραπάνω τομή του σχήματος 8.3 και σε συνδυασμό με το σχήμα 7.9 , η τομή H-H' τέμνει τις ζώνες άρδρευσης 6,5,3,2,1 με την σειρά που αναφέρονται. Το γράφημα της τομής αναφέρεται στα κελιά C133-C188 της περιοχής μελέτης ξεκινώντας από το δυτικό τμήμα της περιοχής και καταλήγοντας νοτιοανατολικό παραλληλα του διαπερατού ορίου. Στην αρχή του γραφήματος παρατηρείται ταύτιση των υψών για τις δύο περιόδους προσομοίωσης γεγονός που εξηγείται με το ότι στο βορεινό τμήμα υπάρχει το ΤΟΕΒ Πηνειού, όπως ήδη έχει αναφερθεί, και δεν έχουμε μεγάλες αλλαγές στην στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα. Στα τελευταία κελιά που αποτυπώνονται στο γράφημα παρατηρούνται τα χαμηλότερα υδραυλικά ύψη σε σχέση με τις άλλες τομές που παρουσιάζονται παρακάτω αλλά και κατακόρυφη αύξηση των υψών του εδάφους. Η διαφορά των υδραυλικών υψών στο νότιο τμήμα της μελέτης για τις δύο περιόδους προσομοίωσης φτάνει μέχρι και τα 40μ. Η απότομη αυτή διαφορά επιβεβαιώνει την υπεράντληση στο νότιο τμήμα.

- Τομή Z-Z'

