



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ**

**ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑΤΟΣ
ΤΗΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΠΟΤΑΜΙΑΣ ΕΛΑΣΣΟΝΑΣ**



Διπλωματική Εργασία

Μασούρα Μαρία

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια:

Παπαδοπούλου Μαρία, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2020



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑΤΟΣ
ΤΗΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΠΟΤΑΜΙΑΣ ΕΛΑΣΣΟΝΑΣ**

ΜΑΣΟΥΡΑ ΜΑΡΙΑ

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια:

Παπαδοπούλου Μαρία, Καθηγήτρια Σ.Α.Τ.Μ./Ε.Μ.Π.

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Παπαδοπούλου Μαρία, Καθηγήτρια Σ.Α.Τ.Μ./Ε.Μ.Π.

Νάνου-Γιάνναρου Αικατερίνη, Επίκουρη Καθηγήτρια Σ.Π.Μ./Ε.Μ.Π.

Τσιχριντζής Βασίλειος, Καθηγητής Σ.Α.Τ.Μ./Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2020

*Στους γονείς μου,
Παναγιώτη και Παναγιώτα*

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω την κα. Παπαδοπούλου, η οποία μου ανέθεσε την παρούσα διπλωματική εργασία, συνδυάζοντας δύο κλάδους της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών. Την ευχαριστώ για την καθοδήγηση και επίβλεψή της.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω την υποψήφια Διδάκτορα Ε.Μ.Π., Δέσποινα Χαρχούση, για την πολύτιμη βοήθεια όλο αυτόν τον καιρό, την καθοδήγηση, την επίβλεψη και τον χρόνο που αφιέρωσε. Αποτέλεσε σημαντικό παράγοντα προκειμένου να ολοκληρωθεί η εργασία.

Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Παναγιώτη και Παναγιώτα, για την αγάπη και υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια.

Καταληκτικά ευχαριστώ τις φίλες μου Φιλίππια, Διονυσία και Ελεονώρα για την υποστήριξή τους.

Περιεχόμενα

Περίληψη	ix
Abstract.....	xi
Κεφάλαιο 1 ^ο	1
Εισαγωγή	1
1.1 Σκοπός εργασίας.....	2
1.2 Διάρθρωση εργασίας	2
Κεφάλαιο 2 ^ο	5
Υπόγειο Υδατικό Αποτύπωμα	5
2.1 Γενικά	6
2.1.1 Το Υπόγειο Υδατικό Αποτύπωμα.....	8
2.2 Οικοσυστήματα εξαρτώμενα από τα υπόγεια νερά.....	12
2.3 Υπηρεσίες Οικοσυστημάτων	14
2.4 Νομοθετικό πλαίσιο.....	17
2.4.1 Οικοσυστήματα εξαρτώμενα από τα υπόγεια νερά.....	17
2.4.2 Οικολογική παροχή	20
Κεφάλαιο 3 ^ο	22
Η περιοχή μελέτης	22
3.1 Χαρακτηριστικά ευρύτερης περιοχής.....	23
3.2 Γεωμορφολογικές συνθήκες	25
3.2.1 Γεωμορφολογία ευρύτερης περιοχής	25
3.2.2 Γεωμορφολογία Περιοχής Μελέτης.....	26
3.2.3 Ανάγλυφο.....	27
3.3 Γεωλογική Δομή.....	28
3.4 Τεκτονική	32
3.5 Κλιματολογικές συνθήκες	34
3.5.1 Θερμοκρασία	35
3.5.2 Βροχόπτωση.....	36
3.6 Υδρογεωλογία.....	38
3.7 Επιφανειακά υδάτινα σώματα.....	40
3.7.1 Πηνειός Ποταμός.....	40

3.7.2 Τιταρήσιος ποταμός	41
3.7.3 Υδρολογική συμπεριφορά Τιταρήσιου	42
3.8 Πηγές	45
3.8.1 Αμούριο	45
3.8.2 Κεφαλόβρυσο.....	45
Κεφάλαιο 4 ^ο	46
Μαθηματική προσομοίωση υπόγειου υδατικού συστήματος	46
4.1 Μαθηματικό υπόβαθρο Modflow	47
4.1.1 Διακριτοποίηση	49
4.1.2 Εξίσωση πεπερασμένων διαφορών	50
4.1.3 Καθορισμός οριακών συνθηκών	52
Κεφάλαιο 5 ^ο	59
Υπολογισμός Υπόγειου Υδατικού Αποτυπώματος	59
5.1 Ανάπτυξη μοντέλου υπόγειου ροής	60
5.2 Δημιουργία εννοιολογικού μοντέλου (conceptual model)	60
5.2.1 Εισαγωγή γεωλογικών δεδομένων	62
5.2.2 Εισαγωγή υδραυλικών παραμέτρων και αρχικών υδραυλικών υψών (conductivity, storage, initial heads).....	64
5.2.3 Εισροές στο μοντέλο	66
5.2.4 Εκροές-Αντλήσεις	67
5.2.5 Οριακές συνθήκες	67
5.2.6 Ρύθμιση του μοντέλου	68
5.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης μοντέλου	69
5.3.1 Σφάλματα της διαδικασίας βαθμονόμησης και υδατικό ισοζύγιο 1990- 1996.	69
5.3.2 Σφάλματα διαδικασίας βαθμονόμησης και υδατικό ισοζύγιο 2013-2015.76	
5.4 Υπολογισμός περιβαλλοντικής ροής	82
5.4.1 Μέθοδος Tennant	82
5.4.2 Εκτίμηση περιβαλλοντικής ροής στην Ελλάδα	82
5.4.3 Αποτελέσματα στην περιοχή μελέτης.....	83
5.5 Υπολογισμός δείκτη υπόγειου υδατικού αποτυπώματος.....	84
Κεφάλαιο 6 ^ο	91

Συμπεράσματα – Προτάσεις.....	91
6.1 Συμπεράσματα	92
6.2 Προτάσεις	93
Βιβλιογραφία	94
Παράρτημα	101

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Ο Υδρολογικός Κύκλος.....	2
Εικόνα 2: Ρύπανση υπογείων υδάτων από την αλόγιστη χρήση λιπασμάτων.....	7
Εικόνα 3: Υπόγειο Υδατικό Αποτύπωμα υδροφορέων που είναι σημαντικά για τη γεωργία και σημαντικά μεγαλύτερα από τις γεωγραφικές τους περιοχές.....	11
Εικόνα 4: Ενοιολογικό μοντέλο οικοσυστημάτων εξαρτωμένων από τα υπόγεια νερά.....	14
Εικόνα 5: Υδρογεωλογικές Λεκάνες Θεσσαλίας.....	23
Εικόνα 6: Επαρχία Ελασσόνας.....	24
Εικόνα 7: Γεωμορφολογικός χάρτης ευρύτερης περιοχής.....	25
Εικόνα 8: Χάρτης γεωλογίας περιοχής μελέτης.....	31
Εικόνα 9: Γεωλογική τομή περιοχής μελέτης.....	32
Εικόνα 10: Γεωτεκτονικές Ζώνες Ελλάδος.....	34
Εικόνα 11: Χάρτης υδροπερατότητας περιοχής μελέτης.....	40
Εικόνα 12: Χωρική διακριτοποίηση ενός τρισδιάστατου υδροφορέα.....	49
Εικόνα 13: Το κελί (i, j, k) και τα γειτονικά του.....	51
Εικόνα 14: Ροή από το κελί (i,j,k) στο (i,j-1,k) κατά τη διεύθυνση των γραμμών.....	52
Εικόνα 15: Τύποι κελιών και προσομοίωση οριακών συνθηκών.....	53
Εικόνα 16: Η περιοχή μελέτης με τον κάνναβο στο μοντέλο.....	61
Εικόνα 17: Τρισδιάστατη απεικόνιση των γεωλογικών ζωνών του υδροφορέα μελέτης.....	63
Εικόνα 18: Δισδιάστατη απεικόνιση των γεωλογικών ζωνών του υδροφορέα μελέτης.....	63
Εικόνα 19: Γεωτρήσεις άντλησης περιοχής μελέτης.....	67
Εικόνα 20: Χάρτης οριακών συνθηκών του μοντέλου προσομοίωσης.....	68
Εικόνα 21: Χάρτης Γεωτρήσεων Παρακολούθησης την περίοδο 1990-1996.....	69

Εικόνα 22: Σφάλματα βαθμονόμησης 1990-1991 για το τέλος υγρής περιόδου.....	70
Εικόνα 23: Σφάλματα βαθμονόμησης 1991-1992 για το τέλος υγρής περιόδου.....	70
Εικόνα 24: Σφάλματα βαθμονόμησης 1992-1993 για το τέλος υγρής περιόδου.....	71
Εικόνα 25: Σφάλματα βαθμονόμησης 1993-1994 για το τέλος υγρής περιόδου.....	71
Εικόνα 26: Σφάλματα βαθμονόμησης 1994-1995 για το τέλος υγρής περιόδου.....	72
Εικόνα 27: Σφάλματα βαθμονόμησης 1995-1996 για το τέλος υγρής περιόδου.....	72
Εικόνα 28: Σφάλματα βαθμονόμησης 1990-1991 για το τέλος ξηρής περιόδου.....	73
Εικόνα 29: Σφάλματα βαθμονόμησης 1991-1992 για το τέλος ξηρής περιόδου.....	73
Εικόνα 30: Σφάλματα βαθμονόμησης 1992-1993 για το τέλος ξηρής περιόδου.....	74
Εικόνα 31: Σφάλματα βαθμονόμησης 1993-1994 για το τέλος ξηρής περιόδου.....	74
Εικόνα 32: Σφάλματα βαθμονόμησης 1994-1995 για το τέλος ξηρής περιόδου.....	75
Εικόνα 33: Σφάλματα βαθμονόμησης 1995-1996 για το τέλος ξηρής περιόδου.....	75
Εικόνα 34: Χάρτης Γεωτρήσεων παρακολούθησης για την περίοδο 2013-2015.....	77
Εικόνα 35: Σφάλματα βαθμονόμησης 2013 για το τέλος υγρής περιόδου.....	78
Εικόνα 36: Σφάλματα βαθμονόμησης 2014 για το τέλος υγρής περιόδου.....	78
Εικόνα 37: Σφάλματα βαθμονόμησης 2015 για το τέλος υγρής περιόδου	79
Εικόνα 38: Σφάλματα βαθμονόμησης 2013 για το τέλος της ξηρής περιόδου.....	79
Εικόνα 39: Σφάλματα βαθμονόμησης 2014 για το τέλος της ξηρής περιόδου.....	80
Εικόνα 40: Σφάλματα βαθμονόμησης 2015 για το τέλος της ξηρής περιόδου.....	80

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Εδαφολογικές κλίσεις περιοχής μελέτης (Βασιλείου, 2011).....	27
Πίνακας 2: Κατάταξη γεωλογικών σχηματισμών του υδροφορέα ως προς τη χρονολογία σχηματισμών.....	63
Πίνακας 3: Αντιστοιχία υδραυλικής αγωγιμότητας (m/d) με γεωλογικούς σχηματισμούς (Costandinidis, 1974).....	64
Πίνακας 4: Αντιστοιχία αποθηκευτικότητας (1/m) με γεωλογικούς σχηματισμούς (Costandinidis, 1974, Καλλέργης, 2000).....	65
Πίνακας 5: Εκτίμηση περιβαλλοντικής ροής για τα υδρολογικά έτη 1990-2015.....	83
Πίνακας 6: Παράμετροι για τον υπολογισμό του δείκτη (1 ^η περίπτωση).....	84
Πίνακας 7: Τιμή δείκτη υπόγειου υδατικού αποτυπώματος (1 ^η περίπτωση).....	85
Πίνακας 8: Σύγκριση υπόγειου υδατικού αποτυπώματος και της έκτασης της περιοχής (1 ^η περίπτωση).....	85
Πίνακας 9: Παράμετροι για τον υπολογισμό του δείκτη (2 ^η περίπτωση).....	86
Πίνακας 10: Τιμή δείκτη υπόγειου υδατικού αποτυπώματος (2 ^η περίπτωση).....	86
Πίνακας 11: Σύγκριση υπόγειου υδατικού αποτυπώματος και της έκτασης της περιοχής (2 ^η περίπτωση).....	87
Πίνακας 12: Παράμετροι για τον υπολογισμό του δείκτη (3 ^η περίπτωση).....	88
Πίνακας 13: Τιμή δείκτη υπόγειου υδατικού αποτυπώματος (3 ^η περίπτωση).....	88
Πίνακας 14: Σύγκριση υπόγειου υδατικού αποτυπώματος και της έκτασης της περιοχής (3 ^η περίπτωση).....	89

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: Καταμερισμός υδάτων στη γήινη επιφάνεια.....	6
Διάγραμμα 2: Μετεωρολογικά δεδομένα Σταθμού Λάρισας για τη μέση θερμοκρασία για τα έτη 1990-2017.....	36
Διάγραμμα 3: Μετεωρολογικά δεδομένα Σταθμού Λάρισας για το ύψος υετού για τα έτη 1990-2017.....	37
Διάγραμμα 4: Μετεωρολογικά στοιχεία υετού Σταθμού Λάρισας.....	38
Διάγραμμα 5(α): Διακύμανση στάθμης Κεφαλόβρυσου τη δεκαετία 1990.....	43
Διάγραμμα 5(β): Διακύμανση στάθμης Κεφαλόβρυσου 2013-2015.....	43
Διάγραμμα 6(α): Διακύμανση στάθμης Αμουρίου τη δεκαετία 1990.....	44
Διάγραμμα 6(β): Διακύμανση στάθμης Αμουρίου 2013-2015.....	44
Διάγραμμα 7: Σύγκριση μέσης πιεζομετρικής στάθμης 5 γεωτρήσεων το 1990 και το 1996.....	81

Παράρτημα

Χάρτης 1(α): Θέση περιοχής μελέτης στον Ελλαδικό Χώρο.....	102
Χάρτης 1(β): Θέση Υπόγειου Υδατικού Συστήματος Ποταμιάς Στο Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας.....	103
Χάρτης 2: Οριακές Συνθήκες του Μοντέλου Προσομοίωσης.....	104
Χάρτης 3: Γεωτρήσεις Παρακολούθησης την περίοδο 1990-1996.....	105
Χάρτης 4: Γεωτρήσεις Παρακολούθησης την περίοδο 2013-2015.....	106
Χάρτης 5: Γεωτρήσεις Άντλησης περιοχής μελέτης.....	107
Χάρτης 6: Πιεζομετρία περιοχής μελέτης για τα έτος 2015 στο τέλος της ξηρής περιόδου.....	108

Περίληψη

Το υδάτινο στοιχείο αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους φυσικούς πόρους, καθώς συντελεί στην ύπαρξη ζωής στη Γη. Παρόλα αυτά, τόσο οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες όσο και η άνιση κατανομή του νερού στο χώρο και χρόνο, οδήγησαν σταδιακά στην ποσοτική και ποιοτική υποβάθμισή του. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, ιδιαίτερα τη σύγχρονη εποχή, να επιδιώκεται η ορθολογική διαχείριση των υδάτινων πόρων, λαμβάνοντας υπ' όψιν τους λόγους που επιβαρύνουν, όχι μόνο τα επιφανειακά, αλλά και τα υπόγεια ύδατα.

Προκειμένου να διαμορφωθούν πολιτικές για την ορθή διαχείριση των υπογείων υδάτων, αναπτύχθηκαν διάφορα εργαλεία, όπως είναι ο δείκτης αποτυπώματος των υπογείων υδάτων. Το υπόγειο υδατικό αποτύπωμα συμπληρώνει την καθιερωμένη μέθοδο αποτύπωσης νερού (ισοζύγιο) και χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των επιπτώσεων των υπογείων υδάτων σε φυσικά αποθέματα και ροές. Είναι ουσιαστικά το ισοζύγιο νερού μεταξύ εισροών και εκροών οι οποίες εκτιμώνται μέσω παρατηρήσεων ή υδρολογικών μοντέλων.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, μελετάται η περιοχή της Ποταμιάς στην Ελασσόνα, που ανήκουν στο Υδατικό Διαμέρισμα της Θεσσαλίας (ΥΔ08), προκειμένου να διαπιστωθεί αν λαμβάνει χώρα η ορθή διαχείριση των υπόγειων υδάτων της. Η αξιολόγηση της διαχείρισης των υδατικών πόρων της περιοχής πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του υπόγειου υδατικού αποτυπώματος. Για το λόγο αυτό προσδιορίστηκαν, η ετήσια άντληση, η επανατροφοδότηση του υδροφορέα, η συνεισφορά των υπόγειων υδάτων στα επιφανειακά νερά για χρονική περίοδο έξι ετών τη δεκαετία του 1990 (1990 – 1996), καθώς και τριών ετών στη δεκαετία του 2000 (2013-2015).

Η περιοχή της Ποταμιάς αποτελείται κυρίως από τεταρτογενείς και νεογενείς αποθέσεις. Τα υπόγεια ύδατα τροφοδοτούνται από κατεισδύσεις, διηθήσεις ποταμών και χειμάρρων και πλευρικές μεταγγίσεις. Οι υδρευτικές και αρδευτικές ανάγκες της περιοχής ικανοποιούνται κυρίως από την άντληση των υπογείων υδάτων. Οι υδατικοί πόροι της περιοχής έχουν οδηγηθεί σε σοβαρή ποιοτική και ποσοτική υποβάθμιση, εξαιτίας της εκμετάλλευσής τους εδώ και αρκετά χρόνια. Για

το λόγο αυτό είναι σημαντικός ο υπολογισμός του υπόγειου υδατικού αποτυπώματος στην περιοχή.

Προκειμένου να υπολογισθούν οι παράμετροι του αποτυπώματος, προσομοιώθηκε το υπόγειο υδροφόρο σύστημα της περιοχής μελέτης με τη βοήθεια του λογισμικού πακέτου Modflow 4.1 Flex. Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε σε συνθήκες μη μόνιμης ροής. Οι αδιαπέρατοι σχηματισμοί αποτέλεσαν τις οριακές συνθήκες, ενώ οι υδραυλικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση του μοντέλου ήταν η υδραυλική αγωγιμότητα και αποθηκευτικότητα. Οι εισροές προήρθαν από τις επιφανειακές ροές, ενώ οι εκροές προέκυψαν από τις παραγωγικές γεωτρήσεις άντλησης. Η περιβαλλοντική ροή προέκυψε από τα δεδομένα των παροχών των πηγών του ποταμού Τιταρήσιου, στην περιοχή μελέτης, και υπολογίσθηκε με βάση τη Μέθοδο Tennant, καθώς και τη μέθοδο που προβλέπεται από την Ελληνική Νομοθεσία για την περιβαλλοντική ροή.

Με βάση τα δεδομένα των αντλήσεων, επαναφόρτισης, τη συνεισφορά των υπόγειων υδάτων και περιβαλλοντικής ροής υπολογίσθηκε η τιμή του δείκτη υπόγειου υδατικού αποτυπώματος προκειμένου να βρεθεί εάν ο υπό μελέτη υδροφορέας βρίσκεται υπό βιώσιμη διαχείριση. Με βάση τη μέθοδο Tennant για τη περιβαλλοντική ροή και τον υπολογισμό του δείκτη βρέθηκε ότι η διαχείριση των υδατικών πόρων της περιοχής δεν είναι βιώσιμη. Καταληκτικά ακολούθησαν ορισμένες πιθανές προτάσεις για τη βελτίωση της υφιστάμενης κατάστασης.

Abstract

The water is one of the most important natural resources, as it contributes to the existence of life on Earth. However, both the anthropogenic activities and the unequal distribution of water in space and time have gradually led to its quantitative and qualitative degradation. As a result, especially in recent years, the rational management of water resources is pursued, taking into account factors that may not lead only to surface water vulnerability, but also to groundwater deterioration.

In order to formulate policies for groundwater proper management, various tools have been developed, such as the groundwater footprint indicator. The groundwater footprint complements the standard method of water balance and is used to assess the effects of groundwater on natural reserves. It essentially expresses a water balance focusing on environmental requirements. The inflows of water volumes and outflows can be estimated based on observations and / or hydrological models.

In the present Diploma Thesis, the area of Potamia in Ellassona, which belongs to the Water Department of Thessaly (YD08), is studied, in order to determine whether the proper management of its groundwater resources takes place. To this end, the groundwater footprint concept is adopted. In order to estimate groundwater footprint, parameters such as annual pumping, recharge, groundwater contribution to the flow and the environmental flow have been estimated for a period of six years in the 1990s (1990 - 1996), as well as for three years in the 2000s (2013-2015).

The area of Potamia consists mainly of quaternary and neogene deposits, whose groundwater is fed by precipitation infiltration, river and torrent infiltrations. The water and irrigation needs of the area are met mainly by groundwater. For several years, the region's water resources have been severely degraded by quantitative and qualitative degradation due to their exploitation. As a result, monitoring groundwater resources management (e.g. through the estimation of groundwater footprint) is critical.

In order to calculate the footprint parameters, the underground aquifer system of the study area was simulated with the help of the Modflow 4.1 Flex software

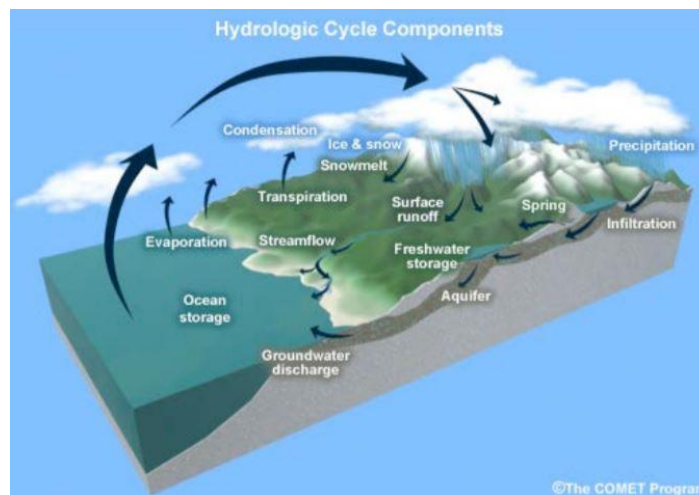
package. The simulation was performed under transient flow conditions. The impermeable formations formed the boundary conditions, while the hydraulic parameters used for model's calibration were the hydraulic conductivity and storage. The inflows came from surface flows, while the outflows came from productive pumping wells. The environmental flow was estimated based on timeseries of Titarissios river flow measurements. The Tennant Method, as well as the method provided by the Greek Legislation for the environmental flow have been adopted in order to estimate the environmental flow.

Based on the data of the pumping, recharging, the groundwater contribution to flow and environmental flow, the value of the groundwater footprint indicator was calculated in order to find out if the groundwater management in the area is sustainable. Based on the Tennant Method for the environmental flow and the calculation of the indicator, it was found that the aquifer of the study area is not subjected to sustainable management. Finally, some possible proposals for the improvement of the current situation are followed.

Κεφάλαιο 1^ο

Εισαγωγή

Τα υπόγεια ύδατα αποτελούν το μεγαλύτερο χώρο αποθήκευσης γλυκού νερού σε παγκόσμια κλίμακα. Υπολογίζεται ότι αποτελούν το 97% των διαθέσιμων γλυκών νερών στη Γη, χωρίς να υπολογίζονται οι πολικοί πάγοι. Διαδραματίζουν ένα ουσιαστικό ρόλο στον υδρολογικό κύκλο. Ο υδρολογικός κύκλος περιλαμβάνει μια σειρά διαδικασιών με τις οποίες το νερό κυκλοφορεί μεταξύ της υδρόσφαιρας, ατμόσφαιρας, ξηράς και θάλασσας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1. Παράλληλα τα υπόγεια ύδατα δρουν σαν ρυθμιστικός παράγοντας για τη διατήρηση υγροτόπων και ποταμών, ιδιαίτερα κατά τις περιόδους ξηρασίας, εξασφαλίζοντας μόνιμη ροή. Ενώ μέχρι τα πρόσφατα χρόνια τα υπόγεια ύδατα αφορούσαν κυρίως σε αρδευτικές εργασίες, σήμερα γίνεται αντιληπτό ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για άλλες χρήσεις, δημιουργώντας, με αυτόν τον τρόπο, μία αξιοσημείωτη περιβαλλοντική αξία. Για το λόγο αυτό χρήζουν σοβαρής προστασίας και διαχείρισης, καθώς η υποβάθμιση της ποιότητάς τους μπορεί να επηρεάσει άμεσα τα συνδεδεμένα με αυτά χερσαία και υδάτινα οικοσυστήματα.



Εικόνα 1: Ο Υδρολογικός Κύκλος

Πηγή: comet.ucar.edu

1.1 Σκοπός εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως στόχο τη μελέτη του υπόγειου υδροφόρου συστήματος της υπολεκάνης της επαρχίας της Ελασσόνας η οποία ανήκει στην ευρύτερη λεκάνη του ποταμού Τιταρήσιου, με στόχο την αξιολόγηση της διαχείρισης των υπόγειων υδατικών αποθεμάτων στην περιοχή. Κατά συνέπεια, στο πλαίσιο της εργασίας επιδιώκεται η εκτίμηση των παραμέτρων όπως η άντληση

και η φυσική επαναφόρτιση, οι οποίες συμβάλλουν στη διατύπωση του υδατικού ισοζυγίου της περιοχής μελέτης. Επιπρόσθετα, επιδιώκεται ο υπολογισμός της περιβαλλοντικής ροής, ώστε να επιτευχθεί η εκτίμηση του υπόγειου υδατικού αποτυπώματος, ενός δείκτη που εκφράζει το υδατικό ισοζύγιο δίνοντας έμφαση στις περιβαλλοντικές απαιτήσεις της περιοχής μελέτης. Η εκτίμηση του δείκτη μπορεί να οδηγήσει στον χαρακτηρισμό της διαχείρισης των υπόγειων υδατικών αποθεμάτων ως βιώσιμης ή μη.

1.2 Διάρθρωση εργασίας

- ❖ Στο 1^ο Κεφάλαιο δίνονται, συνοπτικά, γενικά στοιχεία για την περιοχή μελέτης και του γεωγραφικού διαμερίσματος που αυτή ανήκει, καθώς γίνεται αναφορά και για τις υδρογεωλογικές λεκάνες αυτού. Παρουσιάζεται, ακόμη, ο σκοπός και η διάρθρωση της εργασίας.
- ❖ Στο 2^ο Κεφάλαιο δίνονται και αναλύονται μέσα από παραδείγματα και αναφορές, οι ορισμοί του υπόγειου υδατικού αποτυπώματος, των οικοσυστημάτων που εξαρτώνται από τα υπόγεια ύδατα και των υπηρεσιών οικοσυστημάτων. Επιπλέον, αναφέρεται η υπάρχουσα νομοθεσία η οποία έχει δημιουργηθεί με σκοπό την προστασία των οικοσυστημάτων που εξαρτώνται από τα υπόγεια νερά.
- ❖ Στο 3^ο Κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά η περιοχή μελέτης, με γεωγραφικά και άλλα στοιχεία. Με πιο λεπτομερή περιγραφή παρουσιάζονται, έπειτα, οι γεωμορφολογικές συνθήκες και η γεωλογική δομή της περιοχής έρευνας, που συνοδεύονται από αντίστοιχες εικόνες και χάρτες. Στη συνέχεια με τη βοήθεια πινάκων και διαγραμμάτων παρουσιάζονται οι κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν και τέλος περιγράφεται τόσο η υδρογεωλογική λεκάνη της περιοχής, όσο και τα επιφανειακά σώματα που τη διατρέχουν και οι πηγές τους.
- ❖ Στο 4^ο Κεφάλαιο παρουσιάζεται και περιγράφεται αναλυτικά το λογισμικό πακέτο Modflow, αναλύοντας το μαθηματικό υπόβαθρό του με τη βοήθεια εξισώσεων και σχημάτων.
- ❖ Στο 5^ο Κεφάλαιο περιγράφονται αναλυτικά τα βήματα, οι επιλογές παραμέτρων που πραγματοποιήθηκαν για την προσομοίωση του υπόγειου

μοντέλου ροής, με παράλληλη παράθεση πινάκων, εικόνων, καθώς και οι μέθοδοι υπολογισμού της περιβαλλοντικής ροής. Τέλος παρατίθενται τα αποτελέσματα αυτών αντίστοιχα.

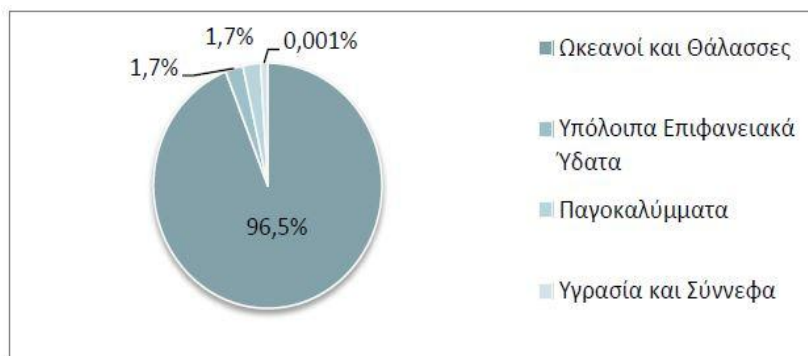
- ❖ Στο 6^ο Κεφάλαιο ακολουθεί μία σειρά συμπερασμάτων και προτάσεων.

Κεφάλαιο 2^ο

Υπόγειο Υδατικό Αποτύπωμα

2.1 Γενικά

Το νερό μπορεί να θεωρηθεί φυσικός πόρος, οικονομικό και κοινωνικό αγαθό, αλλά και περιβαλλοντικό στοιχείο. Σε σχέση με άλλους πόρους έχει μια ιδιαιτερότητα: είναι μοναδικό και αναντικατάστατο. Το νερό αποτελεί προϋπόθεση για την ανθρώπινη ύπαρξη και ζωή στον πλανήτη και δεν έχει υποκατάστατο στην ανάπτυξη (Σούλιος, 2004). Κατανέμεται όμως άνισα στη γήινη επιφάνεια (Διάγραμμα 1), καθώς ποσοστό ίσο με 96,5% αναλογεί στους ωκεανούς και τις θάλασσες, ποσοστό 3,4% μοιράζεται ισότιμα στα υπόλοιπα επιφανειακά νερά και στα παγοκαλύμματα, ενώ τέλος μόλις το 0,001% αντιπροσωπεύει την υγρασία και τα σύννεφα (Υ.ΠΕ.ΚΑ., 2015).



Διάγραμμα 1: Καταμερισμός υδάτων στη γήινη επιφάνεια

Πηγή: Υ.ΠΕ.Κ.Α. (2015)

Οι ανανεώσιμοι φυσικοί πόροι είναι δυνατόν να χαρακτηριστούν ανεξάντλητοι, όταν η ταχύτητα χρήσης του είναι ίδια με την ταχύτητα ανανέωσής τους. Ωστόσο, μπορούν να εξαντληθούν, όταν η χρήση τους καταστρέφει την ισορροπία ανανέωσής τους, καταλήγοντας σε μη ανανεώσιμους φυσικούς πόρους. Τη σύγχρονη εποχή, με την ταχύτητα που χρησιμοποιούνται οι υδατικοί πόροι, και με την επέμβαση που έχει γίνει στον υδρολογικό κύκλο, σε πολλές περιπτώσεις έχει καταστραφεί η δυναμική ισορροπία ανανέωσης των πόρων αυτών, δημιουργώντας ανησυχία για το ότι πολλοί από τους διαθέσιμους, σήμερα, υδατικούς πόρους δε θα είναι διαθέσιμοι στις μελλοντικές γενιές (Λέκκας, 1996).

Οι υδάτινοι πόροι συχνά θεωρούνται μεγάλες δεξαμενές που αποθηκεύουν το νερό σε λίμνες, φράγματα ή ποτάμια. Ωστόσο, εκτός από την επιφάνεια, μεγάλη

ποσότητα νερού αποθηκεύεται στο έδαφος και απαιτεί την επένδυση, για την εξεύρεση και την εξαγωγή του πόρου. Ενώ τα υπόγεια ύδατα αναδημιουργούνται μέσω μια διαδικασίας που ονομάζεται «επαναφόρτιση», η διαδικασία αυτή είναι αργή. Αυτό σημαίνει ότι εάν οι ρυθμοί κατανάλωσης είναι μεγαλύτεροι από τις απολήψεις μπορούν να αποστραγγίσουν έναν υδροφόρο ορίζοντα, ο οποίος οδηγεί σε αρνητικές συνέπειες για τον περιβάλλοντα πληθυσμό και το περιβάλλον.

Ο κίνδυνος ρύπανσης των υπόγειων νερών, κατά τις τελευταίες δεκαετίες, μεταβλήθηκε σημαντικά εξαιτίας διάφορων ανθρωπογενών δραστηριοτήτων και χρήσεων νερού (Εικόνα 2). Η εμφάνιση της βιομηχανικής δραστηριότητας στα μέσα του εικοστού αιώνα οδήγησε στην υπερφόρτιση των υδατορευμάτων με βαρέα μέταλλα και ιζήματα. Σε συνδυασμό, τα επόμενα χρόνια, με την υψηλή συγκέντρωση του πληθυσμού σε αστικά κέντρα, και με την ευρύτατη χρήση χημικών ουσιών (χημικά λιπάσματα, φυτοφάρμακα) στο περιβάλλον (γεωργία), η οποία τα τελευταία χρόνια έχει γίνει ανεξέλεγκτη εξαιτίας της υπερεκμετάλλευσης της γεωργικής γης προς την ικανοποίηση του ανθρώπινου πληθυσμού, είχε ως αποτέλεσμα την επαгрύπνηση της διεθνούς κοινότητας. Μερικοί από τους οργανισμούς που άσκησαν δράση με προγράμματα ελέγχου είναι ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (WHO: World Health Organization), ο Οργανισμός Τροφίμων και Γεωργίας (FAO: Food and Agriculture Organization) και άλλοι διεθνείς και διακυβερνητικοί οργανισμοί (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2009). Προκειμένου να επιτευχθεί ένας βέλτιστος έλεγχος, που αποσκοπεί στην ορθολογική διαχείριση των υδάτων και την αειφόρο ανάπτυξη, τα τελευταία χρόνια αναπτύχθηκε η έννοια του «δείκτη» (Gleeson et al, 2012).



Εικόνα 2: Ρύπανση υπογείων υδάτων από την αλόγιστη χρήση λιπασμάτων
Πηγή: agonaskritis.gr

Οι δείκτες προσφέρουν μια συνοπτική εικόνα της δυναμικής του οικοσυστήματος, και αποτελούν εργαλεία παρακολούθησης της πορείας προς τη βιώσιμη ανάπτυξη (Jennings, 2005). Ως εργαλεία μέτρησης οι δείκτες παρέχουν στοιχεία που επιτρέπουν τη διάγνωση τυχόν αποκλίσεων από κάποια σημεία αναφοράς, αποτυπώνοντας την υφιστάμενη κατάσταση του οικοσυστήματος, τις πιέσεις που αυτό δέχεται, αλλά και τις επιπτώσεις των αποτελεσμάτων από κάποιους διαχειριστικές δράσεις που υιοθετούνται. Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί δείκτες για την επιστάμενη παρακολούθηση και δημοσιοποίηση περιβαλλοντικών δεδομένων. Πιο συγκεκριμένα, για τα υπόγεια ύδατα αναπτύχθηκε από τους Gleeson et al., το 2012, ο δείκτης «υπόγειο υδατικό αποτύπωμα» (groundwater footprint). Η έννοια του «αποτυπώματος» είναι ένα ισχυρό εργαλείο επικοινωνίας και μέτρησης της χρήσης των πόρων και είναι γνωστό για την εφαρμογή του στο οικολογικό αποτύπωμα και το υδατικό αποτύπωμα (Gleeson et al., 2012).

2.1.1 Το Υπόγειο Υδατικό Αποτύπωμα

Το υπόγειο υδατικό αποτύπωμα είναι «η έκταση που απαιτείται για τη συντήρηση των υπογείων υδάτων και των υπηρεσιών των οικοσυστημάτων που εξαρτώνται από τα υπόγεια ύδατα, όπως ένας υδροφορέας, μία λεκάνη απορροής ή μια κοινότητα» (Gleeson et al., 2012), δίνοντάς της την ικανότητα να συνδεθεί με αγαθά και υπηρεσίες κατανάλωσης νερού.

Τα υπόγεια ύδατα αποτελούν πόρους που διατηρούν τη ζωή τους και παρέχουν νερό σε δισεκατομμύρια ανθρώπους, διαδραματίζοντας κεντρικό ρόλο στην αρδευόμενη γεωργία και επηρεάζοντας την υγεία πολλών οικοσυστημάτων. Οι περισσότερες έρευνες των υδάτινων πόρων επικεντρώθηκαν στα επιφανειακά ύδατα, όμως η μη βιώσιμη εξάντληση των υπογείων υδάτων έχει τεκμηριωθεί τόσο στις περιφερειακές όσο και στις παγκόσμιες κλίμακες, όπως στους υδροφορείς του Άνω Γάγγη στην Ινδία, τη Λεκάνη του Δούναβη στην Ευρώπη και την κεντρική κοιλάδα στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής. Το υπόγειο υδατικό αποτύπωμα είναι το πρώτο εργαλείο που επιτρέπει τη συνεπή αξιολόγηση της χρήσης, της ανανέωσης και των οικοσυστημικών απαιτήσεων των υπόγειων υδάτων σε κλίμακα υδροφορέων.

Το αποτύπωμα μπορεί να συνδυαστεί με τον υπολογισμό και του εικονικού νερού ώστε να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της δυνατότητας αύξησης των γεωργικών αποδόσεων με ανανεώσιμες πηγές υπογείων υδάτων (Gleeson et al, 2012).

Το υπόγειο υδατικό αποτύπωμα συμπληρώνει την καθιερωμένη μέθοδο αποτύπωσης νερού (ισοζύγιο) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση των επιπτώσεων των υπογείων υδάτων σε φυσικά αποθέματα και ροές. Ορίζεται ως:

$$GF = \left[\frac{C}{R-E} \right], (2.1.1.1)$$

όπου τα C,R και E είναι αντιστοίχως η ετήσια άντληση υπογείων υδάτων, ο ρυθμός επαναφόρτισης και η συνεισφορά των υπόγειων υδάτων στη ροή ή περιβαλλοντική ροή, όλα σε μονάδες με διαστάσεις μήκος/χρόνος (π.χ. m/day).

Το υπόγειο υδατικό αποτύπωμα είναι ουσιαστικά το ισοζύγιο νερού μεταξύ εισροών υδάτινων όγκων (R) και εκροών (C και E) που μπορεί να προκύψει από παρατηρήσεις ή/και από χρήση μοντέλων. Το C προέρχεται από τη χρήση υπόγειων υδάτων στην κλίμακα του ενδιαφέροντος. Το R είναι η μακροπρόθεσμη φυσική επανατροφοδότηση στο σύστημα συν η πρόσθετη επαναφόρτιση από την άρδευση και μπορεί να εκτιμηθεί μέσω μεθόδων γεωχημικών ιχνηθετών ή από υδρολογικά μοντέλα. Το E είναι η ποσότητα υπογείων υδάτων που πρέπει να διατεθεί στα επιφανειακά ύδατα για τη διατήρηση των υπηρεσιών οικοσυστήματος, η οποία είναι σημαντικότερη στις συνθήκες χαμηλής ροής. Συνεπώς η μέθοδος αποτύπωσης υπόγειων υδάτων δίνει έμφαση στη συνεισφορά των υπόγειων υδάτων στην περιβαλλοντική ροή κατά τη διάρκεια χαμηλών ροών (Gleeson et al., 2012).

