



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ»

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

«Ολοκληρωμένο πλαίσιο μοντελοποίησης υδρολογίας, ποιότητας νερών
και στερεοπαροχής σε λεκάνες απορροής ποταμών διαλείπουσας ροής»

Χρήστος Χ. Γαμβρούδης

Διπλωματούχος Μηχανικός Ορυκτών Πόρων

MSc «Γεωτεχνολογία και Περιβάλλον», Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης

MSc «Έλεγχος και Διαχείριση Περιβάλλοντος», Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης

Επταμελής Εξεταστική Επιτροπή

Καθηγητής Νικολαΐδης Νικόλαος (Επιβλέπων)

Καθηγητής Καρατζάς Γεώργιος (Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής)

Δρ. Σκουλικίδης Νικόλαος (Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής)

Καθηγητής Λουκάς Αθανάσιος

Επίκουρος Καθηγητής Παρανυχιανάκης Νικόλαος

Καθηγητής Τσάνης Ιωάννης

Καθηγητής Συνολάκης Κωνσταντίνος

Χανιά, 2016

Αυτή η σελίδα έχει μείνει σκόπιμα κενή



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ»

Τίτλος Διδακτορικής Διατριβής:

Ολοκληρωμένο πλαίσιο μοντελοποίησης υδρολογίας, ποιότητας νερών και στερεοπαροχής σε λεκάνες απορροής ποταμών διαλείπουσας ροής.

Χρήστος Χ. Γαμβρούδης

Διπλωματούχος Μηχανικός Ορυκτών Πόρων

MSc «Γεωτεχνολογία και Περιβάλλον», Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης

MSc «Έλεγχος και Διαχείριση Περιβάλλοντος», Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης

Η παρούσα διδακτορική διατριβή εκπονήθηκε στο εργαστήριο Υδρογεωχημικής Μηχανικής και Αποκατάστασης εδαφών της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης και χρηματοδοτήθηκε στα πλαίσια του 7^{ου} κοινοτικού προγράμματος-πλαισίου της Ευρωπαϊκής Ένωσης (FP7/2007-2011) μέσω του προγράμματος MIRAGE (211732).

Αυτή η σελίδα έχει μείνει σκόπιμα κενή



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ»

Η παρούσα διδακτορική διατριβή υποβλήθηκε στο Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος – Πολυτεχνείο Κρήτης.

Εκπονήθηκε στη Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος - Πολυτεχνείο Κρήτης, Εργαστήριο Υδρογεωχημικής Μηχανικής και Αποκατάστασης Εδαφών, Τομέας Περιβαλλοντικής Υδραυλικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής

Ημερομηνία Προφορικής Εξέτασης: 14 Δεκεμβρίου 2016

Επταμελής Εξεταστική Επιτροπή

Ν. Νικολαΐδης, Καθηγητής Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος Πολυτεχνείου Κρήτης, Επιβλέπων

Γ. Καρατζάς, Καθηγητής Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος Πολυτεχνείου Κρήτης, Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής

Ν. Σκουλικίδης, Ελληνικό Κέντρο Θαλασσίων Ερευνών, Διευθυντής Ερευνών

Α. Λουκάς, Καθηγητής Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, Εξεταστής

Ν. Παρανυχιανάκης, Επίκουρος Καθηγητής Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος Πολυτεχνείου Κρήτης, Εξεταστής

Ι. Τσάνης, Καθηγητής Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος Πολυτεχνείου Κρήτης, Εξεταστής

Κ. Συνολάκης, Καθηγητής Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος Πολυτεχνείου Κρήτης, Εξεταστής

Αυτή η σελίδα έχει μείνει σκόπιμα κενή

Τίτλος Διδακτορικής Διατριβής:

Ολοκληρωμένο πλαίσιο μοντελοποίησης υδρολογίας, ποιότητας νερών και στερεοπαροχής σε λεκάνες απορροής ποταμών διαλείπουσας ροής.

«Η έγκριση της παρούσης Διδακτορικής Διατριβής από τη Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνωμών του συγγραφέως» (Ν. 5343/1932, άρθρο 202, παρ. 2).