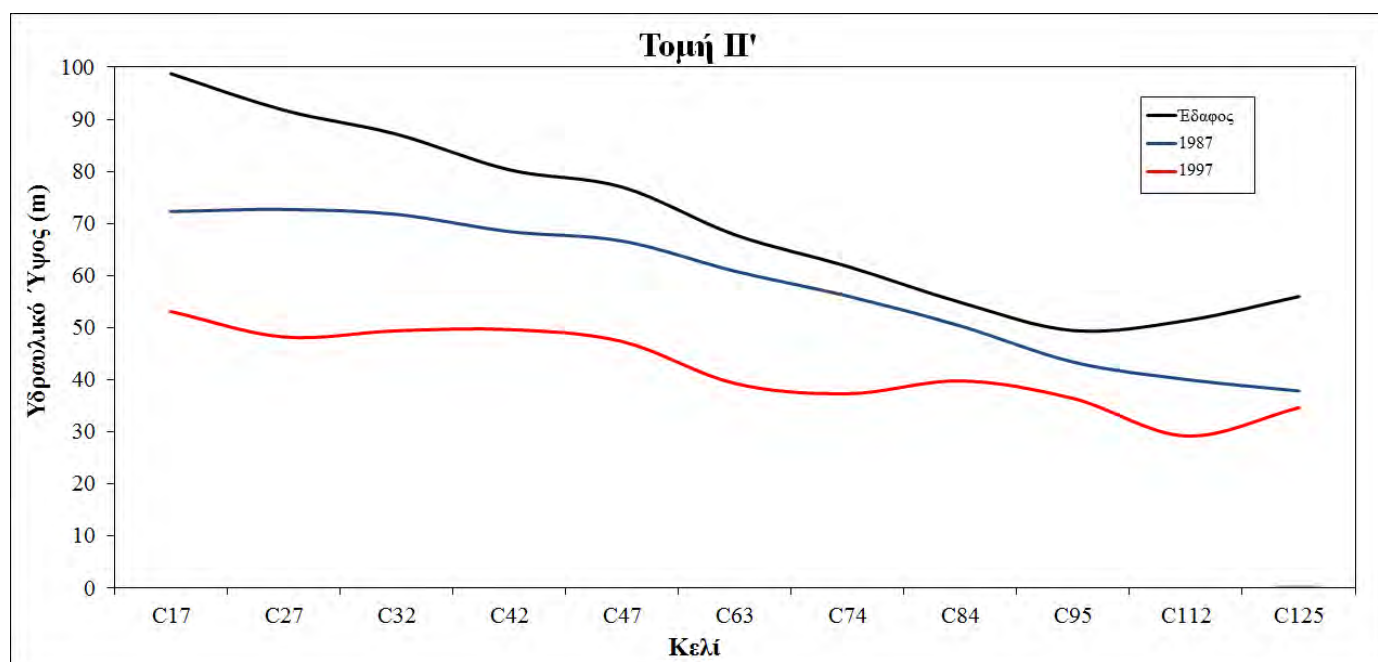


**Σχήμα 8.4** Τομή Z-Z' στο νότιο τμήμα της περιοχής μελέτης.

Από την τομή Z-Z' φαίνονται οι χαμηλές στάθμες των υδραυλικών υψών οι οποίες πραγματοποιούνται στο νότιο τμήμα της περιοχής μελέτης. Η τομή τέμνει στο νότιο τμήμα της μελέτης τις ζώνες 2 και 1 με τη σειρά που αναφέρονται και τα επιλεγμένα κελιά C103-C138. Δεν παρατηρούνται μεγάλες διαφορές στα υδραυλικά

ύψη κατά μήκος της τομής λόγω της θέσης της. Εφόσον η θέση της τομής επιλέχθηκε να είναι στο νότιο τμήμα της περιοχής όπου εκεί γίνεται υπεράντληση του φορέα, είναι αναμενόμενα τα χαμηλά υδραυλικά ύψη, σχεδόν σε όλα τα επιλεγμένα κελιά, τα οποία για το 1997 φτάνουν στα 20μ περίπου. Η διαφορά των υδραυλικών υψών για τις δύο περιόδους προσομοίωσης κατά μήκος της τομής διατηρείται σταθερή και ίση με 20μ. περίπου.

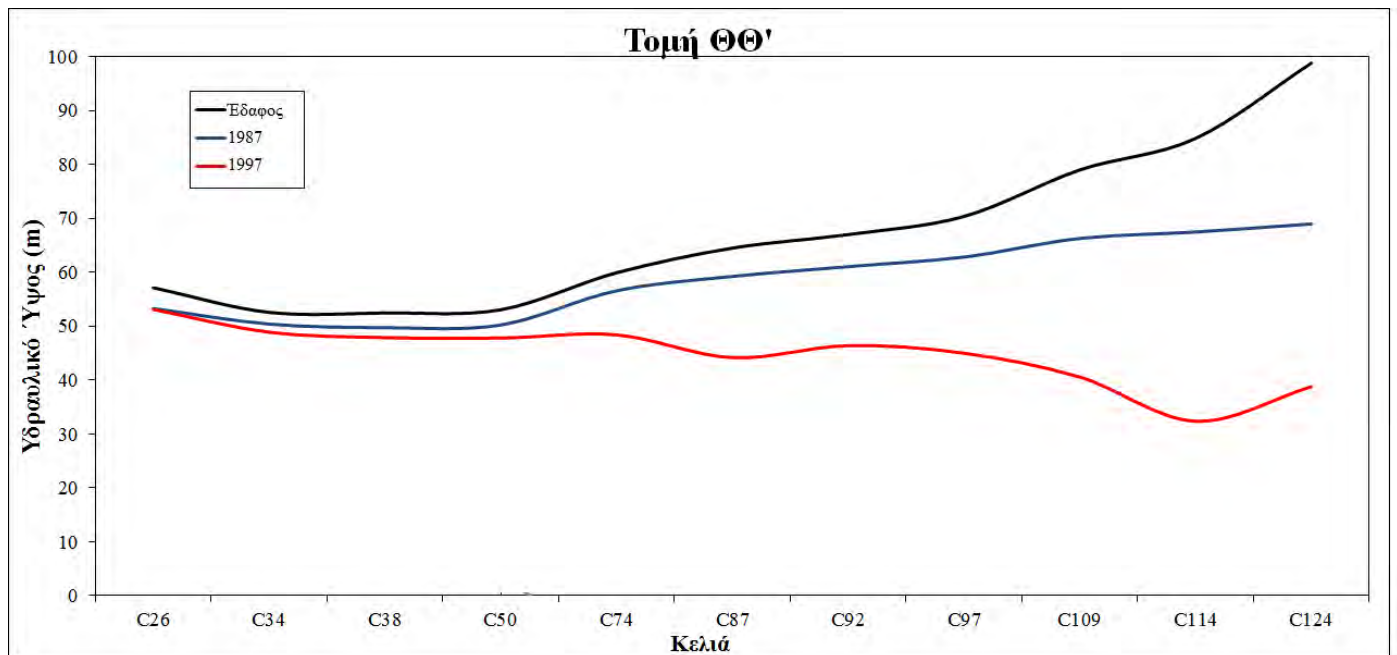
- Τομή I-I'