Η απαιτούμενη περιβαλλοντική ροή ποταμών καθορίζεται ακριβέστερα κατά περίπτωση λαμβάνοντας υπόψη λεπτομερή υδρολογικά και οικολογικά δεδομένα καθώς και επιστημονικές διαβουλεύσεις εμπειρογνομώνων. Πιο συγκεκριμένα, η οικολογική παροχή αποτελεί την ποσότητα ροής ύδατος που διατίθεται για την αποκατάσταση και συντήρηση των διεργασιών που συντελούνται σε ένα ποτάμιο σύστημα, προς όφελος της διατήρησης των υδρόβιων οικοσυστημάτων, όταν η ανθρώπινη παρέμβαση οδηγεί στη ραγδαία μεταβολή της υδρολογικής ροής (Γεωργαλάς Σ., 2015).

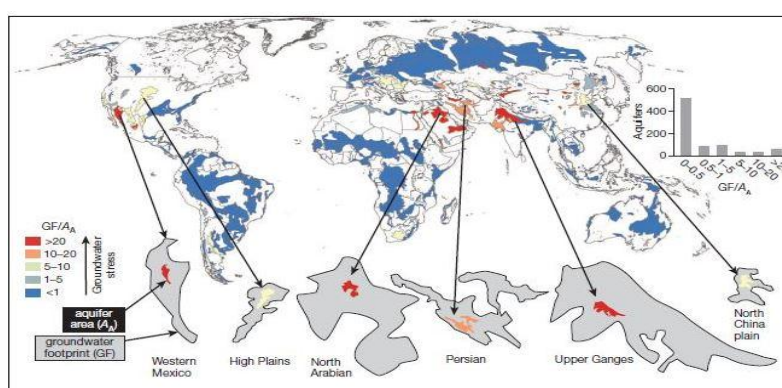
Το υπόγειο υδατικό αποτύπωμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση της δυνατότητας αύξησης της γεωργικής παραγωγής μέσω αυξημένης χρήσης υπόγειων νερών για άρδευση ενώ μπορεί να συνδυαστεί με το υδατικό αποτύπωμα και το εικονικό νερό για την αξιολόγηση της διαχείρισης των υδατικών πόρων (Gleeson et al., 2012).

Ο δείκτης χρησιμοποιήθηκε σε μελέτες από τους Gleeson (et al., 2012), για την αξιολόγηση υδροφορέων σε παγκόσμια κλίμακα. Στόχος υπήρξε ο υπολογισμός του αποτυπώματος υδροφορέων που είναι σημαντικοί για τη γεωργία και σημαντικά μεγαλύτεροι από τις γεωγραφικές τους περιοχές. Μερικοί από τους υδροφορείς που μελετήθηκαν είναι αυτοί του Άνω Γάγγη (Ινδία), ο Βόρειος και ο Νότιος Αραβικός (Σαουδική Αραβία), το Δέλτα του Νείλου (Αφρική), η Λεκάνη του Δούναβη (Ευρώπη), Κεντρικής Κοιλιάδας (Η.Π.Α.), Βόρειας Κίνας. Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν ότι οι υδροφορείς στην Ινδία, Σαουδική Αραβία, Κίνα και Αφρική διαθέτουν τα μεγαλύτερα υδατικά αποτυπώματα καθώς και τη μεγαλύτερη αναλογία υδατικού αποτυπώματος/περιοχή υδροφορέα. Πιο συγκεκριμένα η αναλογία τους ήταν πολύ μεγαλύτερη της μονάδας, γεγονός που συνεπάγεται μη βιώσιμη άντληση υπογείων υδάτων. Παρόλα αυτά, το 80% των υδροφορέων παγκοσμίως έχει αναλογία αποτυπώματος/περιοχής μικρότερη από τη μονάδα, γεγονός που αποδεικνύει ότι η υποβάθμιση των υπόγειων υδάτων δεν υφίσταται παντού (Gleeson et al., 2012 - Rodell et al., 2009 - Sophocleous M. et al., 2010 - Famiglietti J. S. et al., 2011 - Foster S. et al., 2004).

Σε άλλη μελέτη που πραγματοποιήθηκε στη Βόρεια Κολομβία, αξιολογήθηκε η λειψυδρία σε υποπεριφερειακή κλίμακα με τη χρήση του υπόγειου υδατικού αποτυπώματος. Ο δείκτης ήταν αρκετά ψηλός για τον υδροφορέα Morroa, γεγονός που δείχνει ότι είναι μη βιώσιμος (Pérez et al., 2019).

Τέλος, ο δείκτης υπογείου υδατικού αποτυπώματος έχει χρησιμοποιηθεί και στην Κρήτη (Kourgialas et al., 2017). Η μελέτη αυτή υπογραμμίζει τον κρίσιμο ρόλο του αποτυπώματος των υπόγειων υδάτων ως εργαλείο για την αειφόρο διαχείριση των υδάτινων πόρων, ιδίως στα νησιά που είναι λιγοστά σε νερό. Η Κρήτη αποτελείται από 11 κύρια συστήματα υδροφόρων οριζόντων. Τα δεδομένα που

χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση του αποτυπώματος υπογείων υδάτων σε κάθε σύστημα αφορούσαν στην επανατροφοδότηση των υπόγειων υδάτων, στις αντλήσεις μέσω 412 φρεατίων και στις περιβαλλοντικές ροές (εκροές) από 76 πηγές και 19 ρέματα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι από τα 11 συστήματα υπογείων υδάτων στην Κρήτη, τρία έχουν τιμές GF/A πάνω από ένα (Χανιά, Ηράκλειο και Σητεία). Η μέση τιμή του GF/A για όλα τα συστήματα υδροφόρου ορίζοντα στην Κρήτη είναι πολύ καλή (0.649) (Kourgialas et al., 2017). Στην Εικόνα 3 απεικονίζονται υδροφορείς, των οποίων το υπόγειο υδατικό αποτύπωμα είναι αρκετά μεγαλύτερο από την περιοχή την οποία καλύπτουν.



Εικόνα 3: Υπόγειο Υδατικό Αποτύπωμα υδροφορέων που είναι σημαντικά για τη γεωργία και σημαντικά μεγαλύτερα από τις γεωγραφικές τους περιοχές
Πηγή: Gleeson (et al., 2012)

2.2 Οικοσυστήματα Εξαρτώμενα από τα Υπόγεια Νερά

Τα οικοσυστήματα τα οποία εξαρτώνται από τα υπόγεια νερά είναι πολύπλοκα δυναμικά φυσικά οικοσυστήματα που απαιτούν πρόσβαση σε υπόγεια ύδατα για να καλύψουν όλες ή ορισμένες από τις ανάγκες τους σε νερό σε μόνιμη ή διακεκομμένη βάση, ώστε να διατηρηθούν οι κοινότητες των φυτών και ζώων, οι οικοσυστημικές διεργασίες και οι υπηρεσίες των οικοσυστημάτων (Richardson et al., 2011). Αυτά τα διαφορετικά οικοσυστήματα σχετίζονται με την χρονική μεταβλητότητα της ροής των υπογείων υδάτων που εξαρτάται από το κλίμα, τη γεωλογία και τη χρήση γης. Τα οικοσυστήματα που εξαρτώνται από τα υπόγεια νερά (GDE: Groundwater Depended Ecosystems) περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα από εξαιρετικά εξειδικευμένα είδη και οικοσυστήματα που διαθέτουν μοναδικά

βιοτικά και αβιοτικά χαρακτηριστικά τα οποία τα διαφοροποιούν από άλλα οικοσυστήματα. Αυτή η εξάρτηση από τα υπόγεια ύδατα μπορεί να είναι μεταβλητή, που κυμαίνεται από μερική και σπάνια εξάρτηση, δηλαδή εποχιακή ή επεισοδιακή, έως συνολική (πλήρης / υποχρεωτική), συνεχής εξάρτηση. Τα οικοσυστήματα μπορούν να κυμανθούν στην περιοχή από λίγα μέτρα έως πολλά τετραγωνικά χιλιόμετρα (NSW Office of Water, 2012).

Τα εξαρτώμενα από τα υπόγεια νερά οικοσυστήματα αναγνωρίστηκαν και ταξινομήθηκαν πρώτη φορά στην Αυστραλία από τους Hatton και Evans (1998) και ύστερα αναγνωρίστηκαν από τη NSW (New South Wales) μέσα στο πλαίσιο της πολιτικής υπόγειων υδάτων της NSW, Τμήμα Διατήρησης Γης και Νερού (2002).

Τα εξαρτώμενα οικοσυστήματα περιλαμβάνουν:

- Υγροβιότοπους, λίμνες, υπολείμματα χερσαίων δασών/θάμνων και παραποτάμια οικοσυστήματα όπου η εκφόρτωση των υπογείων υδάτων αποτελεί συστατικό στοιχείο του υδρολογικού περιβάλλοντος (Eamus et al., 2006, O'Grady et al., 2006a, b).
- Πηγές, όπου υπάρχει έκφραση υπογείων υδάτων (Eamus et al., 2006).
- Υδροβία οικοσυστήματα σπηλαίων και υδροφόρων υδάτων που βασίζονται σε υπόγεια ύδατα (Humphreys, 2006).
- Εκβολές και θαλάσσια ύδατα που βασίζονται στην υποβρύχια απόρριψη νερού για θρεπτικά συστατικά (Paytan et al., 2006).

Η ταξινόμηση των οικοσυστημάτων στους παραπάνω τύπους βασίζεται σε κριτήρια οικολογικής, γεωμορφολογίας και χημείας νερού (NSW Office of Water, 2012).

Με την αυξανόμενη ανάπτυξη των υπόγειων υδάτων σε όλο τον κόσμο, ήταν απαραίτητη η ανάπτυξη μίας μεθόδου για το εντοπισμό και τη χαρτογράφηση των εξαρτώμενων από τα υπόγεια νερά οικοσυστημάτων σε ευρείες κλίμακες τοπίου. Ο εντοπισμός της θέσης των οικοσυστημάτων αυτών (GDE) θα διασφαλίσει ότι οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της αυξανόμενης υδατικής ανάπτυξης θα κατανοηθούν και θα οδηγήσουν σε καλύτερη διαχείριση των υδάτινων πόρων για την προστασία των εξαρτώμενων οικοσυστημάτων (GDE), όπως στην περίπτωση της Αυστραλίας, όπου υπάρχουν διάφορα οικοσυστήματα, που αποτελούνται από υποτροπικά και

τροπικά τροπικά δάση, ημιάνυδρες και άγονες πλημμυρικές εκτάσεις, ερημικές και αλπικές ορεινές περιοχές. Αυτά τα οικοσυστήματα υποστηρίζουν πολλαπλά GDE στις ζώνες εκκένωσης των υπόγειων υδάτων (Gnangara στη Δυτική Αυστραλία, Parsons et al., 2008, artesian springs in GAB, White et al., 2015). Τα περισσότερα από αυτά τα GDE συμπίπτουν με περιοχές εντατικής άντλησης σε ολόκληρη την Αυστραλία, επομένως είναι αναγκαία η ορθολογική διαχείριση των υδάτινων πόρων για την προστασία τους (Eamus et al., 2006).

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με την υπερβολική εκμετάλλευση υπογείων υδάτων είναι ιδιαίτερα σημαντικές. Η υπερεκμετάλλευση έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των επιπέδων των υπόγειων υδάτων σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο, η οποία μειώνει τη συνεισφορά υπόγειων υδάτων στη ροή σε ποτάμια, πηγές, λίμνες και υγροβιότοπους, προκαλώντας με τον τρόπο αυτό συρρίκνωση των υδάτινων σωμάτων. Το αποτέλεσμα είναι η υποβάθμιση των οικοσυστημάτων και η σημαντική υποβάθμιση των υπηρεσιών οικοσυστημάτων. Λόγω των αυξημένων αντλήσεων υπόγειων υδάτων και επιφανειακών υδάτων για την κάλυψη αρδευτικών, βιομηχανικών, αστικών και οικιακών υδάτων υπάρχει αυξημένος κίνδυνος για το μέλλον των οικοσυστημάτων που εξαρτώνται από τα υπόγεια νερά (NSW Office of Water, 2012).

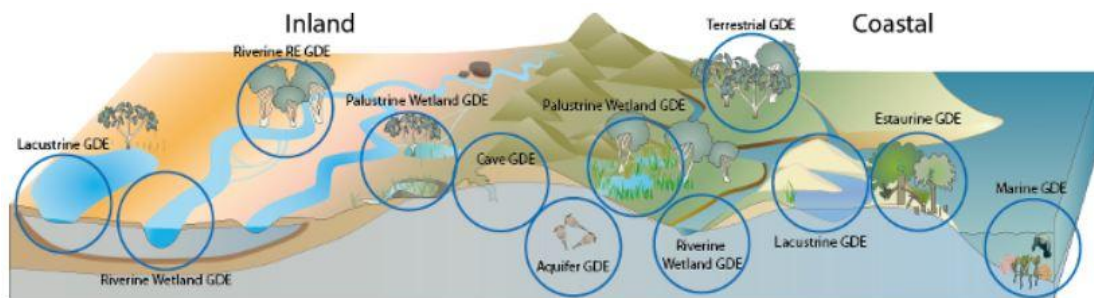
Υπάρχουν πολλές δραστηριότητες που επηρεάζουν την υγεία και την κατάσταση ενός υδροφορέα και των σχετικών εξαρτώμενων οικοσυστημάτων. Αυτές οι δραστηριότητες μπορούν να προκαλέσουν αλλαγές στην ποσότητα του νερού, την ποιότητα του νερού και να επηρεάσουν τη δομή του υδροφόρου ορίζοντα. Αυτός ο αντίκτυπος μπορεί επομένως να επηρεάσει πολλά υδραυλικά συνδεδεμένα περιβάλλοντα και μπορεί να έχει ευρεία, μακροχρόνια επίδραση στα οικοσυστήματα (NSW Office of Water, 2012).

Οι τρεις κύριες κατηγορίες που μπορούν να επηρεάσουν τα GDE είναι:

- Ποσότητα νερού
- Ποιότητα νερού
- Δομή υδροφορέων

Τα εξαρτώμενα οικοσυστήματα επηρεάζονται όταν οι μεταβολές του καθεστώτος των υπόγειων υδάτων (εποχιακή διακύμανση, βάθος των υπόγειων υδάτων, ρυθμός ροής ή πίεσης των υπόγειων υδάτων) υπερβαίνουν τα φυσικά όρια μεταβολής (Boulton, 2005). Οι επιπτώσεις προέρχονται όχι μόνο από την άντληση για άρδευση και την κατανάλωση από τον άνθρωπο, αλλά και τη μείωση της επαναφόρτισης των υπογείων υδάτων λόγω της αλλαγής της χρήσης γης, όπου η ρηχή βλάστηση αντικαθίσταται από τη βαθιά ριζωμένη (Schenk and Jackson, 2002 - Scott et al., 2014). Επιπλέον, η εκκαθάριση γης για την ανάπτυξη αστικών περιοχών ή γεωργικών εκμεταλλεύσεων μπορεί να προκαλέσει αύξηση της στάθμης των υπογείων υδάτων, υπερχείλιση, αλάτωση ή άλλες χημικές αλλαγές νερού που σχετίζονται με ανθρωπογενείς αλληλεπιδράσεις (Boulton, 2005).

Καθώς ο ανταγωνισμός για το νερό προβλέπεται να αυξηθεί στο μέλλον, η παροχή νερού για τη διατήρηση των λειτουργιών του υδάτινου και του χερσαίου οικοσυστήματος, της βιοποικιλότητας και των υπηρεσιών οικοσυστήματος θα συνεχίσει να αποτελεί πρόκληση για τη διαχείριση των υδάτινων πόρων (Boulton, 2005). Στην Εικόνα 4 φαίνεται ένα εννοιολογικό μοντέλο προσομοίωσης οικοσυστημάτων που εξαρτώνται από τα υπόγεια νερά.



Εικόνα 4: Εννοιολογικό μοντέλο οικοσυστημάτων εξαρτωμένων από τα υπόγεια νερά

Πηγή: wetlandinfo.des.qld.gov.au

2.3 Οικοσυστημικές Υπηρεσίες

Τα οικοσυστήματα υποστηρίζουν όλη την ανθρώπινη ζωή και δραστηριότητα. Τα προϊόντα και οι υπηρεσίες που παρέχουν είναι ζωτικής σημασίας για τη διατήρηση της ευημερίας, αλλά και για τη μελλοντική οικονομική και κοινωνική ανάπτυξη.

Τα εξαρτώμενα οικοσυστήματα από τα υπόγεια νερά παρέχουν πολλές οικολογικές και κοινωνικοοικονομικές αξίες (Boulton, 2005 - Tomlinson and Boulton, 2008) και η ανεπαρκής παροχή υπογείων υδάτων μπορεί να απειλήσει την ποικιλία των υπηρεσιών οικοσυστήματος. Οι οικοσυστημικές υπηρεσίες περιλαμβάνουν οικολογικές (βιοποικιλότητα), περιβαλλοντικές (διήθηση, μετριασμό των πλημμυρών, πρόληψη της διάβρωσης), οικονομικές (παραγωγή ψαριών, αλιεία, δασοκομία, γεωργία) και κοινωνικές αξίες (αναψυχή, τουρισμός) (NSW Office of Water, 2012).

Η έννοια της υπηρεσίας είναι ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο πλαίσιο για την εξέταση των δεσμών μεταξύ της λειτουργίας των οικοσυστημάτων και της ανθρώπινης ευημερίας. Υπάρχει ένα ευρύ φάσμα οικοσυστημικών υπηρεσιών, οι οποίες συχνά ταξινομούνται ιεραρχικά ως υπηρεσίες παροχής, ρύθμισης και πολιτιστικών υπηρεσιών (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2009).

Σύμφωνα με την παγκόσμια πρωτοβουλία η Οικονομία των Οικοσυστημάτων και της Βιοποικιλότητας (The Economics of Ecosystem and Biodiversity – TEEB), οι οικοσυστημικές υπηρεσίες είναι η άμεση και έμμεση συνεισφορά στην ανθρώπινη ευημερία. Διακρίνονται τέσσερις τέτοιες υπηρεσίες (TEEB):

- Υπηρεσίες Παροχής
- Ρυθμιστικές Υπηρεσίες
- Υποστηρικτικές Υπηρεσίες
- Πολιτιστικές Υπηρεσίες και Υπηρεσίες Αναψυχής.

Ένα άλλο σύστημα, που προσφέρει μια δομή που συνδέεται με το πλαίσιο του Συστήματος Περιβαλλοντικών και Οικονομικών Αποτιμήσεων του Οργανισμού Ηνωμένων Εθνών (System of Environmental-Economic Accounts, 2003), είναι το CICES: The Common International Classification of Ecosystem Services. Με βάση αυτό, οι κατηγορίες των υπηρεσιών είναι:

- Υπηρεσίες Παροχής: Περιλαμβάνονται όλα τα αγαθά και προϊόντα που προέρχονται από οικοσυστήματα και εξαρτώνται από την ύπαρξη βιολογικών πόρων.

- Ρυθμιστικές Υπηρεσίες και Διατήρησης: Περιλαμβάνονται όλοι οι τρόποι με τους οποίους τα οικοσυστήματα ελέγχουν ή τροποποιούν βιοτικές ή αβιοτικές παραμέτρους που καθορίζουν το περιβάλλον που ζει και δραστηριοποιείται ο άνθρωπος.
- Πολιτιστικές Υπηρεσίες: Περιλαμβάνονται όλες οι άυλες εκροές των οικοσυστημάτων που έχουν συμβολική ή πνευματική σημασία.

Από τα παραπάνω, ιδιαίτερα σημαντικές Υπηρεσίες που σχετίζονται με τα ύδατα, και κατ' επέκταση με τα υπόγεια ύδατα, είναι οι Παροχής και οι Ρυθμιστικές. Οι Παροχής περιλαμβάνουν τη διατροφή στην οποία συνυπολογίζεται το πόσιμο νερό. Τα οφέλη που προκύπτουν από τις Ρυθμιστικές υπηρεσίες είναι μεταξύ άλλων ο καθαρισμός του νερού, η ρύθμιση των ροών ύδατος, ο έλεγχος πλημμυρών (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2009).

Τα οικοσυστήματα των ποταμών, λιμνών και λιμνοθαλασσών, που ανήκουν και στις τρεις υπηρεσίες, παρέχουν ζωτικής σημασίας αγαθά (με κυριότερο νερό) και υπηρεσίες. Για παράδειγμα, παρέχουν νερό για άρδευση και ύδρευση, προστατεύουν τις κατοικημένες και τις αγροτικές περιοχές από πλημμύρες, ρυθμίζουν το κλίμα, προσφέρουν προϊόντα για τροφή, αλλά και ευκαιρία για έρευνα και αναψυχή. Συνεισφέρουν στον καθαρισμό των επιφανειακών υδάτων και την ανατροφοδότηση του υδροφόρου ορίζοντα με γλυκό νερό (GDE).

Καθώς οι πληθυσμιακές συγκεντρώσεις αυξήθηκαν και οι οικονομικές δραστηριότητες εντατικοποιήθηκαν, η ζήτηση για εκτάσεις (για παράδειγμα στέγαση, υποδομή και επιχειρηματικά κέντρα) αυξήθηκε και η επακόλουθη ανάπτυξη σε περιφερειακές περιοχές. Το γεγονός αυτό έχει οδηγήσει σε πολλά οικολογικά προβλήματα σε όλο τον κόσμο, αλλάζοντας τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ της ατμόσφαιρας, της υδροσφαίρας και της βιόσφαιρας, μεταβάλλοντας έτσι πολλές οικοσυστημικές υπηρεσίες, με αποτέλεσμα την ευρεία τους πτώση. Εάν αυτά καταστραφούν, συνήθως είναι δύσκολο και ενίοτε αδύνατο να αποκατασταθούν (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2009).

Η εκτίμηση των επιπτώσεων της αλλαγής χρήσης της γης στις οικοσυστημικές υπηρεσίες αποτελεί μία από τις κρίσιμες προσπάθειες στην περιφερειακή

διαχείριση και αποτελεί το ενεργό σημείο της περιφερειακής βιώσιμης ανάπτυξης. Η προστασία των οικοσυστημάτων δεν είναι μόνο ηθικό καθήκον αλλά και πρακτική αναγκαιότητα, τόσο για τις σημερινές όσο και για τις μελλοντικές γενιές (Γεωργαλάς Σ., 2015).

2.4 Νομοθετικό πλαίσιο

2.4.1 Οικοσυστήματα εξαρτώμενα από τα υπόγεια νερά

Τα υπόγεια ύδατα, οι μεγαλύτεροι πόροι γλυκού νερού στον κόσμο, είναι εξαιρετικά σημαντικοί για την αρδευόμενη γεωργία και ως εκ τούτου για την παγκόσμια επισιτιστική ασφάλεια. Ωστόσο, η εξάντληση είναι ευρέως διαδεδομένη στα μεγάλα συστήματα υπογείων υδάτων τόσο στις ημίανυδρες όσο και στις υγρές περιοχές του κόσμου. Η υπερβολική άντληση για άρδευση, με την ταυτόχρονη αργή επαναπλήρωση των υπόγειων υδάτων, είναι η κύρια αιτία της εξάντλησης των υπόγειων αποθεμάτων ενώ η κλιματική αλλαγή αναμένεται να επιδεινώσει το πρόβλημα σε ορισμένες περιοχές. Ωστόσο, οι επιπτώσεις τους στους υδάτινους πόρους είναι πιο εμφανείς σε περιφερειακή κλίμακα, όπως για παράδειγμα συμβαίνει στη Λεκάνη Απορροής του Πηνειού, όπου η εντατική γεωργική παραγωγή επηρεάζει τα υδάτινα περιβάλλον, μέσω οργανικών, ανόργανων και βακτηριολογικών ρυπαντών (λιπάσματα, φυτοφάρμακα, ζωικά απόβλητα). Για το σκοπό αυτό, απαιτείται μετασχηματισμός των μεθόδων αξιολόγησης και της διαχείρισης των υπόγειων υδατικών συστημάτων. Πρέπει να συμπληρωθούν από πιο ολοκληρωμένες στρατηγικές προσαρμοσμένες στις συγκεκριμένες κοινωνικές, οικονομικές, πολιτικές και περιβαλλοντικές συνθήκες κάθε περιφέρειας (Σαμαντζή, 2013).

Επιπλέον, τα υπόγεια ύδατα αποτελούν θεμελιώδη έλεγχο των βιοφυσικών διεργασιών που στηρίζουν τις βασικές υπηρεσίες οικοσυστήματος και τα οικοσυστήματα που εξαρτώνται από αυτά. Έρευνες οι οποίες έχουν πραγματοποιηθεί τα τελευταία χρόνια, όπως η έρευνα της WWF «Προβλήματα και Λύσεις για την Ολοκληρωμένη Διαχείριση του Νερού», δείχνουν ότι η παραγωγή τροφίμων, η ποιότητα και η ποσότητα του νερού και ο έλεγχος των πλημμυρών

επηρεάζονται από τις μεταβολές των υπογείων υδάτων, με τις ισχυρότερες αντιδράσεις σε ακραίες συνθήκες υγρού και ξηρού κλίματος (Zen, 2015). Το κλίμα επηρεάζει τα υπόγεια ύδατα, με αποτέλεσμα να επισημαίνεται ότι η στρατηγική διαχείριση των υπόγειων υδάτων μπορεί να ενισχύσει την ανθεκτικότητα των οικοσυστημάτων και των υπηρεσιών του σε ακραίες κλιματικές συνθήκες.

Τα τελευταία χρόνια έγινε αντιληπτή η αναγκαιότητα για την προστασία του περιβάλλοντος στα πλαίσια της αειφορίας και της βιώσιμης ανάπτυξης και για το λόγο αυτό έχουν πραγματοποιηθεί πολλές παγκόσμιες διασκέψεις με τη συμμετοχή των περισσότερων χωρών. Παράλληλα, οι χώρες προσπαθούν μέσω της νομοθεσίας τους να προφυλάξουν το περιβάλλον από την υποβάθμισή του.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση και η Ελλάδα έχουν ενσωματώσει στη νομοθεσία τους αρκετές νομοθετικές και κανονιστικές διατάξεις σχετικά με την προστασία του περιβάλλοντος, που αφορούν στην ατμοσφαιρική ρύπανση, τη ρύπανση των υδάτων, το φυσικό περιβάλλον, τη χλωρίδα και την πανίδα, το φαινόμενο του θερμοκηπίου, τα απορρίμματα και τα τοξικά απόβλητα, την περιβαλλοντική πολιτική, τις μελέτες περιβαλλοντικών επιπτώσεων και άλλα.

Η υποβάθμιση των υδάτων και η αύξηση ζήτησης για νερό καλής ποιότητας αποτελούν σημαντικά προβλήματα, που απασχολούν όλες τις χώρες της Ευρώπης. Το Ευρωπαϊκό νομικό πλαίσιο περιλαμβάνει πλήθος Οδηγιών για την προστασία των υδάτων. Πιο συγκεκριμένα για τα υπόγεια ύδατα ισχύει η εφαρμογή των Οδηγιών 80/68, 2006/118: Προστασία των υπόγειων υδάτων από τη ρύπανση και την υποβάθμιση (Σαμαντζή, 2013).

Η Οδηγία 80/68, 2006/118 εκτιμά ότι: «τα υπόγεια ύδατα αποτελούν πολύτιμο φυσικό πόρο, και ως τέτοιος πόρος θα πρέπει να προστατεύεται από την υποβάθμιση και από τη χημική ρύπανση. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τα οικοσυστήματα που εξαρτώνται από τα υπόγεια ύδατα καθώς και για τη χρήση των υπογείων υδάτων για παροχή νερού για ανθρώπινη κατανάλωση. Τα υπόγεια ύδατα αποτελούν το μεγαλύτερο και πιο ευαίσθητο σύστημα γλυκών υδάτων στην Ευρωπαϊκή Ένωση αλλά και κύρια πηγή εφοδιασμού του κοινού με πόσιμο ύδωρ σε πολλές περιοχές. Για την προστασία του περιβάλλοντος ως συνόλου και της

ανθρώπινης υγείας ειδικότερα, οι επιζήμιες συγκεντρώσεις επιβλαβών ρύπων στα υπόγεια ύδατα πρέπει να αποτρέπονται, να προλαμβάνονται ή να μειώνονται. Λαμβανομένης υπόψη της ανάγκης να επιτευχθούν αξιόπιστα επίπεδα προστασίας των υπόγειων υδάτων, θα πρέπει να καθορισθούν ποιοτικά πρότυπα και ανώτερες αποδεκτές τιμές και να αναπτυχθούν μεθοδολογίες με βάση μια κοινή προσέγγιση, ώστε να θεσπισθούν κριτήρια για την αξιολόγηση της χημικής κατάστασης των συστημάτων υπόγειων υδάτων».

Σημαντικό είναι να αναφερθεί και η Οδηγία 2000/60/EK η οποία αποτελεί «Πλαίσιο για τα νερά για τη θέσπιση πλαισίου Κοινοτικής Δράσης στον τομέα της Πολιτικής των Υδάτων». Η Οδηγία Πλαίσιο αναφέρει ότι «το νερό δεν είναι εμπορικό προϊόν, όπως όλα τα αγαθά, αλλά αποτελεί πολύτιμη κληρονομιά, που πρέπει να προστατεύεται και να τυγχάνει της κατάλληλης μεταχείρισης». Αναφέρεται στην προστασία των υπόγειων, εσωτερικών, μεταβατικών, παράκτιων υδάτων, αλλά και των οικοσυστημάτων της Ευρωπαϊκής Ένωσης μέσω δράσεων, που πρέπει να έχουν ολοκληρωθεί σε σαφώς καθορισμένα χρονικά όρια, καθώς και στη διαχείριση υδατικών πόρων σε επίπεδο Λεκάνης Απορροής Ποταμού ή Ποταμών. Η διαχείριση των υδατικών πόρων γίνεται ανά λεκάνη ή ομάδα λεκανών απορροής, με διασυνοριακή συνεργασία μεταξύ χωρών, εφαρμογή της αρχής «ο ρυπαίνων πληρώνει», ενεργό συμμετοχή όλων των εμπλεκόμενων φορέων στη διαχείριση των υδάτων, καθώς και του κοινού στη λήψη αποφάσεων.

Ο βασικός στόχος της Οδηγίας αναφέρεται στην επίτευξη μέχρι το 2015 της καλής κατάστασης για όλα τα επιφανειακά και υπόγεια νερά στην Ευρώπη με τη βοήθεια ολοκληρωμένων σχεδίων διαχείρισης σε επίπεδο λεκάνης απορροής ποταμού. Ως καλή κατάσταση επιφανειακών υδάτων η Οδηγία ορίζει την κατάσταση ενός επιφανειακού υδατικού συστήματος, η οποία χαρακτηρίζεται τουλάχιστον «καλή» τόσο από οικολογική όσο και από χημική άποψη.

Για τα υπόγεια ύδατα τα κράτη μέλη υποχρεούνται να ελέγξουν τη ρύπανση και υποβάθμιση αυτών, καθώς και την υπερεκμετάλλευση τους, λαμβάνοντας τα κατάλληλα μέτρα, προκειμένου κάθε συγκέντρωση ρύπου, που οφείλεται σε ανθρώπινη δραστηριότητα, να μειωθεί.

2.4.2 Οικολογική παροχή

Για την οικολογική παροχή έχουν αναπτυχθεί πολλοί ορισμοί. Έχοντας ως γνώμονα τις διεθνείς δράσεις για την επίτευξη της οικολογικής παροχής και τη σημασία της στα κατάντη οικοσυστήματα οι Dyson (et al., 2003), υιοθέτησαν μια γενική περιγραφή του όρου ως την ποσότητα νερού που παρέχεται σε έναν ποταμό, υγρότοπο ή παράκτια ζώνη με σκοπό τη διατήρηση των οικοσυστημάτων και των οφελών που απορρέουν από αυτά σε περιοχές όπου συναντώνται ανταγωνιστικές χρήσεις νερού και ρυθμιζόμενες παροχές. Ένας ορισμός που συχνά συναντάται σε επιστημονικά άρθρα είναι ο εξής: Η οικολογική παροχή έχει ως σκοπό να συντηρήσει να προστατέψει και να αποκαταστήσει τις βιολογικές, γεωμορφολογικές, φυσικές και χημικές διεργασίες που συντελούνται σε ένα ποτάμιο σύστημα, οι οποίες διαμορφώνουν και διατηρούν τα υδρόβια οικοσυστήματα (Suen, 2011).

Η επιβίωση των υδάτινων οικοσυστημάτων και των έμβιων όντων που υπάρχουν σε αυτά είναι συνυφασμένη με την ύπαρξη υδάτων. Η πιο σημαντική διαδικασία είναι η διατήρηση του ρυθμού με τον οποίο τροφοδοτούνται τα οικοσυστήματα με νερό, ο οποίος μεταφράζεται στη ροή των ποτάμιων συστημάτων. Διαταραχές που μπορεί να υποστεί η υδρολογική δίαιτα μπορούν να προκαλέσουν καταστροφές στη μορφή, τη λειτουργία ή και στην ίδια την ύπαρξη του οικοσυστήματος. Παρόλα αυτά, και μία μικρή μεταβολή μπορεί να επηρεάσει τις διεργασίες που συντελούνται σε αυτό (Suen, 2011).

Τα τελευταία χρόνια οι κυβερνήσεις ανά τον κόσμο έχουν σημειώσει σημαντική πρόοδο στην αναγνώριση της έννοιας της οικολογικής παροχής και την ανάδειξη της σημασίας της για τα οικοσυστήματα. Σύμφωνα με έρευνα που διεξήγαγε η WWF (Le Quesne et al, 2010), σε όλα τα μεγάλα κράτη πλέον συζητείται το θέμα της οικολογικής παροχής και παράλληλα ενσωματώνεται στη χάραξη στρατηγικής σχετικά με τα ζητήματα του νερού. Παράλληλα, έχουν θεσπιστεί νόμοι που καθορίζουν τις μεθόδους εκτίμησής της οικολογικής παροχής, καθώς και την ελάχιστη τιμή της (Γεωργαλάς Σ., 2015).

Στην Ελλάδα, σύμφωνα με την ΚΥΑ 49828/2008 (ΦΕΚ 2464 Β'/2008), μέχρι να γίνει καθορισμός των κριτηρίων της ελάχιστης απαιτούμενης οικολογικής παροχής, ως ελάχιστη απαιτούμενη οικολογική παροχή νερού που παραμένει στη φυσική κοίτη υδατορεύματος, πρέπει να εκλαμβάνεται το μεγαλύτερο από τα παρακάτω μεγέθη:

- 30% της μέσης παροχής των θερινών μηνών Ιουνίου-Ιουλίου-Αυγούστου ή
- 50% της μέσης παροχής του μηνός Σεπτεμβρίου ή
- 30 lt/sec σε κάθε περίπτωση.

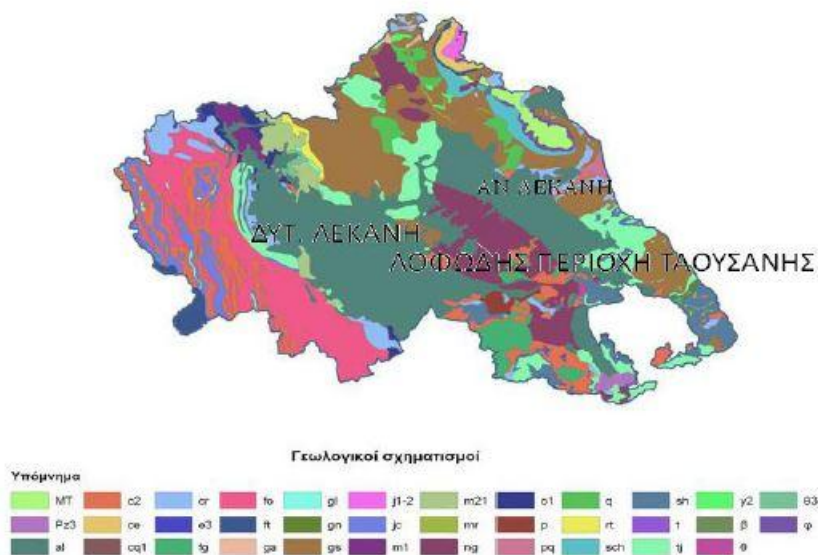
Κεφάλαιο 3^ο

Η περιοχή μελέτης

3.1 Χαρακτηριστικά ευρύτερης περιοχής

Η Θεσσαλία είναι ένα γεωγραφικό διαμέρισμα της Ελλάδας, με συνολική έκταση 14.036 τετραγωνικά χιλιόμετρα και αντιπροσωπεύει περίπου το 11% της συνολικής έκτασης της ελληνικής επικράτειας. Αποτελεί τη δεύτερη μεγαλύτερη καλλιεργήσιμη και αρδευόμενη περιοχή στην Ελλάδα. Οι κύριες καλλιέργειές της χαρακτηρίζονται ως αρκετά υδροβόρες, όπως είναι για παράδειγμα το καλαμπόκι και βαμβάκι. Για το λόγο αυτό, οι υψηλές απαιτήσεις σε νερό έχουν οδηγήσει στην πίεση του υπόγειου υδροφόρου συστήματος. Ο υπόγειος υδροφορέας της Θεσσαλίας υπήρξε ο πρώτος που μελετήθηκε τη δεκαετία του 1970, με την πρώτη μελέτη να εκπονείται το 1974 για το Υπουργείο Γεωργίας (Sogreah-Grenoble). Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν δύο αναρρυθμίσεις, που στηρίχθηκαν στα αποτελέσματα της πρώτης, ενώ γενικά έχουν δημοσιευθεί αρκετές επιστημονικές μελέτες που μελετούν τα υπόγεια υδροφόρα συστήματα της Θεσσαλίας.

Υδρογεωλογικά η Θεσσαλία χωρίζεται σε δύο λεκάνες, τη Δυτική και την Ανατολική. Η λοφώδης περιοχή Ταουσάνης αποτελεί το φυσικό διαχωριστικό όριο μεταξύ των δύο λεκανών, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.



Εικόνα 5: Υδρογεωλογικές Λεκάνες Θεσσαλίας
Πηγή: Τζιάτζιος (2012)

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στον τέως Καποδιστριακό Δήμο Ποταμιάς, στην επαρχία της Ελασσόνας. Η επαρχία έχει έκταση 1.708 τετραγωνικά χιλιόμετρα και ο συνολικός πληθυσμός σύμφωνα με την απογραφή του 2011 είναι 30.599 κάτοικοι (2011, Στατιστική Υπηρεσία). Τοποθετείται στο βόρειο-δυτικό τμήμα της Θεσσαλίας (Εικόνα 6).

Η μορφολογία του εδάφους της είναι κυρίως ορεινή με ποσοστό 78% και πεδινή με ποσοστό 22%. Στο βόρειο-ανατολικό τμήμα της βρίσκεται ο Όλυμπος, το υψηλότερο βουνό της Ελλάδας και των Βαλκανίων.

Η περιοχή της Ποταμιάς βρίσκεται στο νότιο-ανατολικό τμήμα της επαρχίας της Ελασσόνας, και μέχρι το 1999 ήταν Καποδιστριακός Δήμος με έδρα το Βλαχογιάννι, περιλαμβάνοντας τα εξής Δημοτικά Διαμερίσματα: Αμούρι, Δομένικο, Μαγούλα, Μεγάλο Ελευθεροχώρι, Πραιτώρι, Συκέα και Ανάληψη. Σήμερα έδρα του Δήμου είναι η Ελασσόνα.