Αυτή η σελίδα έχει μείνει σκόπιμα κενή

*«Αυτός που έχει θέληση, δημιουργεί, και
δημιουργεί πάρα πολλά. Αυτό είναι η απόδειξη
πως δεν υπάρχει τίποτα ακατόρθωτο.»*

Γουίλιαμ Σέξπιρ

Αυτή η σελίδα έχει μείνει σκόπιμα κενή

ΠΡΟΛΟΓΟΣ ΚΑΙ ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διδακτορική διατριβή χαρακτηρίζεται από πρωτότυπα σημεία, που είτε τέθηκαν από την αρχή ως στόχοι, είτε προέκυψαν στην πορεία της ως καινοτόμα μέσα για την επίτευξή τους συμβάλλοντας σε διάφορους ερευνητικούς και μη τομείς διαχείρισης των υδατικών πόρων. Βασική καινοτομία θεωρείται η μεθοδολογία στο σύνολό της που παρουσιάζει ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο προσομοίωσης των φυσικών διεργασιών και αντιμετώπιση των δυσκολιών παραμετροποίησης και βαθμονόμησης μιας σύνθετης υδρολογικής και υδρογεωλογικής λεκάνης στη Μεσόγειο.

Με την ολοκλήρωση της παρούσας πολυετούς έρευνας θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στους ανθρώπους, που χωρίς τη καθοριστική συμβολή τους δεν θα ήταν δυνατή η επιτυχής ολοκλήρωσή της.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος και επιβλέποντα κ. Νικολαΐδη Νικόλαο για την καθοδήγηση, στήριξη, υπομονή καθώς και για τις γνώσεις που μου προσέφερε κατά την διάρκεια των σπουδών μου καθώς και στην εκπόνηση αυτής της διατριβής. Η εμπιστοσύνη που μου έδειξε και η συνεχής συνεργασία μαζί του ήταν αυτό που οδήγησε στην ωρίμανση των συνθηκών για την ολοκλήρωση αυτής της μεγάλης προσπάθειας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες προς τον Καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος κ. Καρατζά Γεώργιο και τον κ. Σκουλικίδη Νικόλαο Διευθυντή Ερευνών του Ελληνικού Κέντρου Θαλασσίων Ερευνών, για τη συμμετοχή τους στην Τριμελή Συμβουλευτική Επιτροπή καθώς και για τις συμβουλές και παρατηρήσεις τους.

Ευχαριστώ επίσης τα μέλη της Εξεταστικής Επιτροπής της διδακτορικής μου διατριβής, κ.κ Συνολάκη Κώστα, Τσάνη Ιωάννη Καθηγητές του Πολυτεχνείου Κρήτης, Παρανυχιανάκη Νίκο Επίκουρο Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης, Λουκά Αθανάσιο Καθηγητή του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας για τις πολύ χρήσιμες και ουσιαστικές παρατηρήσεις τους οι οποίες συνέβαλαν στην βελτίωση της παρούσας διατριβής.

Σε όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διατριβής είχα την τύχη να γνωρίσω και να συνεργαστώ με πολύ ενδιαφέροντες ανθρώπους που πλέον θεωρώ πολύ καλούς φίλους.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την κ. Τζωράκη Ουρανία Επίκουρο Καθηγήτρια του Πανεπιστημίου Αιγαίου και την κ. Δόκου Ζωή για την υποστήριξη, συνεργασία και μετάδοση γνώσεων που μου προσέφεραν.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω το κ. Παπαδουλάκη Βασίλη, Γεωλόγο του Τμήματος Περιβάλλοντος και Υδροοικονομίας της Περιφέρειας Πελοποννήσου, της Περιφερειακής Ενότητας Λακωνίας καθώς και τους κ.κ Καραλέμα Νίκο, Τσιγαρίδα Λάμπρο και Αννούση Κωνσταντίνο για την πολύτιμη βοήθεια τους και το χρόνο που διέθεσαν στη συλλογή των δειγματοληψιών και στην πραγματοποίηση των απαραίτητων μετρήσεων στο πεδίο.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τις μεταπτυχιακές φοιτήτριες Λίλλη Μαρία και Κασσωτάκη Ελίζα καθώς και τους υπόλοιπους συνεργάτες, πρώην και νυν του εργαστηρίου Υδρογεωχημικής Μηχανικής και Αποκατάστασης εδαφών της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος με τους οποίους συνεργαστήκαμε κατά τη διάρκεια των εργαστηριακών αναλύσεων.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους γονείς και την οικογένεια μου οι οποίοι με στήριξαν και με στηρίζουν με κάθε τρόπο, με έμαθαν να πιστεύω στον εαυτό μου και να μην επαναπαύομαι.

Βέβαια, η παρούσα διατριβή δεν θα ήταν εφικτή χωρίς την απεριόριστη αγάπη, ενθάρρυνση και εμπιστοσύνη, την πνευματική και ψυχολογική υποστήριξη και το μοναδικό χαρακτήρα της Ειρήνης, συζύγου και συντρόφου μου σε όλα τα θέματα και τα επίπεδα της ζωής μου καθώς και της μικρής μας Νεφέλης-Σταυρούλας.