**Σχήμα 8.5** Τομή I-I' σχεδόν στο μέσο τμήμα της περιοχής μελέτης

Κατά μήκος της τομής I-I' παρατηρείται μεγάλη κλίση εδάφους και τελικώς ταύτιση των υδραυλικών υψών. Πρόκειται για τομή που επιλέχθηκε να γίνει σχεδόν στο μέσον της περιοχής μελέτης, τέμνει τις ζώνες 7 και 6 και ξεκινάει από το δυτικό μέρος και καταλήγει το ανατολικό. Στο δυτικό μέρος της μελέτης η διαφορά των υδραυλικών υψών φτάνει μέχρι και τα 20μ. ενώ όσο η τομή πλησιάζει στο ανατολικό τμήμα η διαφορά αυτή μηδενίζεται και από αυτο συμπεραίνεται ότι στο ανατολικό τμήμα της περιοχής δεν υφίσταται υπεράντληση τέτοιου βαθμού όπως στο νοτιοδυτικό τμήμα.

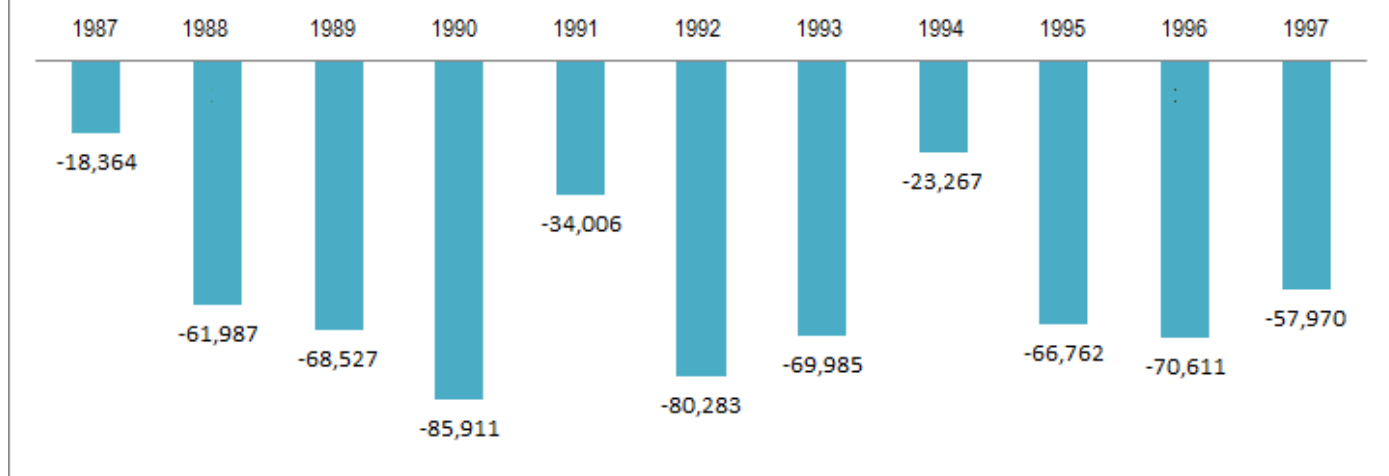
- Τομή Θ-Θ'



**Σχήμα 8.6** Τομή Θ-Θ' στο βοριοδυτικό τμήμα της περιοχής μελέτης.

Η τομή Θ-Θ' τέμνει τις ζώνες 6 και 7. Ξεκινάει από το βορινό τμήμα της περιοχής μελέτης και καταλήγει στο δυτικό. Στην τομή Θ-Θ' παρατηρείται αλλαγή στα υδραυλικά ύψη στα κελιά που βρίσκονται στο δυτικό τμήμα μελέτης (μετά το κελί C74). Όσο η τομή τέμνει το βορινό τμήμα παρατηρείται σταθερότητα στις τιμές των υδραυλικών υψών αλλά και μερική ταύτιση των τιμών και αυτό οφείλεται εν μέρει και στην ύπαρξη του ΤΟΕΒ Πηνειού. Στο νότιο τμήμα της μελέτης, κελιά C92-C124, παρατηρείται αύξηση των υψομέτρων του εδάφους ενώ τα υδραυλικά ύψη της περιόδου 1997 μειώνονται κατακόρυφα. Η διαφορά των υδραυλικών υψών στο νοτιοδυτικό τμήμα φτάνει μέχρι και τα 30μ. Και από εδώ φαίνεται η υπεράντληση του νοτιοδυτικού τμήματος.