Η μορφολογία της περιοχής της Ποταμιάς είναι σε μεγαλύτερο βαθμό πεδινή, με μία μικρή εξαίρεση στο Ελευθεροχώρι που είναι ημιορεινή (Βασιλείου, 2011).

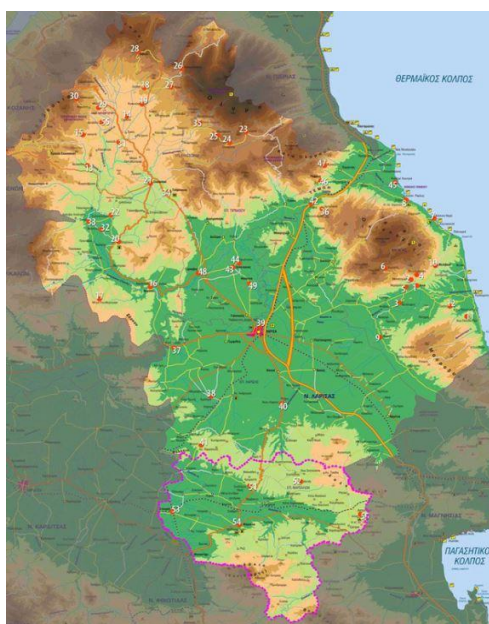


Εικόνα 6: Επαρχία Ελασσόνας
Πηγή: el.wikipedia.org

3.2 Γεωμορφολογικές συνθήκες

3.2.1 Γεωμορφολογία ευρύτερης περιοχής

Η ευρύτερη περιοχή μελέτης (Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας) ανήκει γεωλογικά στην Πελαγονική ζώνη. Με βάση την ταξινόμηση του επιφανειακού αναγλύφου αποτελεί μορφοδομική μονάδα τέταρτης (4^{ης}) τάξης, που ονομάζεται Πελαγονικό τέμαχος. Το τέμαχος ανήκει στο μεγάλο σύμπλεγμα των τεκτονικών καλυμμάτων, εξαρμάτων-βυθισμάτων της Πελαγονικής (μορφοδομική μονάδα 3^{ης} τάξης), που με τη σειρά του ανήκει στην Ηπειρωτική περιοχή (μορφοδομική μονάδα 2^{ης} τάξης) του Νεοελληνικού Μορφοδότηματος (μορφοδομική μονάδα 1^{ης} τάξης) (Μπέλεσης, 2012). Στην Εικόνα 7 παρουσιάζεται η γεωμορφολογία της ευρύτερης περιοχής..



Εικόνα 7: Γεωμορφολογικός χάρτης ευρύτερης περιοχής

Πηγή: farsala.gr

Ο ποταμός που κυριαρχεί στο υδρογραφικό δίκτυο είναι ο Πηνειός, που συγκεντρώνει σχεδόν το σύνολο της επιφανειακής απορροής του Θεσσαλικού κάμπου, με συνολικό μήκος στα 205 χιλιόμετρα. Εισέρχεται από την ανατολική στη δυτική πεδιάδα αναπτύσσοντας μαιανδρισμούς. Έπειτα, ενώνεται με τον Τιταρήσιο ποταμό και εξέρχεται προς τα βόρεια μέσω του στενού της Ροδιάς και της κοιλάδας

των Τεμπών, εκβάλλοντας τελικά στο Αιγαίο Πέλαγος, μεταξύ της Όσσας και του κάτω Ολύμπου.

Το λιμναίο, ποταμολιμναίο και παραποτάμιο περιβάλλον του Πηνειού έχει επίδραση σε όλη την κεντρική λεκάνη της Λάρισας. Το βόρειο-δυτικό τμήμα της Θεσσαλίας έχει δεχθεί επιρροές από τον Τιταρήσιο ποταμό, με φερτά υλικά, προϊόντα διάβρωσης της λεκάνης απορροής του, τα οποία αποτέθηκαν μετά την έξοδο του Τιταρήσιου από το ορεινό σύμπλεγμα στο τεκτονικό βύθισμα Αμπελώννα-Τυρνάβου.

Η μεταφορική ικανότητα του νερού σε συνδυασμό με την κοκκομετρία, το ειδικό βάρος των φερτών υλικών, την τεκτονική εξέλιξη, την κλιματολογία οδήγησαν στην εξάπλωσή τους. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός μεγάλου κώνου κορημάτων με διαφοροποιημένη οριζόντια και κάθετη εξάπλωση και με υπόβαθρο τα νεογενή (μάργες) ή σχιστόλιθους της περιοχής (Βασιλείου, 2011).

3.2.2 Γεωμορφολογία Περιοχής Μελέτης

Η υπολεκάνη της Ποταμιάς ανήκει στην ευρύτερη «Λεκάνη της Ελασσόνας» και αποτελεί το νότιο-δυτικό της τμήμα, επικοινωνώντας με τη δεύτερη υπολεκάνη αυτή της Γαλανόβρυσης-Τσαρίτσανης στο βόρειο-ανατολικό τμήμα. Το χαμηλό τμήμα της Ποταμιάς εκτείνεται μεταξύ των χωριών Ευαγγελισμός, Βλαχόγιαννι κατά τον άξονα Βορράς-Νότος και Πραιτώρι, Αμούρι, Δομένικο, Λεύκη κατά τον άξονα Δύση-Ανατολή. Οι δύο υπολεκάνες επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω της κοιλάδας του Αγιονερίου που τη διασχίζει ο Ελασσονίτικος. Ο ποταμός Ελασσονίτικος διασχίζει τη νότιο-δυτική λεκάνη της Ποταμιάς με κατεύθυνση από το Βορρά προς το Νότο, ενώνεται στην περιοχή του Αμουρίου με τον ποταμό Βούλγαρη και σχηματίζουν τον Τιταρήσιο. Η βασική ροή του Βούλγαρη προέρχεται από τις εκροές των πηγών του Κεφαλόβρυσου.

Το χαμηλό τμήμα της λεκάνης της Ποταμιάς έχει έκταση 107,75 km². Από τα Δυτικά προς τα Βορειοδυτικά οριοθετείται από τα Αντιχάσια Όρη, προς το Νότο από το όρος Ζάρκος και προς τα Ανατολικά από τα όρη Τρόχαλος και Παπαλίβαδος. Σε όλη σχεδόν την έκταση της λεκάνης το ανάγλυφο είναι ομαλό και το υψόμετρο του περίπου στα 200 μέτρα (Κεφαλόβρυσος, Ευαγγελισμός, Δαμάσι). Προς τα δυτικά

(Βερδικούσα) αυξάνεται το υψόμετρο πλησιάζοντας τα 400 μέτρα, όπως αντίστοιχα και στα ανατολικά της περιοχής, όπου συναντάται το Στεφανόβουνο, πλησιάζοντας έως και τα 800 μέτρα.

3.2.3 Ανάγλυφο

Το ανάγλυφο μιας περιοχής είναι το σύνθετο αποτέλεσμα της τεκτονικής και γεωμορφολογικής εξέλιξης, καθώς και τη λιθολογίας και των πετρωμάτων. Κατά συνέπεια οι μορφολογικές παράμετροι μεταβάλλονται παρέχοντας ενδείξεις για την υδρολογική ισορροπία (Hirsch, 1962).

Η περιοχή μελέτης χαρακτηρίζεται από ημιορεινό έως λοφώδες ανάγλυφο, με 100 έως 500 περίπου μέτρα στα βόρεια, στα νότια και δυτικά και στα ανατολικά περίπου έως 800 μέτρα, ενώ στα κεντρικά χαρακτηρίζεται πεδινό το έδαφος φτάνοντας περίπου τα 100 μέτρα.

Σύμφωνα με απόσπασμα του εδαφολογικού χάρτη της Ελλάδας (Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας), η περιοχή μελέτης σύμφωνα με τις κλίσεις του ανάγλυφου της αντιστοιχίζεται σε τρεις κλάσεις. Αυτές είναι οι 0-6%, 6-18%, 18-40% (Πίνακας 1). Πιο αναλυτικά στην πρώτη κλάση (0-6%) ανήκουν οι ελαφρές κλίσεις, στη δεύτερη (6-18%) οι ελαφρές και μέτριες κλίσεις και καταληκτικά στην τρίτη κλάση (18-40%) οι μέτριες και ελαφρές και ελαφρές και απότομες κλίσεις. Η μέση κλίση της περιοχής έρευνας είναι 5,20% (Βασιλείου, 2011).

Πίνακας 1: Εδαφολογικές κλίσεις περιοχής μελέτης (Βασιλείου, 2011).

Κλίσεις %	Συνολικό εμβαδόν επιφάνειας m ²	Ποσοστό %
0-6	105683086.02	32,5
6-18	167073802.3	51,4
18-40	52409901.22	16,1
Συνολική έκταση	325166789.5	100

3.3 Γεωλογική Δομή

Η περιοχή μελέτης από γεωτεκτονικής άποψης ανήκει στη μεταμορφωμένη Πελαγονική Ζώνη με μάρμαρα, κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους, γνεύσιους και σχιστόλιθους και την Υποπελαγονική Ζώνη με ασβεστολιθικά ιζήματα και οφιόλιθους. Σήμερα θεωρείται ότι οι δύο αυτές ζώνες ανήκουν σε μία κατηγορία, μία ενιαία ζώνη, την Πελαγονική, η οποία διακρίνεται σε Πελαγονική Ζώνη μη μεταμορφωμένων σχηματισμών και σε Πελαγονική Ζώνη μεταμορφωμένων σχηματισμών (Κατσικάτσος, 1992).

Η Πελαγονική ζώνη συγκροτείται από κρυσταλλικά πετρώματα που διαχώριζαν κατά τη διάρκεια του Μεσοζωικού δύο ωκεάνιες αύλακες, την Πινδική αύλακα στα δυτικά της από την αύλακα του Αξιού στα ανατολικά της. Η μεσοζωική ιζηματογένεση θεωρείται ανθρακική, καθαρά νηριτική με οφειολιθικές μάζες.

Η Πελαγονική ζώνη έχει διεύθυνση ΒΒΔ-ΝΝΑ, εκτεινόμενη από την πρώην Γιουγκοσλαβία προς τα ελληνικά όρη, τα οποία είναι αυτά του Βόρα, του Βέρνου, του Βερμίου, των Πιερίων, του Ολύμπου, της Βόρειας Εύβοιας και έπειτα στις Σποράδες. Γνώρισμά της είναι ότι τόσο οι σχηματισμοί του υποβάθρου της, όσο και του προοφιολιθικού ιζηματογενούς καλύμματος της είναι εξ ολοκλήρου μεταμορφωμένοι (Βασιλείου, 2011, Τζιάτζιος, 2012).

Οι μεταμορφωμένοι σχηματισμοί της Πελαγονικής ζώνης αποτελούνται από προαλπικής και αλπικής ηλικίας πετρώματα. Στα προαλπικά πετρώματα ανήκουν οι μιγματίτες, αμφιβολίτες, γνεύσιοι και γρανιτοειδή πετρώματα. Τα γρανιτοειδή πετρώματα έχουν μετατραπεί σε σχιστοειδείς γνεύσιους, οφθαλμογνεύσιους και φυλλονίτες εξαιτίας της έντονης παραμόρφωσης που έχουν δεχθεί, ενώ διατηρούν σε ορισμένες μόνο θέσεις το γρανιτικό τους ιστό (Περράκη, 2003).

Στα πετρώματα αλπικής ηλικίας περιλαμβάνονται:

- Μία μεταηφαίστειοϊζηματογενής σειρά Περμοτριάδικής ηλικίας, που αποτελείται από μεταμορφωμένα πετρώματα, ιζηματογενούς και ηφαιστειακής προέλευσης. Στους μεσαίους και ανώτερους

στρωματογραφικούς ορίζοντες υπάρχουν αδροκρυσταλλικά μάρμαρα πάχους έως και 100 μέτρων. (Μιγκίρος, 1983).

- Υπερκείμενα της μεταηφαιστειογενούς σειράς υπάρχουν μάρμαρα ηλικίας Α.Τριαδικού-Μ. Ιουρασικού.

Από τη μελέτη των Γεωλογικών Χαρτών του ΙΓΜΕ (Φύλλα Ελασσόνας και Φαρκαδώνας, κλίμακας 1:50.000, Τριανταφυλλίδης, 1987) και της εργασίας SOGREAH 1975, η στρωματογραφική και λιθολογική διάθρωση της λεκάνης της Ποταμιάς που προκύπτει, είναι η εξής:

- Τεταρτογενές και Πλειστόκαινο

Οι Τεταρτογενείς σχηματισμοί είναι ολοκαινικής ή πλειστοκαινικής ηλικίας αποθέσεις, με βασικές χαρτογραφικές μονάδες τα αλλούβια, τα πλευρικά κορήματα και τους κώνους κορημάτων, αλλά και αναβαθμίδες, παράκτιες αποθέσεις.

Πιο συγκεκριμένα οι ολοκαινικές αποθέσεις περιλαμβάνουν:

- Σύγχρονες αποθέσεις: παρατηρούνται στις κοίτες των ποταμών και των χειμάρρων και στις νέες αναβαθμίδες τους. Αποτελούνται από κροκάλες και λατύπες με το μέγεθός τους να ποικίλει, όπως εξίσου και η λιθολογική τους σύσταση, και άμμους.
- Αλλουβιακές αποθέσεις: ποταμολιμναίες αποθέσεις που αποτελούνται από άμμους, αργίλους και κροκάλες.
- Ελουβιακός μανδύας: αποτελείται από λεπτομερή ως αδρομερή μη συγκολλημένα προϊόντα αποσάθρωσης των υποκείμενων στρωμάτων.
- Ποτάμιες αναβαθμίδες: αδρομερή υλικά που το μέγεθός τους ποικίλει και λεπτομερή υλικά.

Οι ολοκαινικές αποθέσεις έχουν πάχος μέχρι τα 25 μέτρα.

- Νεογενές

Οι Νεογενείς σχηματισμοί είναι πλειοκαινικής και μειοκαινικής ηλικίας σχηματισμοί, αντιπροσωπεύονται από όλες τις φάσεις ιζημάτων (θαλάσσια, λιμναία, χερσαία ή ανάμεικτα) και σχηματίζουν είτε σημαντικού πάχους αποθέσεις σε λεκάνες και βυθίσματα είτε μικρότερης έκτασης και πάχους εμφανίσεις σε μικρές κλειστές λεκάνες ή στις παράκτιες, παραλίμνιες ή παραποτάμιες περιοχές.

Οι σχηματισμοί ή στρώματα που χαρακτηρίζουν τη συγκεκριμένη ομάδα είναι μάργες, άργιλοι: οι μάργες είναι υπόλευκες, εύθρυπτες και σπανιότερα σκληρές, εναλλασσόμενες με αργιλομαργαϊκό υλικό και με ενστρώσεις μαργαϊκών ασβεστόλιθων με πάχος έως 50 εκατοστά. Περιέχουν ασύνδετες κροκάλες, λατύπες ανθρακικές και γνευσιακές καθώς και κροκαλοπαγή και λατυποπαγή με στοιχεί ανθρακικά, γνευσιακά και χαλαζιακά. Επίσης περιλαμβάνονται και οι ψαμμίτες με πάχος περίπου 180 μέτρα.

- Παλαιοζωϊκό

Ο σχηματισμός αποτελείται από γνεύσιους: πρόκειται για διμαρμαρυγιακούς γνεύσιους που συχνά εμφανίζονται οφθαλμώδεις. Συνήθως είναι ανοιχτόχρωμοι, υποπράσινοι έως υπόλευκοι. Το ορατό πάχος είναι μεγαλύτερο από τα 1200 μέτρα.

- Οφιολιθικά πετρώματα

Αποτελούνται κυρίως από σερπεντινίτες πρασίνου έως καστανοπράσινου χρώματος, πολύ τεκτονισμένους και συχνά σχιστοποιημένους με πάχος που φθάνει έως και 100 μέτρα.

- Αυτόχθονη σειρά

Μάρμαρα: αποτελούν μία συνεχή σειρά με μεγάλο πάχος, που καλύπτεται τεκτονικά από τους παλαιοζωϊκούς (νεοπαλαιοζωϊκούς) σχηματισμούς της Πελαγονικής ζώνης. Έχουν ορατό πάχος μέχρι τα 750 μέτρα.

- Πελαγονική ζώνη, Μεσοτριαδικό-Ιουρασικό

Μάρμαρα: αποτελούν την κανονική προς τα πάνω εξέλιξη των παλαιοζωϊκών-κάτω μεσοτριαδικών σχηματισμών. Σε ορισμένες θέσεις γίνονται δολομιτικά ή ακόμη αδροκρυσταλλικοί δολομίτες (κυρίως προς τα κάτω).

- Νεοπαλαιοζωϊκό, Κάτω-Μέσο Τριαδικό

Οι σχηματισμοί αυτοί καταλαμβάνουν μεγάλη έκταση, ο χωρισμό τους είναι δύσκολος και αποτελούνται από:

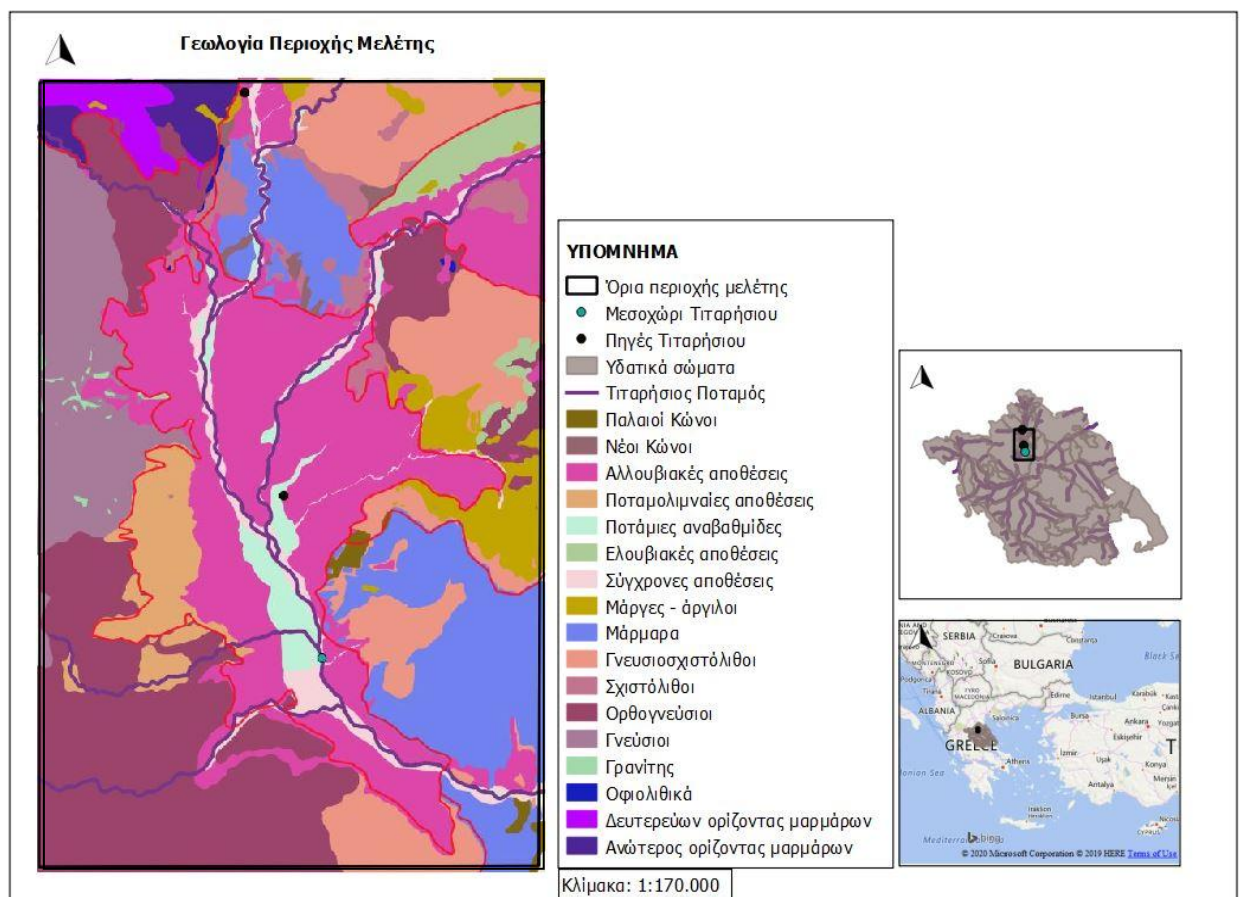
- Σχιστόλιθους: νεότερα μέλη νεοπαλαιοζωϊκών, κάτω-μέσο τριαδικών σχηματισμών και είναι οι εξής:
 - Σερικιτικοί σχιστόλιθοι

- Μαρμαρυγιακοί ακτινολιθικοί σχιστόλιθοι
- Χλωριτικοί σερικιτικοί σχιστόλιθοι.

Το πάχος τους φθάνει έως και τα 150 μέτρα.

- Γνευσιοσχιστόλιθοι, γνεύσιοι, σχιστόλιθοι με ενστρώσεις ορθογνεύσιων και μαρμάρων. Είναι οι κύριοι σχηματισμοί των νεοπαλαιοζωικών, κάτω-μέσο τριαδικών σχηματισμών. Μπορούν να διακριθούν στους εξής πετρογραφικούς τύπους: επιδοτιτικοί διμαρμαρυγιακοί γνευσιο - σχιστόλιθοι και γνεύσιοι, επιδοτιτικοί-αμφιβολιτικοί γνεύσιοι, πρασινοσχιστόλιθοι (χλωριτικοί, επιδοτιτικοί, ακτινολιθικοί), μαρμαρυγιακοί και αμφιβολικοί σχιστόλιθοι.

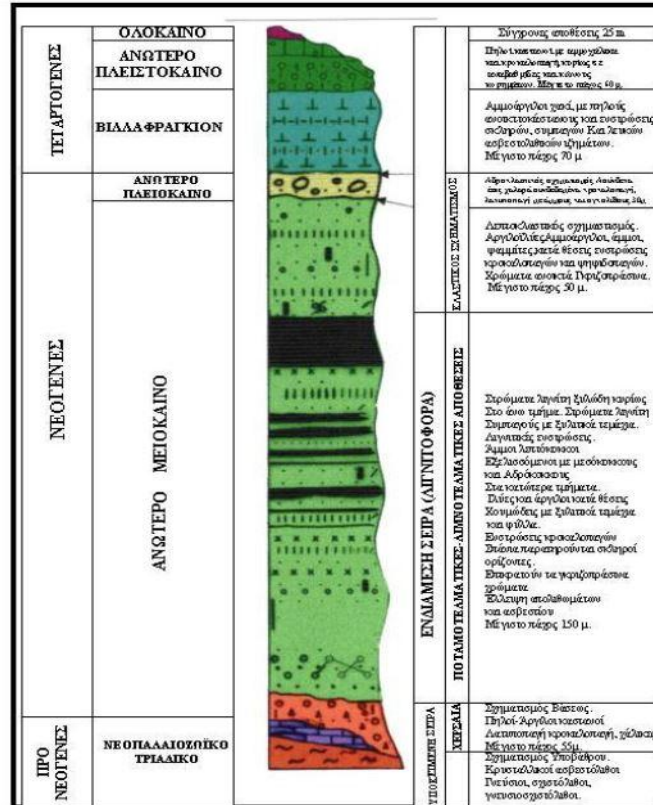
Το συνολικό πάχος του σχηματισμού είναι περίπου στα 600 μέτρα (Βασιλείου, 2011). Η γεωλογία της περιοχής μελέτης παρουσιάζεται στην Εικόνα 8.



Εικόνα 8: Χάρτης γεωλογίας περιοχής μελέτης

Πηγή: Φύλλα Ελασσόνας και Φαρκαδώνας του ΙΓΜΕ (1987α, 1987β)

Η γεωλογία της ευρύτερης περιοχής, όπως και της περιοχής μελέτης, μελετήθηκε και δημιουργήθηκε από τα φύλλα Ελασσόνας και Φαρκαδόνας του ΙΓΜΕ (1987α, 1987β) σε κλίμακα 1:50.000. Η γεωλογική της τομή φαίνεται στην Εικόνα 9.



Εικόνα 9: Γεωλογική τομή περιοχής μελέτης

Πηγή: Βασιλείου (2011)

3.4 Τεκτονική

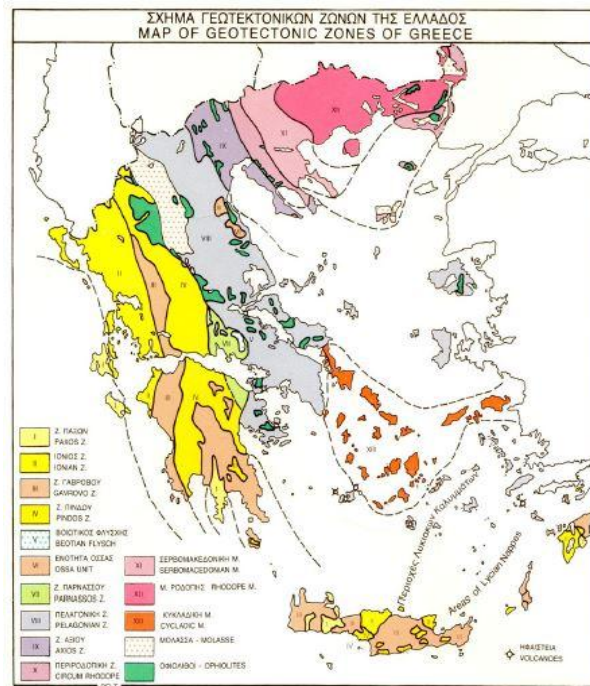
Η ευρύτερη περιοχή μελέτης ανήκει τεκτονικά στην επιμήκη ενδοορεινή τεκτονική λεκάνη της Ανατολικής Θεσσαλικής πεδιάδας (Λάρισας), που έχει σχηματιστεί παράλληλα με τη ΒΔ-ΝΑ διεύθυνση των Εσωτερικών Ελληνίδων. Η περιοχή μαζί με τα όρη που την περιβάλλουν από ΒΔ, ΒΑ και ΝΑ αποτελούνται κυρίως από κρυσταλλοσχιστώδη πετρώματα και ανθρακικά της Πελαγονικής ζώνης.

Η λεκάνη αυτή δημιουργήθηκε κατά το Πλειόκαινο (ή ανώτερο Μειόκαινο) σαν αποτέλεσμα της διαστολής που ακολούθησε την τελευταία αλπική ορογενετική φάση (Αλπιδική) που διαμόρφωσε οριστικά το ορογενές και επηρέασε την περιοχή από το Ηώκαινο έως το Μέσο Μειόκαινο. Η διαστολή έλαβε χώρα σε δύο κύριες

φάσεις. Η πρώτη φάση διήρκησε από το Πλειόκαινο έως το Μέσο Πλειστόκαινο, είχε διεύθυνση ΒΑ – ΝΔ και δημιούργησε τα μεγάλα ΒΔ – ΝΑ διευθύνσεως ρήγματα τα οποία καθορίζουν τη μορφολογική διάταξη και το μέγεθος της λεκάνης μέχρι και σήμερα. Η δεύτερη φάση διαστολής διαρκεί από το Μέσο Πλειστόκαινο έως σύγχρονα, έχει διεύθυνση Β – Ν έως ΒΒΑ – ΝΝΔ και δημιούργησε τα Α έως ΔΒΔ – ΑΝΑ διευθύνσεως ρήγματα, τα οποία καθόρισαν μετέπειτα την εσωτερική μορφολογία της λεκάνης. Στα πλαίσια αυτών των ρηξιγενών δομών δημιουργήθηκε ένα σύνθετο ποταμολιμναίο – ποταμοχερσαίο περιβάλλον απόθεσης, εντός του οποίου αποτέθηκαν ιζήματα με μέγιστο πάχος περίπου 500 μέτρα (Doutsos 1980).

Το περιβάλλον αυτό καθορίστηκε από την αρχική ανάπτυξη μιας μεγάλης λίμνης με μεταβλητό βάθος που είχε μέγιστο μερικές δεκάδες μέτρα και με τα νερά της κάλυπτε και τις δύο Θεσσαλικές πεδιάδες ενώ κατά το Μέσο Πλειόκαινο απομονώθηκαν μεταξύ τους. Η λίμνη τροφοδοτούνταν με μεγάλο ποσοστό ιζημάτων από την αποσάθρωση των γύρω ορεινών και δημιουργούσαν δελταϊκές αποθέσεις, προελαυνούσες στο εσωτερικό της λίμνης, όπως το δέλτα της Ροδιάς. Περίπου σε αυτήν την εποχή ο Πηνειός άρχισε να σχηματίζει το δέλτα του στο Αιγαίο και το γεγονός αυτό συνδέεται με τη διαμόρφωση της κοιλάδας των Τεμπών η οποία επέτρεψε την σταδιακή εκκένωση της Θεσσαλικής λίμνης από τα νερά της και στη θέση της αναπτύχθηκε ένα σύστημα απορροής. Οι μεταβολές αυτές είχαν ως αποτέλεσμα τις διαφοροποιήσεις στο περιβάλλον απόθεσης, ανάλογο με την έκταση της λίμνης, τα σημεία τροφοδοσίας με κλαστικά υλικά στη λεκάνη και τη διάταξη του υδρογραφικού δικτύου. Η αλλαγή του τεκτονικού καθεστώτος από το Μέσο Πλειστόκαινο και η ανάπτυξη μιας δεύτερης γενιάς ρηγμάτων διεύθυνσης Α έως ΔΒΔ – ΝΑ δημιούργησε μεταβολές στην τοπογραφία της λεκάνης της Λάρισας και συγκεκριμένα μια ΒΔ λεκάνη – τη λεκάνη του Τυρνάβου – που κατά το Πλειστόκαινο ήταν λίμνη και στη συνέχεια το αλλουβιακό πεδίο του Πηνειού και του Τιταρήσιου ποταμού, ένα τοπογραφικό υψηλό που την οριοθετεί – της Χασάμπαλης – και μια λεκάνη στο ΝΑ τμήμα της πεδιάδας – της Κάρλας – η οποία μέχρι πρόσφατα αποτελούσε το υπόλειμμα της πλειοπλειστοκαινικής λίμνης, αλλά σήμερα έχει αποξηρανθεί και ανασυσταίνεται. Κατά το διάστημα αυτό η λεκάνη του Τυρνάβου αποτελεί πλέον το κυρίως αποθετικό κέντρο στη Θεσσαλική πεδιάδα

λόγω της καταβύθισης της από τα ρήγματα που την οριοθετούν και περιλαμβάνει μια σημαντική πλειστοκαινική – ολοκαινική ποταμολιμναία και ποταμοχερσαία ιζηματογένεση (Βασιλείου, 2011). Στην Εικόνα 10 παρουσιάζεται το σχήμα γεωτεκτονικών ζωνών Ελλάδος.



Εικόνα 10: Γεωτεκτονικές Ζώνες Ελλάδος

Πηγή: orykta.gr

3.5 Κλιματολογικές συνθήκες

Τα στοιχεία του κλίματος μιας περιοχής, όπως για παράδειγμα η βροχόπτωση και η θερμοκρασία, συμβάλλουν στον καθορισμό του υδρολογικού ισοζυγίου μια λεκάνης και πιο συγκεκριμένα αφορούν στην κατείσδυση, την εξατμισοδιαπνοή και την επιφανειακή απορροή.

Η ευρύτερη περιοχή μελέτης χαρακτηρίζεται από ηπειρωτικό κλίμα, και περισσότερο συγκεκριμένα από μεταβατικό, από το μεσογειακό προς το μεσοευρωπαϊκό, με ψυχρό-υγρό χειμώνα και θερμό-ξηρό καλοκαίρι. Οι ορεινοί όγκοι της Πίνδου, του Ολύμπου, της Όσσας, του Μαυροβουνίου, του Πηλίου και των Αγράφων δημιουργούν ένα φυσικό εμπόδιο στα κλιματικά φαινόμενα που έρχονται από τα δυτικά, γεγονός που έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση των

βροχοπτώσεων και την επίδραση στο κλίμα από το Αιγαίο, που επιδρά μόνο στα παράλια στα ανατολικά.

Με βάση την ταξινόμηση του Köppen (1936), ο κλιματικός τύπος της περιοχής μελέτης χαρακτηρίζεται ως Csa, δηλαδή μεσογειακός τύπος κλίματος ή μεσόθερμος τύπος κλίματος. Το C υποδηλώνει κλίμα υγρό με ήπιους χειμώνες, με κριτήριο ότι για τον θερμότερο μήνα η θερμοκρασία είναι σε °C, $T_{\theta} > 10$ °C και για το ψυχρότερο μήνα η θερμοκρασία κυμαίνεται από -3 °C $< T_{\psi} < 18$ °C. Το s υποδηλώνει ξηρό καλοκαίρι με κριτήριο ότι τα κατακρημνίσματα του ξηρότερου μήνα της καλοκαιρινής περιόδου σε mm είναι $R_{\xi\theta} < 40$ mm και ότι ισχύει $R_{\xi\theta} < R_{\psi}$, όπου R_{ψ} είναι τα κατακρημνίσματα του υγρότερου μήνα της χειμερινής περιόδου σε mm. Το a υποδηλώνει μακρόχρονο και θερμό Καλοκαίρι, με κριτήριο ότι η θερμοκρασία του θερμότερου μήνα σε °C είναι $T_{\mu} > 10$ °C για τουλάχιστον τέσσερις μήνες το χρόνο.

Τα μετεωρολογικά στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της εργασίας προέρχονται από το Μετεωρολογικό Σταθμό Λάρισας (70 μέτρα) με κωδικό σταθμού 16648, γεωγραφικό μήκος $22^{\circ},46$ (364288.73 στο ΕΓΣΑ 87') και γεωγραφικό πλάτος $39^{\circ},65$ (4387963.68 στο ΕΓΣΑ 87') (Σαμαντζή, 2013).

3.5.1 Θερμοκρασία

Η γνώση της θερμοκρασίας συμβάλλει στην καλύτερη μελέτη της υδρογεωλογίας μια περιοχής, διότι επιδρά στην εξατμισοδιαπνοή (Καλλέργης, 1986). Στο Διάγραμμα 2 παρουσιάζονται τα δεδομένα για τη μέση θερμοκρασία, τα οποία προέκυψαν από το Μετεωρολογικό Σταθμό Λάρισας, από το 1990 έως το 2017.

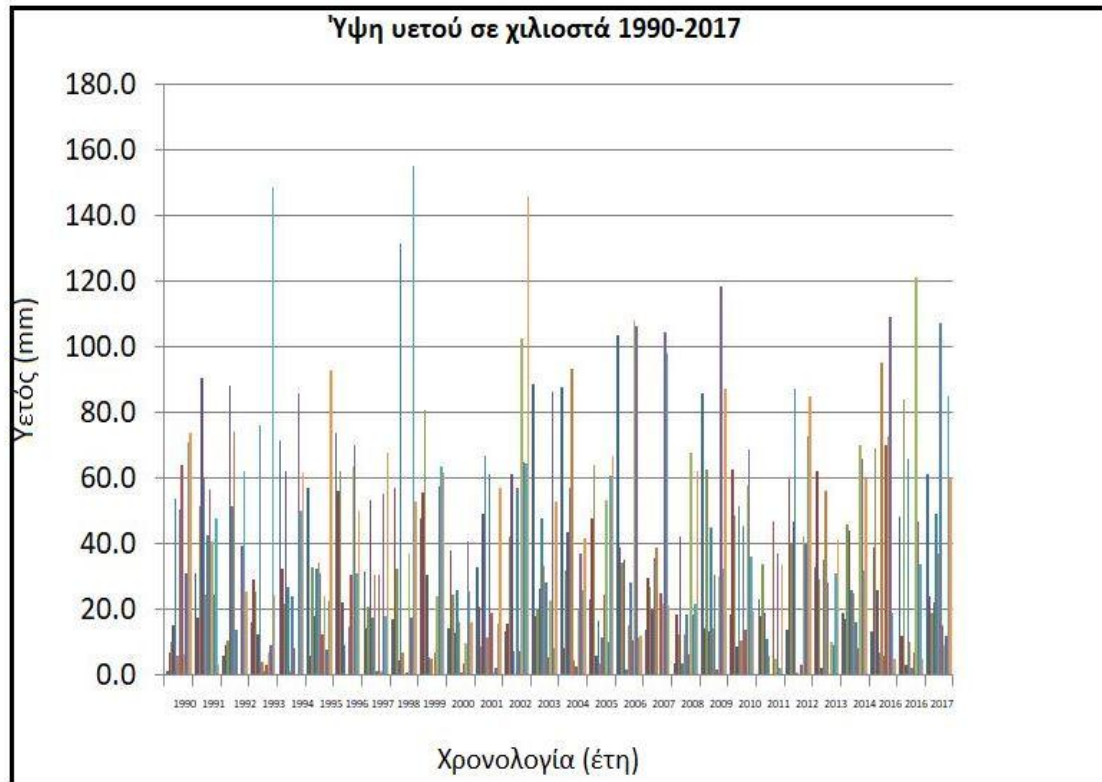


Διάγραμμα 2: Μετεωρολογικά δεδομένα Σταθμού Λάρισας για τη μέση θερμοκρασία για τα έτη 1990-2017

Σύμφωνα με τα μετεωρολογικά στοιχεία τα οποία αποκτήθηκαν από την ΕΜΥ για το συγκεκριμένο μετεωρολογικό σταθμό παρατηρείται ότι ο ψυχρότερος μήνας υπήρξε ο Ιανουάριος του 2017 με μέση θερμοκρασία $1,61^{\circ}\text{C}$, ενώ ο θερμότερος ο Αύγουστος του 2010 με μέση θερμοκρασία $29,6^{\circ}\text{C}$.

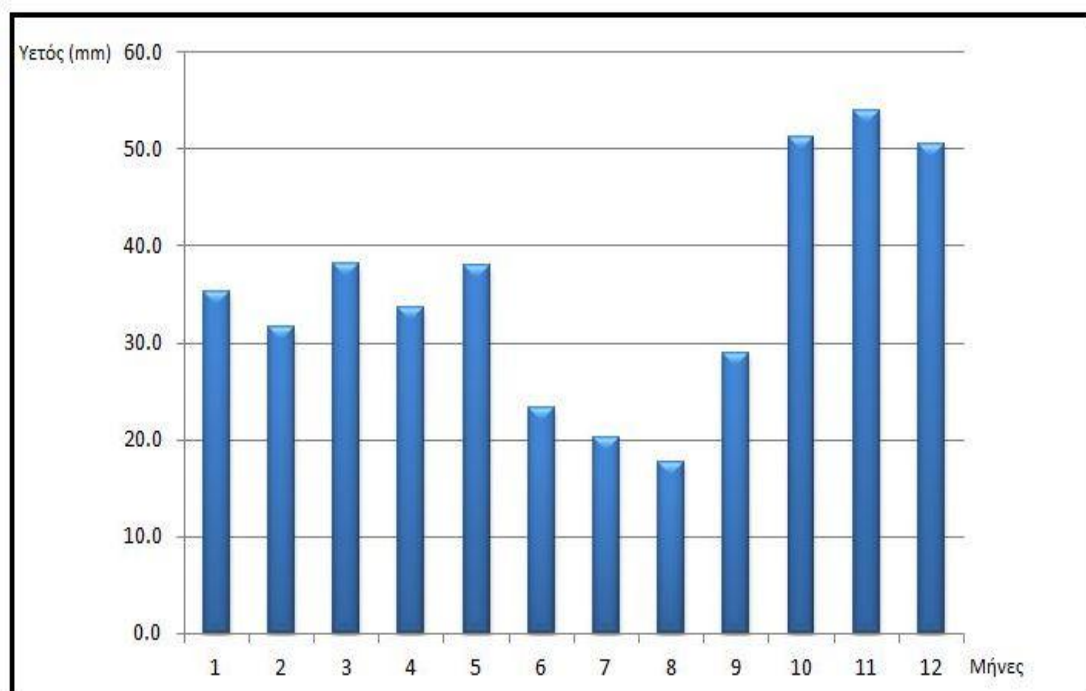
3.5.2 Βροχόπτωση

Τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα περιλαμβάνουν τις διάφορες μορφές με τις οποίες το νερό φτάνει στην επιφάνεια του εδάφους, όπως (βροχή, χαλάζι, χιόνι, ομίχλη ή δρόσος). Τα κατακρημνίσματα στην περιοχή μελέτης προκαλούνται κατά κύριο λόγο από την μηχανική ανύψωση και αδιαβατική ψύξη του αέρα υγρών ανέμων από τους ορεινούς όγκους που παρεμβάλλονται στη διεύθυνση της κίνησης τους. Για την περιοχή μελέτης, και τα πιο πρόσφατα χρόνια υπάρχουν δεδομένα για το ύψος του υετού όπως παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 3.