Σας ευχαριστώ για όλες τις θυσίες που κάνατε, τις οποίες ίσως να μην μπορέσω ποτέ να ανταποδώσω πλήρως, αν και ελπίζω να εκλάβετε την παρούσα προσπάθεια ως μία πρώτη κίνηση. Σας ευχαριστώ πολύ για όλα!

Αυτή η σελίδα έχει μείνει σκόπιμα κενή

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ ΚΑΙ ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	ix
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	xii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	xv
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	xvii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	xxii
ABSTRACT	xxvi
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Τοποθέτηση του προβλήματος.....	1
1.2 Σκοπός και πρωτοτυπία της διατριβής	4
1.3 Δομή της διατριβής.....	6
1.4 Δημοσιεύσεις	7
2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	9
2.1 Η κλιματική αλλαγή και οι συνέπειες της στην Μεσόγειο	9
2.2 Τα χαρακτηριστικά και η σημασία των ποταμών διαλείπουσας ροής ως υδατικά συστήματα	10
2.2.1 Σύνδεση των ποταμών διαλείπουσας ροής με την οικολογία	13
2.2 Μοντέλα Προσομοίωσης	15
2.2.1 Υδρολογικά μοντέλα	15
2.2.2 Μοντέλα Διάβρωσης.....	18
2.2.2.1 Παγκόσμια Εξίσωση Απώλειας Εδάφους (USLE)	21
2.2.3 Μοντέλα υπογείων υδάτων.....	25
2.2.3.1 Θεμελιώδης εξίσωση ροής μοντέλων υπογείων υδάτων.....	26
2.3 Περιγραφή μοντέλου SWAT.....	29
2.3.1 Σύγκριση μοντέλου SWAT με άλλα μοντέλα	32
2.3.2 Υδρολογία μοντέλου SWAT.....	33
2.3.3 Διεργασίες διάβρωσης στο μοντέλο SWAT	36
2.4 Περιγραφή λογισμικού ARGUS ONE και μοντέλου PTC	38
2.4.1 Λογισμικό ARGUS ONE.....	38
2.4.2 Ο κώδικας PTC (Princeton Transport Code).....	40
2.5 Το φαινόμενο της ξηρασίας – Δείκτες Ξηρασίας.....	47
3. ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ – ΔΙΚΤΥΟ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ	50

3.1	Περιγραφή περιοχής μελέτης	50
3.1.1	Γεωγραφική θέση και διοικητική υπαγωγή	50
3.1.2.	Γεωμορφολογικά στοιχεία	51
3.1.3	Γεωλογία	51
3.1.4	Επιφανειακά υδρολογικά συστήματα	55
3.1.5	Υδροφορίες	59
3.1.6	Πηγές	62
3.1.7	Κλιματολογικά στοιχεία	65
3.1.8	Περιβάλλον και Οικολογία.....	66
3.1.9	Χρήσεις Γης.....	67
3.1.10	Πιέσεις στην λεκάνη απορροής του ποταμού Ευρώτα	67
	Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ).....	68
3.1.10.11	Συνολική επισκόπηση των πιέσεων στην λεκάνη απορροής του ποταμού Ευρώτα	71
3.2	Δίκτυο ποσοτικής και ποιοτικής παρακολούθησης.....	72
3.2.1	Σημεία δειγματοληψίας επιφανειακού και υπόγειου νερού	72
3.2.1.1	Αποτελέσματα φυσικοχημικών παραμέτρων.....	74
3.2.1.2	Αποτελέσματα υπολογισμού των αιωρούμενων στερεών	79
3.2.2	Μετρήσεις Παροχής.....	82
3.2.2.1	Εκτίμηση καμπύλης Στάθμης-Παροχής	83
3.2.3	Τοπογραφική αποτύπωση διατομών ποταμού - Αποτελέσματα	90
4	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΥ ΚΑΘΕΣΤΩΤΟΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΙΖΗΜΑΤΩΝ ΣΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΑ ΝΕΡΑ.....	93
4.1	Προσομοίωση του υδρολογικού καθεστώτος και της μεταφοράς ιζημάτων στα επιφανειακά νερά του ποταμού Ευρώτα	95
4.1.1	Σχηματοποίηση της λεκάνης απορροής	95
4.1.2	Απεικόνιση χρήσεων γης και εδάφους	98
4.1.3	Σχηματισμός Υδρολογικών Μονάδων Απόκρισης	101
4.1.4	Μετεωρολογικά δεδομένα	101
4.1.5	Δεδομένα Άρδευσης	103
4.1.6	Κωδικοποίηση – Δημιουργία μοντέλου	103
4.1.6.1	Ανάλυση ευαισθησίας	104
4.1.6.2	Βαθμονόμηση του μοντέλου της λεκάνης απορροής του Ευρώτα	105