## Γραφημα υδατικού ισοζυγίου για την περίοδο 1987-1997



**Σχήμα 8.7** Γράφημα υδατικού ισοζυγίου για την περίοδο προσομοίωσης.

Από το σχήμα 8.7 όπου παρουσιάζεται το γράφημα του υδατικού ισοζυγίου για την περιοχή μελέτης την περίοδο προσομοίωσης παρατηρείται ότι έχει αρνητικές τιμές και μάλιστα σε συγκεκριμένες χρονιές να φτάνει μέχρι και τα 86 εκ.κυβ. μ. Αυτό οφείλεται στο γεγονός, ότι τα ανανεώσιμα, δηλαδή κατείδυση συμπεριλαμβανομένου και επιστροφές απο άρδρευση και πλευρικές εισροές δεν είναι επαρκή. Αυτό συμβαίνει διότι μετά την αποξήρανση του ταμιευτήρα η λεκάνη της Κάρλας είναι φτωχή σε υδατικό δυναμικό. Δεν υπάρχει κάποιος επιφανειακός υδατικός πόρος να εμπλουτίζει τον υδροφόρα και να καλύπτει τις ανάγκες για άρδευση. Αυτό αποτελεί ακόμη μία αιτία του υδατικού προβλήματος της λεκάνης της Καρλας, που αναμένεται να αναστραφεί με την επανασύσταση της λίμνης.

### 8.2 Συμπεράσματα.

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία ειδίκευσης έγινε προσπάθεια μιας ολοκληρωμένης προσομοίωσης και διαχείρισης των υδατικών πόρων στη λεκάνης απορροής της λίμνης Κάρλας μέσω ενός συστήματος προσομοίωσης. Το σύστημα αυτό αποτελείται από ένα μοντέλο προσομοίωσης της επιφανειακής απορροής και ένα μοντέλο προσομοίωσης της υπόγειας ροής. Στόχος ήταν η ικανότητα πρόβλεψης των επιμέρους διαδικασιών απορροής και των αλληλεπιδράσεων τους. Κατά κανόνα ο σχεδιασμός μεμονωμένου ομοιώματος πρόγνωσης που θα αναπαρίστανε

ικανοποιητικά το σύνολο των διαδικασιών απορροής δεν είναι εφικτός, απομένως είναι απαραίτητο ένα μέσο διασύνδεσης των ομοιωμάτων που περιγράφουν τις επιμέρους διαδικασίες της απορροής. Η απαίτηση αυτή καλύπτεται από την εφαρμογή OpenMI μιας ενιαίας πλατφόρμας σύνδεσης των δύο διαφορετικών ομοιωμάτων που περιγράφουν τις επιμέρους διαδικασίες απορροής

Τα δύο μοντέλα προσομοίωσης ρυθμίστηκαν επιτυχώς και το σύστημα εφαρμόστηκε για την περίοδο 1987-1997, ώστε να εκτιμηθεί η απόκριση του υπόγειου υδροφορέα και να αξιολογηθούν τα παραγόμενα αποτελέσματα.