Διάγραμμα 3: Μετεωρολογικά δεδομένα Σταθμού Λάρισας για το ύψος υετού για τα έτη 1990-2017

Οι μέσες τιμές υετού ανά μήνα παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 4. Από το Διάγραμμα συμπεραίνεται ότι οι πιο ξηροί μήνες είναι ο Ιούλιος και ο Αύγουστος (με μέσους όρους υετού 20 και 18 χιλιοστά αντίστοιχα), ενώ οι πιο υγροί ο Νοέμβριος που ξεπερνά τα 50 χιλιοστά και ο Δεκέμβριος, που και αυτός βρίσκεται κοντά στα 50 χιλιοστά υετού.



Διάγραμμα 4: Μετεωρολογικά στοιχεία υετού Σταθμού Λάρισας

3.6 Υδρογεωλογία

3.6.1 Γενικά

Τη Θεσσαλία διατρέχει εξ ολοκλήρου ο Πηνειός ποταμός. Η λεκάνη απορροής του διαιρείται σε μεγάλο αριθμό υπολεκανών, όπως των Εννιπέα, Φαρσαλιώτη, Σοφαδίτη, Καλέντζη, Πάμισου, Πορταϊκού, Μουργκανίου, Ληθαίου, Νεοχωρίτη και Τιταρήσιου. Στο υδατικό διαμέρισμα περιλαμβάνεται και η κλειστή λεκάνη της Κάρλας. Η περιοχή μελέτης είναι τμήμα της λεκάνης του Πηνειού και της υπολεκάνης του Τιταρήσιου.

Η περιοχή διαρρέεται νότια από τον Πηνειό ποταμό, σε μήκος 18 χιλιομέτρων και στο κέντρο της, τη διασχίζει εγκάρσια ο Τιταρήσιος ποταμός, σε μήκος 22 χιλιομέτρων, από τα οποία τα 11 χιλιόμετρα είναι εντός της καρστικής κοιλάδας Δαμασίου έως την έξοδο στο πεδινό τμήμα, και τα άλλα 11 χιλιόμετρα στο πεδινό τμήμα των στενών της Ροδιάς συμβάλλουν με τον Πηνειό ποταμό.

3.6.2 Υδρολιθολογική ταξινόμηση

Στην περιοχή της Ποταμιάς βρέθηκε ότι οι αδιαπέρατοι σχηματισμοί καταλαμβάνουν έκταση περίπου ίση με 178 τετραγωνικά χιλιόμετρα, ενώ οι διαπερατοί καταλαμβάνουν έκταση περίπου ίση με 200 τετραγωνικά χιλιόμετρα.

- Περαιοί σχηματισμοί

Οι υδροπερατοί σχηματισμοί κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες: τις Τεταρτογενείς αποθέσεις και τα μάρμαρα.

Οι Τεταρτογενείς αποθέσεις περιλαμβάνουν:

- Σύγχρονες αποθέσεις στις κοίτες των ποταμών και των χειμάρρων
- Αλλουβιακές και ποταμολιμναίες αποθέσεις
- Ελουβιακό μανδύα, από λεπτομερή έως αδρομερή μη συγκολλημένα υλικά αποσάθρωσης
- Ποτάμιες αναβαθμίδες, από αδρομερή υλικά με κροκάλες και λατύπες
- Κώνους κορημάτων και πλευρικά κορήματα.

Οι Τεταρτογενείς αποθέσεις στην περιοχή μελέτης καταλαμβάνουν έκταση περίπου ίση με 90 τετραγωνικά χιλιόμετρα.

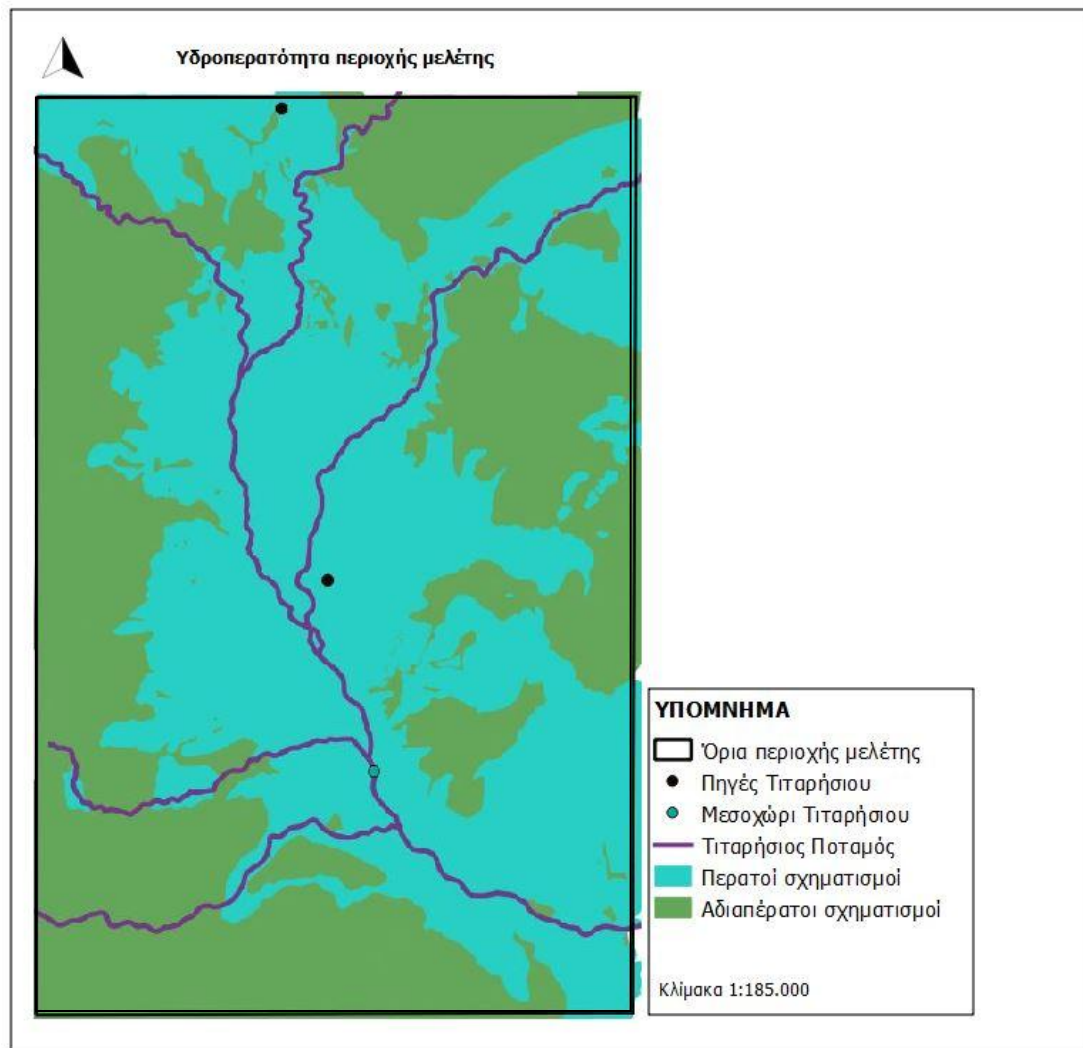
- Κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι και μάρμαρα

Βρίσκονται κυρίως στο βόρειο τμήμα και στο νοτιοανατολικό της περιοχής μελέτης.

- Στο βόρειο τμήμα, κοντά στις πηγές του Κεφαλόβρυσου αποτελούν ζώνη εκφόρτισης των υπόγειων νερών.
- Στο ανατολικό τμήμα, ενισχύει την παροχή στον καρστικό υδροφορέα που έχει ως αποτέλεσμα την ύπαρξη των πηγών του Αμουρίου.

- Αδιαπέρατοι σχηματισμοί

Δεν επιτρέπουν τη ροή του νερού υπό την επίδραση της βαρύτητας ή της υδροστατικής πίεσης. Πρακτικά τα αδιαπέρατα στρώματα είναι οι γνεύσιοι, όλες οι κατηγορίες των σχιστόλιθων, οι μάργες, οι άργιλοι (Βασιλείου, 2011). Στην Εικόνα 11 παρουσιάζεται η περιοχή μελέτης ανάλογα με την υδροπερατότητά της.



Εικόνα 11: Χάρτης υδροπερατότητας περιοχής μελέτης

Πηγή: Υδρογεωλιθικός χάρτης Θεσσαλίας (2012)

3.7 Επιφανειακά υδάτινα σώματα

3.7.1 Πηνειός Ποταμός

Ο ποταμός Πηνειός πηγάζει από της οροσειρά της Πίνδου και σχηματίζεται από τη συμβολή του Μαλακασιώτικου ρέματος που πηγάζει από το βουνό Λάκμος (στα 1800 μέτρα) και του ρέματος Μουργκάνι, που πηγάζει από τα Αντιχάσια (στα 1100 μέτρα). Το μήκος του φθάνει τα 205 χιλιόμετρα και είναι ο τρίτος σε μήκος ποταμός της Ελλάδας. Η λεκάνη απορροής του έχει έκταση 10.700 τετραγωνικά χιλιόμετρα και η μέση ετήσια απορροή εκτιμάται σε $3.500 \times 10^6 \text{ m}^3$ (κυβικά μέτρα) (Panagoroulou, 1995).

Ο ποταμός είναι ο αποδέκτης των υδάτων του μεγαλύτερου μέρους της Θεσσαλικής πεδιάδας. Το σύστημα του ποταμού χωρίζεται σε τρία ευδιάκριτα τμήματα: στον ορεινό ρου, στο πεδινό τμήμα και στο Δέλτα του. Μεγάλο τμήμα της λεκάνης απορροής του ποταμού περιλαμβάνει ορεινές περιοχές με υψόμετρο πάνω από 2000 μέτρα (όπως η Πίνδος και ο Όλυμπος), καθώς και αγροτικές περιοχές (Θεσσαλική πεδιάδα) και αστικές περιοχές (Μαντούζα, 2008).

Το πεδινό τμήμα του ποταμού εισέρχεται στη Θεσσαλική λεκάνη, δυτικά της Καλαμπάκας, διέρχεται νότια των Τρικάλων και στη συνέχεια κατευθύνεται ανατολικά σχηματίζοντας διάφορους μαιανδρισμούς. Έπειτα εισέρχεται στην πεδιάδα της Λάρισας φθάνοντας ως τις προσβάσεις του Κάτω Ολύμπου, στην περιοχή του Τυρνάβου, όπου δέχεται τα νερά του κυριότερου παραποτάμου του, του Τιταρήσιου. Σε αυτό το τμήμα του ποταμού συμβάλλουν, εκτός από τον Τιταρήσιο και άλλοι παραπόταμοι, όπως ο Ληθαίος, ο Πορταϊκός, ο Πάμισος, ο Νεοχωρίτης, ο Ενιπέας και το Μεγάλο Ρέμα. Μετά την ένωση με τον Τιταρήσιο κατευθύνεται ανατολικά στο στενό της Ροδιάς και τέλος στην κοιλάδα των Τεμπών μεταξύ Ολύμπου και Όσσας. Παλαιότερα με τα πλημμυρικά νερά του τροφοδοτούνταν η λίμνη Κάρλα, της οποίας η έκταση έφθανε μέχρι 180 τετραγωνικά χιλιόμετρα.. Μετά τη δημιουργία του αναχώματος στην κοίτη του Πηνειού, η Κάρλα απέκτησε τη δική της υδρολογική λεκάνη (Panagoroulos, 1995).

Ο Πηνειός, ιδιαίτερα τις τελευταίες δεκαετίες, δέχεται σημαντική ρύπανση από αστικά και βιομηχανικά απόβλητα καθώς και από την εντατική γεωργική και κτηνοτροφική δραστηριότητα, χαρακτηριστικό γνώρισμα της Θεσσαλικής πεδιάδας. Έχει υποστεί σημαντικές αλλοιώσεις από τον εγκιβωτισμό της κοίτης του, την κατασκευή αρδευτικών δικτύων, των προσωρινών φραγμάτων και τις υπεραντλήσεις. Κατά τους θερινούς μήνες, που οι απαιτήσεις σε νερό είναι μεγάλες και υπάρχει μείωση της ροής του ποταμού, οι συνέπειες από τη ρύπανση είναι πλέον εμφανείς και έντονες (Ευαγγελόπουλος, 1974).

3.7.2 Τιταρήσιος ποταμός

Ο Τιταρήσιος ποταμός ή Ξεριάς είναι παραπόταμος του Πηνειού ποταμού, πηγάζει από τις δυτικές πλαγιές του Ολύμπου και τις ανατολικές πλαγιές των Καμβουνίων,

διαρρέει την επαρχία Ελασσόνας και Τυρνάβου και χύνεται στον Πηνειό. Βρίσκεται 70 μέτρα άνω της επιφάνειας της θάλασσας. Το συνολικό μήκος του ποταμού είναι 70 χιλιόμετρα (Panagoroulos,1995).

Ο Τιταρήσιος σχηματίζεται από την συμβολή πολλών ορεινών χειμάρρων και μικρορεμάτων και συχνά μετά την έξοδό του από την λεκάνη απορροής δεν εμφανίζει διαρκή ροή. Εκεί οφείλει και το όνομα Ξεριάς. Η αλλουβιακή του λεκάνη οφείλει τον πλούτο της στα υπόγεια νερά και στον Τιταρήσιο ποταμό. Ο αλλουβιακός υδροφόρος ορίζοντας δέχεται κατά τη διάρκεια του χειμώνα άφθονη τροφοδοσία, εντοπισμένη κυρίως στα ανάντη του ποταμού (Ευαγγελόπουλος, 1974).

Ο υγρότοπος υφίσταται σημαντικές αλλοιώσεις όσον αφορά τα γνωρίσματά του (αβιοτικά και βιοτικά) με κύρια αίτια την κατασκευή έργων διευθέτησης της ροής των υδάτων καθώς και των υπεραντλήσεων κατά το παρελθόν, τόσο του ποταμού όσο και του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, ο οποίος εμπλουτίζεται σε μεγάλο βαθμό από τα ύδατα του ποταμού. Ο Τιταρήσιος ποταμός έχει άμεση υδραυλική επικοινωνία με τον επιφανειακό υδροφορέα (Panagoroulos,1995).

Ο υγρότοπος του Τιταρήσιου ποταμού υφίσταται και αυτός επιβάρυνση από τη ρίψη υγρών και στερεών αποβλήτων. Παράδειγμα αποτελεί η ύπαρξη ανεξέλεγκτων χώρων ρίψης στερεών αποβλήτων των δημοτικών διαμερισμάτων Ροδιάς, Βρουσώπου, Δελερίων καθώς και μπαζών εντός της κοίτης του ποταμού (Βασιλείου, 2011).

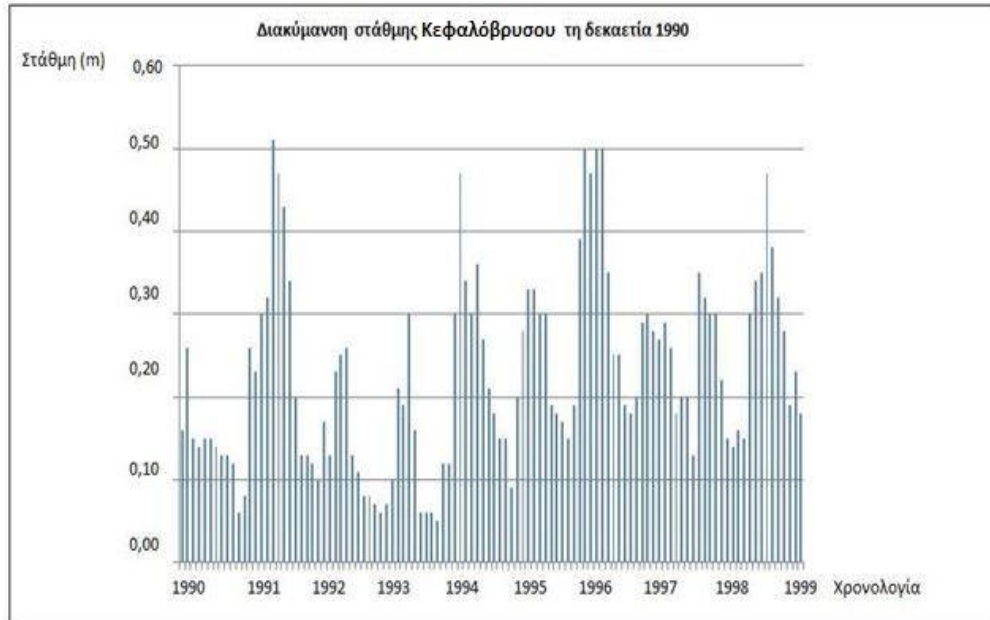
3.7.3 Υδρολογική συμπεριφορά Τιταρήσιου

Στην περιοχή μελέτης ο Τιταρήσιος πηγάζει από τις πηγές του Κεφαλόβρυσου και του Αμουρίου. Μελετώντας τη δεκαετία του 1990, για την οποία υπήρχαν περισσότερο ολοκληρωμένα δεδομένα, και ορισμένων χρόνων των δεκαετιών του 2000-2010, παρατηρήθηκε ότι:

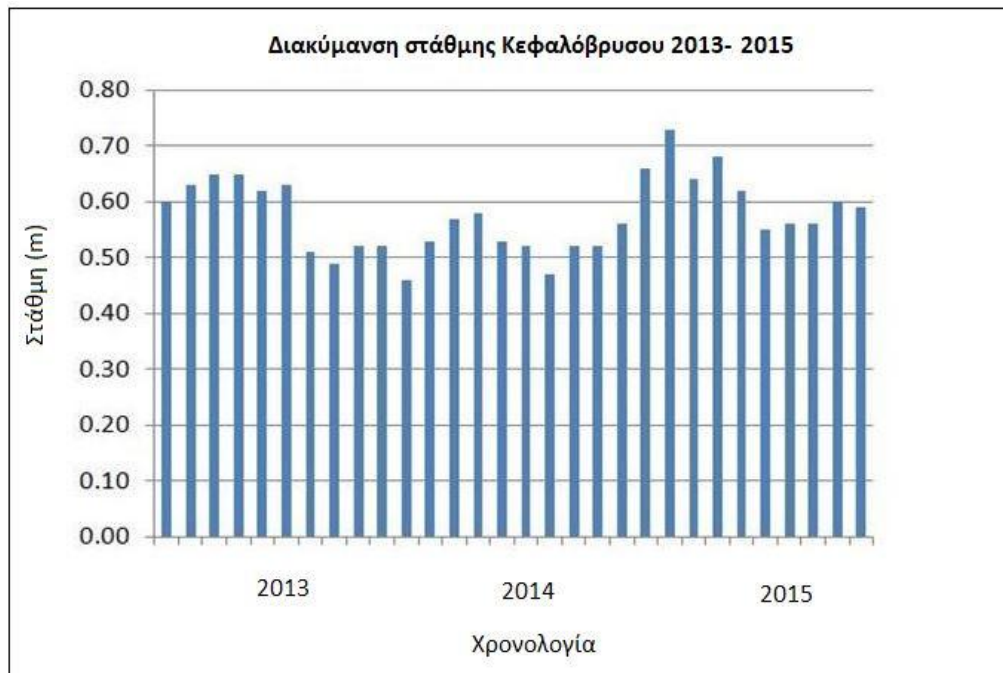
Για τη στάθμη:

- Η στάθμη στην πηγή Κεφαλόβρυσου παραμένει σχετικά σταθερή τη δεκαετία του 1990 (Διάγραμμα 5), με μικρές μεταβολές μόνο κατά τους

καλοκαιρινούς μήνες, και ιδιαίτερα τον Αύγουστο, ο οποίος είναι και ο θερμότερος μήνας για την περιοχή μελέτης. Παρόμοια είναι η κατάσταση και για τα πιο πρόσφατα χρόνια (2013, 2014, 2015 στο Διάγραμμα 5.1), όπου πάλι μόνο τους καλοκαιρινούς μήνες παρατηρείται μία μικρή πτώση της στάθμης.

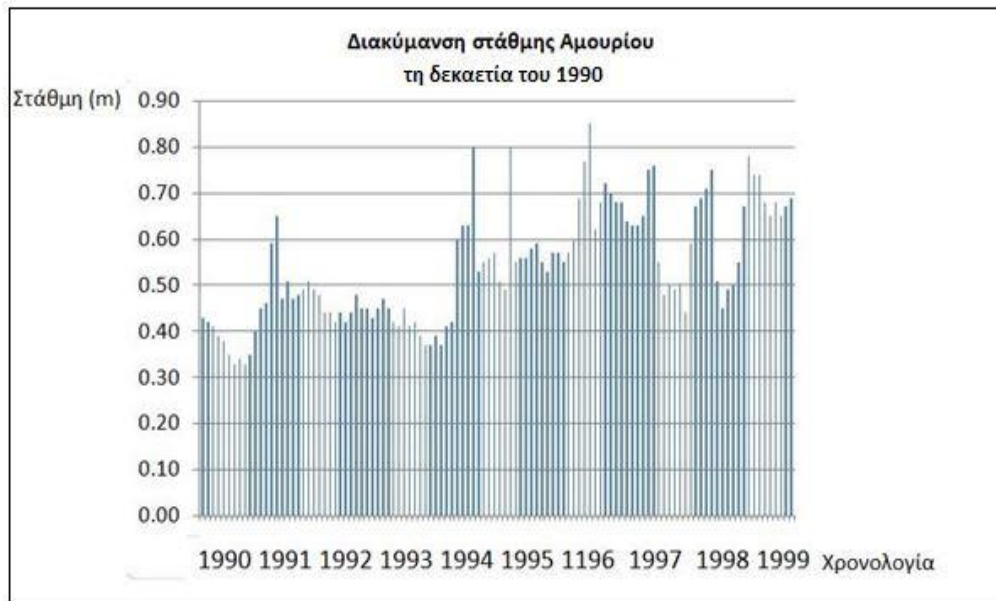


Διάγραμμα 5(α): Διακύμανση στάθμης Κεφαλόβρυσου τη δεκαετία 1990

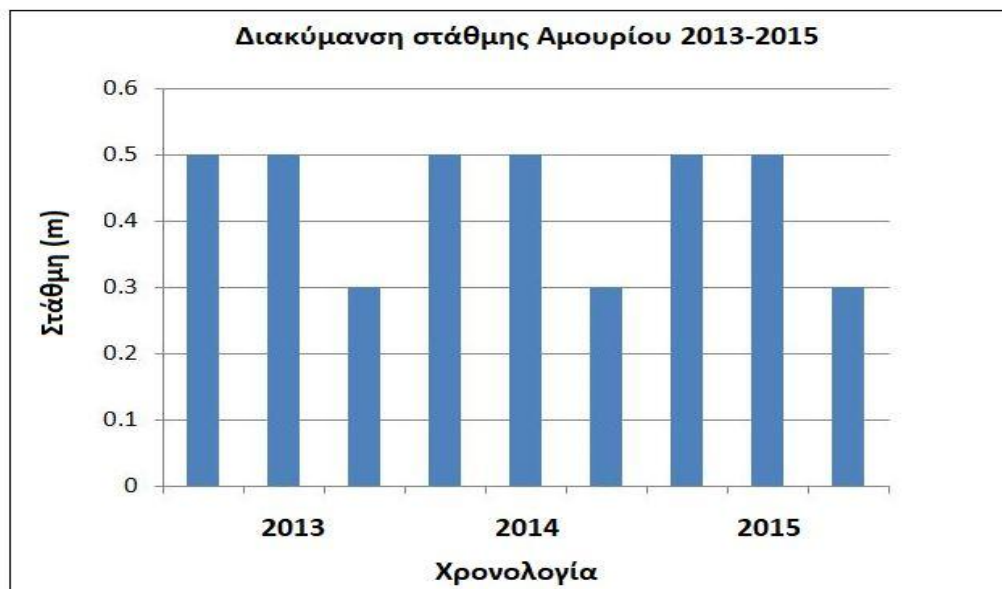


Διάγραμμα 5(β): Διακύμανση στάθμης Κεφαλόβρυσου 2013-2015

- Η στάθμη στην πηγή του Αμουρίου παραμένει, και αυτή, σχετικά σταθερή (περίπου στο ίδιο επίπεδο) τη δεκαετία του 1990 (Διάγραμμα 6). Εδώ δεν παρατηρούνται ιδιαίτερες μεταβολές κατά τους θερινούς μήνες, αντίθετα η στάθμη παραμένει σε σχετικά υψηλά επίπεδα, με μικρή εξαίρεση τα νεότερα χρόνια, που παρουσιάζεται μια μικρή πτώση στάθμης (Διάγραμμα 6.1).



Διάγραμμα 6(α): Διακύμανση στάθμης Αμουρίου τη δεκαετία 1990



Διάγραμμα 6(β): Διακύμανση στάθμης Αμουρίου 2013-2015

Για τις παροχές:

- Η παροχή τόσο για το Κεφαλόβρυσο, όσο και τον Τιταρήσιο, παραμένει σε σχετικά σταθερά επίπεδα, τη δεκαετία του 1990, με μικρές μεταβολές να παρατηρούνται τους καλοκαιρινούς μήνες και ιδιαίτερα τον Αύγουστο. Παρόμοια κατάσταση λαμβάνει χώρα και στο Αμούριο, με τη διαφορά ότι χαμηλές σχετικά τιμές παροχής παρατηρούνται και του μήνες του φθινοπώρου. Στα πιο πρόσφατα χρόνια (2013, 2014, 2015) παρατηρούνται οι ίδιες καταστάσεις για Το Κεφαλόβρυσο, τον Τιταρήσιο και το Αμούριο αντίστοιχα.

3.8 Πηγές

3.8.1 Αμούριο

Εκδηλώνονται οι πηγές του σε υψόμετρο 170 μέτρων, μέσα στις προσχώσεις της λεκάνης της Ποταμιάς. Η τροφοδοσία των πηγών οφείλεται σε διηθήσεις της επιφανειακής απορροής κατά μήκος του Ελασσονίτικου ποταμού. Το νερό που προέρχεται από τη βροχή εμπλουτίζει τον υδροφόρο ορίζοντα, σε μικρό ποσοστό το φρεάτιο και στη συνέχεια τον υδροπερατό σε μεγαλύτερο βαθμό. Συγκεκριμένα για το Αμούριο ισχύει μία επιπρόσθετη τροφοδοσία από υπόγειες μεταγγίσεις καρστικών νερών, εξαιτίας της παρουσίας των μαρμάρων στην περιοχή (Βασιλείου, 2011).

3.8.2 Κεφαλόβρυσο

Η πηγή του Κεφαλόβρυσου βρίσκεται στα 800 μέτρα. Εκφορτίζεται από τον καρστικό υδροφορέα που αναπτύσσεται στα μάρμαρα που βρίσκονται στην περιοχή. Ο εμπλουτισμός του συστήματος ενισχύεται από την κατείδυση των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων. Το σύνολο του νερού καταλήγει στον ποταμό Βούλγαρη. Στην περιοχή γίνεται εκμετάλλευση των πηγών μέσω γεωτρήσεων άντλησης. Χαρακτηρίζεται ως πηγή υπερχειλίσης εξαιτίας του ρήγματος (30/70 NA) που εντοπίστηκε 2,5 χιλιόμετρα νότια από αυτή (Μανάκος και Τασιός, 1998).

Κεφάλαιο 4^ο

Μαθηματική προσομοίωση υπόγειου υδατικού συστήματος

4.1 Μαθηματικό υπόβαθρο Modflow

Για την προσομοίωση της υδροδυναμικής κατάστασης των υδροφορέων χρησιμοποιείται ο κώδικας Modflow (*Modular three dimensional finite difference ground water flow model*) της Αμερικανικής Υπηρεσίας Γεωλογικών Ερευνών (U.S.G.S).

Το πρόγραμμα στηρίζεται στην αριθμητική επίλυση μιας κύριας διαφορικής εξίσωσης, η οποία προκύπτει από την εφαρμογή της εξίσωσης διατήρησης της μάζας και το νόμο του Darcy. Το μοντέλο είναι πεπερασμένων διαφορών με επίλυση των εξισώσεων στο κέντρο των κυψελίδων του καννάβου. Εφαρμόζεται σε μόνιμα και μη μόνιμα προβλήματα ροής υπολογίζοντας τις μεταβολές φορτίου στα σημεία πεδίου σε όλη τη διάρκεια του χρόνου για ομοιογενή/ετερογενή, ισότροπο ή ανισότροπο υδροφορέα. Έχει τη δυνατότητα προσομοίωσης μεγάλου αριθμού πηγαδιών, της κατείδυσης, της επίδρασης στραγγιστηριών, ποταμών και λιμνών κ.α. (Harbaugh et al., 2000).

Σύμφωνα με τον Hantush (1964):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_{xx} x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{yy} x \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{zz} x \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_y \frac{\partial y}{\partial t}, \quad (4.1.1)$$

Από την εξίσωση 4.1.1 προκύπτει:

- Για τους ελεύθερους υδροφορείς:

$$S_y \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{xx} x h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{yy} x h \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{zz} x h \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W_i, \quad (4.1.2)$$

Όπου:

K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} : οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας κατά τις διευθύνσεις X, Y, Z αντίστοιχα σε μονάδες $[\frac{L}{T}]$.

h: το πιεζομετρικό φορτίο σε [L].

W: είναι η ποσότητα της ροής ανά μονάδα όγκου και αντιπροσωπεύει εισροές ή εκροές νερού προς ή από το σύστημα [T-1]

W_i : είναι η ποσότητα της ροής ανά μονάδα όγκου και αντιπροσωπεύει εισροές ή εκροές νερού προς ή από το σύστημα [$L \times T^{-1}$]

S : η ειδική αποθηκευτικότητα

S_y : η ειδική απόδοση του πορώδους υλικού

S_s : η ειδική αποθηκευτικότητα του πορώδους υλικού σε [L-1], ή το αποτελεσματικό πορώδες ανά μέτρο βάθους του υδροφορέα

t : ο χρόνος [T] (Bear, 1979).

Η εξίσωση 4.1.1 είναι η τρισδιάστατη διαφορική εξίσωση με μερικές παραγώγους, που περιγράφει την κίνηση του υπόγειου νερού σε υπό πίεση υδροφορείς και χρησιμοποιείται από το Modflow. Περιγράφει την κίνηση του υπόγειου νερού σε 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.

Σε συνδυασμό με τις οριακές συνθήκες του υδροφορέα και με καθορισμό της αρχικής συνθήκης πιεζομετρίας, η εξίσωση 4.1.1 αποτελεί ένα μαθηματικό μοντέλο ενός υπόγειου υδροφορέα. Τα τελευταία χρόνια τα μαθηματικά μοντέλα στηρίζονται σε αριθμητικές μεθόδους επίλυσης και δίνουν προσεγγιστικές λύσεις. Οι αριθμητικές μέθοδοι αυτές είναι πεπερασμένες διαφορές, τα πεπερασμένα στοιχεία, τα πολλαπλά κελιά, τα οριακά στοιχεία και άλλα (Harbaugh et al., 2000).

Το Modflow χρησιμοποιεί τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών στις τρεις διαστάσεις όπου το συνεχές σύστημα αντικαθίσταται από ένα πεπερασμένο αριθμό διακριτών σημείων, τόσο ως προς τον χρόνο όσο και ως προς τον 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 σύστημα 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 βήματα. Οι τιμές αυτές αποτελούν μία προσέγγιση της αναλυτικής λύσης της εξίσωσης η οποία, σε αντίθεση με την αριθμητική ανάλυση, δίνει συνεχείς τιμές της κατανομής του φορτίου, για οποιοδήποτε σημείο και οποιοδήποτε χρόνο (Harbaugh et al., 2000).

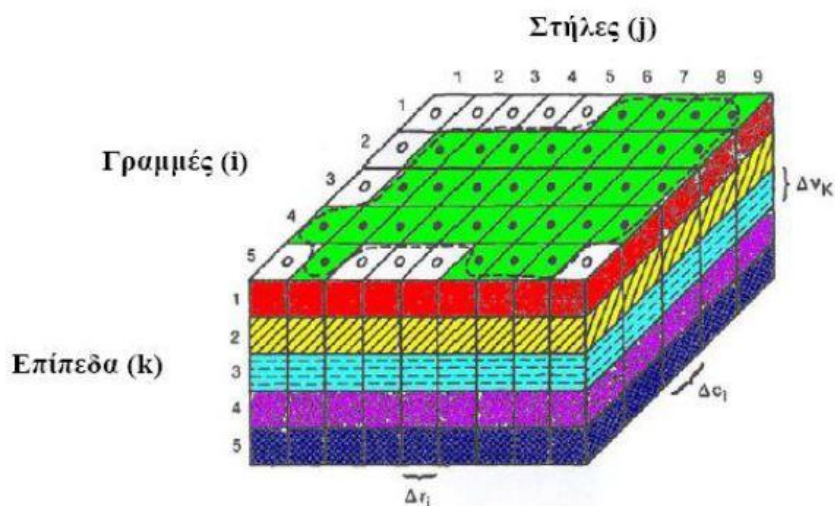
4.1.1 Διακριτοποίηση

Η χωρική διακριτοποίηση ενός υδροφορέα (Εικόνα 12) παρουσιάζεται με ένα πλέγμα ορθογώνιων υποπεριοχών, προσανατολισμένων σύμφωνα με το καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων, που λέγονται κελιά (cells). Κάθε υποπεριοχή αποτελείται από ένα χαρακτηριστικό σημείο, το οποίο είναι το κέντρο βάρους του κελιού και στο οποίο ζητείται να υπολογιστεί η τιμή του h . Χρησιμοποιούνται δείκτες (i,j,k) όπου :

$i = 1, 2, \dots, nrow$, αντιπροσωπεύει τον αριθμό των γραμμών

$j = 1, 2, \dots, ncol$, αντιπροσωπεύει τον αριθμό των στηλών,

$k = 1, 2, \dots, nlay$, αντιπροσωπεύει τον αριθμό των επιπέδων στην κατακόρυφη διεύθυνση



Εικόνα 12: Χωρική διακριτοποίηση ενός τρισδιάστατου υδροφορέα

Πηγή: Τζιάτζιος (2012)

Όπου

● Ενεργό κελί

○ Ανενεργό κελί

---- όρια υδροφορέα

Δr_j : οι διαστάσεις του κελιού κατά μήκος της διεύθυνσης των γραμμών, ο δείκτης j υποδεικνύει τον αριθμό της στήλης

Δc_i : οι διαστάσεις του κελιού κατά μήκος της διεύθυνσης των στηλών, ο δείκτης i υποδεικνύει τον αριθμό της γραμμής

Δn_k : οι διαστάσεις του κελιού κατά μήκος της διεύθυνσης των επιπέδων, ο δείκτης k υποδεικνύει τον αριθμό των επιπέδων.

4.1.2 Εξίσωση πεπερασμένων διαφορών

Η εξίσωση συνέχειας που εκφράζει το ισοζύγιο της ροής για ένα κελί, με την προϋπόθεση ότι η πυκνότητα ρ του υπόγειου νερού είναι σταθερή, δίνεται από την έκφραση:

$$\sum Q_i = S_s x \frac{\Delta h}{\Delta t} x \Delta V, (4.1.2.1)$$

Όπου:

$\sum Q_i$: το σύνολο των πραγματοποιούμενων εισροών ή εκροών στα όρια του κελιού που προέρχονται από γειτονικά κελιά [L3T-1]

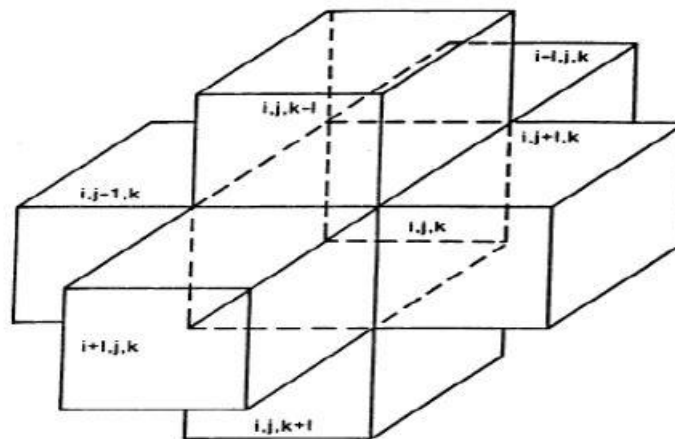
S_s : η ειδική αποθηκευτικότητα ή το ενεργό πορώδες ανά μέτρο βάθους του υδροφορέα. Αυτή μπορεί να οριστεί και ως ο όγκος του νερού που αντλείται ανά μονάδα όγκου του υδροφορέα και ανά μονάδα μεταβολής του φορτίου [L-1]

ΔV : ο όγκος του κελιού [L3]

Δh : η μεταβολή της πιεζομετρίας [L]

Δt : το χρονικό βήμα [T]

Οι όροι της εξίσωσης 4.1.2.1 στο δεξί μέλος είναι ισοδύναμοι με τον όγκο του νερού που αποθηκεύονται σε ένα χρονικό διάστημα με τον όγκο του νερού που αποθηκεύεται σε ένα χρονικό διάστημα Δt , κατά το οποίο παρατηρείται αλλαγή της στάθμης κατά Δh . Από την εξίσωση προκύπτει ένα κεντρικό κελί (i, j, k) και έξι γειτονικά του: $(i-1, j, k)$, $(i+1, j, k)$, $(i, j-1, k)$, $(i, j+1, k)$, $(i, j, k-1)$, $(i, j, k+1)$, όπως φαίνεται στην Εικόνα 13:



Εικόνα 13: Το κελί (i, j, k) και τα γειτονικά του

Πηγή: Harbaugh (2000)

Στο (i, j, k) η εισροή λαμβάνει θετικό πρόσημο, ενώ η εκροή αρνητικό. Με βάση τον Darcy, για τις ροές των έξι γειτονικών κελιών προς το κεντρικό (i, j, k) , θα ισχύει:

$$q_{i,j-\frac{1}{2},k} = KR_{i,j-\frac{1}{2},k} \Delta c_i \Delta V_k \frac{h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k}}{\Delta r_{j-\frac{1}{2}}}, \quad (4.1.2.2)$$

όπου

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

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

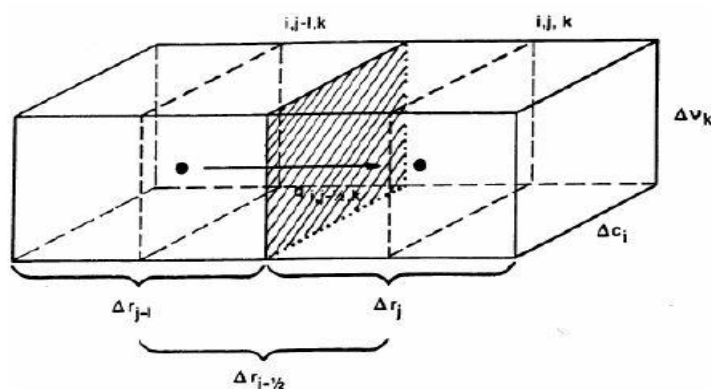
$q_{i,j-1/2,k}$: η παροχή στην κοινή πλευρά των ορθογώνιων στοιχείων (i,j,k) και $(i,j-1,k)$

[L3T-1]

$KR_{i,j-1/2,k}$: η υδραυλική αγωγιμότητα κατά τη διεύθυνση των γραμμών, στην κοινή πλευρά των στοιχείων (i,j,k) και $(i,j-1,k)$ [LT-1]

$\Delta c_i \Delta v_k$: το εμβαδό της πλευράς του στοιχείου που είναι κάθετη στη διεύθυνση των γραμμών [L2]

$\Delta r_{j-1/2}$: η οριζόντια απόσταση ανάμεσα στα κέντρα των στοιχείων (i,j,k) και $(i,j-1,k)$ [L], όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 14.