4.1.6.3	Αποτελέσματα βαθμονόμησης	108
4.1.6.4	Αποτελέσματα προσομοίωσης υφιστάμενης κατάστασης	121
5	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΑΙ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ ΚΑΙ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΟΥΣ ΣΕ ΣΕΝΑΡΙΑ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ.....	137
5.1	Προσομοίωση της αλληλεπίδρασης επιφανειακών και υπόγειων νερών του ποταμού Ευρώτα.....	138
5.1.1	Σχηματοποίηση της περιοχής μελέτης, καθορισμός παραμέτρων και εισαγωγή δεδομένων στο PTC.....	139
5.1.2	Βαθμονόμηση μοντέλου SWAT-PTC	145
5.1.3	Αποτελέσματα προσομοίωσης μοντέλου SWAT-PTC.....	146
5.1.3.1	Σενάριο μηδενικών συνθηκών άντλησης	148
5.2	Απόκριση των επιφανειακών και υπόγειων υδατικών αποθεμάτων σε σενάρια κλιματικής αλλαγής.....	151
5.2.1	Εκτίμηση του δείκτη SPI στην υπό μελέτη περιοχή.....	154
5.2.2	Επίδραση της κλιματικής αλλαγής στα επιφανειακά ύδατα και στην οικολογία.....	155
5.2.3	Επίδραση της κλιματικής αλλαγής στα υπόγεια ύδατα	160
6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ- ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ	167
	Προτάσεις για Μελλοντική έρευνα.....	170
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	171
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ I	192
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ II	217
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ III	222
	<i>Ρασίνα Κουμουστά - Aquatic States Frequency Graph (2000-2060) – KNMI-RACMO2.....</i>	<i>225</i>
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ IV	232

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.1. Συστήματα κοκκωδών σχηματισμών	59
Πίνακας 3.2. Καρστικά πεδία ευρύτερης περιοχής.....	60
Πίνακας 3.3. Κυριότερες πηγές που βρίσκονται στη λεκάνη απορροής του ποταμού Ευρώτα, οι μηχανισμοί λειτουργίας τους και τα χαρακτηριστικά τους.....	64
Πίνακας 3.4. Μετρήσεις φυσικοχημικών παραμέτρων στις θέσεις δειγματοληψίας επιφανειακού και υπόγειου νερού.....	75
Πίνακας 3.5. Μετρήσεις χημικών παραμέτρων στις θέσεις δειγματοληψίας επιφανειακού και υπόγειου νερού	78
Πίνακας 3.6. Μετρήσεις αιωρούμενων στερεών αμέσως μετά από φαινόμενα βροχοπτώσεων 80	
Πίνακας 3.7. Μετρήσεις αιωρούμενων στερεών στις θέσεις δειγματοληψίας επιφανειακού νερού.....	81
Πίνακας 4.1. Μετεωρολογικοί σταθμοί στην ευρύτερη περιοχή της λεκάνης απορροής του ποταμού Ευρώτα.....	102
Πίνακας 4.2. Μέσες μηνιαίες τιμές βροχόπτωσης περιόδου 1990-2010.....	102
Πίνακας 4.3. Μέσες μηνιαίες τιμές θερμοκρασίας περιόδου 1990-2010.....	103
Πίνακας 4.7. Αποτελέσματα ανάλυσης ευαίσθητων παραμέτρων υδρολογίας και στερεομεταφοράς.....	106
Πίνακας 4.8. Παράμετροι βαθμονόμησης παροχής	107
Πίνακας 4.9. Παράμετροι βαθμονόμησης στερεοπαροχής.....	107
Πίνακας 4.10. Στατιστικά κριτήρια σύγκρισης παρατηρημένων και προσομοιωμένων ημερήσιων χρονοσειρών παροχής για την περίοδο της βαθμονόμησης.....	111
Πίνακας 4.11. Στατιστικά κριτήρια σύγκρισης παρατηρημένων και προσομοιωμένων ημερήσιων χρονοσειρών στερεοπαροχής για την περίοδο της βαθμονόμησης και επαλήθευσης	112
Πίνακας 4.12. Ετήσιες τιμές προσομοίωσης με το μοντέλο SWAT της περιόδου 2000-2011.	120
Πίνακας 4.13. Ετήσιες τιμές προσομοίωσης με το μοντέλο SWAT της περιόδου 2000-2011.	122
Πίνακας 4.14. Αποτελέσματα προσομοιωμένων και μετρούμενων τιμών διάβρωσης/εναπόθεσης ιζημάτων.....	134
Πίνακας 5.1. Τιμές υδραυλικών υψών δεδομένων πεδίου και μοντέλου.....	145
Πίνακας 5.2. Υδραυλικά ύψη (m) Σεπτέμβριος 2011 με μείωση των αντλήσεων.....	150
Πίνακας 5.3. Σενάρια κλιματικής αλλαγής.....	153
Πίνακας 5.4. Εκτιμώμενα όρια παροχών εμφάνισης των καθεστώτων ροής περιόδου 1970-2011.....	156