Τα συμπεράσματα τα οποία προκύπτουν από αυτή την έρευνα είναι τα εξής:

- Το ZOOM είναι ένα ιδιαίτερα ευέλικτο διαχειριστικό εργαλείο και σε συνθήκες ικανοποιητικών διαθέσιμων δεδομένων δίνει αξιόπιστες πληροφορίες που αφορούν τη διαχείριση των υδατικών πόρων και ιδιαίτερα την συμπεριφορά των υπόγειων υδατικών συστημάτων σε διαφορετικές συνθήκες φόρτισης από ανθρώπινες ενέργειες.
- Όπως φαίνεται από το UTHBAL, οι ποσότητες της κατείδυσης είναι μικρές, λόγω μη σημαντικής βροχόπτωσης αλλά και της σύστασης του υπεδάφους (αργιλοαμμώδη στρώματα).
- Επίσης, μετά την αποξήρανση της λίμνης η λεκάνη της Κάρλας είναι φτωχή σε υδατικό δυναμικό. Δεν υπάρχει κάποιος επιφανειακός υδατικός τεχνικός πόρος να εμπλουτίζει τον υδροφορέα και να καλύπτει τις ανάγκες για άρδευση.
- Το OpenMI, σαν μια ενιαία πλατφόρμα σύνδεσης διαφορετικών ομοιωμάτων, απλοποιεί σημαντικά τη διαδικασία προσομοίωσης, καθώς αντί για τη δημιουργία ενός μεγάλου και πολυσύνθετου προγράμματος, δημιουργούνται πολλά μικρότερα, στα οποία είναι ευκολότερη η επέμβαση, η συντήρηση και η βελτίωση τους. Επίσης, λόγω της ανοιχτής αρχιτεκτονικής της πλατφόρμας OpenMI, είναι δυνατόν να αντικατασταθούν τμήματα της διαδικασίας εκτίμησης του υδατικού δυναμικού μιας λεκάνης σε οποιοδήποτε σημείο της περιοχής μελέτης σε άλλα διαφορετικά ή περισσότερο εξελιγμένα μοντέλα.
- Ο υπόγειος υδροφορέας της περιοχής μελέτης βρίσκεται υπό καθεστώς υπερεκμετάλλευσης. Λόγω της εντατικής αγροτικής δραστηριότητας, η ταπείνωση του υπόγειου υδροφορέα είναι αρκετά μεγάλη εξαιτίας των αναγκών άρδευσης.



- Οι πτώσεις στάθμης του υπόγειου υδροφορέα είναι αρκετά σημαντικές στο κεντρικό και δυτικό τμήμα της περιοχής μελέτης με τις μεγαλύτερες τιμές να παρατηρούνται στο νότιο τμήμα. Αυτό οφείλεται, όπως έχει ήδη αναφερθεί, στην έλλειψη επιφανειακών υδατικών πόρων, αρδευτικού δικτύου και ορθολογικής διαχείρισης των υδατικών πόρων της λεκάνης.
- Ειδικότερα, στα κελιά όπου εμφανίζεται ο μεγαλύτερος αριθμός γεωτρήσεων με ποικίλες παροχές το ύψος του υπόγειου υδροφορέα μειώνεται απότομα λαμβάνοντας και αρνητικές τιμές ενώ στις περιοχές όπου η παρουσία γεωτρήσεων είναι αραιή ή οι παροχές αυτών είναι μικρής τάξεως, η πτώση του υπόγειου υδροφορέα είναι σχετικά μικρή.
- Όσο αφορά την κίνηση του υπόγειου νερού παρατηρείται εισροή από τα δυτικά και νοτιοδυτικά γεγονός που οφείλεται στο ότι ο δυτικός γειτονικός υπόγειος υδροφορέας βρίσκεται σε καλύτερη ποσοτική κατάσταση από τον αντίστοιχο της Κάρλας. Συνεχίζεται η υφιστάμενη κατάσταση της ροής από ΒΔ προς ΝΑ όπως είχε περιγραφηθεί από τη μελέτη της SOGREAH με έντονες όμως τοπικές αλλαγές λόγω της παρουσίας γεωτρήσεων άντλησης.
- Συνεπώς, λαμβάνοντας υπόψιν και όλα τα παραπάνω ο υπόγειος υδροφορέας της Κάρλας χαρακτηρίζεται σύμφωνα με την οδηγία 2000/60 από κακή ποσοτική κατάσταση.
- Απαιτείται άμεση αναστροφή αυτού του φαινομένου μέσω μιας βιώσιμης διαχείρισης των υδατικών πόρων της λεκάνης. Μοντέλα όπως το OpenMI μπορούν αν φανούν χρήσιμα εργαλεία για αυτό το σκοπό.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

Costandinidis, D., (1978) Hydrodynamique d'un systeme aquifere heterogene, Hydrogeologie de la Thessalie Orientale. Doctora D'Etat, Grenoble (in French).