Εικόνα 14: Ροή από το κελί (i,j,k) στο $(i,j-1,k)$ κατά τη διεύθυνση των γραμμών

Πηγή: Harbaugh (2000)

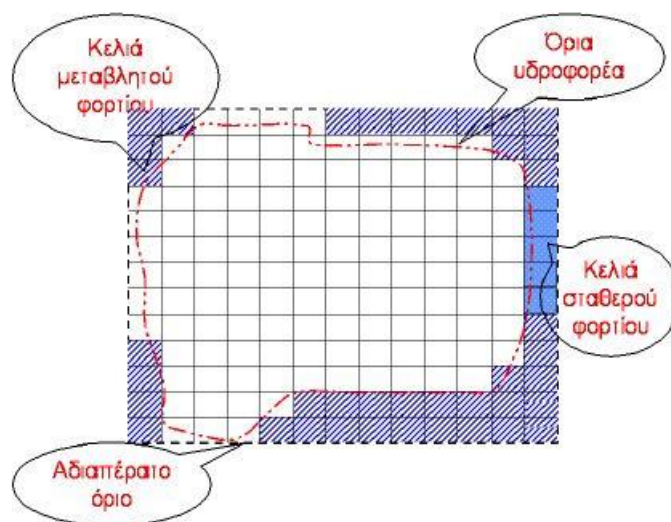
4.1.3 Καθορισμός οριακών συνθηκών

Τα κελιά που χρησιμοποιούνται για τις ανάγκες προσομοίωσης των οριακών συνθηκών του εκάστοτε προβλήματος, κατατάσσονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- Κελιά σταθερού φορτίου, όπου το υδραυλικό φορτίο καθορίζεται εκ των προτέρων και παραμένει σταθερό κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.
- Ανενεργά ή αδιαπέρατα κελιά, στα οποία η ροή δεν επιτρέπεται από και προς αυτά κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.
- Κελιά, μεταβλητού φορτίου, είναι όλα τα υπόλοιπα στα οποία τα φορτία δεν καθορίζονται, αλλά μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Οι οριακές συνθήκες του εκάστοτε προβλήματος προσεγγίζονται μόνο από τα κελιά σταθερού φορτίου και ανενεργά ή αδιαπέρατα. Τα πρώτα μπορεί να προσομοιώνουν την επικοινωνία του υδροφορέα με επιφανειακούς πόρους (όπως

λίμνες και ποτάμια), ενώ τα δεύτερα κελιά τα αδιαπέρατα όριά του. Όπου υπάρχουν όρια σταθερής εισροής ή μεταβαλλόμενης με το φορτίο μπορούν να προσομοιωθούν ως εξωτερικές πηγές ή ως συνδυασμός αδιαπέραστων κελιών και εξωτερικής πηγής (Harbaugh et al., 2000). Απεικονίζονται στην Εικόνα 15:



Εικόνα 15: Τύποι κελιών και προσομοίωση οριακών συνθηκών

Πηγή: Τζιάτζιος (2012)

Πακέτα υποστήριξης του Modflow

Εκτός του κεντρικού προγράμματος Modflow υπάρχει και μία σειρά από βοηθητικά υποπρογράμματα (packages). Τα υποπρογράμματα συνοδεύονται από υπορουτίνες (modules). Η κάθε υπορουτίνα επιτελεί συγκεκριμένους υπολογισμούς. Τα modules έχουν ομαδοποιηθεί με τη μορφή «πακέτων» και κάθε πακέτο είναι μια ομάδα από modules, που σχετίζεται με κάποιο στάδιο της προσομοίωσης.

Κατά τη λειτουργία του προγράμματος χρησιμοποιούνται μόνο εκείνα τα πακέτα, που είναι απαραίτητα για το εκάστοτε στάδιο της προσομοίωσης. Τα κυριότερα υποπρογράμματα είναι τα εξής:

- Basic package
- BCF2 (block centered flow) package
- River package ή Stream package

- Well package
- Recharge package
- Drain package
- Evapotranspiration package
- General-head package
- Constant head package
- SIP solution package
- SSOR solution package
- PCG2 solution package
- Output control package

Μια συνοπτική παρουσίαση των υποπρογραμμάτων βρίσκεται παρακάτω:

- Βασικό πακέτο (basic package)

Τα δεδομένα που εισάγονται στο βασικό πακέτο αφορούν

- Των αριθμό των στηλών και των γραμμών
- Τον αριθμό των υδροφόρων στρωμάτων
- Την χρονική περίοδο προσομοίωσης και βήμα κάθε περιόδου
- Τον καθορισμό των μονάδων μέτρησης
- Τις οριακές συνθήκες σε κάθε κόμβο του καννάβου

Ως αρχική συνθήκη εισάγεται η πιεζομετρία στην αρχή της χρονικής περιόδου, που προέρχεται από μετρήσεις πεδίου.

- BCF2 (block centered flow) package

Στο πακέτο αυτό εισάγονται οι πληροφορίες που αφορούν:

- τον τύπο του υδροφορέα (ελεύθερος, υπό πίεση, ημιελεύθερος)
- τις συνθήκες ροής (μόνιμη ή μη μόνιμη κατάσταση ροής)
- τις διαστάσεις των κυψελίδων κατά τις διευθύνσεις x και y

- τις συνιστώσες της υδραυλικής αγωγιμότητας για τους ελεύθερους υδροφόρους ορίζοντες ή της μεταβιβαστικότητας για τους υπό πίεση υδροφόρους ορίζοντες
- το συντελεστή εναποθήκευσης ή το ενεργό πορώδες

Απαραίτητη προϋπόθεση είναι κάθε κόμβος να εντοπίζεται στο κέντρο κάθε κυψελίδας του μοντέλου.

- Υδατορεύματα (Rivers, RIV)

Προσομοιώνεται η ροή νερού μεταξύ υδατορεύματος (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.

Κάθε κυψελίδα που περιέχει όριο ποταμού απαιτεί τις παρακάτω πληροφορίες:

- Το υψόμετρο της στάθμης του υδατορεύματος, το οποίο μπορεί να αλλάζει με τον χρόνο.
- Το υψόμετρο του πυθμένα του υδατορεύματος (υψόμετρο κοίτης)
- Την αγωγιμότητα (C). Είναι μια αριθμητική παράμετρος που αντιπροσωπεύει την αντίσταση στη ροή μεταξύ υδατορεύματος και υδροφόρου στρώματος. Υπολογίζεται από το μήκος του υδατορεύματος ανά κυψελίδα (L), το εύρος του υδατορεύματος ανά κυψελίδα (W), το πάχος του υποστρώματος της κοίτης (M) και την υδραυλική αγωγιμότητά τους (K). Η αγωγιμότητα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$C = \frac{K \cdot L \cdot M}{M}, (4.1.3.1)$$

- Γεωτρήσεις (Well package)

Αναφέρεται στα δεδομένα των γεωτρήσεων άντλησης ή εμπλουτισμού σε έναν υδροφορέα για μια δεδομένη περίοδο. Θετικές τιμές της παροχής υποδηλώνουν εμπλουτισμό, ενώ οι αρνητικές κατάστασης άντλησης. Ο ρυθμός άντλησης θεωρείται ανεξάρτητος τόσο από την έκταση της κυψελίδας, όσο και από την πιεζομετρική στάθμη σε αυτή.

- Εμπλουτισμός (Recharge package)

Προσομοιώνεται η επιφανειακή κατανομή του εμπλουτισμού προς το υπόγειο υδροφόρο σύστημα. Ο εμπλουτισμός αναφέρεται, είτε στην κατείσδυση λόγω των βροχοπτώσεων, είτε σε τεχνητό εμπλουτισμό. Ο εμπλουτισμός μπορεί να εισαχθεί στο ανώτερο στρώμα (top layer). Με αυτόν τον τρόπο δε χρειάζεται ο υπολογισμός του εμπλουτισμού, που λαμβάνει χώρα ταυτόχρονα σε πολλαπλά επίπεδα μια κατακόρυφης στήλης, επειδή ο φυσικός εμπλουτισμός εισέρχεται στον υδροφορέα από την επιφάνεια του εδάφους.

- Στραγγιστήρια (Drains)

Προσομοιώνονται τα αποτελέσματα της επιστροφής του αρδευτικού νερού στον υδροφόρο ορίζοντα. Τα δεδομένα εισόδου που απαιτεί είναι το βάθος των στραγγιστηριών και η αγωγιμότητα C.

- Evapotranspiration package

Προσομοιώνονται τα αποτελέσματα της διαπνοής των φυτών και της εξάτμισης από την επιφάνεια του εδάφους. Η εξατμισοδιαπνοή, στο Modflow, εισάγεται στην οροφή του ανώτερου στρώματος το οποίο απαιτεί το ύψος της εξατμισοδιαπνοής σε mm ή σε m σε κάποια χρονική στιγμή σε sec.

- General-head package

Προσομοιώνεται η υπόγεια υδραυλική επικοινωνία γειτονικών υδροφορέων. Μπορεί να προσομοιώσει την υδραυλική σύνδεση με έναν υδροφορέα, που βρίσκεται εκτός των ορίων της προσομοιωμένης περιοχής και υποδηλώνει την ύπαρξη πλευρικής τροφοδοσίας. Τα αντικείμενα, για την προσομοίωση των οποίων χρησιμοποιείται το πακέτο αυτό, μπορούν να καθοριστούν με την χρήση σημείων, τόξων ή πολυγώνων.

Η παροχή τροφοδοσίας είναι ανάλογη προς τη διαφορά της στάθμης ανάμεσα στην εξωτερική πηγή και σε κάθε κυψελίδα στην περιοχή του μοντέλου. Η παροχή αυτή ακόμη εξαρτάται από την αγωγιμότητα των υλικών ανάμεσα στην εξωτερική πηγή και στην κυψελίδα ή τις κυψελίδες του μοντέλου με τις οποίες γειτνιάζει. Η

αγωγιμότητα είναι μια υδραυλική παράμετρος και ορίζεται ως η οριζόντια υδραυλική αγωγιμότητα της κυψελίδας πολλαπλασιαζόμενη με την εγκάρσια διατομή αυτής και διαιρούμενη με την απόστασή της από την εξωτερική πηγή τροφοδοσίας.

Το πακέτο αυτό απαιτεί, για κάθε κυψελίδα που περιέχει το όριο αυτό:

- Το γενικό φορτίο: αυτό το φορτίο είναι το επίπεδο της υδάτινης επιφάνειας στο όριο. Αυτό μπορεί να είναι φυσικά καθορισμένο, όπως για παράδειγμα η επιφάνεια μιας λίμνης ή μπορεί να ληφθεί από τη ρύθμιση του μοντέλου.
- Την αγωγιμότητα: αντιπροσωπεύει την αντίσταση της ροής ανάμεσα στο όριο γενικού φορτίου και τα υπόγεια νερά της προσομοιωμένης περιοχής.
 - Constant head package

Τα όρια σταθερού φορτίου μένουν αμετάβλητα κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Αυτό προϋποθέτει ότι στην έναρξη και στο τέλος της προσομοίωσης τα φορτία είναι σταθερά, χρειάζονται μόνο οι τιμές υδραυλικού φορτίου στα άκρα του ορίου.

- Ισχυρά πεπλεγμένη μέθοδος (Strongly Implicit Procedure Package, SIP)

Αντιπροσωπεύει μία μέθοδο επίλυσης του συστήματος γραμμικών εξισώσεων, που προκύπτει με τη χρήση επαναληπτικών διαδικασιών. Το σύνολο των εξισώσεων του καννάβου πρέπει να επιλύεται ταυτόχρονα σε κάθε βήμα. Η επίλυση συνιστάται στη λήψη μια τιμής της πιεζομετρικής στάθμης για κάθε κόμβο.

- Έλεγχος αποτελεσμάτων (Output Control)

Καθορίζεται ο τρόπος και η μορφή των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Διαθέτει δυνατότητα σύνδεσης με άλλα βοηθητικά προγράμματα για τη γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.

Τα δεδομένα εισόδου (input data) για το πρόγραμμα Modflow είναι τα εξής:

- Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα.

- Αρχικές συνθήκες, δηλαδή οι τιμές του πιεζομετρικού φορτίου σε όλους τους κόμβους του καννάβου.
- Οριακές συνθήκες είτε με τιμές πιεζομετρικού φορτίου, είτε με τη μορφή ροής στα όρια του καννάβου.
- Βάθη υδροφόρων στρωμάτων.
- Υδραυλικές παράμετροι (υδραυλική αγωγιμότητα, συντελεστής αποθηκευτικότητας και άλλα).
- Παροχές αντλήσεων ή εμπλουτισμού.
- Διηθήσεις από ποταμούς ή χείμαρρους.
- Επιστροφές άρδευσης, (Harbaugh et al., 2000).

Κεφάλαιο 5^ο

Υπολογισμός Υπόγειου Υδατικού Αποτυπώματος

5.1 Ανάπτυξη μοντέλου υπόγειου ροής

Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της περιοχής ήταν το λογισμικό πακέτο Visual Modflow 4.1 Flex.

Το MODFLOW αποτελεί ένα εύχρηστο και διαδομένο τρισδιάστατο μοντέλο προσομοίωσης για την υπόγεια ροή του ύδατος στην κορεσμένη ζώνη. Με τη βοήθειά του γίνεται η μελέτη των επιδράσεων των γεωτρήσεων, ποταμών, εξατμισοδιαπνοής, και των εισροών και εκροών ακόμη και σε υδροφορείς έντονης ετερογένειας και σύνθετων οριακών συνθηκών (Harbaugh, 1988).

Το μοντέλο MODFLOW χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών στις τρεις διαστάσεις, όπου το συνεχές σύστημα αντικαθίσταται από ένα πεπερασμένο αριθμό διακριτών σημείων τόσο ως προς το χώρο, όσο και ως προς το χρόνο (Τζιμόπουλος και Μπαλλάς, 2005).

5.2 Δημιουργία εννοιολογικού μοντέλου (conceptual model)

Για την προσομοίωση του υδροφορέα στην υδρολογική λεκάνη της περιοχής της Ποταμιάς, δημιουργήθηκε κάρναβος με διαστάσεις κελιών 100x100. Οι περίοδοι προσομοίωσης χωρίστηκαν σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία αφορά στη συμπεριφορά του υδροφορέα παλαιότερα χρόνια, και η δεύτερη σε νεότερα. Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε με βάση τα υδρολογικά έτη (από Οκτώβριο σε Σεπτέμβριο του επόμενου έτους). Πιο συγκεκριμένα:

- 1^η περίοδος προσομοίωσης: Έτη 1990 έως 1996
- 2^η περίοδος προσομοίωσης: Έτη 2013 έως 2015

Η προσομοίωση έγινε σε συνθήκες μη μόνιμης ροής (transient state). Στην Εικόνα 16 παρουσιάζεται η περιοχή μελέτης στο μοντέλο. Με μπλε χρώμα απεικονίζονται τα μη ενεργά κελιά.



Εικόνα 16: Η περιοχή μελέτης με τον κάνναβο στο μοντέλο

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία του μοντέλου λήφθηκαν από τις εξής μελέτες και βιβλία:

- Διδακτορική Διατριβή Ε.Βασιλείου, «Υδρογεωλογικές συνθήκες της ευρύτερης περιοχής Ποταμιάς Ελασσόνας. Επιπτώσεις από τη μελλοντική εκμετάλλευση των λιγνιτικών κοιτασμάτων στο γεωλογικό καθεστώς».
- Τελική έκθεση, R 11971, Sogreah-Grenoble 1979. Έργο αναπτύξεως υπογείων υδάτων Θεσσαλίας, Μαθηματικά Ομοιώματα.
- Μεταπτυχιακή διατριβή Γ.Τζιάτζιου, «Προσομοίωση Υπόγειου Υδροφόρου Συστήματος Ανατολικής Υδρογεωλογικής Λεκάνης Θεσσαλίας».
- Τεχνική Υδρολογία, Καλλέργης (1999).
- Τεχνική Υδρολογία, Υπόγεια Νερά, Νίκος Μαμάσης, Τομέας Υδατικών Πόρων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Εφαρμοσμένη υδρογεωλογία, Ανδρέας Καλλιώρας, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Άρθρο: *Estimating River Conductance from Prior Information to Improve Surface-Subsurface Model Calibration*, Yohann Cousquer.
- Εθνικό Δίκτυο Παρακολούθησης Υδάτων.

- Δεδομένα από επικοινωνία με τη Διεύθυνση Υδάτων Θεσσαλίας.

5.2.1 Εισαγωγή γεωλογικών δεδομένων

Αρχικά εισήχθησαν τα υψομετρικά δεδομένα της περιοχής και στη συνέχεια γεωλογικά χαρακτηριστικά όπως το πάχος του κάθε γεωλογικού σχηματισμού με βάση τη γεωλογική τομή των φύλλων Χαρτών του ΙΓΜΕ, 1987.

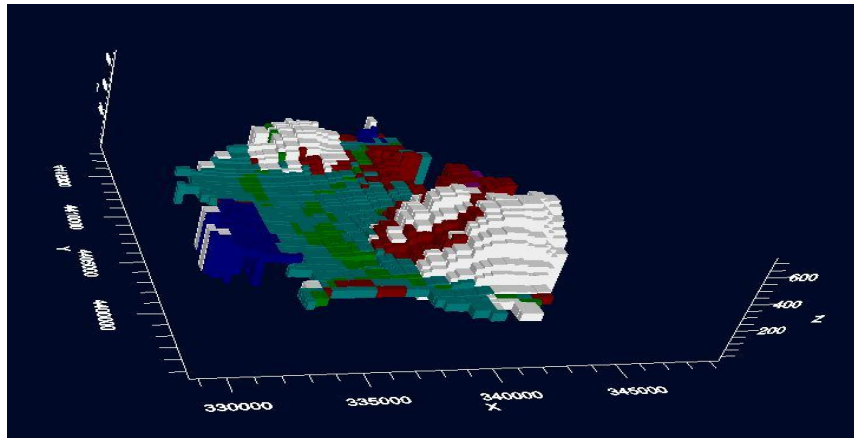
Πιο συγκεκριμένα δημιουργήθηκε γεωλογική ζώνη που προσομοιάζει τις σύγχρονες-ποταμολιμναίες-αλλουβιακές αποθέσεις, μία ζώνη για τον ελλουβιακό μανδύα και τους παλαιούς και νέους κώνους, έπειτα γεωλογικές ζώνες που προσομοιάζονται οι γνευσιοσχιστόλιθοι-ορθογνεύσιοι-σχιστόλιθοι-μάργες και οι γνεύσιοι, και τελικά μία ακόμη ζώνη για τα μάρμαρα. Από τα παραπάνω οι διαπερατοί σχηματισμοί είναι:

- Οι σύγχρονες-ποταμολιμναίες-αλλουβιακές αποθέσεις
- Ο ελλουβιακός μανδύας και οι παλαιοί και νέοι κώνοι
- Τα μάρμαρα.

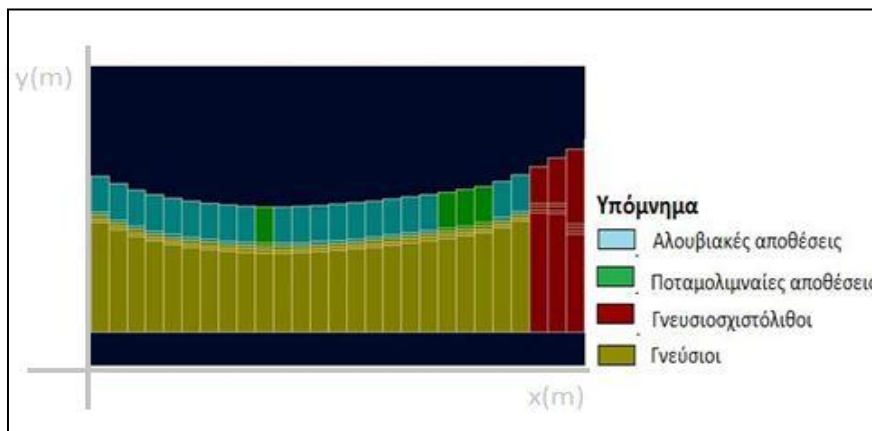
Οι υπόλοιποι σχηματισμοί είναι αδιαπέρατοι:

- Γνευσιοσχιστόλιθοι-ορθογνεύσιοι-σχιστόλιθοι-μάργες
- Γνεύσιοι.

Με βάση τη γεωλογική τομή των χαρτών του ΙΓΜΕ δημιουργήθηκαν γεωλογικές ζώνες βοηθητικά για τα βάθη, που προσομοιάζουν τις αλλουβιακές με βάθος ως 5 μέτρα, τις ποταμολιμναίες και τον ελλουβιακό μανδύα με 15 και 25 μέτρα αντίστοιχα, και τα μάρμαρα με μέσο πάχος περίπου στα 100 μέτρα βάθος, όπως συμβαίνει και με τα στρώματα. Στις Εικόνες 17 και 18 παρουσιάζονται οι γεωλογικές ζώνες του υπό μελέτη υδροφορέα.



Εικόνα 17: Τρισδιάστατη απεικόνιση των γεωλογικών ζωνών του υδροφορέα μελέτης



Εικόνα 18: Δισδιάστατη απεικόνιση των γεωλογικών ζωνών του υδροφορέα μελέτης

Η κατάταξη των γεωλογικών σχηματισμών ως προς τη χρονολογία των σχηματισμών του είναι όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2: Κατάταξη γεωλογικών σχηματισμών του υδροφορέα ως προς τη χρονολογία σχηματισμών.

Σύγχρονες-ποταμολιμναίες-αλλουβιακές αποθέσεις
Αλλουβιακός μανδύας, μάργες οι παλαιοί και νέοι κώνοι
Μάρμαρα
Γνευσιοσχιστόλιθοι-ορθογνεύσιοι-σχιστόλιθοι
Γνεύσιοι

5.2.2 Εισαγωγή υδραυλικών παραμέτρων και αρχικών υδραυλικών υψών (conductivity, storage, initial heads)

Για την αντιστοίχιση της κατάλληλης αγωγιμότητας σε κάθε γεωλογικό σχηματισμό, λήφθηκαν υπόψη η μελέτη για το Υπουργείο Γεωργίας το 1979, Sogreah-Grenoble καθώς και η Διδακτορική Διατριβή Ε.Βασιλείου, «Υδρογεωλογικές συνθήκες της ευρύτερης περιοχής Ποταμιάς Ελασσόνας. Επιπτώσεις από τη μελλοντική εκμετάλλευση των λιγνιτικών κοιτασμάτων στο γεωλογικό καθεστώς». Με βάση τις δύο αυτές μελέτες οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας προέκυψαν όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3: Αντιστοιχία υδραυλικής αγωγιμότητας (m/d) με γεωλογικούς σχηματισμούς (Costandinidis, 1974).

Σύγχρονες-ποταμολιμναίες-αλλουβιακές αποθέσεις	K= 40 m/d
Ελλουβιακός μανδύας, οι παλαιοί και νέοι κώννοι	K= 40 m/d
Γνευσιοσχιστόλιθοι-ορθογνεύσιοι-σχιστόλιθοι-μάργες	K= 10 m/d
Μάρμαρα	K= 35 m/d
Γνεύσιοι	K= 5 m/d

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η υδραυλική αγωγιμότητα, η παράμετρος δηλαδή του μέσου που επιτρέπει την κίνηση του νερού μέσω των διάκενών του, στην περιοχή μελέτης κυμαίνεται από 40 m/d (διαπερατά στρώματα) έως τα 5 m/d (στρώματα). Παρατηρείται, δηλαδή η ύπαρξη μίας ζώνης υψηλής αγωγιμότητας όσο αφορά στην περιοχή που καλύπτεται από τεταρτογενείς αποθέσεις κατά μήκος της περιοχής και φτάνει περίπου μέχρι τα 25 μέτρα βάθος. Υψηλή αγωγιμότητα συναντάται και στην κατηγορία των μαρμάρων, που βρίσκονται κυρίως στα όρια της περιοχής. Στην υπόλοιπη περιοχή που βρίσκονται στρώματα, τα οποία συναντώνται και κάτω από την περιοχή των τεταρτογενών ύστερα από το βάθος των 25 μέτρων περίπου, η αγωγιμότητα είναι αρκετά μικρότερη.

Η εύρεση των κατάλληλων τιμών για την αποθηκευτικότητα αποτέλεσε ένα δύσκολο βήμα, για το λόγο αυτό λήφθηκαν υπόψη, εκτός από τις δύο μελέτες, και βιβλιογραφικά δεδομένα που περιείχαν πίνακες και διαγράμματα προς εύρεση της ιδανικής αποθηκευτικότητας για τον αντίστοιχο γεωλογικό σχηματισμό. Με βάση το σύνολο των δεδομένων προέκυψαν οι τιμές αποθηκευτικότητας όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.

Πίνακας 4: Αντιστοιχία αποθηκευτικότητας (1/m) με γεωλογικούς σχηματισμούς (Costandinidis, 1974, Καλλέργης, 2000).

Σύγχρονες-ποταμολιμναίες-αλλουβιακές αποθέσεις	$S_s = 0,09$ $S_y = 0,18$ Effective porosity = 0,18 Total porosity = 0,57
Ελλουβιακός μανδύας, οι παλαιοί και νέοι κώνοι	$S_s = 0,09$ $S_y = 0,18$ Effective porosity = 0,18 Total porosity = 0,57
Γνευσιοσχιστόλιθοι-ορθογνεύσιοι-σχιστόλιθοι-μάργες	$S_s = 0,005$ $S_y = 0,05$ Effective porosity = 0,04 Total porosity = 0,1
Μάρμαρα	$S_s = 0,07$ $S_y = 0,36$ Effective porosity = 0,36 Total porosity = 0,56
Γνεύσιοι	$S_s = 0,005$ $S_y = 0,05$ Effective porosity = 0,04 Total porosity = 0,1

Οι τιμές αγωγιμότητας και αποθηκευτικότητας προσεγγίστηκαν αρχικώς από τη βιβλιογραφία. Στη συνέχεια μέσω της διαδικασίας βαθμονόμησης (ρύθμισης) του μοντέλου προσαρμόστηκαν και επιβεβαιώθηκαν. Η ειδική απόδοση S_y χρησιμοποιείται για του ελεύθερους υδροφορείς και ταυτίζεται με το ενεργό πορώδες στην περίπτωση αυτή, ενώ για τους υπό πίεση το S . Οι τιμές πορώδους και ειδικής απόδοσης βρέθηκαν στηριζόμενες στη μελέτη Sogreah για το Υπουργείο Γεωργίας το 1974, και αντιστοιχηθήκαν με τους αντίστοιχους γεωλογικούς σχηματισμούς. Στα διαπερατά στρώματα οι παράμετροι S_s , S_y είναι μεγαλύτεροι από τις αντίστοιχες των αδιαπέρατων στρωμάτων, όπως συμβαίνει και με το ενεργό και ολικό πορώδες. Στην ιδανική περίπτωση ο προσδιορισμός των υδραυλικών παραμέτρων πρέπει να βασίζεται σε μετρήσεις στάθμης συναρτήσει του χρόνου γενόμενες σε υδροφόρο πιεζόμετρο αντλούμενης (δοκιμαζόμενης γεώτρησης) (Βασιλείου, 2011).

Τα αρχικά υδραυλικά ύψη θεωρήθηκαν σύμφωνα με αυτά των γεωτρήσεων της περιοχής το 1990. Πιο συγκεκριμένα υπολογίστηκαν με βάση το υδραυλικό ύψος της κάθε γεώτρησης, του προηγούμενου μήνα (Σεπτεμβρίου) του 1990, από την αρχή του υδρολογικού έτους, δηλαδή τον Οκτώβριο του 1990. Για τα επόμενα χρόνια της προσομοίωσης της περιοχής θεωρήθηκαν τα υδραυλικά ύψη που προέκυψαν από το μοντέλο την πρώτη χρονιά προσομοίωσης και διατηρήθηκαν μέχρι το 2015.

5.2.3 Εισροές στο μοντέλο

Στη δημιουργία του μοντέλου ίσχυσαν οι εξής συνθήκες για το υπόγειο υδροφόρο σύστημα:

- Επαναφόρτιση (Recharge)

Σύμφωνα με τη μελέτη Sogreah-Grenoble και τον υδρογεωλιθικό χάρτη της ευρύτερης λεκάνης του Πηνειού, βρέθηκε ότι η διείσδυση της βροχής στην περιοχή μελέτης, που οι διαπερατοί σχηματισμοί αποτελούνται από τεταρτογενείς αποθέσεις, κυμαίνεται από 2 έως 10%.

5.2.4 Εκροές-Αντλήσεις

Οι γεωτρήσεις άντλησης που εισήχθησαν στην περιοχή μελέτης, φαίνονται στην Εικόνα 19. Από αυτές κάποιες χρησιμοποιούνται για αρδευτικούς και άλλες για υδρευτικούς σκοπούς. Ακόμη διακρίνονται σε δημόσιες και ιδιωτικές.



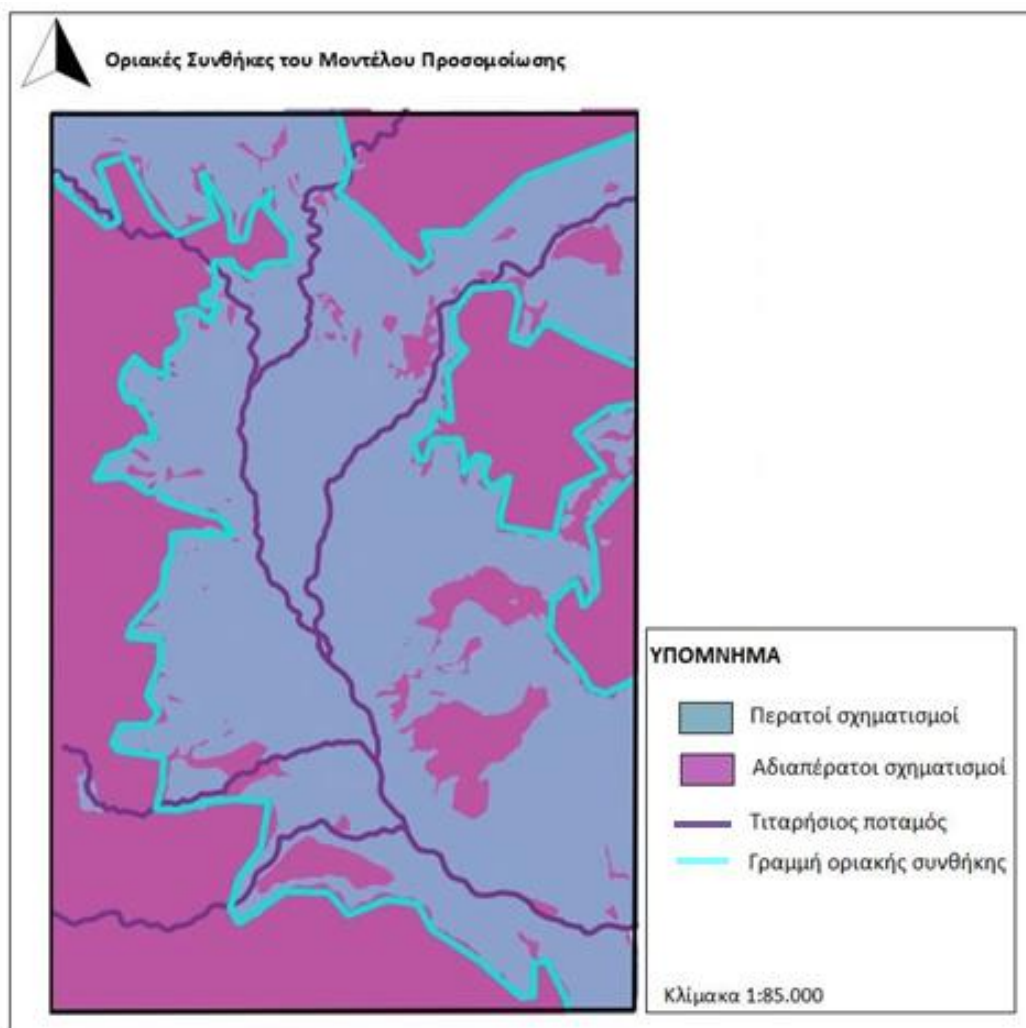
Εικόνα 19: Γεωτρήσεις άντλησης περιοχής μελέτης

Η ένταση των αντλήσεων διαφοροποιούνται κυρίως μεταξύ υγρής και ξηρής περιόδου ενός υδρολογικού έτους:

- Υγρή περίοδος (Οκτώβριος-Μάρτιος)
- Ξηρή περίοδος (Μάρτιος-Σεπτέμβριος)

5.2.5 Οριακές συνθήκες

Ως οριακή συνθήκη επιλέχθηκε να είναι η περιοχή που αποτελείται από τους αδιαπέρατους σχηματισμούς που περιλαμβάνουν κυρίως γνευσιοσχιστόλιθους και γνεύσιους. Είναι ουσιαστικά το όριο των νοητών γραμμών που χωρίζουν τους παλαιοζωϊκούς-μεσοτριάδικούς σχηματισμούς (μάρμαρα) και τις Τεταρτογενείς αποθέσεις (κυρίως αλλουβιακές αποθέσεις) από τους νεοπαλαιοζωϊκούς. Στην Εικόνα 20 φαίνεται η αδιαπέρατη περιοχή με μωβ χρώμα, που αποτελεί τις οριακές συνθήκες καθώς και οι νοητές γραμμές που τις ξεχωρίζουν από την υπόλοιπη περιοχή.



Εικόνα 20: Χάρτης οριακών συνθηκών του μοντέλου προσομοίωσης

Στα ανατολικά κυρίως της περιοχής μελέτης βρίσκεται η οριακή συνθήκη των αδιαπέρατων σχηματισμών, και λιγότερο στα βορειοδυτικά, ενώ στα νοτιοδυτικά της περιοχής μελέτης υπάρχει επικοινωνία μεταξύ του υδροφορέα της Ποταμιάς, με αυτόν του Τύρναβου (Βασιλείου, 2012).

5.2.6 Ρύθμιση του μοντέλου

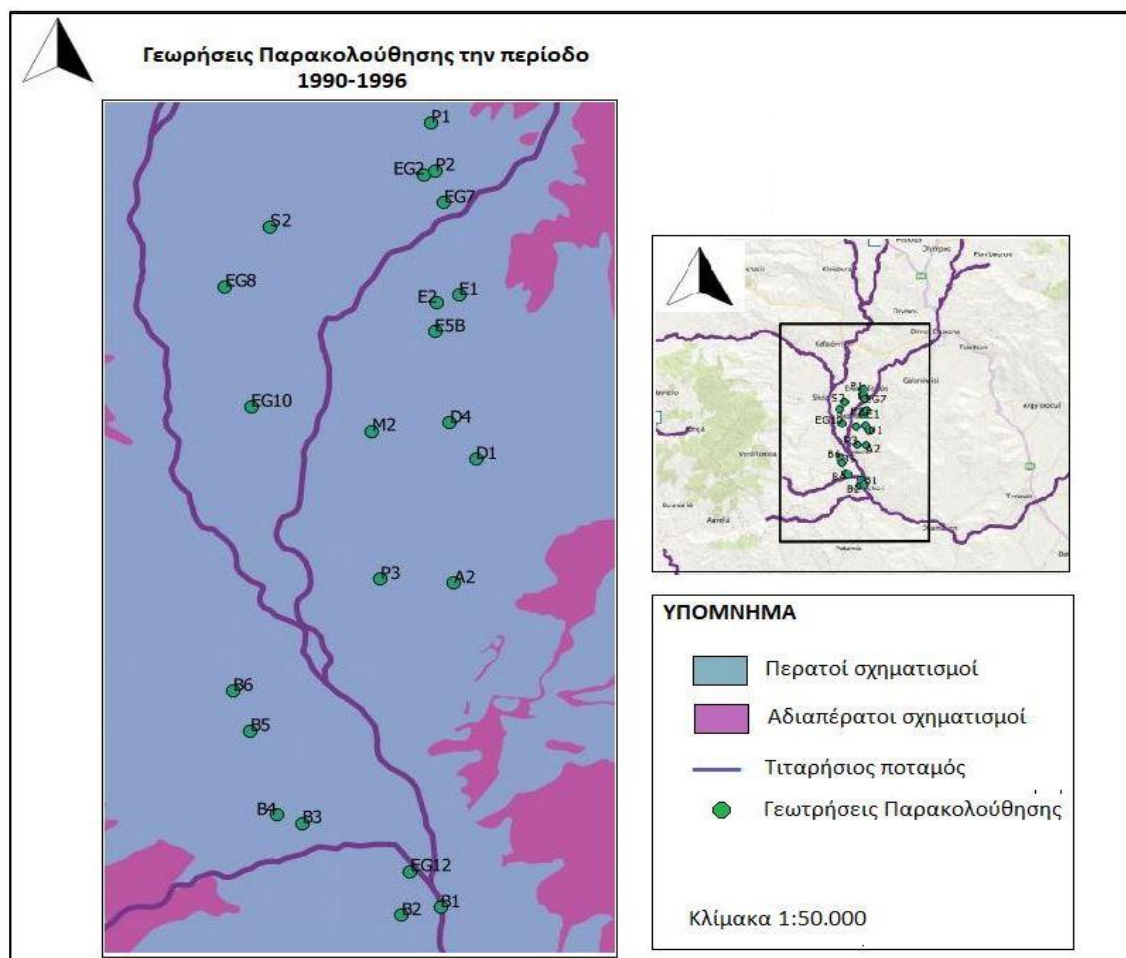
Σημαντική διαδικασία στην προσομοίωση υπόγειων νερών αποτελεί η εργασία ρύθμισης του μοντέλου (Model Calibration), η οποία διασφαλίζει την επιτυχή προσομοίωση της συμπεριφοράς του υδροφορέα. Στην παρούσα εργασία η διαδικασία αυτή εφαρμόστηκε κυρίως μέσω της μικρής μεταβολής της υδραυλικής παραμέτρου της αγωγιμότητας και της αποθηκεύτικότητας. Οι μεταβολές αυτές

ήταν μικρής τάξης μεγέθους, ώσπου να βρεθεί εκείνη η τιμή που θα ρυθμίσει καλύτερα το μοντέλο. Για παράδειγμα η μεταβολή της αγωγιμότητας ήταν περίπου του ενός μέτρου (ανά μέρα). Η διαδικασία επαναλαμβάνεται ώσπου η υπολογισμένη λύση ταιριάζει πλέον με τις παρατηρημένες τιμές του πεδίου, σε αποδεκτά επίπεδα ακριβείας.