Πίνακας 5.5. Δείκτες Mf και Sd ₆ χαρακτηρισμού των υδρόβιων συνθηκών – Σενάριο 1.....	159
Πίνακας 5.6. Δείκτες Mf και Sd ₆ χαρακτηρισμού των υδρόβιων συνθηκών – Σενάριο 2.....	159
Πίνακας 5.7. Δείκτες Mf και Sd ₆ χαρακτηρισμού των υδρόβιων συνθηκών – Σενάριο 3.....	159

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1. Ο ποταμός Ευρώτας στη περιοχή της Σκούρας μετά την πλημμύρα του Νοεμβρίου 2005.....	12
Εικόνα 2.2. Ιστορική εξέλιξη μοντέλου SWAT	30
Εικόνα 2.3. Σχηματική απεικόνιση υδρολογικού κύκλου στο μοντέλο SWAT	35
Εικόνα 2.4. Οριζόντιο δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων	41
Εικόνα 2.5. Κομβική κατανομή ροής μέσω ενός στοιχείου μήκους L.....	45
Εικόνα 2.6. Συνθήκες στάθμης υδροφόρου ορίζοντα.....	46
Εικόνα 3.1. Ο Ταΰγετος.....	51
Εικόνα 3.2. Γεωλογία της λεκάνης απορροής του ποταμού Ευρώτα ως προς τις γεωτεκτονικές ενότητες	53
Εικόνα 3.3. Παραπόταμος Κελεφίνα	57
Εικόνα 3.4. Παραπόταμος Μαγουλίτσα (δίπλα στο εκκλησάκι Αγ. Ειρήνη).....	58
Εικόνα 3.5. Η κοιλάδα της Σπάρτης.....	61
Εικόνα 3.6. Οι πηγές της Τρύπης.....	63
Εικόνα 3.7. Χρήσεις Γης	68
Εικόνα 3.8. Ρύπανση από τα υγρά απόβλητα των χυμοποιείων.....	70
Εικόνα 3.9. Δεξαμενή σταθεροποίησης οργανικού υλικού αποβλήτων ελαιουργείου	70
Εικόνα 3.10. Θέσεις δειγματοληψίας επιφανειακών και υπόγειων δειγμάτων.....	73
Εικόνα 3.11. Γράφημα αιωρούμενων στερεών στις θέσεις δειγματοληψίας επιφανειακού νερού.....	80
Εικόνα 3.12. Θέση Κελεφίνα Κλαδάς. Καταγραφής στάθμης ποταμού με αυτόματο καταγραφέα (levellogger)	82
Εικόνα 3.13. Θέσεις σταθμών αυτόματων καταγραφών στάθμης και σημεία μέτρησης μηνιαίας παροχής	83
Εικόνα 3.14. Λογαριθμικό διάγραμμα H-Q στην περιοχή Κελεφίνα Κλαδάς	85
Εικόνα 3.15. Λογαριθμικό διάγραμμα H-Q στην περιοχή Κελεφίνα Βασσαράς.....	85
Εικόνα 3.16. Λογαριθμικό διάγραμμα H-Q στην περιοχή Μαγουλίτσα Αγ. Ειρήνη	86
Εικόνα 3.17. Λογαριθμικό διάγραμμα H-Q στην περιοχή Ρασίνα Κουμουστά.....	86
Εικόνα 3.18. Λογαριθμικό διάγραμμα H-Q στην περιοχή Ρασίνα Αεροδρόμιο	87
Εικόνα 3.19. Ημερήσια παροχή για το χρονικό διάστημα από 1/01/2009 έως 22/09/2011 στην θέση Κελεφίνα Κλαδάς	88
Εικόνα 3.20. Ημερήσια παροχή για το χρονικό διάστημα από 20/09/2009 έως 20/09/2011 στην θέση Κελεφίνα Βασσαράς	88