Gijsbers P. J. A., Gregersen J.B., Westen S. J. P., (2007) «OpenMIQ: Open Modeling interface.» Journal of Hydroinformatics

Hantush, Mahdi S., (1964). «Advances in Hydrosience», chapter Hydraulics of Wells, pp 281-442. Academic Press.

Knight, C.G., H. Chang, M.P. Staneva and D. Kostov (2001) «A simplified basin model for simulating runoff: The Struma River GIS», Professional Geographer, Vol. 53(4), pp. 533-545.

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.

Makropoulos, C., E. Safiolea, A. Efstratiades, E. Oikonomidou, V. Kaffes, C.Papathanasiou and M. Mimikou, (2009) «Multi-Reservoir Management With OpenMI», 11th International Conference On Environmental Science And Technology, Chania, Crete, September 3rd - 5th.

Makropoulos, C., E. Safiolea, S. Baki, E. Douka, A. Stamou, and M. Mimikou,(2010) «Anintegrated, multi-modelling approach for the assessment of water quality: lesson from the Pinios River Case in Greece», International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs), 2010 International Congress on Environmental Modelling and Software Modelling for Environment's Sake, Fifth Biennial Meeting, Ottawa, Canada , July 5th – 8th.

Moore R. V. and Tindall C. I. (2005) “An overview of the open modelling interface and environment (the OpenMI)”, Environmental Science & Policy.

Nash, J.E. and J.V. Sutcliffe (1970) «River flow forecasting through conceptual models, Part-1 A discussion of principles», Journal of Hydrology, Vol. 10(3), pp. 282-290.

SOGREAH (1974), «Study of groundwater circulation in Thessaly plain, Greece», Technical report, Athens (in Greek).

SOGREAH-GRENOBLW,(1979) «Έργο ανάπτυξης υπόγειων υδάτων Θεσσαλίας-Μαθηματικά ομοιώματα», Υπουργείο Γεωργίας, Αθήνα

Semadeni-Davies, A., (1997), «Monthly snowmelt modeling for long-scale climate change studies using the degree-day approach», Ecological Modelling, 101(1997), pp303-323.

Vandewiele, G.L. and N.L. Win (1998) «Monthly water balance models for 55 basins in 10 Countries», Hydrologic Sciences Journal, Vol. 43(5), pp. 687-699.

ZOOMQ3D (2004), User's manual for the groundwater flow model, B.G.S.

Κωνσταντινίδης Δ. και Περγιαλιώτης Π. (1984), «Ανάπτυξη Υπόγειων Υδάτων Θεσσαλίας. Μαθηματικά Μοντέλα. Αναρίθμηση των Μοντέλων Υπόγειων Υδροφορέων», Υπουργείο Γεωργίας, Αθήνα.

Λουκάς, Α., Λ. Βασιλειάδης, and Ν. Μπαστρογιάννης (2003) «Υδρολογική Προσομοίωση Υδατικού Ισοζυγίου Λεκάνης Απορροής Γερμασόγειας, Κύπρος.» Πρακτικά Ημερίδας «Μελέτες και Έρευνες Υδατικών Πόρων στον Κυπριακό Χώρο, Λευκωσία, Κύπρος, 20 Ιουνίου 2003, pp. 83-114.

Μουστάκα Ε. (2002). Διαχείριση Υδατικών Πόρων της υπό ανασύστασης Λίμνης Κάρλας με χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών. Διπλωματική εργασία, τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Π.Θ.

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.

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,.

Τσακίρης, Γ., (1995) “Υδατικοί Πόροι: Ι. Τεχνική Υδρολογία”, Εκδόσεις Συμμετρία,

ΥΠΕΧΩΔΕ, Γενική Γραμματεία Δημοσίων Έργων, Διεύθυνση Εγγειοβελτιβτικών Έργων (1999), “Επαναδημιουργία Λίμνης Κάρλας: Περιβαλλοντική Τεχνική Έκθεση”, Μελέτη Κόστους - Οφέλους και Υποστηρικτικές Μελέτες, Παράρτημα ΙΙΙ.2, Υποστηρικτική Υδρογεωλογική Μελέτη, Αθήνα