5.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης μοντέλου

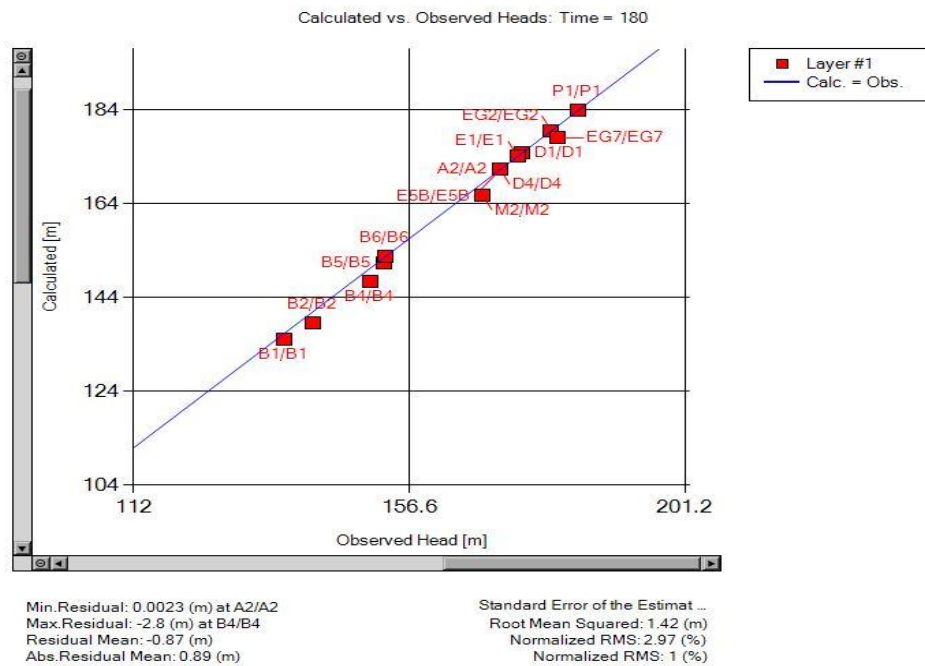
5.3.1 Σφάλματα της διαδικασίας βαθμονόμησης και υδατικό ισοζύγιο 1990-1996.

Οι γεωτρήσεις παρακολούθησης φαίνονται στην Εικόνα 21. Τα σφάλματα που προέκυψαν παρουσιάζονται στις Εικόνες 22-33. Ακολουθούν οι τιμές των μεγεθών του υδατικού ισοζυγίου, όπως αυτό προέκυψε για τα έτη 1990-1996.

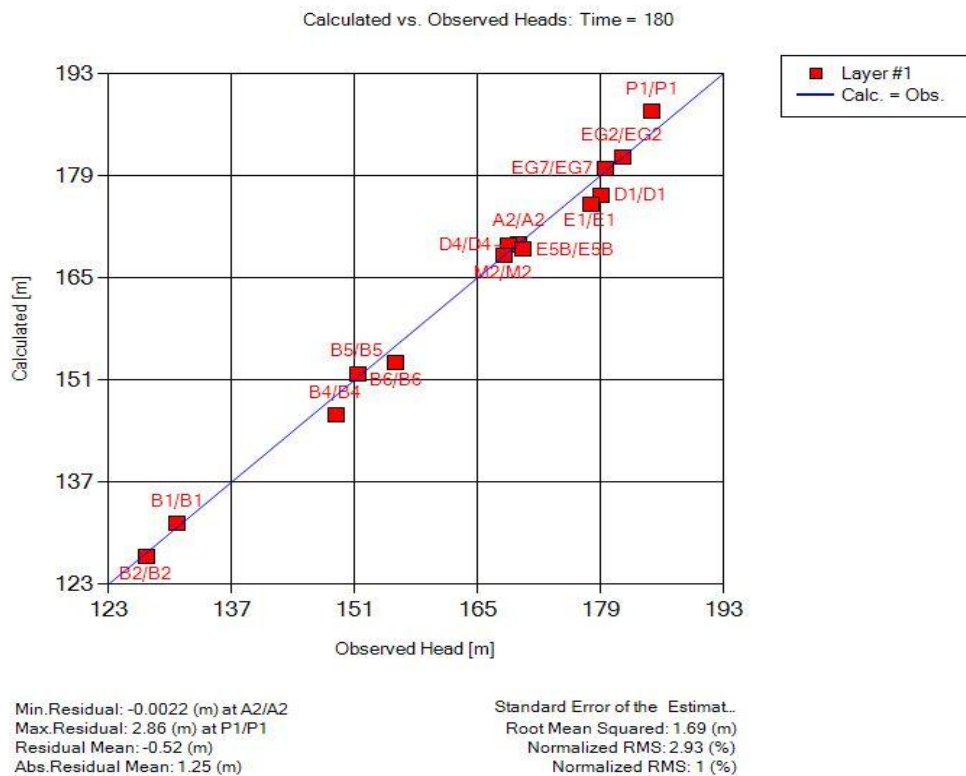


Εικόνα 21: Χάρτης Γεωτρήσεων Παρακολούθησης την περίοδο 1990-1996

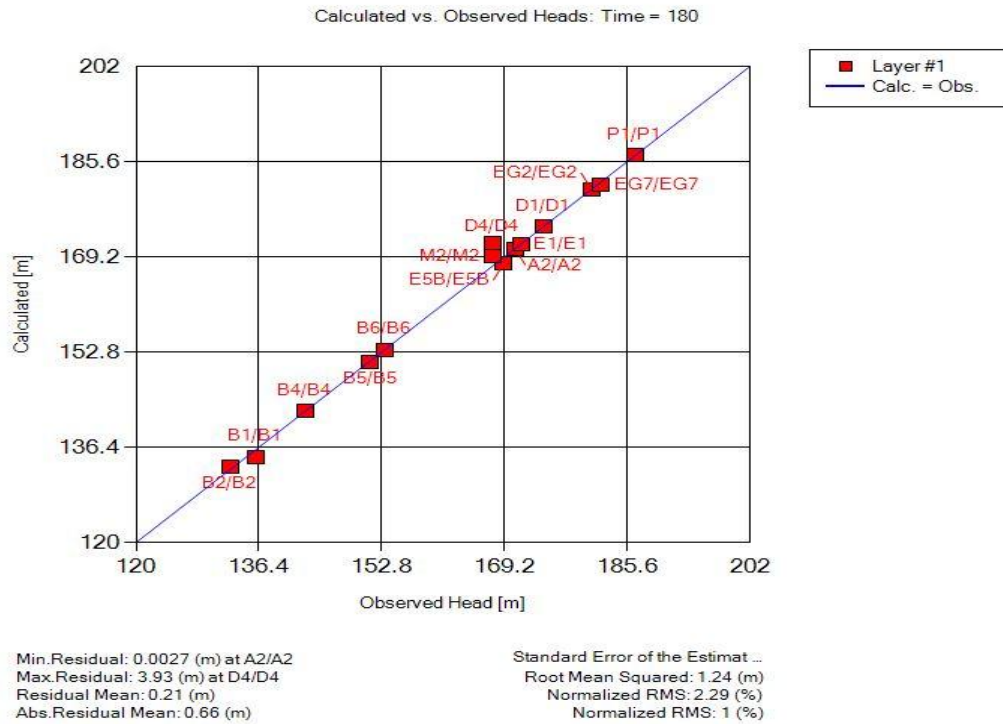
Αρχικά για τα έτη 1990-1996 τις περιόδους: τέλος υγρής περιόδου-τέλος ξηρής περιόδου:



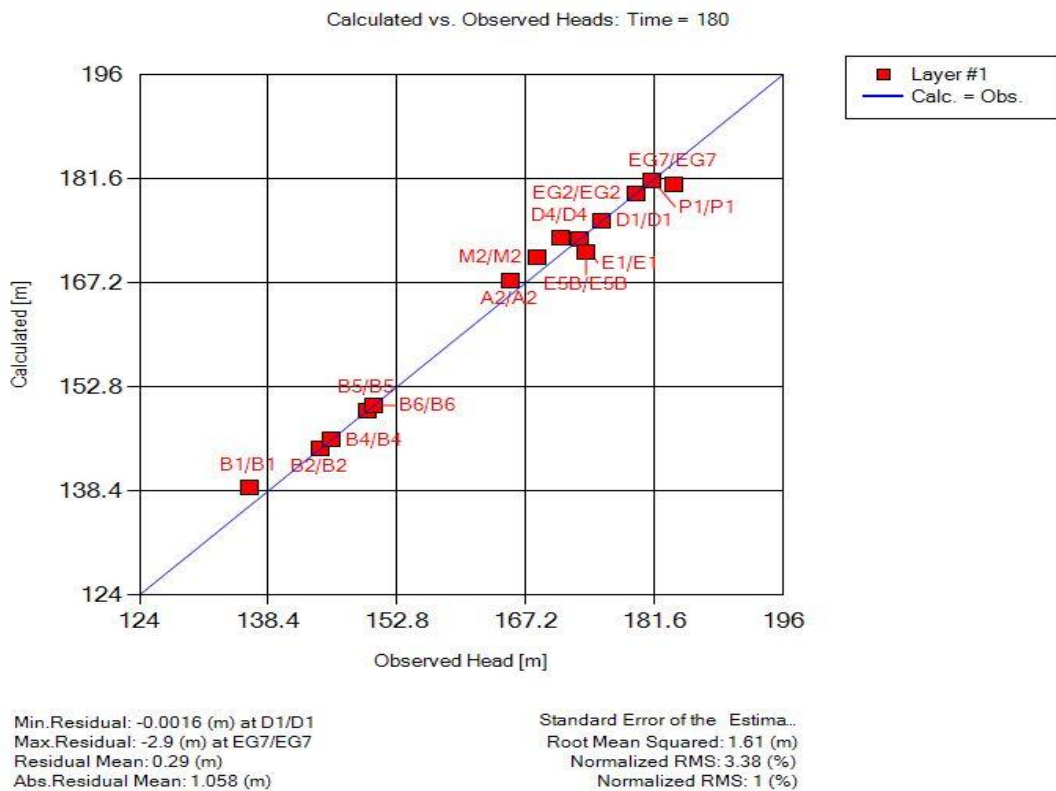
Εικόνα 22: Σφάλματα βαθμονόμησης 1990-1991 για το τέλος υγρής περιόδου



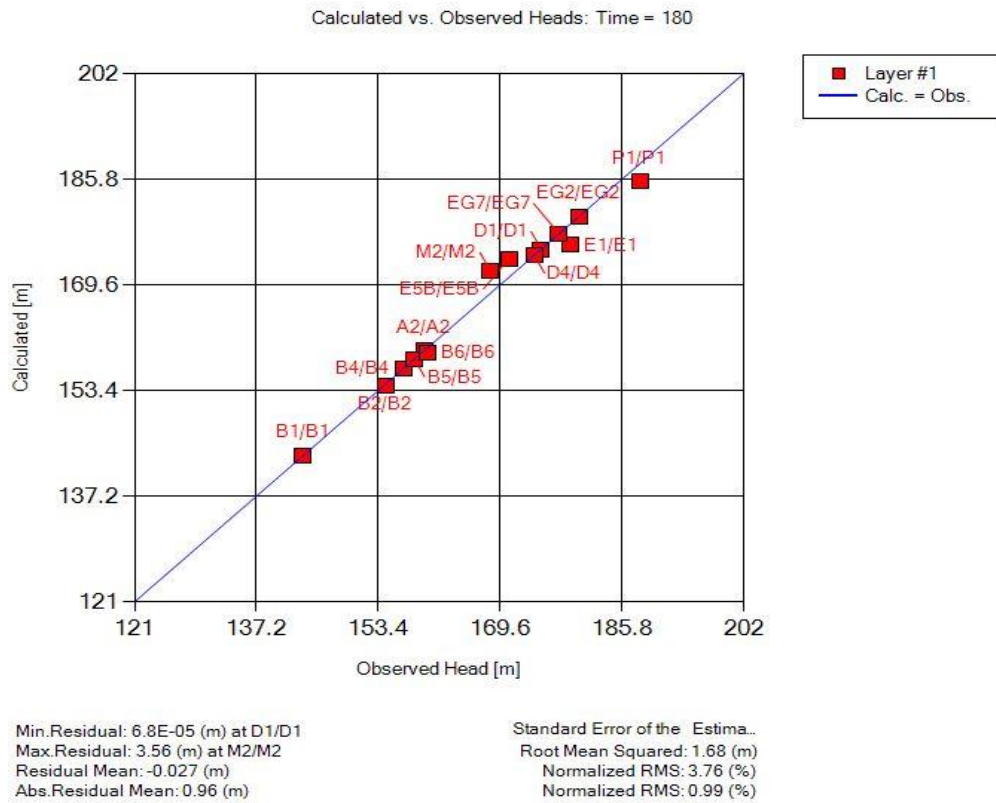
Εικόνα 23: Σφάλματα βαθμονόμησης 1991-1992 για το τέλος υγρής περιόδου



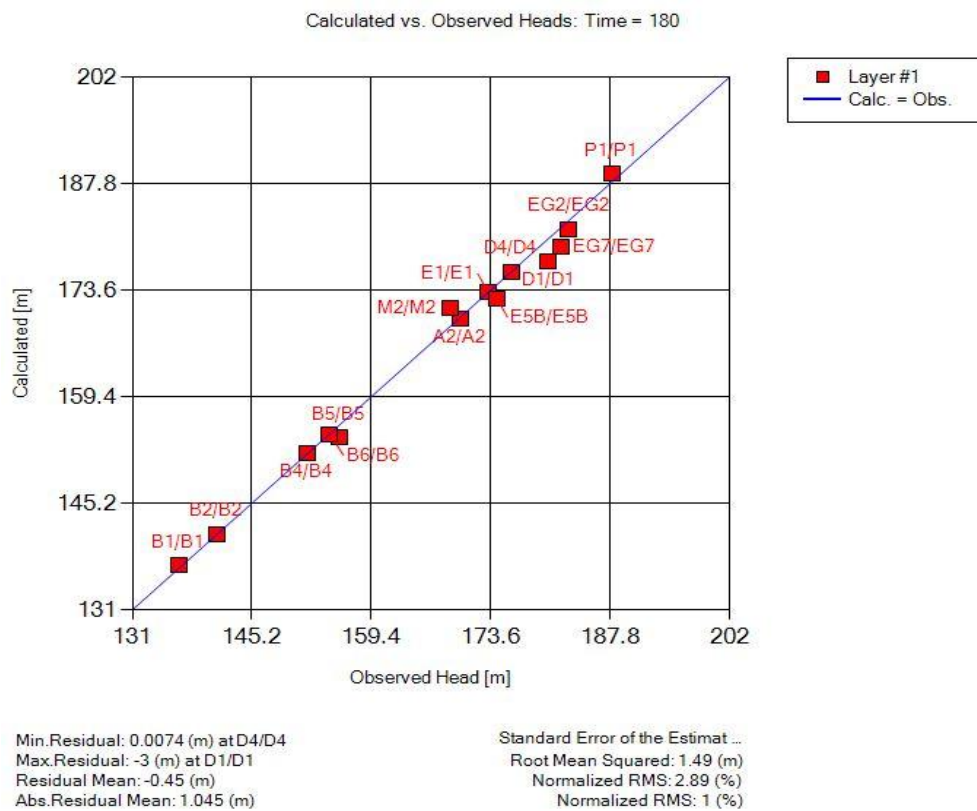
Εικόνα 24: Σφάλματα βαθμονόμησης 1992-1993 το τέλος υγρής περιόδου



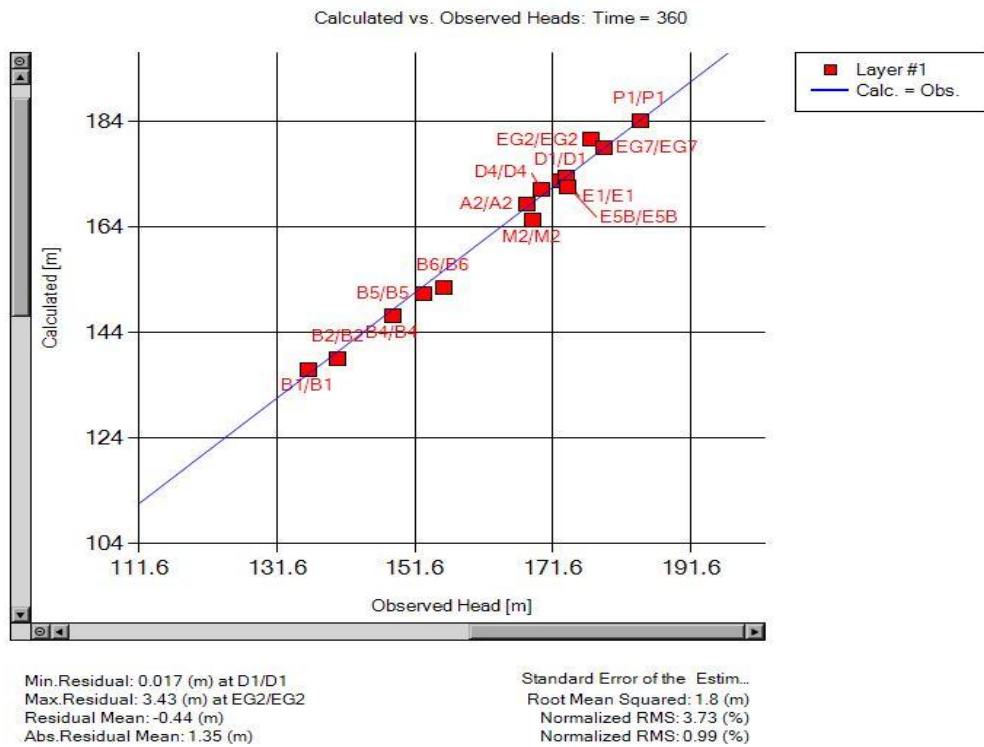
Εικόνα 25: Σφάλματα βαθμονόμησης 1993-1994 για το τέλος υγρής περιόδου



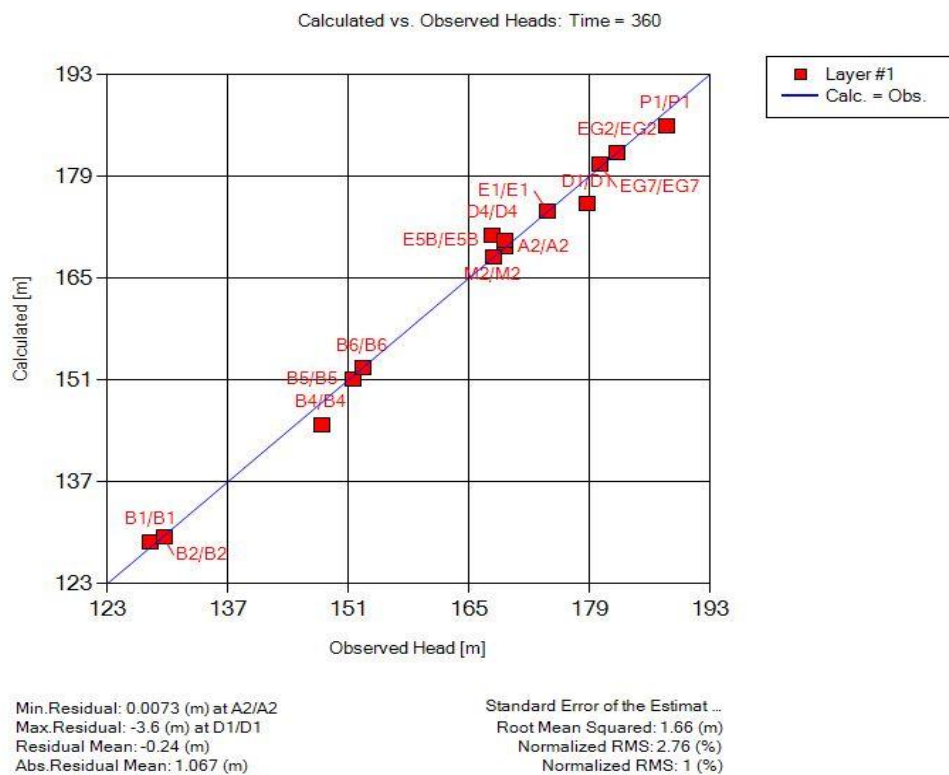
Εικόνα 26: Σφάλματα βαθμονόμησης 1994-1995 για το τέλος υγρής περιόδου



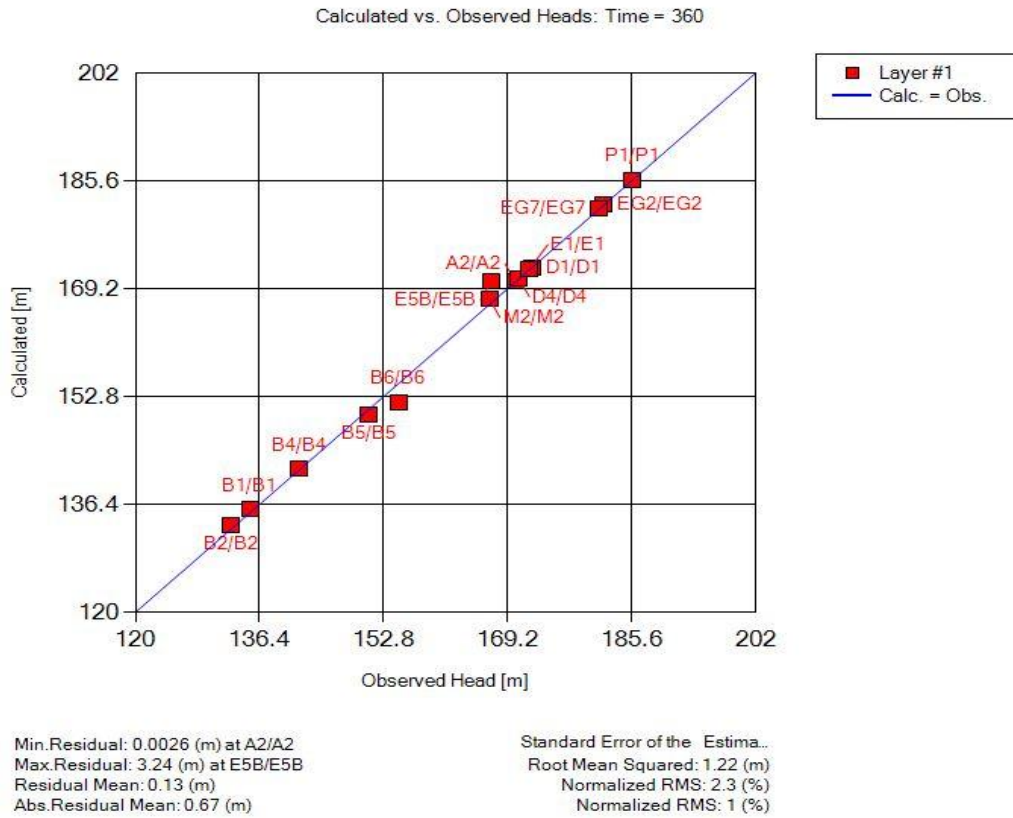
Εικόνα 27: Σφάλματα βαθμονόμησης 1995-1996 για το τέλος υγρής περιόδου



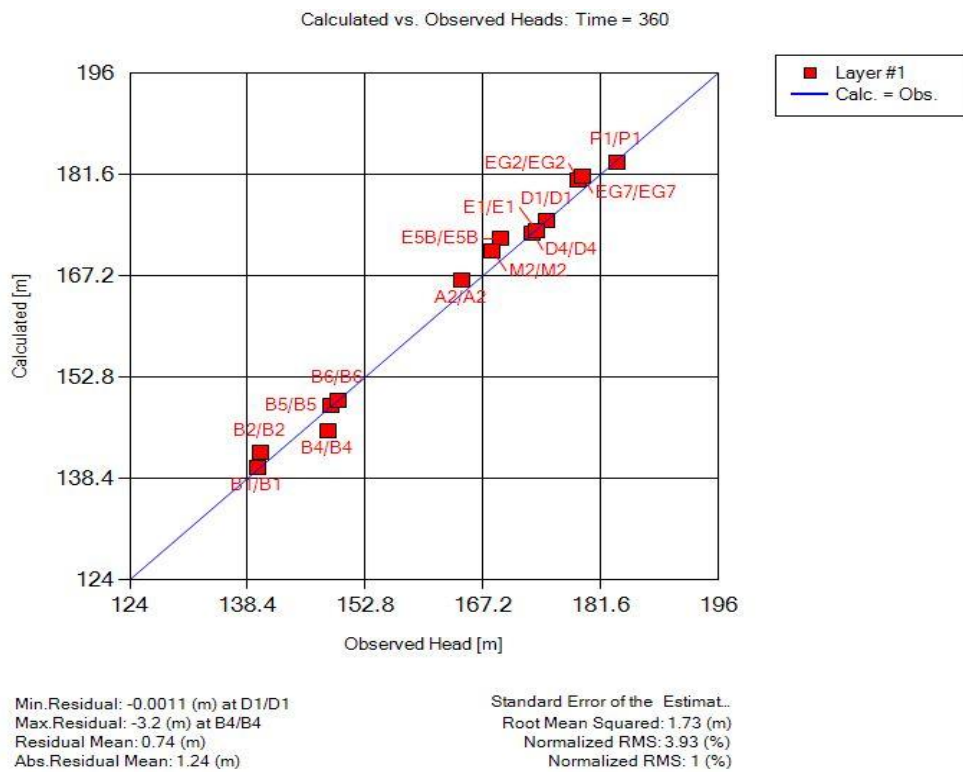
Εικόνα 28: Σφάλματα βαθμονόμησης 1990-1991 για το τέλος ξηρής περιόδου



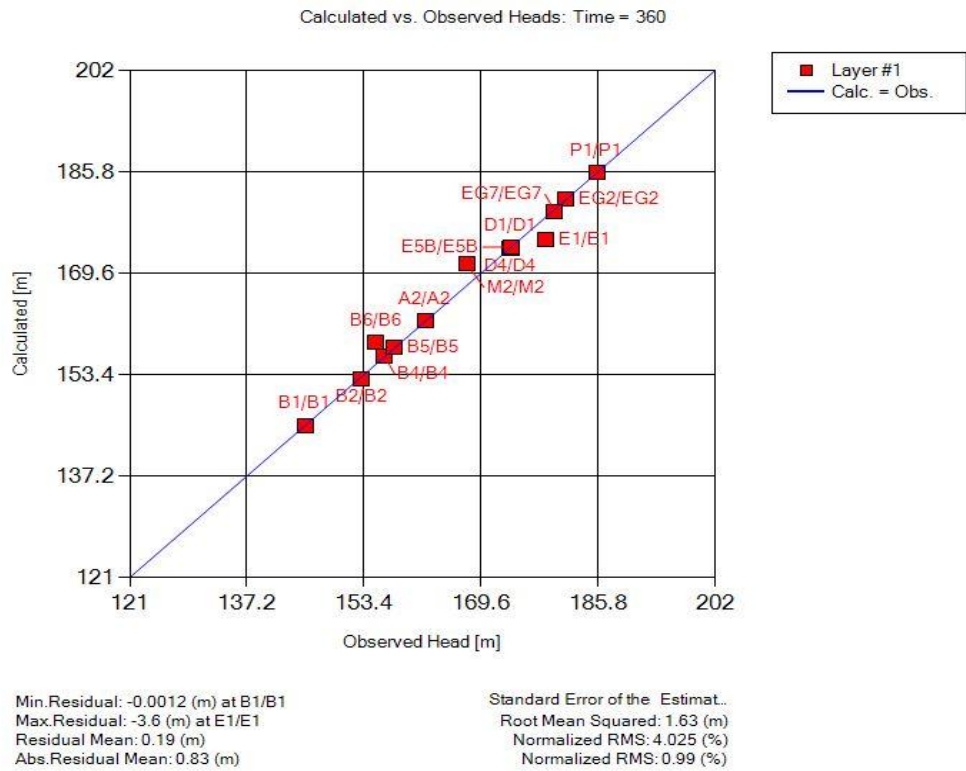
Εικόνα 29: Σφάλματα βαθμονόμησης 1991-1992 για το τέλος ξηρής περιόδου



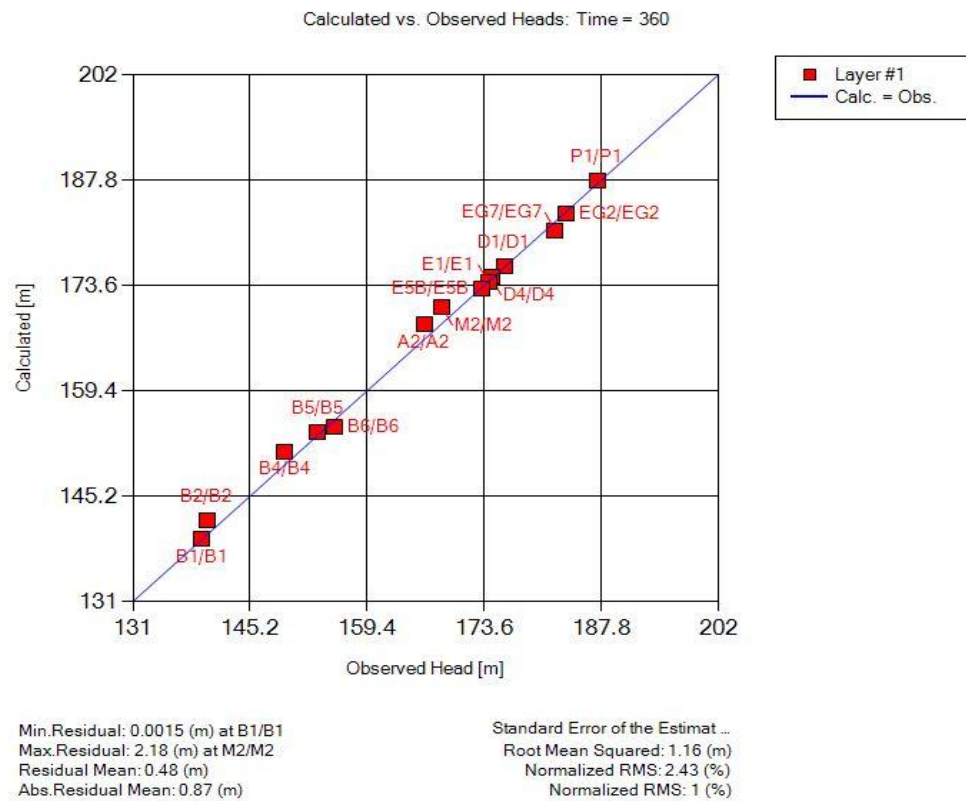
Εικόνα 30: Σφάλματα βαθμονόμησης 1992-1993 για το τέλος ξηρής περιόδου



Εικόνα 31: Σφάλματα βαθμονόμησης 1993-1994 για το τέλος ξηρής περιόδου



Εικόνα 32: Σφάλματα βαθμονόμησης 1994-1995 για το τέλος ξηρής περιόδου



Εικόνα 33: Σφάλματα βαθμονόμησης 1995-1996 για το τέλος ξηρής περιόδου

Από τη μελέτη των παραπάνω σχημάτων παρατηρείται ότι το μέγιστο μέσο σφάλμα, που προκύπτει για την πτώση στάθμης, είναι 3.17 μέτρα και το απόλυτο μέσο σφάλμα 0.97 μέτρα στο τέλος της υγρής περιόδου. Αντίστοιχα στο τέλος της ξηρής περιόδου το μέγιστο μέσο σφάλμα είναι 3.19 μέτρα και το απόλυτο μέσο σφάλμα στο 1 μέτρο.

Αναλυτικά το ισοζύγιο των υπόγειων νερών (μέσες ετήσιες τιμές όγκων νερού), με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα δεδομένα και την εφαρμογή τους στο μοντέλο προσομοίωσης, έχει ως εξής:

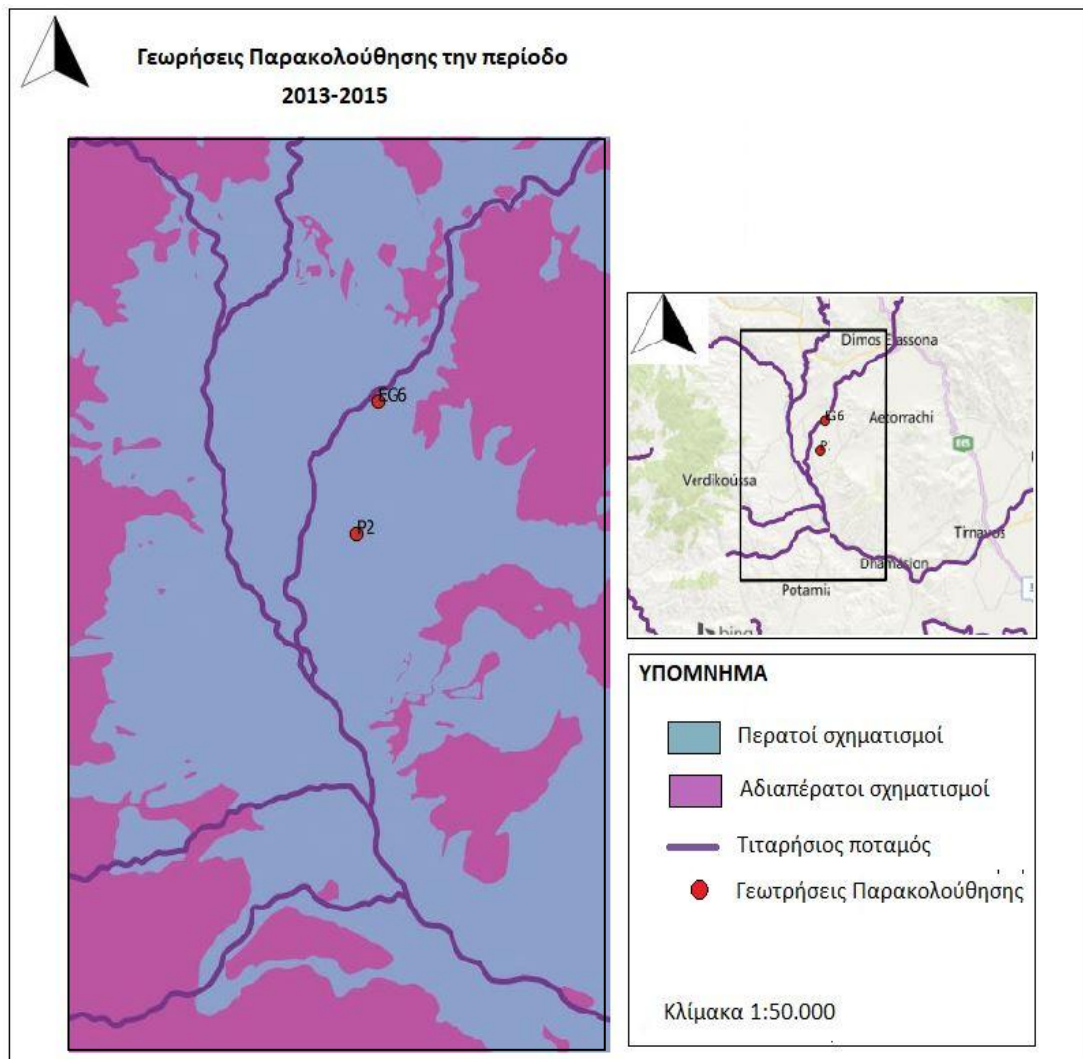
- Οι κατεισδύσεις (βροχή) στις τεταρτογενείς αποθέσεις είναι περί τα $4 \times 10^6 \text{ m}^3$.
- Οι διηθήσεις του ποταμού είναι περί τα $1.2 \times 10^7 \text{ m}^3$.
- Οι εκροές είναι περί τα $3 \times 10^6 \text{ m}^3$.
- Οι αντλούμενες ποσότητες είναι περί τα $7 \times 10^6 \text{ m}^3$.

Οι αντλούμενες ποσότητες την υγρή περίοδο είναι περί τα $2 \times 10^6 \text{ m}^3$.

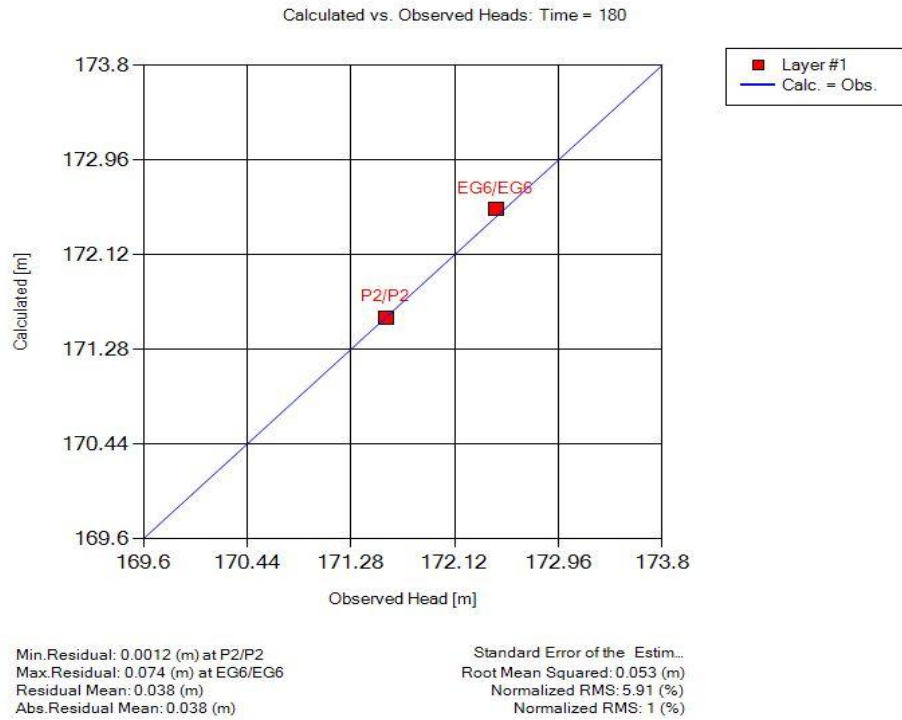
Για την ύδρευση θεωρήθηκε ότι χρησιμοποιούνται τα 500.000 m^3 (Βασιλείου, 2012). Άρα για την άρδευση των στρεμμάτων χρησιμοποιούνται τα $6.5 \times 10^6 \text{ m}^3$. Οι εκροές του ποταμού πραγματοποιούνται, επιπλέον, και από τις δύο πηγές του, το Κεφαλόβρυσο και το Αμούριο.

5.3.2 Σφάλματα διαδικασίας βαθμονόμησης και υδατικό ισοζύγιο 2013-2015.