Εικόνα 3.21. Ημερήσια παροχή για το χρονικό διάστημα από 08/07/2009 έως 24/10/2011 στην θέση Μαγουλίτσα Αγ. Ειρήνη	89
Εικόνα 3.22. Ημερήσια παροχή για το χρονικό διάστημα από 21/07/2009 έως 24/10/2011 στην θέση Ρασίνα Κουμουστά.....	89
Εικόνα 3.23. Ημερήσια παροχή για το χρονικό διάστημα από 08/07/2009 έως 13/10/2011 στην θέση Ρασίνα Αεροδρόμιο.....	90
Εικόνα 3.24. Η Μαγουλίτσα Αγ.Ειρήνη τον Νοέμβριο του 2009 (αριστερά) και τον Ιούνιο του 2010 (δεξιά).....	91
Εικόνα 3.25. Η Ρασίνα τον Νοέμβριο του 2009 (αριστερά) και τον Ιούνιο του 2010 (δεξιά) ..	91
Εικόνα 3.26. Τρισδιάστατες (3-D) τοπογραφικές απεικονίσεις των τμημάτων Μαγουλίτσα Αγ. Ειρήνη (αριστερά) και Ρασίνα (δεξιά).	92
Εικόνα 4.1. Ψηφιακό τοπογραφικό ανάγλυφο (DEM) της λεκάνης απορροής του ποταμού Ευρώτα	96
Εικόνα 4.2. Διαχωρισμός της λεκάνης του ποταμού Ευρώτα σε υπολεκάνες με βάση το ψηφιακό τοπογραφικό ανάγλυφο.....	97
Εικόνα 4.3. Τύποι εδαφοκάλυψης της λεκάνης απορροής του ποταμού Ευρώτα σύμφωνα με την ονοματολογία του μοντέλου SWAT	99
Εικόνα 4.4. Τύποι εδαφών της λεκάνης απορροής του ποταμού Ευρώτα σύμφωνα με την ονοματολογία του μοντέλου SWAT.....	100
Εικόνα 4.5. Προσομοιωμένες και παρατηρούμενες παροχές στη θέση Βρονταμάς.....	113
Εικόνα 4.6. Προσομοιωμένες και παρατηρούμενες στερεοπαροχές στη θέση Βρονταμάς ...	113
Εικόνα 4.7. Προσομοιωμένες και παρατηρούμενες παροχές στη θέση Βιβάρι.....	114
Εικόνα 4.8. Προσομοιωμένες και παρατηρούμενες στερεοπαροχές στη θέση Βιβάρι.....	114
Εικόνα 4.9. Προσομοιωμένες και παρατηρούμενες παροχές στη θέση Μαγουλίτσα Αγ. Ειρήνη	115
Εικόνα 4.10. Προσομοιωμένες και παρατηρούμενες στερεοπαροχές στη θέση Μαγουλίτσα Αγ. Ειρήνη.....	115
Εικόνα 4.11. Προσομοιωμένες και παρατηρούμενες παροχές στη θέση Ρασίνα Κουμουστά	116
Εικόνα 4.12. Προσομοιωμένες και παρατηρούμενες στερεοπαροχές στη θέση Ρασίνα Κουμουστά.....	116
Εικόνα 4.13. Προσομοιωμένες και παρατηρούμενες παροχές στη θέση Ρασίνα Αεροδρόμιο	117
Εικόνα 4.14. Προσομοιωμένες και παρατηρούμενες στερεοπαροχές στη θέση Ρασίνα Αεροδρόμιο.....	117
Εικόνα 4.15. Προσομοιωμένες και παρατηρούμενες παροχές στη θέση Κελεφίνα Κλαδάς ..	118

Εικόνα 4.16. Προσομοιωμένες και παρατηρούμενες στερεοπαροχές στη θέση Κελεφίνα Κλαδάς.....	118
Εικόνα 4.17. Προσομοιωμένες και παρατηρούμενες παροχές στη θέση Κελεφίνα Βασσαράς 119	
Εικόνα 4.18. Προσομοιωμένες και παρατηρούμενες στερεοπαροχές στη θέση Κελεφίνα Βασσαράς.....	119
Εικόνα 4.19. Προσομοιωμένες και παρατηρούμενες στερεοπαροχές στη θέση Ψυχικό.....	120
Εικόνα 4.20. Υδρολογική προσομοίωση στην θέση Βρονταμάς για την περίοδο 1970-2010 .	123
Εικόνα 4.21. Εξέλιξη της προσομοιωμένης αποξήρανσης του ποταμού κατά τη διάρκεια του ξηρού έτους 2007.....	124
Εικόνα 4.22. Υδρολογικός χάρτης προσομοιωμένης ροής Ευρώτα ποταμού α) Απρίλιος 2007 και β) Οκτώβριος 2007.....	125
Εικόνα 4.23. Υδρολογικός χάρτης ροής Ευρώτα ποταμού α) Απρίλιος 2007 και β) Οκτώβριος 2007. Οι έντονες γραμμές αντιπροσωπεύουν τμήματα του ποταμού με ροή.	126
Εικόνα 4.24. Καμπύλες διάρκειας ροής στον κύριο ρου του Ευρώτα α) 2002-2003 β) 2006-2007 και γ) 2008-2009	127
Εικόνα 4.25. Καμπύλες διάρκειας ροής στην Δυτική πλευρά του Ευρώτα α) 2002-2003 β) 2006-2007 και γ) 2008-2009	128
Εικόνα 4.26. Καμπύλες διάρκειας ροής στην Ανατολική πλευρά του Ευρώτα α) 2002-2003 β) 2006-2007 και γ) 2008-2009	128
Εικόνα 4.27. Μέσο ετήσιο δυναμικό ιζημάτων (sediment yield) για κάθε υπολεκάνη του Ευρώτα για την περίοδο 2000-2011.....	129
Εικόνα 4.28. Η κατανομή της προσομοιωμένης στερεοπαροχής του Ευρώτα για ένα α) υγρό (2003-2004), β) ξηρό (2006-2007) και γ) τυπικό (2008-2009) έτος.....	130
Εικόνα 4.29. Καμπύλες διάρκειας στερεοπαροχής στον κύριο ρου του Ευρώτα α) 2002-2003 β) 2006-2007 και γ) 2008-2009	131
Εικόνα 4.30. Καμπύλες διάρκειας στερεοπαροχής στην Δυτική πλευρά του Ευρώτα α) 2002-2003 β) 2006-2007 και γ) 2008-2009	131
Εικόνα 4.31. Καμπύλες διάρκειας στερεοπαροχής στην Ανατολική πλευρά του Ευρώτα α) 2002-2003 β) 2006-2007 και γ) 2008-2009.....	132
Εικόνα 4.32. Προσομοίωση της μέσης ετήσιας συγκέντρωσης των ιζημάτων (2000-2011) για κάθε τμήμα της λεκάνης απορροής.....	132
Εικόνα 4.33. Χαρακτηριστική συσχέτιση μεταξύ των γεγονότων βροχόπτωσης και του παραγόμενου δυναμικού ιζημάτων	133
Εικόνα 4.34. Κατανομή των φορτίων ανόργανου αζώτου που εκφορτίζονται από κάθε υπολεκάνη (tn/yr)	135