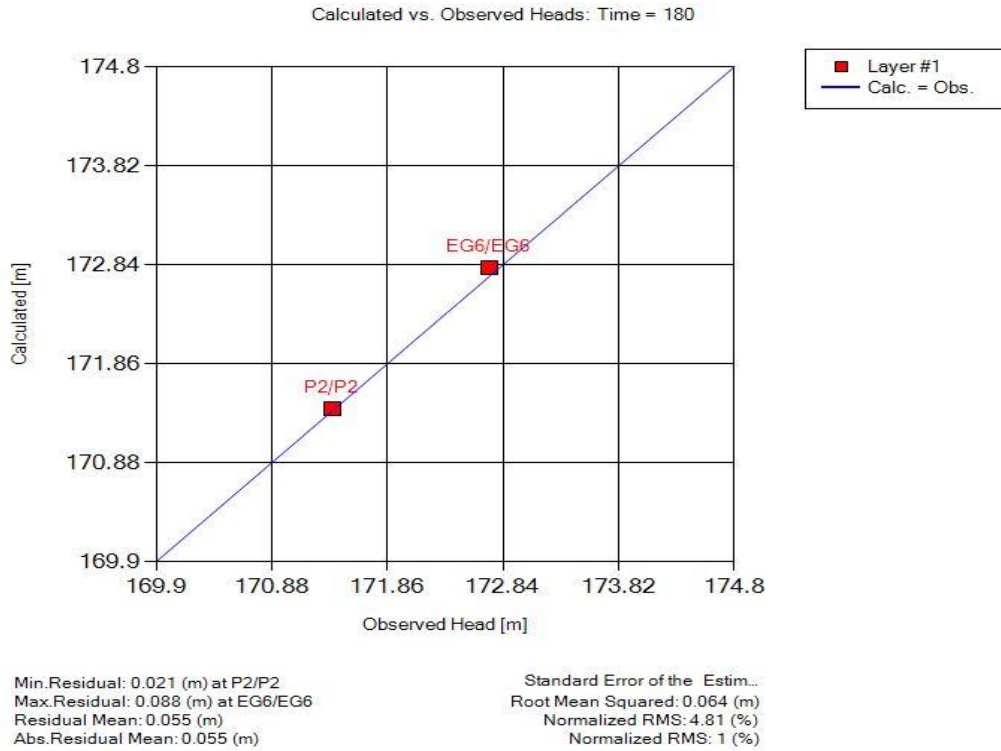
Για τα έτη 2013-2014-2015 υπήρξαν ως δεδομένα λιγότερα σημεία γεωτρήσεων παρακολούθησης. Οι γεωτρήσεις παρακολούθησης φαίνονται στην Εικόνα 34. Τα σφάλματα που προέκυψαν παρουσιάζονται στα Σχήματα 35-40. Ακολουθούν οι τιμές των μεγεθών του υδατικού ισοζυγίου, όπως αυτό προέκυψε για τα έτη 2013-2015.



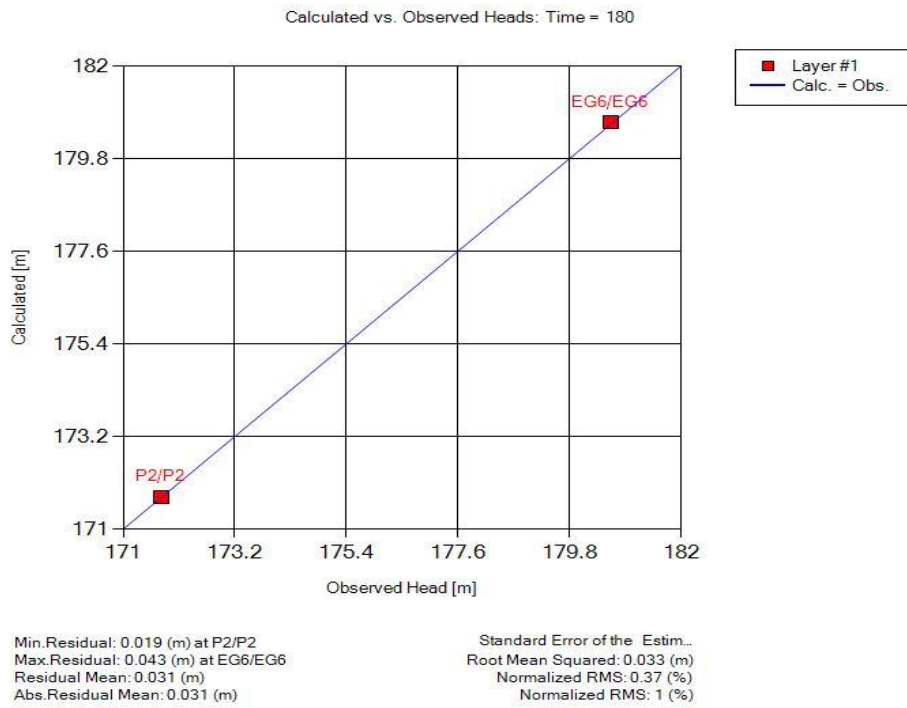
Εικόνα 34: Χάρτης Γεωτήσεων παρακολούθησης για την περίοδο 2013-2015



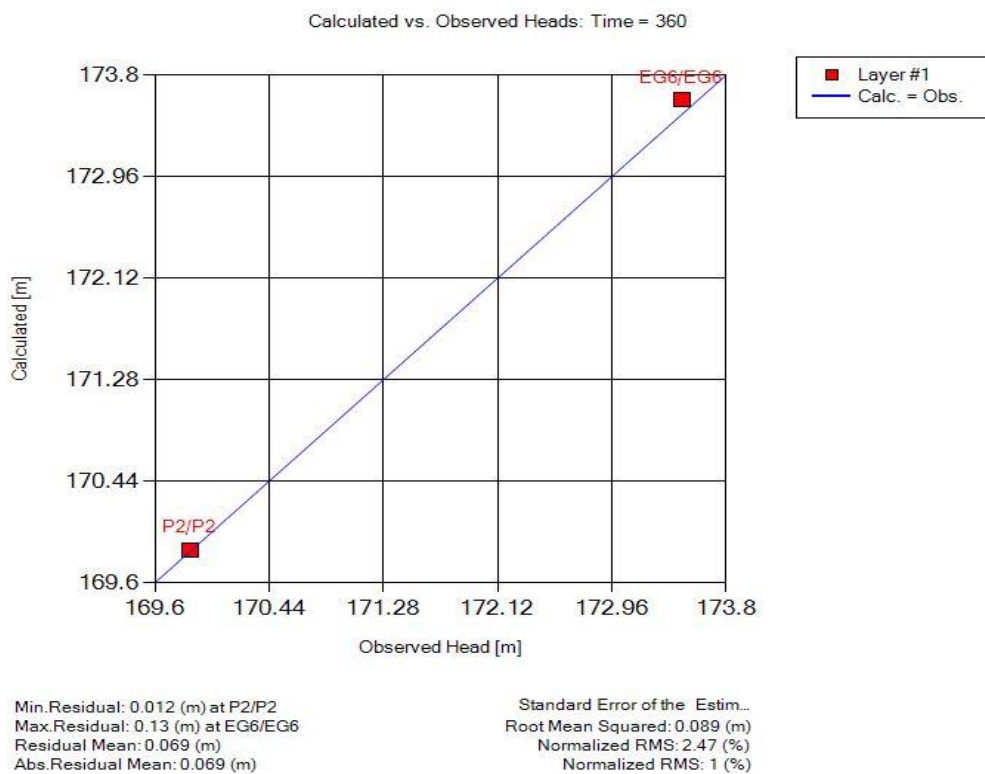
Εικόνα 35: Σφάλματα βαθμονόμησης 2013 για το τέλος υγρής περιόδου



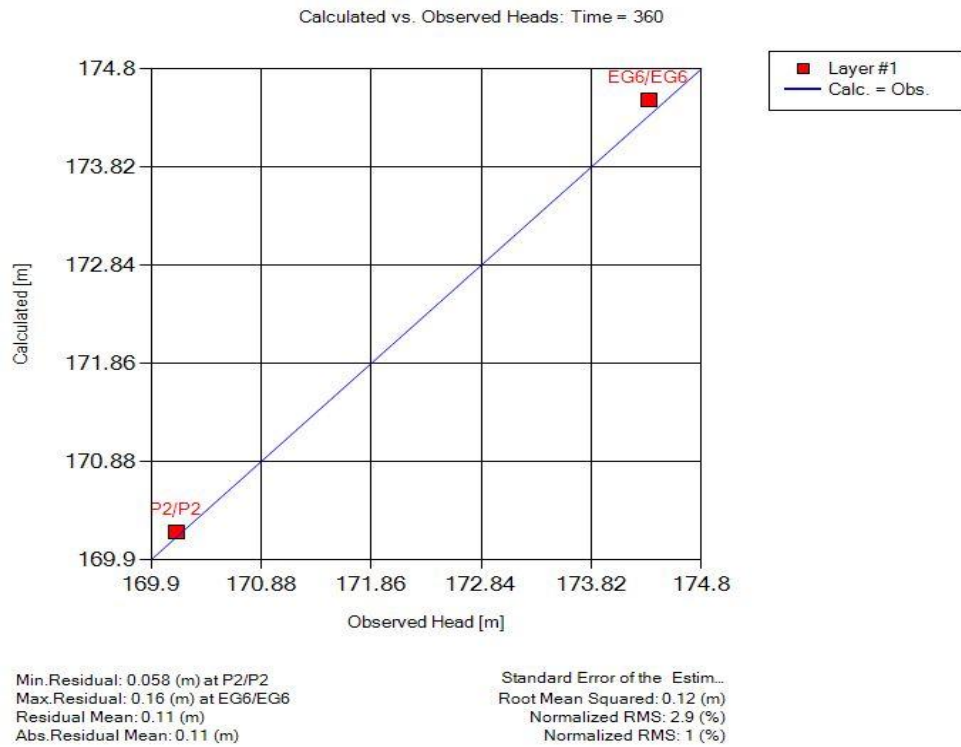
Εικόνα 36: Σφάλματα βαθμονόμησης 2014 για το τέλος υγρής περιόδου



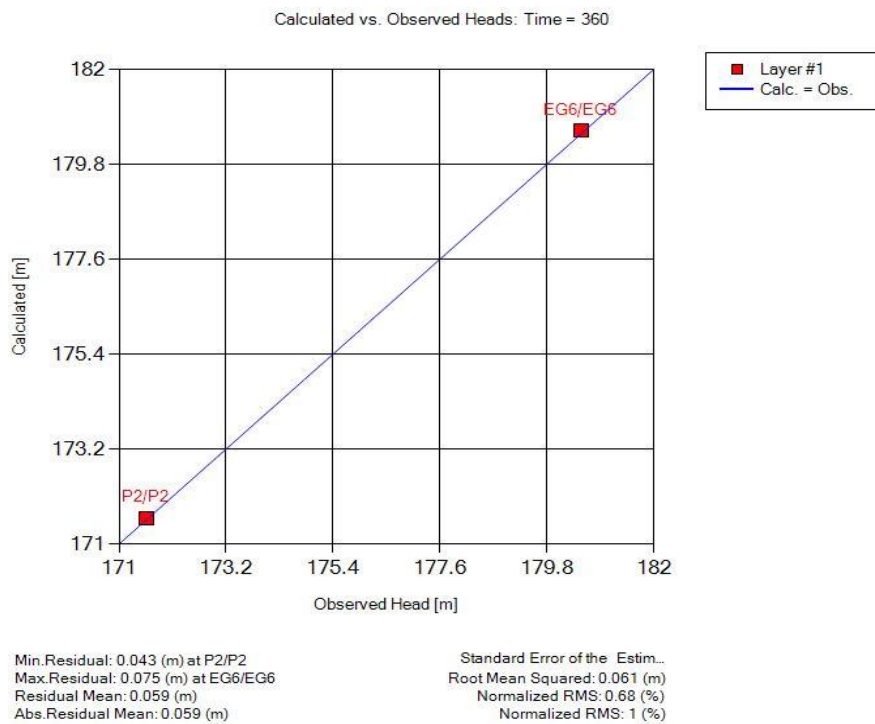
Εικόνα 37: Σφάλματα βαθμονόμησης 2015 για το τέλος υγρής περιόδου



Εικόνα 38: Σφάλματα βαθμονόμησης 2013 για το τέλος ξηρής περιόδου



Εικόνα 39: Σφάλματα βαθμονόμησης 2014 για το τέλος ξηρής περιόδου



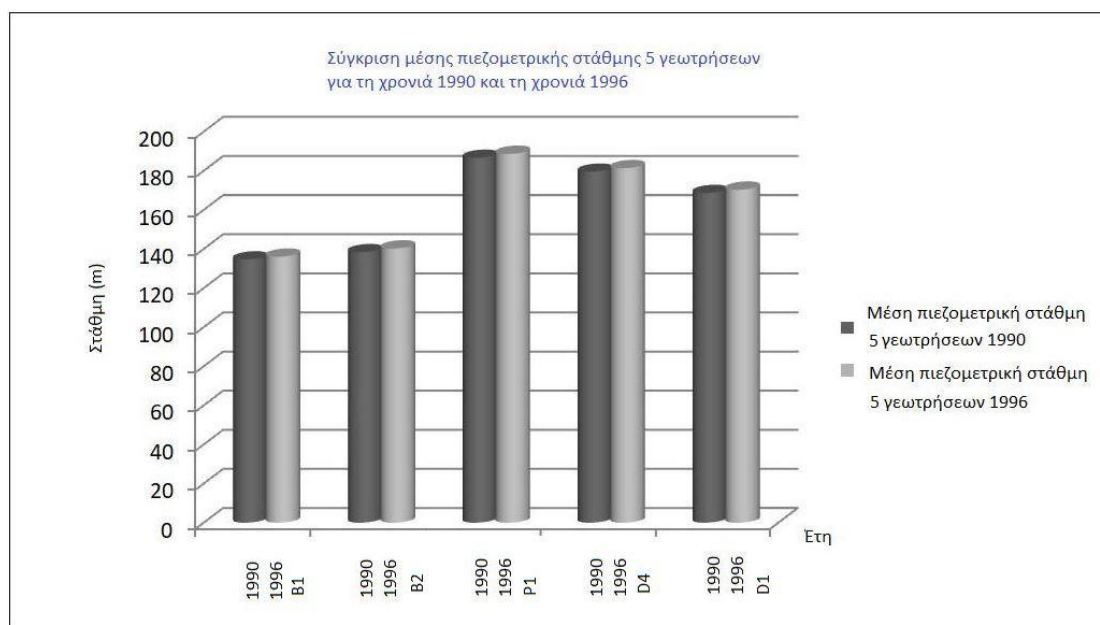
Εικόνα 40: Σφάλματα βαθμονόμησης 2015 για το τέλος ξηρής περιόδου

Από τη μελέτη των παραπάνω σχημάτων παρατηρείται ότι το μέγιστο μέσο σφάλμα, που προκύπτει είναι 0.07 μέτρα και το απόλυτο μέσο σφάλμα 0.04 μέτρα στο τέλος της υγρής περιόδου. Αντίστοιχα στο τέλος της ξηρής περιόδου το μέγιστο μέσο σφάλμα είναι 0.4 μέτρα και το απόλυτο μέσο σφάλμα στα 0.08 μέτρα. Αναλυτικά το ισοζύγιο των υπόγειων νερών (μέσες ετήσιες τιμές όγκων νερού), με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα δεδομένα και την εφαρμογή τους στο μοντέλο προσομοίωσης, έχει ως εξής:

- Οι κατεισδύσεις (βροχή) στις τεταρτογενείς αποθέσεις είναι περί τα $4 \times 10^6 \text{ m}^3$.
- Οι διηθήσεις του ποταμού είναι περί τα $1.4 \times 10^7 \text{ m}^3$.
- Οι εκροές είναι περί τα $3 \times 10^6 \text{ m}^3$.
- Οι αντλούμενες ποσότητες είναι περί τα $7 \times 10^6 \text{ m}^3$ (ετησίως).

Οι αντλούμενες ποσότητες την υγρή περίοδο είναι περί τα $2 \times 10^6 \text{ m}^3$.

Στο Διάγραμμα 7 φαίνεται η σύγκριση της διακύμανσης της μέσης πιεζομετρικής στάθμης 5 γεωτρήσεων, των B1, B2, D1, D4, P1 για δύο έτη, το 1990 και το 1996, στο τέλος της ξηρής περιόδου. Παρατηρείται ότι από το 1990 έως το 1996 τα επίπεδα της μέσης στάθμης των γεωτρήσεων έχουν αυξηθεί.



Διάγραμμα 7: Σύγκριση μέσης πιεζομετρικής στάθμης 5 γεωτρήσεων το 1990 και το 1996

5.4 Υπολογισμός περιβαλλοντικής ροής

Η περιβαλλοντική ροή υπολογίστηκε στο σημείο του Μεσοχωρίου στον Τιταρήσιο. Για τον υπολογισμό της, χρησιμοποιήθηκαν η μέθοδος Tennant και η εκτίμηση περιβαλλοντικής ροής στην Ελλάδα.

5.4.1 Μέθοδος Tennant

Η μέθοδος Tennant βασίζεται στη συσχέτιση μεταξύ του ποσοστού της μέσης ετήσιας ροής κατά τη διάρκεια ορισμένων ετών (ή μηνών) και του οικολογικού περιβάλλοντος κατά μήκος του ποταμού, για να υπολογίζεται η ζήτηση νερού που απαιτείται για τη συντήρηση ορισμένων οικολογικών λειτουργιών (Tennant, 1976). Θεωρείται ότι το 10% της μέσης ετήσιας ροής είναι η συνιστώμενη ελάχιστη παροδική απορροή που απαιτείται από τους βιότοπους για την επιβίωση των περισσότερων υδρόβιων οργανισμών, συνιστάται το 30% κατάλληλη απορροή και το 60% είναι η συνιστώμενη καλύτερη απορροή για τους περισσότερους υδρόβιους οργανισμούς (Tennant, 1976). Για να διατηρηθούν οι «καλές» συνθήκες του ποταμού, η μέθοδος Tennant προτείνει:

$$Π.Ρ. = Q_1 * 20 \% \text{ (υγρή περίοδος)}$$

$$Π.Ρ. = Q_2 * 40 \% \text{ (ξηρή περίοδος)}$$

όπου Π.Ρ. είναι η περιβαλλοντική ροή (EF: Environmental Flow). Το Q_1 είναι η μέση ροή κατά τη διάρκεια της υγρής περιόδου και το Q_2 είναι η μέση ροή σε ξηρή περίοδο. (Tennant, 1976 - Patsialis et al., 2014).

5.4.2 Εκτίμηση περιβαλλοντικής ροής στην Ελλάδα

Στην Ελλάδα, η εφαρμογή της οικολογικής ροής βασίζεται στο θεσμικό πλαίσιο του Υπουργικού διατάγματος 12160/1999. Αυτό το πλαίσιο χρησιμοποιείται επίσης από τη Ρυθμιστική Αρχή για την Ενέργεια (ΡΑΕ) και το Υπουργείο Περιβαλλοντικής Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής για την επιχειρησιακή αδειοδότηση μικρών υδροηλεκτρικών έργων. Η μέθοδος που ακολουθείται στην Ελλάδα είναι εμπειρική μέθοδος και δημιουργήθηκε για την προστασία των ποταμών. Η νομοθεσία αναφέρεται περιβαλλοντική ροή για τα έργα, αλλά δεν υπάρχει κάποια άλλη μέθοδος στην ελληνική νομοθεσία η οποία να αναφέρει ως επικρατέστερη κάποια

άλλη μέθοδο (π.χ.Tennant). Ως τιμή περιβαλλοντικής ροής εκλαμβάνεται το μεγαλύτερο ενός από τα παρακάτω:

- 30% της θερινής ροής του ποταμού, ή
- 50% της ροής το Σεπτέμβριο, ή
- 30 L / s (0,03 m³/s) ανά πάσα στιγμή.

Ο νόμος αφήνει περιθώριο για περαιτέρω αύξηση της τιμής της ελάχιστης οικολογικής παροχής, εφόσον αυτή απαιτείται τεκμηριωμένα λόγω των αναγκών του κατάντη οικοσυστήματος (ύπαρξη σημαντικού οικοσυστήματος) (Γεωργαλάς Σ., 2015).

5.4.3 Αποτελέσματα στην περιοχή μελέτης

Στη λεκάνη της Ποταμιάς, στο σημείο του Μεσοχωρίου υπολογίστηκε ο μέσος ετήσιος όρος των παροχών από το 1990 έως το 2015, ο μέσος όρος παροχών υγρής περιόδου, ο μέσος όρος ξηρής περιόδου και πολλαπλασιάστηκαν με τους αντίστοιχους συντελεστές τους, 10%, 20% και 40%. Για τη θερινή ροή και ροή Σεπτεμβρίου ο μέσος όρος παροχών που βρέθηκαν πολλαπλασιάστηκαν με 30% και 50% αντίστοιχα. Βρέθηκαν τα εξής αποτελέσματα, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.

Πίνακας 5: Εκτίμηση περιβαλλοντικής ροής για τα υδρολογικά έτη 1990-2015.

Χρονολογία (Έτη)	Μέθοδος Tennant υγρή περίοδος	Μέθοδος Tennant ξηρή περίοδος	Μέθοδος Tennant Μέση ετήσια παροχή	Ελληνική Νομοθεσία θερινή ροή	Ελληνική Νομοθεσία ροή Σεπτεμβρίου
1990-2015	0.64 m ³ /s	0.79 m ³ /s	0.29 m ³ /s	0.22 m ³ /s	0.40 m ³ /s

Με βάση τη μέθοδο Tennant για την χειμερινή περίοδο η τιμή περιβαλλοντικής ροής είναι 0.64 m³/s, ενώ για τη θερινή περίοδο η τιμή περιβαλλοντικής ροής βρέθηκε 0.79 m³/s. Η μέση ετήσια παροχή βρέθηκε 0.29 m³/s.

Λαμβάνοντας υπόψη την Ελληνική Νομοθεσία για τη θερινή περίοδο η τιμή περιβαλλοντικής ροής βρέθηκε στα $0.22 \text{ m}^3/\text{s}$. Για τη ροή του μήνα Σεπτεμβρίου η τιμή περιβαλλοντικής ροής είναι $0.40 \text{ m}^3/\text{s}$. Η εκτίμηση της περιβαλλοντικής ροής με βάση την τρίτη κατηγορία της Ελληνικής Νομοθεσίας είναι $0,03 \text{ m}^3/\text{s}$ ανά πάσα στιγμή.

5.5 Υπολογισμός δείκτη υπόγειου υδατικού αποτυπώματος

Όπως έχει αναφερθεί (Κεφάλαιο 2), το υπόγειο υδατικό αποτύπωμα ορίζεται ως:

$GF = \left[\frac{C}{R-E} \right]$, όπου τα C,R και E είναι αντιστοίχως η ετήσια άντληση υπόγειων υδάτων, ο ρυθμός επαναφόρτισης και η περιβαλλοντική ροή ή η συνεισφορά των υπόγειων υδάτων στη ροή. Όταν η περιβαλλοντική ροή είναι μικρότερη από τη συνεισφορά των υπογείων υδάτων στη ροή (base flow), τότε εκτιμήθηκε, στην παρούσα εργασία, με βάση την παραδοχή ότι το E είναι ίσο με την ποσότητα/συνεισφορά των υπογείων υδάτων.

Στον Πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την άντληση, την επαναφόρτιση του ποταμού, της συνεισφοράς του στη ροή (BF: base flow) και της περιβαλλοντικής ροής (E.F.: environmental flow) με βάση την μέθοδο Tennant (10% της μέση ετήσιας παροχής – 1^η Περίπτωση). Στη συνέχεια στον Πίνακα 7 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα για το υπόγειο υδατικό αποτύπωμα ανά έτος μελέτης.

Πίνακας 6: Παράμετροι για τον υπολογισμό του δείκτη (1^η περίπτωση)

Παρά-μετροι	1990-1991	1991-1992	1992-1993	1993-1994	1994-1995	1995-1996	2013	2014	2015
C	7×10^6	7×10^6	7×10^6	7×10^6	7×10^6	7×10^6	7×10^6	7×10^6	7×10^6
R	1.17×10^7	1.5×10^7	1.5×10^7	1.2×10^7	1.1×10^7	1.3×10^7	1.5×10^7	1.17×10^7	1.17×10^7
E.F.	9×10^6	9×10^6	9×10^6	9×10^6	9×10^6	9×10^6	9×10^6	9×10^6	9×10^6
B.F	4×10^6	5.6×10^6	1.2×10^6	3.7×10^6	10^6	4×10^6	8×10^6	3×10^6	5×10^6

Πίνακας 7: Τιμή δείκτη υπόγειου υδατικού αποτυπώματος (1^η περίπτωση)

Χρονολογία	Τιμή δείκτη
1990-1991	GF/A =2.6
1991-1992	GF/A =1.2
1992-1993	GF/A =1.2
1993-1994	GF/A =2.3
1994-1995	GF/A =3.5
1995-1996	GF/A =1.8
2013	GF/A =1.2
2014	GF/A =2.6
2015	GF/A =2.6

Η τιμή του δείκτη για όλες τις χρονολογίες βγήκε μεγαλύτερος από τη μονάδα ($GF/A > 1$), γεγονός που σημαίνει ότι η χρήση των υπόγειων υδάτων στην περιοχή δεν πραγματοποιείται σε βιώσιμο βαθμό, καθώς το αποτύπωμα είναι μεγαλύτερο από την περιοχή που καλύπτει. Η σύγκριση του υπόγειου υδατικού αποτυπώματος και της έκτασης της περιοχής φαίνεται στον Πίνακα 8.

Πίνακας 8: Σύγκριση υπόγειου υδατικού αποτυπώματος και της έκτασης της περιοχής (1^η περίπτωση).

Χρονολογία	GF (Km ²)	A (Km ²)
1990-1991	279	107.75
1991-1992	129	107.75
1992-1993	129	107.75
1993-1994	248	107.75
1994-1995	377	107.75
1995-1996	194	107.75
2013	129	107.75
2014	248	107.75
2015	248	107.75

Στη 2^η περίπτωση υπολογισμού του υπόγειου υδατικού αποτυπώματος, η περιβαλλοντική ροή εκτιμήθηκε με βάση τη μέθοδο Tennant, υιοθετώντας ωστόσο

τη μορφή της μεθόδου η οποία εκτιμά τις περιβαλλοντικές ανάγκες ανά ξηρή και υγρή περίοδο. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 9. Τα αποτελέσματα για το υπόγειο υδατικό αποτύπωμα παρουσιάζονται στον Πίνακα 10.

Πίνακας 9: Παράμετροι για τον υπολογισμό του δείκτη (2^η περίπτωση)

Παρά-μετροι	1990-1991	1991-1992	1992-1993	1993-1994	1994-1995	1995-1996	2013	2014	2015
C	7×10^6	7×10^6	7×10^6	7×10^6	7×10^6	7×10^6	7×10^6	7×10^6	7×10^6
R	1.17×10^7	1.5×10^7	1.5×10^7	1.2×10^7	1.1×10^7	1.3×10^7	1.5×10^7	1.17×10^7	1.17×10^7
E.F.	2×10^7	2×10^7	2×10^7	2×10^7	2×10^7	2×10^7	2×10^7	2×10^7	2×10^7
B.F	4×10^6	5.6×10^6	1.2×10^6	3.7×10^6	10^6	4×10^6	8×10^6	3×10^6	5×10^6

Πίνακας 10: Τιμή δείκτη υπόγειου υδατικού αποτυπώματος (2^η περίπτωση)

Χρονολογία	Τιμή δείκτη
1990-1991	GF/A =0.9
1991-1992	GF/A =0.8
1992-1993	GF/A =0.5
1993-1994	GF/A =0.8
1994-1995	GF/A =0.6
1995-1996	GF/A =0.8
2013	GF/A =1
2014	GF/A =0.8
2015	GF/A =1

Παρατηρείται ότι στις περισσότερες χρονιές υπάρχει μία μείωση του δείκτη, σε σχέση με την 1^η περίπτωση, ιδιαίτερα το 1992-1993. Ενώ για τις υπόλοιπες χρονολογίες θεωρείται επίσης βιώσιμος, με το 2013 και 2015 να είναι οριακά βιώσιμος. Η σύγκριση του υπόγειου υδατικού αποτυπώματος και της έκτασης της περιοχής φαίνεται στον Πίνακα 11.

Πίνακας 11: Σύγκριση υπόγειου υδατικού αποτυπώματος και της έκτασης της περιοχής (2^η περίπτωση).

Χρονολογία	GF (Km ²)	A (Km ²)
1990-1991	97	107.75
1991-1992	86	107.75
1992-1993	54	107.75
1993-1994	86	107.75
1994-1995	65	107.75
1995-1996	86	107.75
2013	107.75	107.75
2014	86	107.75
2015	107.75	107.75

Παρατηρείται ότι με βάση την Ελληνική Νομοθεσία η τιμή της ροής Σεπτεμβρίου είναι μεγαλύτερη από την τιμή για τη θερινή ροή, 0.40 και 0.22 m³/s αντίστοιχα, επομένως με βάση αυτή θα γίνει ο υπολογισμός του δείκτη υπόγειου υδατικού αποτυπώματος που αποτελεί την 3^η περίπτωση. Οι τιμές που βρέθηκαν για την άντληση, την επαναφόρτιση του ποταμού, της συνεισφοράς του στη ροή (BF: base flow) και της περιβαλλοντικής ροής (E.F.: environmental flow), για τη ροή Σεπτεμβρίου με βάση την Ελληνική Νομοθεσία, φαίνονται στον Πίνακα 12. Τα αποτελέσματα του δείκτη για την 3^η περίπτωση παρουσιάζονται στον Πίνακα 13.

Πίνακας 12: Παράμετροι για τον υπολογισμό του δείκτη (3^η περίπτωση)

Παρά- μετροι	1990- 1991	1991- 1992	1992- 1993	1993- 1994	1994- 1995	1995- 1996	2012- 2013	2013 - 2014	2014 - 2015
C	7×10^6	7×10^6	7×10^6	7×10^6	7×10^6	7×10^6	7×10^6	7×10^6	7×10^6
R	1.17×10^7	1.5×10^7	1.5×10^7	1.2×10^7	1.1×10^7	1.3×10^7	1.5×10^7	1.17×10^7	1.17×10^7
E.F.	10^6	10^6	10^6	10^6	10^6	10^6	10^6	10^6	10^6
B.F	4×10^6	5.6×10^6	1.2×10^6	3.7×10^6	4×10^6	4×10^6	8×10^6	3×10^6	5×10^6

Πίνακας 13: Τιμή δείκτη υπόγειου υδατικού αποτυπώματος (3^η περίπτωση).

Χρονολογία	Τιμή δείκτη
1990-1991	GF/A =0.9
1991-1992	GF/A =0.7
1992-1993	GF/A =0.5
1993-1994	GF/A =0.9
1994-1995	GF/A =1.1
1995-1996	GF/A =0.8
2013	GF/A =0.9
2014	GF/A =0.9
2015	GF/A =1

Η τιμή του δείκτη για τις χρονολογίες 1990-1991, 1991-1992, 1992-1993, 1995-1996 για τη ροή Σεπτεμβρίου βγήκε μικρότερη από τη μονάδα ($GF/A < 1$), γεγονός που σημαίνει ότι ο υδροφορέας είναι βιώσιμος. Οριακά βιώσιμος είναι το 2014-2015 ενώ το 1994-1995 χαρακτηρίζεται ως μη βιώσιμος. Η σύγκριση του υπόγειου υδατικού αποτυπώματος και της έκτασης της περιοχής φαίνεται στον Πίνακα 14.

Πίνακας 14: Σύγκριση υπόγειου υδατικού αποτυπώματος και της έκτασης της περιοχής (3^η περίπτωση).

Χρονολογία	GF (Km²)	A (Km²)
1990-1991	97	107.75
1991-1992	75	107.75
1992-1993	65	107.75
1993-1994	97	107.75
1994-1995	119	107.75
1995-1996	86	107.75
2013	97	107.75
2014	97	107.75
2015	107.75	107.75

Κεφάλαιο 6^ο

Συμπεράσματα – Προτάσεις

6.1 Συμπεράσματα

Το υπόγειο υδροφόρο σύστημα της υδρογεωλογικής λεκάνης της Ποταμιάς στην Ελασσόνα αποτελεί ζωτικής σημασίας πηγή νερού για την ικανοποίηση των αρδευτικών και υδρευτικών αναγκών της περιοχής. Η υδροφορία λόγω των διηθήσεων και της κατείδυσης είναι πιο πλούσια στο κεντρικό τμήμα της λεκάνης περιοχής μελέτης. Στα περιθώρια της λεκάνης, όπου υπάρχουν αδιαπέρατοι σχηματισμοί, η υπόγεια υδροφορία είναι σχεδόν ανύπαρκτη, για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε και ως οριακή συνθήκη.

Σύμφωνα με την εκτίμηση του υδατικού ισοζυγίου, ετήσια, οι αντλούμενες ποσότητες είναι περί τα $7 \times 10^6 \text{ m}^3$, ενώ μόλις τα $2 \times 10^6 \text{ m}^3$, ανήκουν στην υγρή περίοδο. Το γεγονός αυτό δείχνει ότι τους θερινούς μήνες οι ανάγκες για άντληση είναι ιδιαίτερα μεγάλες, επομένως λαμβάνει χώρα μία επιβάρυνση του υδροφορέα, προκειμένου να καλυφθούν οι απαιτήσεις για άρδευση και ύδρευση.

Ο υπό μελέτη υδροφορέας, όπως προέκυψε από τον υπολογισμό του δείκτη υπόγειου υδατικού αποτυπώματος, βρέθηκε ότι με βάση τη μέθοδο Tennant, είναι μεγαλύτερος της μονάδας, γεγονός που σημαίνει ότι η εκμετάλλευση των υπόγειων αποθεμάτων της περιοχής πραγματοποιείται σε μη βιώσιμα επίπεδα. Η τιμή του δείκτη υπολογίσθηκε και με μέθοδο εκτίμησης της περιβαλλοντικής ροής που προτείνει η Ελληνική Νομοθεσία. Σε αντίθεση με την προηγούμενη περίπτωση τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο υδροφορέας είναι βιώσιμος ή οριακά βιώσιμος, με βάση τη ροή Σεπτεμβρίου, με εξαίρεση τη χρονιά 1994-1995.

Συμπεραίνεται, η επιρροή της μεθόδου υπολογισμού των περιβαλλοντικών απαιτήσεων στον υπολογισμό του δείκτη είναι ιδιαίτερα σημαντική και αναδεικνύεται η ανάγκη προσδιορισμού της περιβαλλοντικής ροής λαμβάνονται υπόψη περισσότερα χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης (π.χ. μέσω ολιστικών μεθόδων οι οποίες λαμβάνουν υπόψη τόσο υδρολογικά στοιχεία και τα χαρακτηριστικά των ενδιαιτημάτων). Ωστόσο, καθώς με βάση τα αποτελέσματα, το υπόγειο υδατικό αποτύπωμα είναι είτε μεγαλύτερο από την περιοχή την οποία καλύπτει είτε οριακά μικρότερο (μέση τιμή του λόγου GF/A για την 3^η περίπτωση

0.86) και κατά συνέπεια κρίνεται σκόπιμη η επανασχεδιασμός της διαχείρισης των υδατικών πόρων της περιοχής μελέτης.

6.2 Προτάσεις

Αρχικά, από την εκπόνηση της εργασίας έγινε αντιληπτό ότι η περιοχή εμφανίζει έλλειμμα επαρκών υδρολογικών μετρήσεων και στοιχείων. Για το λόγο αυτό θα χαρακτηριζόταν απαραίτητη η μέτρηση παροχής στις πηγές και στάθμης στα υπόγεια ύδατα. Ακόμη κρίνεται αναγκαία η τοποθέτηση ενός πλήρους μετεωρολογικού σταθμού στην περιοχή της λεκάνης, που θα συγκεντρώνει τα απαραίτητα στοιχεία, ώστε να εκτιμάται ορθότερα το υδατικό ισοζύγιο, καθώς ο μετεωρολογικός σταθμός Λάρισας, από τον οποίο συλλέχτηκαν τα δεδομένα, βρίσκεται σχετικά μακριά από την περιοχή.

Επιπλέον, με βάση τις τιμές του δείκτη, οι οποίες είναι σχετικά κοντά στη μονάδα προτείνεται ο επανασχεδιασμός των αντλήσεων στην περιοχή. Σχετικά με τον τρόπο υπολογισμού του δείκτη, προτείνεται να πραγματοποιηθεί περαιτέρω έρευνα σχετικά με την αβεβαιότητα του λόγω της παραμέτρου R.

Βιβλιογραφία

Ελληνική Βιβλιογραφία

Βασιλείου Ε. (2011). *‘Υδρογεωλογικές Συνθήκες της ευρύτερης περιοχής Ποταμιάς Ελασσόνας. Επιπτώσεις από τη μελλοντική εκμετάλλευση των λιγνιτικών κοιτασμάτων στο υδατικό καθεστώς’*. Διδακτορική Διατριβή, Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Γεωργαλάς Σ. (2015). *‘Εκτίμηση Οικολογικής Παροχής στον Ταμιευτήρα του Μαραθώνα. Διαχείριση και Αξιοποίηση’*. Μεταπτυχιακή Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Δημόγιαννη Σ. (2014). *‘Συμβολή των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών και της Τηλεπισκόπησης στην Υδρογεωλογία της περιοχής Λάρισας-Τύρναβου’*. Διατριβή Ειδίκευσης, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

Ειδική Γραμματεία Υδάτων (2015). *‘Σχέδιο Διαχείρισης των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας (ΥΔ08)’*. Υ.Π.Κ.Ε.

Ευαγγελόπουλος Α. (1974). *‘Διαχειριστική μελέτη του υπόγειου υδάτινου δυναμικού περιοχών δικαιοδοσίας των Τοπικών Οργανισμών Εγγείων Βελτιώσεων (Τ.Ο.Ε.Β.) νομού Λάρισας’*. Νομαρχιακή Αυτοδιοίκηση Λάρισας. Διεύθυνση Ε.Β. Λάρισας.

Ευρωπαϊκή Επιτροπή (2009). *‘Προϊόντα και υπηρεσίες οικοσυστήματος’*. Διαθέσιμο στο:

https://ec.europa.eu/environment/pubs/pdf/factsheets/Ecosystems/Ecosystem_EL.pdf. [Τελευταία πρόσβαση: 20/02/2020].

Καλλέργης Γ. (1986). *‘Εφαρμοσμένη Υδρογεωλογία’*. Τόμος Α, Τ.Ε.Ε., Αθήνα.

Καλλέργης Γ. (2000). *‘Εφαρμοσμένη-Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία’*. 3 Τόμοι, Δεύτερη Έκδοση Τεχνικού Επιμελητηρίου, Αθήνα.

Καλλιώρας Α. (2013). *‘Εφαρμοσμένη υδρογεωλογία’*. Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Καραμουχτάρη Α. (2006). *‘Η διακύμανση της στάθμης και η ποιότητα των νερών των υδροφόρων στρωμάτων της περιοχής Τυρνάβου (Ν. Λάρισας)’. Διατριβή Ειδίκευσης, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.*

Κατσικάτσος Γ. (1992). *‘Γεωλογία της Ελλάδας’.* Πανεπιστήμιο Πάτρας, Αθήνα.

Λατινόπουλος Π. Δ. (2008). *‘Υδρολογία των Υπόγειων Νερών’.* Εκδ. ΧΑΡΙΣ, Αθήνα.

Λέκκας Θ. (1996). *‘Περιβαλλοντική Μηχανική-Διαχείριση Υδατικών Πόρων’.* Εκδ. ΚΟΣΜΟΣ ΠΕΜΕΡ ΕΠΕ, Αθήνα.

Μαμάσης Ν. (2009). *‘Πανεπιστημιακές διαλέξεις’.* Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Μανάκος Α. και Τασιός Ν. (1986). *‘Υδρογεωλογική έρευνα μεγάλων ανθρακικών μαζών Θεσσαλίας. Καρστικός υδροφορέας Κρανιάς’.* Εσωτερική Έκθεση ΙΓΜΕ, Θεσσαλονίκη.

Μαντούζα Α. (2008). *‘Ανάλυση της λεκάνης του ποταμού Πηνειού στα πλαίσια της οδηγίας πλαίσιο 2000/60 με χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων πληροφοριών’.* Μεταπτυχιακή εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

Μιγκίρος Γ. (1983). *‘Γεωλογική Μελέτη της περιοχής του κάτω Ολύμπου στη Θεσσαλία’.* Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών.

Μπέλεσης Α. (2012). *‘Αναθεώρηση και τροποποίηση του γενικού πολεοδομικού σχεδίου Δήμου Τυρνάβου’.* Λάρισα.

Νέα Ευρωπαϊκή Οδηγία Για Τα Υπόγεια Ύδατα. *‘Προστασία των Υπόγειων Υδάτων στην Ευρώπη’.* Διαθέσιμο στο: <https://op.europa.eu/el/publication-detail/-/publication>.

[Τελευταία πρόσβαση: 20/02/2020].

Οδηγία 2000/60/ΕΚ. *‘Πλαίσιο για τα νερά για τη θέσπιση πλαισίου Κοινοτικής Δράσης στον τομέα της Πολιτικής των Υδάτων’.* Διαθέσιμο στο:

<https://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CONSLEG:2000L0060:20130913:EL:PDF>. [Τελευταία πρόσβαση: 20/02/2020].

Οδηγίες 80/68, 2006/118. *‘Προστασία των υπόγειων υδάτων από τη ρύπανση και την υποβάθμιση’*. Διαθέσιμο στο:

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/LSU>.

[Τελευταία πρόσβαση: 20/02/2020].

Περράκη Μ. (2003). *‘Πετρολογική μελέτη των μεταμορφωμένων σχηματισμών της ανατολικής Θεσσαλίας’*. Διδακτορική διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Σαμαντζή Κ.Β. (2013). *‘Ανάλυση χρήσεων γης της λεκάνης απορροής του Πηνειού ποταμού για τον προσδιορισμό περιβαλλοντικών πιέσεων’*. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

Σούλιος Γ. (2004). *‘Γενική Υδρογεωλογία’*. Τρίτος τόμος και Αποθέματα και διαχείριση του υπόγειου νερού, Θεσσαλονίκη.

Τζιάτζιος Γ. (2012). *‘Προσομοίωση Υπόγειου Υδροφόρου Συστήματος Ανατολικής Υδρογεωλογικής Λεκάνης Θεσσαλίας’*. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης.

Τζιμόπουλος Δ. Χ. και Μπαλλάς Γ. Λ. (2005). *‘Διαχείριση του υδροφορέα Πυθίου - Ελασσόνας με εφαρμογή του γραμμικού προγραμματισμού’*. Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Πόρων με βάση την λεκάνη απορροής. 50 Εθνικό συνέδριο Ελληνική Επιτροπή Διαχείρισης Υδατικών πόρων, 6-9 Απριλίου Ξάνθη.

Τριανταφυλλίδης Ε. (1987α). *‘Γεωλογικός χάρτης Ελλάδας, Φύλλο Ελασσόνας, κλίμακας 1:50.000’*. ΙΓΜΕ.

Τριανταφυλλίδης Ε. (1987β). *‘Γεωλογικός χάρτης Ελλάδας, Φύλλο Φαρκαδώνας, κλίμακας 1:50.000’*. ΙΓΜΕ.

Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων. *‘Έργο: Έλεγχος χημικής ποιότητας αεδευτικών υδάτων (επιφανειακών και υπόγειων σε κλίμακα λεκανών απορροής ποταμών Μακεδονίας - Θράκης και Θεσσαλίας’*.

Διαθέσιμο στο: <http://www.minagric.gr/ardefrika/index.php/el/to-ergo/stoxoi>.
[Τελευταία πρόσβαση: 20/02/2020].

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

Boulton A. (2005). *Stygofauna biodiversity and endemism in four alluvial aquifers in eastern Australia. Invertebrate Systematics*, 22(2), σσ. 117-126.

Cousquer Y., Pryet A., Flipo N., Delbart C., Dupuy A. (2017). *Estimating River Conductance from Prior Information to Improve Surface-Subsurface Model Calibration. Groundwater*, Vol. 55(3), σσ. 408-418.

Costandinidis D. (1978). *Hydrodynamique d'un système aquifère hétérogène, Hydrogéologie de la Thessalie Orientale*. Doctoral D'Etat, Grenoble.

Dyson M., Bergkamp G., Scanlon J. (2003). *Flow. The Essentials of Environmental Flows*. IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK.

Eamus D., Fu B., Springer A., Stevens L. (2006). Integrated Groundwater Management στο Anthony J. Jakeman, Olivier Barreteau, Randall J. HuntJean-Daniel Rinaudo, Andrew Ross (eds.). *'Groundwater Dependent Ecosystems: Classification, Identification Techniques and Threats'*, σσ. 313-346.

Famiglietti J. S., Lo M., Ho S.L., Bethune J., Anderson K.J., Syed T.H., Swenson S.C., De Linage C.R., Rodell M. (2011). *'Satellites measure recent rates of groundwater depletion in California's Central Valley'*. *Geophys. Res. Lett.* 38, L03403.

Foster S., Garduno H., Evans R., Olson D., Tian Y., Zhang W., Han Z. (2004). *'Quaternary Aquifer of the North China Plain—assessing and achieving groundwater resource sustainability'*. *Hydrogeol. J.*, Vol. 12, σσ. 81–93.

Gleeson T., Wada Y., Bierkens M. F. P., Van Beek L. P. H. (2012). *'Water balance of global aquifers revealed by groundwater footprint'*, *Nature*, 488, σσ. 197-199.

Harbaugh A. W., Banta E. R., Hill M. C., McDonald M. G. (2000). *'MODFLOW-2000, U.S. Geological Survey Modular Finite-Difference Ground-Water Flow Model User*

AGuide to Modularization Concepts and the Ground Water Flow Process. Reston, Virginia.

Hirsch T.J. (1962). *'Modulus of Elasticity of Concrete Affected by Elastic Moduli of Cement Paste Matrix and aggregate'*. *ACI Journal, Proceedings*, Vol. 59, σσ. 427-451.

Humphreys D. (2006). *'Translantic Environmental and Energy Policies'* στο D. Humphreys (ed.) (Brussels: European Science Foundation, COST Action E19). *'Forest for the Future Programmes in Europe-Country and Regional Reports'*.

Jennings S. (2005). *'Indicators to support an ecosystem approach to fisheries'*, *Fish and Fisheries*, Vol. 6(3), σσ. 212-232.

Kourgialas N., Karatzas G. P., Dokou Z., Kokorogiannis A. (2017). *'Groundwater footprint methodology as policy tool for balancing water needs (agriculture & tourism) in water scarce islands - The case of Crete, Greece'*. *Science of the total Environment*, Vol. 615, σσ. 381-389.

Le Quesne T., Kendy E., Weston D. (2010). *'The implementation challenge. Taking stock of Government Policies to Protect and Restore Environmental Flows. The Nature Conservancy and WWF Report'*. WWF.

New South Wales Office of Water (2012). *'Risk assessment guidelines for groundwater dependent ecosystems'*. *The conceptual framework*, Vol. 1, σσ. 1-56.

O'Grady A., Davis J., Dale A., Arthington A. (2006). *'When trends intersect: The challenge of protecting freshwater ecosystems under multiple land use and hydrological intensification scenarios'*, *Science of the Total Environment*, Vol.534, σσ. 65-78.

Panagopoulos C. I. (1995). *'Groundwater evolution of the Tirnavos alluvial basin, central Greece, as indicated by hydrochemistry'*. 3rd Hydrogeological Conference of the Hellenic Chapter of IAH, Heraklion, Crete, σσ. 232-244.

Parsons G. (2008). *'Teaching & Learning Guide for: The Aesthetics of Nature'*. *Wiley Online Library*, Vol. 3(5), σσ. 1106-1112.

Patsialis T., Skoulikaris C., Ganoulis J. (2014). *'Ecological flow for integrated planning of small hydropower plants: a case study from Greece'*. *Hydrology in a Changing World: Environmental and Human Dimensions*, σσ. 469-474.

Paytan A. (2006). *'Advances in Isotope Geochemistry'* στο M. Baskaran (ed.). *'Handbook of Environmental Isotope-Geochemistry'*, σσ. 3-10.

Pedersen O., De Haan M. (2003). *'The System of Environmental and Economic Accounts—2003 and the Economic Relevance of Physical Flow Accounting'*. *Journal of Industrial Ecology-Yale University of Forestry and Environmental Studies*, Vol. 10, σσ. 19-42.

Pérez A. J., Hurtado-Patino J., Herrera H.M., Carvajal A.F., Pérez M.L., Gonzalez-Rojas E., Pérez-Garcia J. (2019). *'Assessing sub-regional water scarcity using the groundwater footprint'*. *Ecological Indicators*, Vol. 96, σσ. 32-39.

Rodell M., Velicogna I., Famiglietti J. S. (2009). *'Satellite-based estimates of groundwater depletion in India'*. *Nature*, Vol. 460, σσ.999–1002.

Schenk J. and Jackson R.B. (2002). *'Rooting Depths, Lateral Root Spreads and Below-Ground/Above-Ground Allometries of Plants in Water-Limited Ecosystems'*. *Journal of Ecology*, Vol. 90(3), σσ. 480-494.

Scott C. J. (2014). *'Evidence for solar wind modulation of lightning'*. *Environmental Research Letters*, Vol. 9(5), σσ. 2-5.

Şen Z. (2015). Applied Drought Modeling, Prediction and Mitigation στο ELSEVIER (eds). *'Chapter Six - Climate Change, Droughts, and Water Resources'*, σσ. 321-391.

Sophocleous M.(2010). *'Review: groundwater management practices, challenges, and innovations in the High Plains aquifer, USA—lessons and recommended actions'*.*Hydrogeol. J*, Vol. 18, σσ. 559–575.

Sogreah-Grenoble (1974). *'Μελέτη αναπτύξεως υπογείων υδάτων πεδιάδος Θεσσαλίας'* (στα γαλλικά). Τελική έκθεση, R 11971, Υπουργείο Γεωργίας, Διεύθυνση Γεωργικής Ανάπτυξης & Υπηρεσία Εγγείων Βελτιώσεων.

Suen J. (2011). *'Determining the Ecological Flow Regime for Existing Reservoir Operation'*. *Water Resources Management*, Vol. 25, σσ. 817-835.

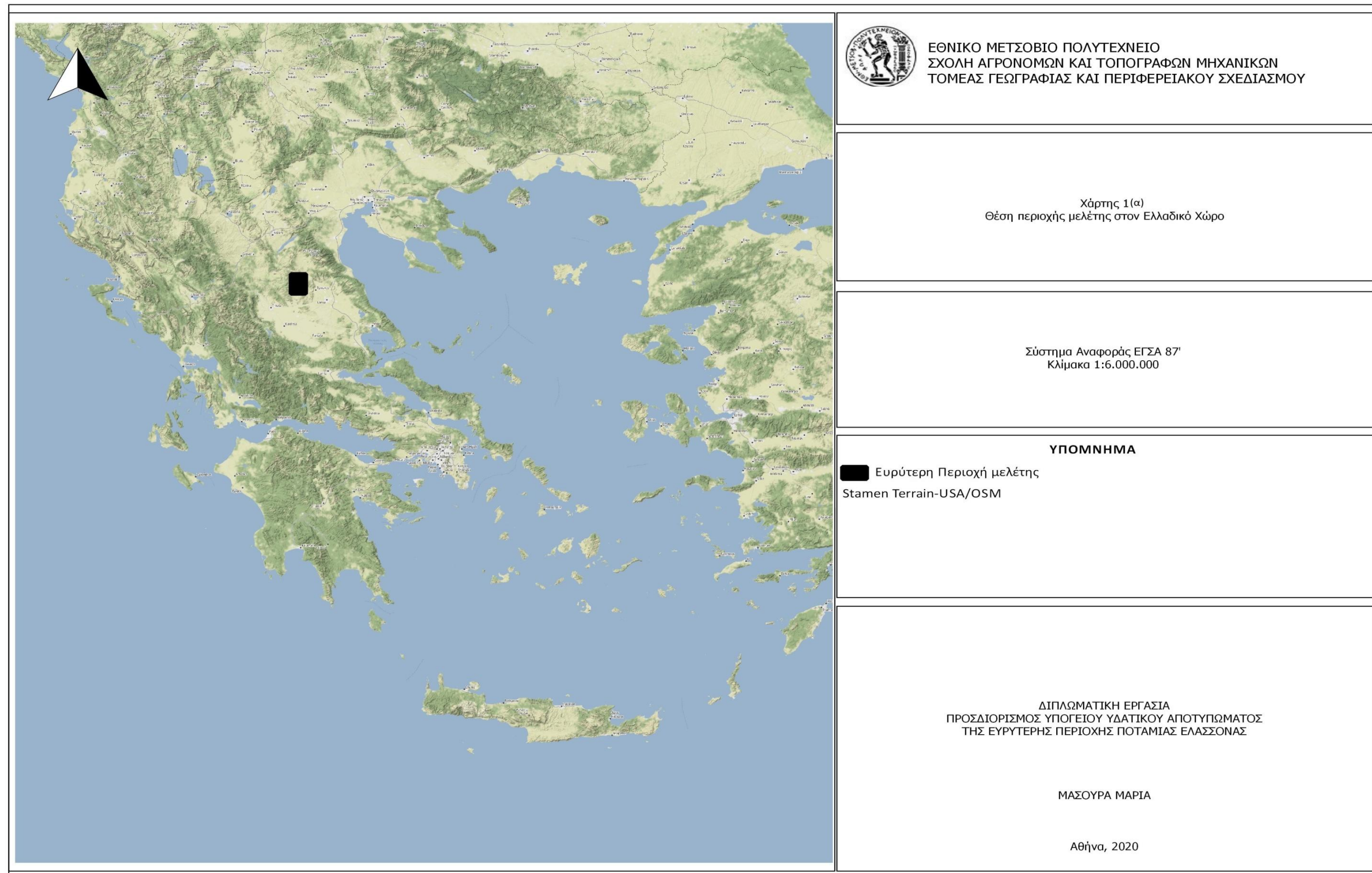
Tomlinson M. and Boulton A. (2008). *'A Framework for Determining Environmental Water Requirements for Alluvial Aquifer Ecosystems'*. Doctoral Thesis, School of Environmental and Rural Science, University of New England.

White W. F. (2015). *'Sinter bonded porous metallic coatings'*. *United States Patent*, US 9_149_750 B2, σσ. 3-12.

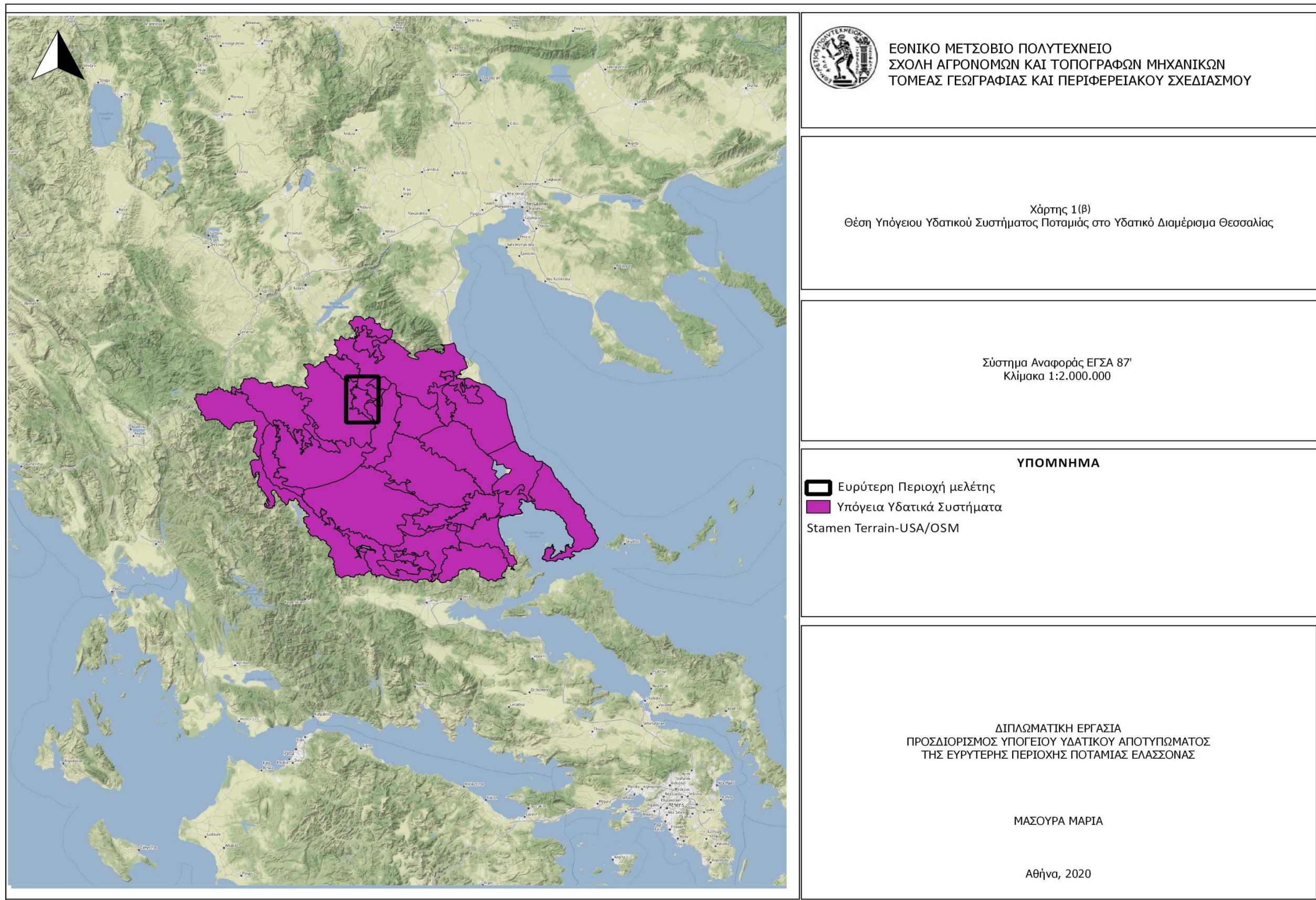
Διαδικτυακή Βιβλιογραφία

- **Εθνικό Δίκτυο Παρακολούθησης Υδάτων.** <http://nmwn.ypeka.gr/>
[Τελευταία πρόσβαση: 20/03/2019]
- <https://www.statistics.gr/el/statistics/pop>
[Τελευταία πρόσβαση 15/02/2019]
- <http://www.ypeka.gr/el-gr> [Τελευταία πρόσβαση: 20/06/2020]
- <http://www.fao.org/home/en/> [Τελευταία πρόσβαση: 15/02/2019]
- <http://www.farsala.gr/map> [Τελευταία πρόσβαση: 20/02/2019]
- <https://www.orykta.gr/geologia-oryktologia/geologia-elladas> [Τελευταία πρόσβαση: 20/02/2019]
- <https://www.comet.ucar.edu/> [Τελευταία πρόσβαση: 20/06/2020]
- <https://wetlandinfo.des.qld.gov.au/wetlands/ecology/aquatic-ecosystems-natural/groundwater-dependent/> [Τελευταία πρόσβαση: 25/06/2020]
- <http://agonaskritis.gr/> [Τελευταία πρόσβαση: 25/06/2020]
- **Υδρογεωλιθικός χάρτης Ελλάδας.** <http://geodata.gov.gr/maps/> [Τελευταία πρόσβαση: 20/03/2019]
- **Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας.** <http://www.ypeka.gr/el-gr/>
[Τελευταία πρόσβαση: 20/03/2019]

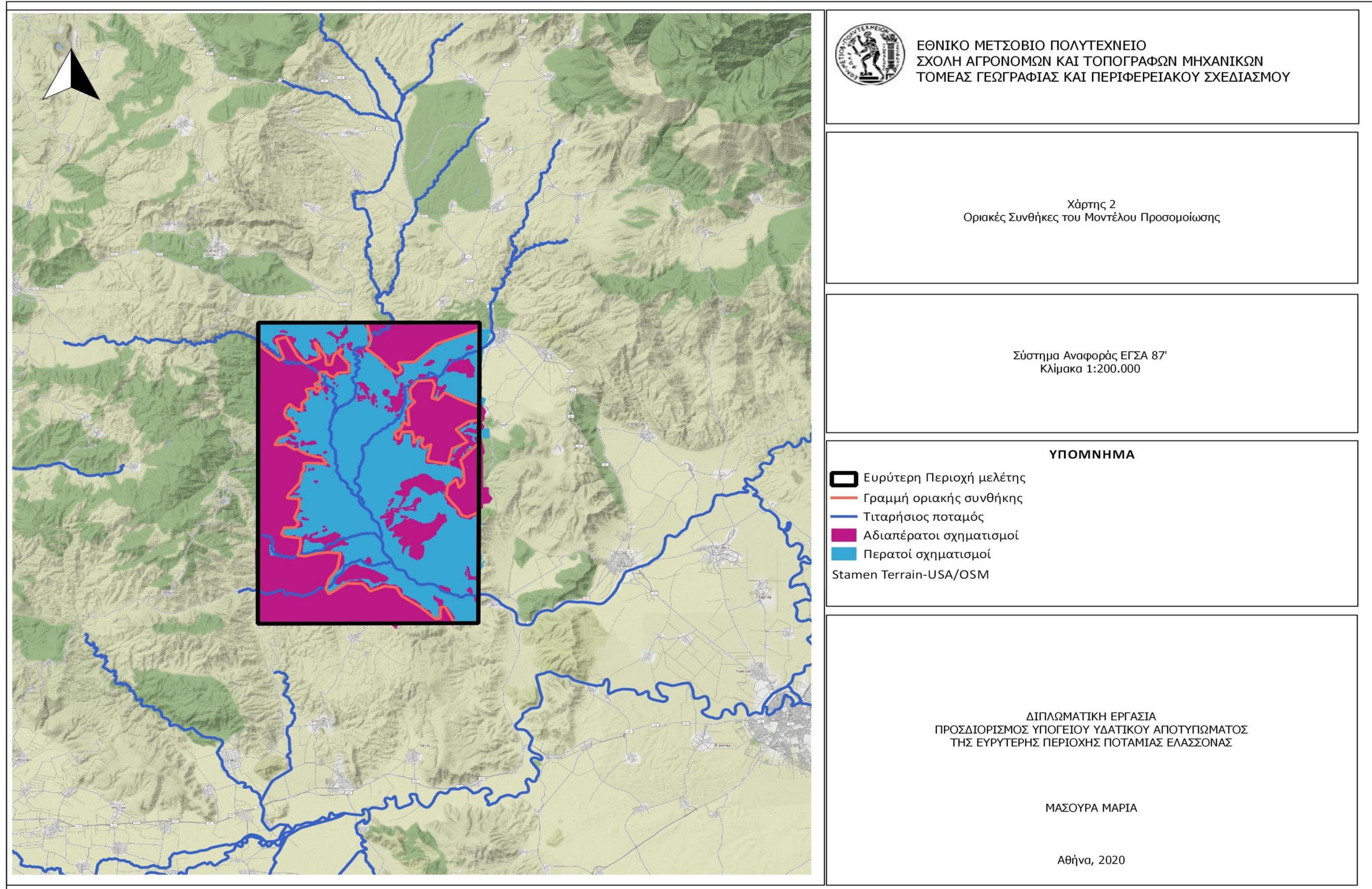
Παράρτημα



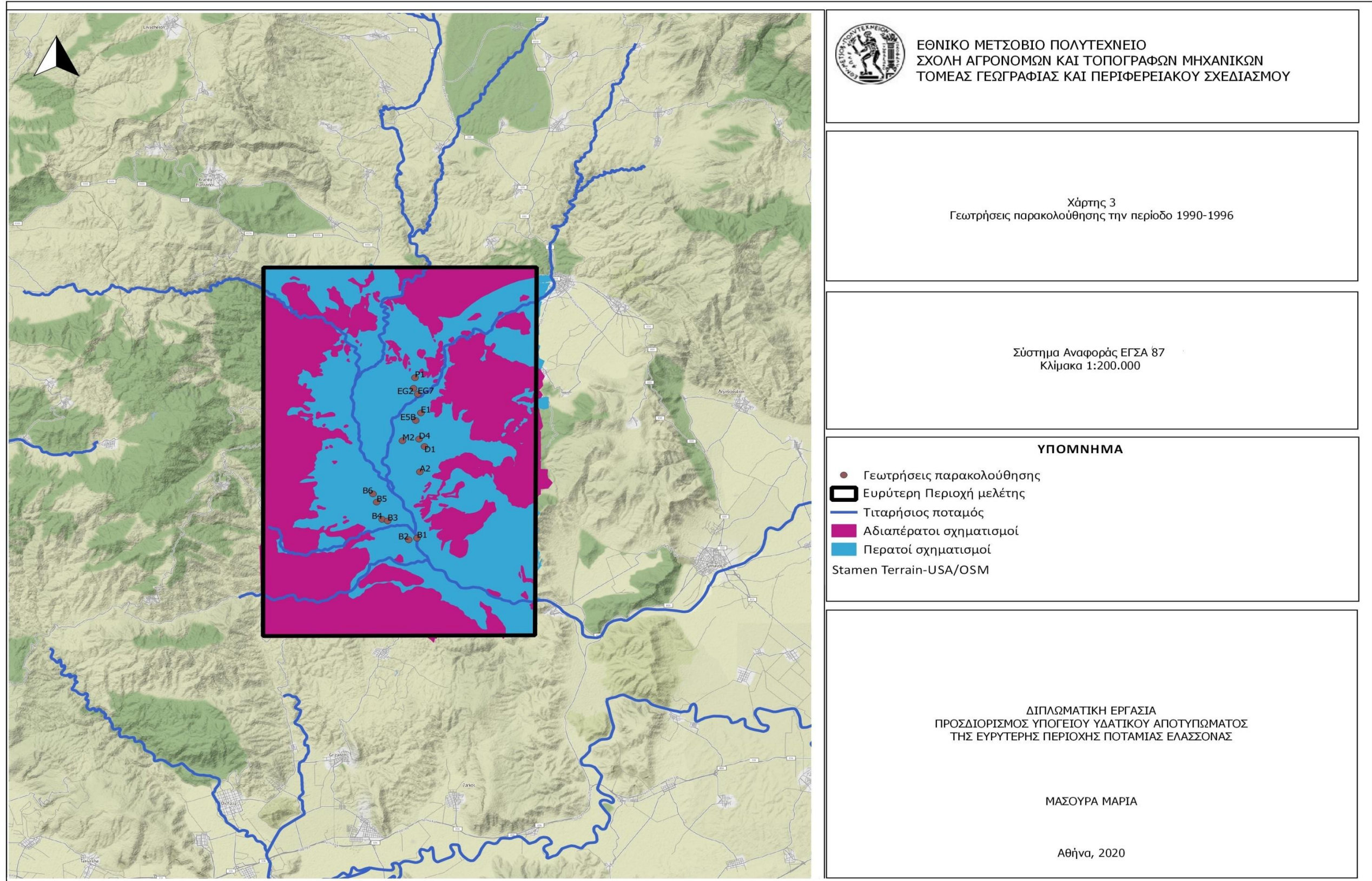
Χάρτης 1(α): Θέση περιοχής μελέτης στον Ελλαδικό χώρο



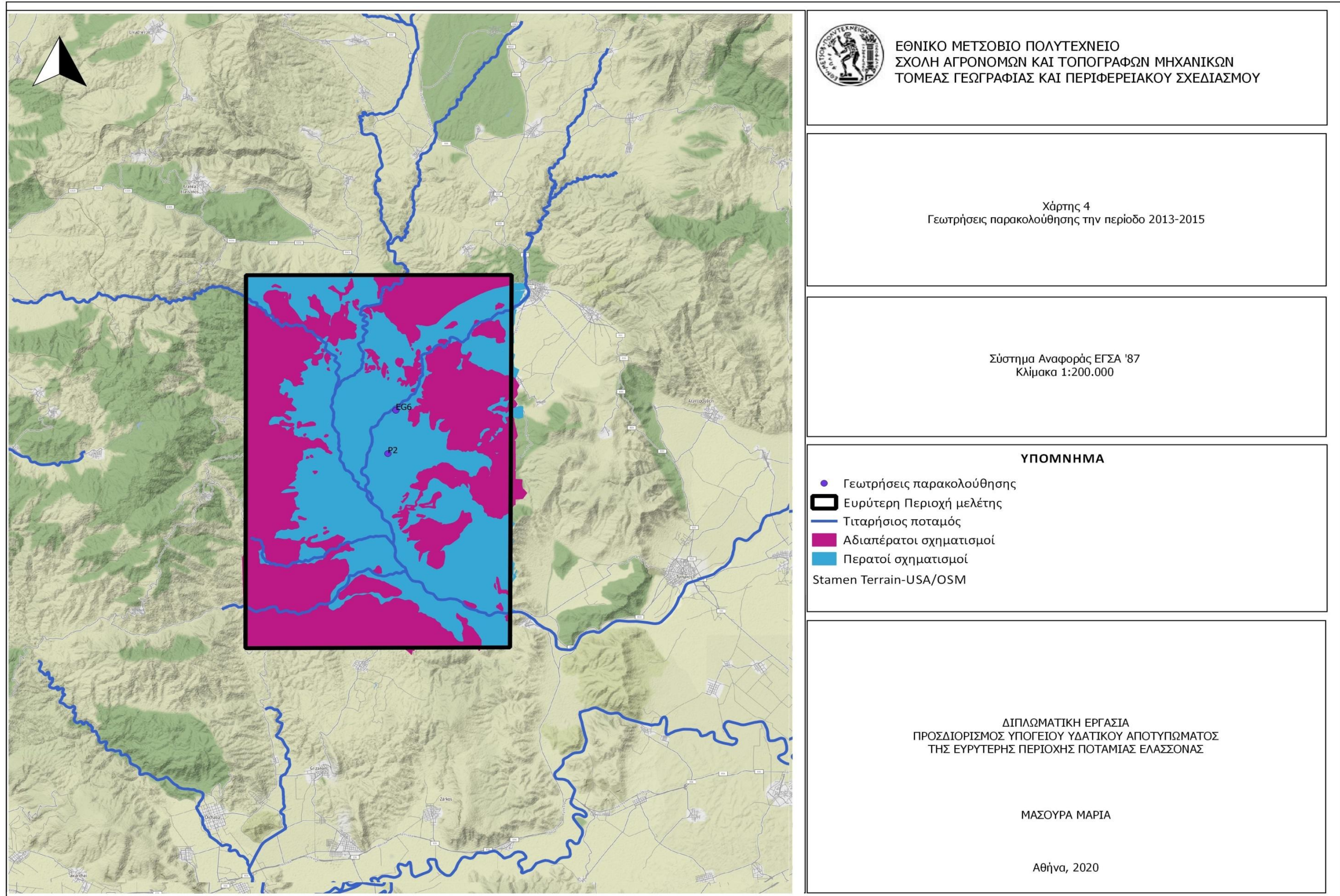
Χάρτης 1(β): Θέση Υπόγειου Υδατικού Συστήματος Ποταμιάς στο Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας



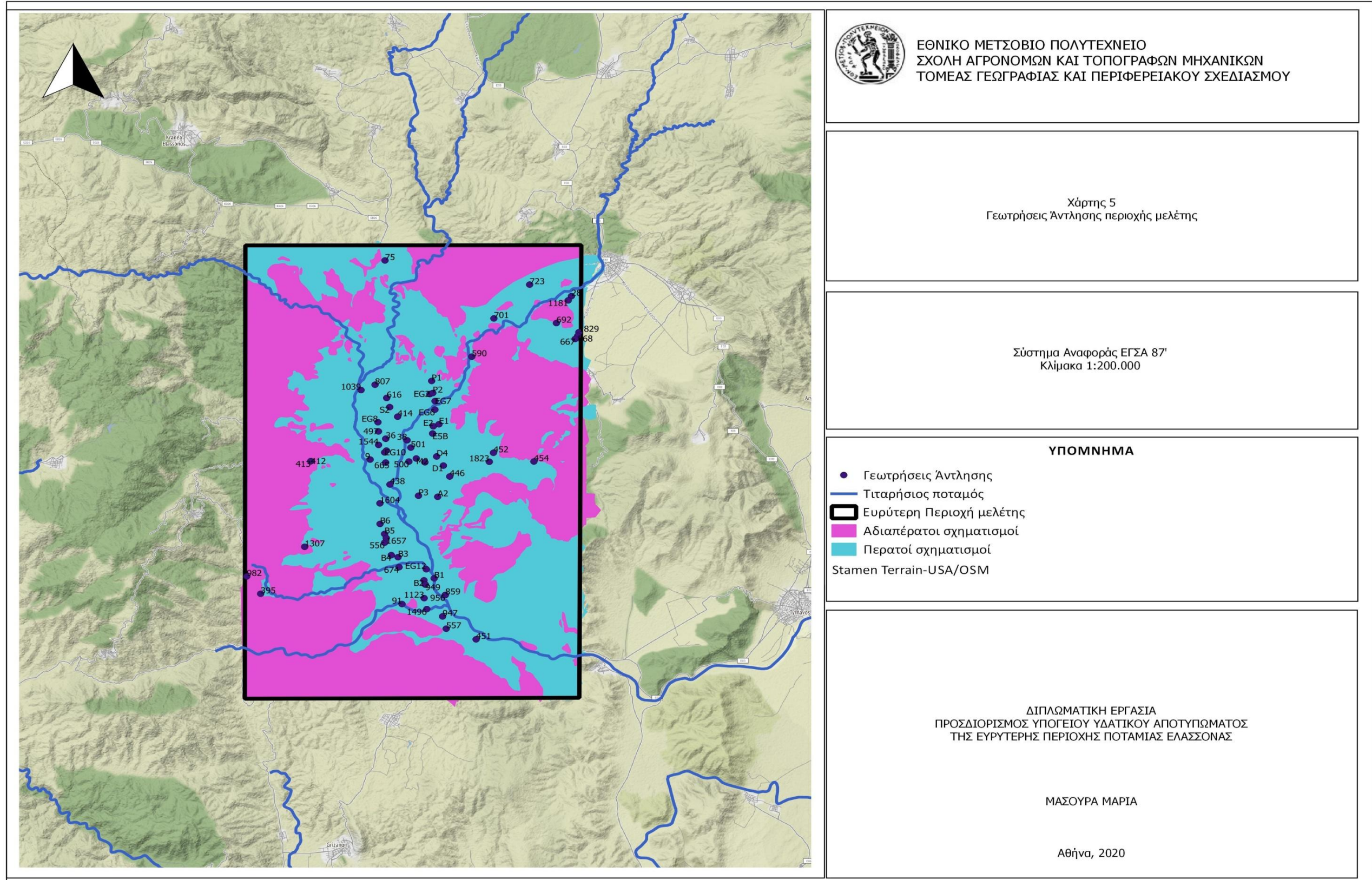
Χάρτης 2: Οριακές συνθήκες του Μοντέλου Προσομοίωσης



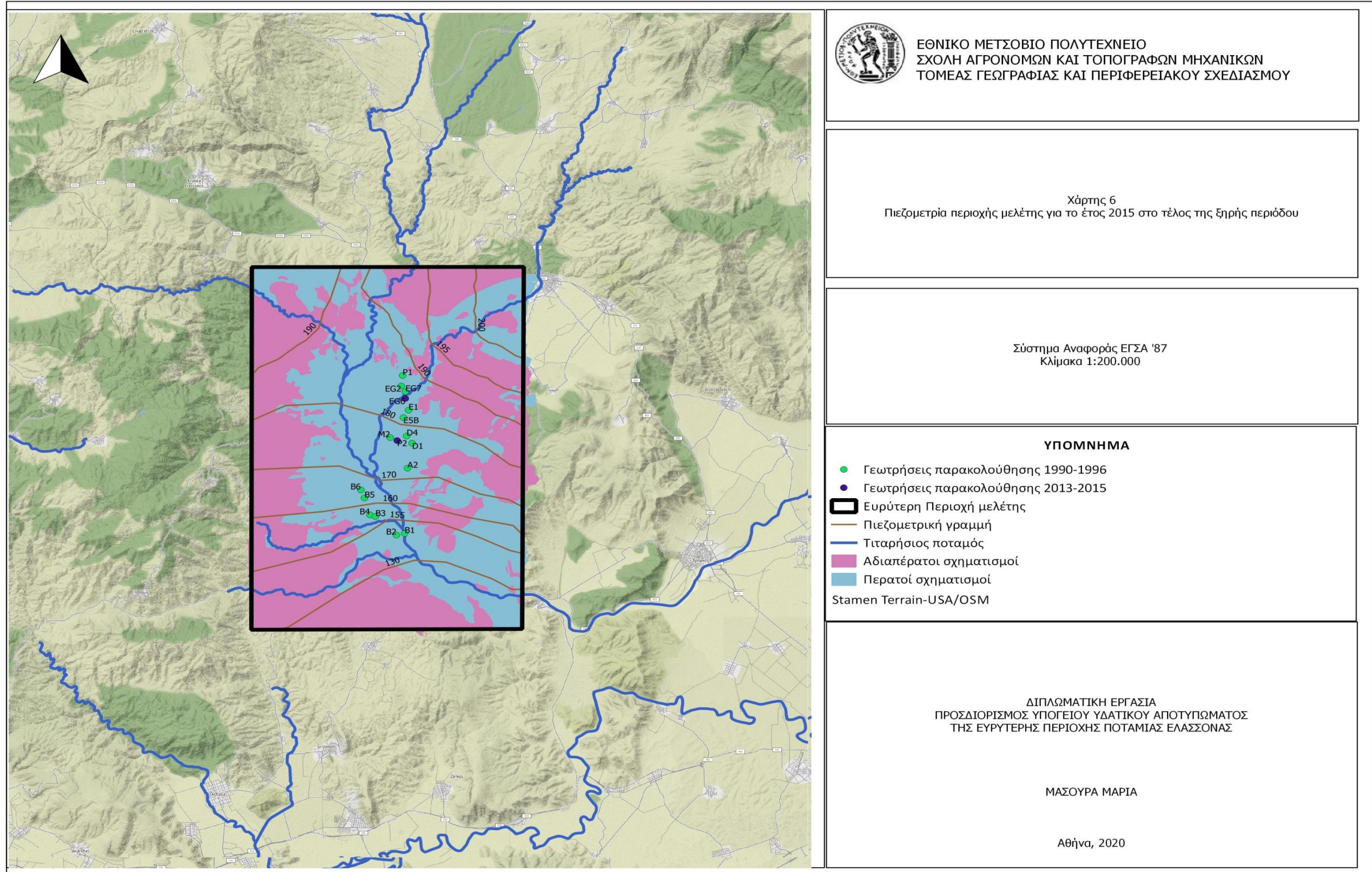
Χάρτης 3: Γεωτρήσεις παρακολούθησης την περίοδο 1990-1996



Χάρτης 4: Γεωτρήσεις παρακολούθησης την περίοδο 2013-2015



Χάρτης 5: Γεωτρήσεις Άντλησης περιοχής μελέτης



Χάρτης 6: Πιεζομετρία περιοχής μελέτης για τα έτος 2015 στο τέλος της ξηρής περιόδου