Εικόνα 4.35. Κατανομή των φορτίων ανόργανου φωσφόρου που εκφορτίζονται από κάθε υπολεκάνη (τη/yr)	136
Εικόνα 5.1. Σχηματική μεθοδολογία συνδυασμού των μοντέλων SWAT και PTC.....	139
Εικόνα 5.2. Περιοχή μελέτης συνδυαστικού μοντέλου SWAT-PTC (Κοιλάδα της Σπάρτης)....	140
Εικόνα 5.3. Ισοΰψεις καμπύλες περιοχής μελέτης (Κοιλάδα Σπάρτης).....	141
Εικόνα 5.4. Υδραυλική αγωγιμότητα περιοχής μελέτης (Κοιλάδα Σπάρτης).....	141
Εικόνα 5.5. Δεδομένα διήθησης περιοχής μελέτης (Κοιλάδα Σπάρτης) επιφανειακού μοντέλου SWAT	142
Εικόνα 5.6. Ορισμός και απεικόνιση οριακών συνθηκών περιοχής μελέτης (Κοιλάδα Σπάρτης) 144	
Εικόνα 5.7. Θέσεις γεωτρήσεων και τριγωνικά πλέγματα διακριτοποίησης περιοχής μελέτης (Κοιλάδα Σπάρτης)	144
Εικόνα 5.8. Απόκλιση τιμών υδραυλικών υψών δεδομένων και μοντέλου.	146
Εικόνα 5.9. Υδραυλικά ύψη Σεπτεμβρίου 2011 (SWAT-PTC).....	147
Εικόνα 5.10. Ταχύτητες ροής Σεπτεμβρίου 2011 (SWAT-PTC).....	148
Εικόνα 5.11. Υδραυλικά ύψη Σεπτεμβρίου 2011 με μηδενικές αντλήσεις (SWAT-PTC)	149
Εικόνα 5.12. Ταχύτητες ροής Σεπτεμβρίου 2011 με μηδενικές αντλήσεις (SWAT-PTC)	150
Εικόνα 5.13 Υπολογιζόμενη ετήσια παροχή (m ³ /s) στην έξοδο της λεκάνης (Βρονταμάς) για τα τρία κλιματικά σενάρια.....	153
Εικόνα 5.14. Χρονοσειρά του δείκτη SPI περιόδου 6 μηνών για τα τρία κλιματικά σενάρια για τη λεκάνη του Ευρώτα για την περίοδο 1970-2060	154
Εικόνα 5.15. Χρονοσειρά του δείκτη SPI περιόδου 6 μηνών για τα τρία κλιματικά σενάρια για τη λεκάνη του Ευρώτα για την περίοδο 2040-2060	154
Εικόνα 5.16. Εμφάνιση (%) Υγρών και Ξηρών περιόδων (SPI περιόδου 6 μηνών) ανά δεκαετία 155	
Εικόνα 5.17. Κατηγορίες χαρακτηρισμού υδάτινων οικοτόπων.....	155
Εικόνα 5.18. Βρονταμάς - Aquatic States Frequency Graph (2000-2060) – KNMI-RACMO2 ... 157	
Εικόνα 5.19. Βρονταμάς - Aquatic States Frequency Graph (2000-2060) – MPI-M-REMO	157
Εικόνα 5.20. Βρονταμάς - Aquatic States Frequency Graph (2000-2060) – SMHI-RCA	158
Εικόνα 5.21. Υδραυλικά ύψη (m) α) 2043 και β) 2055 (KNMI-RACMO2)	160
Εικόνα 5.22. Ταχύτητες ροής (m) α) 2043 και β) 2055 (KNMI-RACMO2)	161
Εικόνα 5.23. Υδραυλικά ύψη (m) α) 2043 και β) 2055 (MPI-M-REMO).....	161
Εικόνα 5.24. Ταχύτητες ροής (m) α) 2043 και β) 2055 (MPI-M-REMO).....	162
Εικόνα 5.25. Υδραυλικά ύψη (m) α) 2043 και β) 2055 (SMHI-RCA).....	162

Εικόνα 5.26. Ταχύτητες ροής (m) α) 2043 και β) 2055 (SMHI-RCA).....	163
Εικόνα 5.27. Γεωτρήσεις και υδατορέματα παρατήρησης των κλιματικών σεναρίων έως το 2058.....	164
Εικόνα 5.28. Σχετική μεταβολή του υδροφόρου ορίζοντα (m) στις γεωτρήσεις – KNMI-RAMCO2	164
Εικόνα 5.29 Σχετική μεταβολή του υδροφόρου ορίζοντα (m) στα υδατορέματα – KNMI-RAMCO2	165
Εικόνα 5.30. Σχετική μεταβολή του υδροφόρου ορίζοντα (m) στις γεωτρήσεις – MPI-M-REMO	165
Εικόνα 5.31. Σχετική μεταβολή του υδροφόρου ορίζοντα (m) στα υδατορέματα – MPI-M-REMO.....	165
Εικόνα 5.32. Σχετική μεταβολή του υδροφόρου ορίζοντα (m) στις γεωτρήσεις – SMHI-RCA.	166
Εικόνα 5.33. Σχετική μεταβολή του υδροφόρου ορίζοντα (m) στα υδατορέματα – SMHI-RCA	166

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή με τίτλο «Ολοκληρωμένο πλαίσιο μοντελοποίησης υδρολογίας, ποιότητας νερών και στερεοπαροχής σε λεκάνες απορροής ποταμών διαλείπουσας ροής» προτείνεται μια νέα μεθοδολογία συλλογής δεδομένων και μοντελοποίησης της υδρολογίας, της ποιότητας νερών και της στερεοπαροχής σε λεκάνες απορροής ποταμών διαλείπουσας ροής στη Μεσόγειο, μεθοδολογία η οποία θα καλύψει τα κενά εφαρμογής υπαρχόντων μοντέλων σε σύνθετα υδρολογικά και υδρογεωλογικά συστήματα.

Οι υδατικοί πόροι διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στις κοινωνικοοικονομικές εξελίξεις συμβάλλοντας ουσιαστικά στην εξέλιξη της ζωής και στον ανθρώπινο πολιτισμό. Η βιώσιμη διαχείριση των πόρων αυτών γίνεται ολοένα και περισσότερο σύνθετη λόγω της πεπερασμένης διάθεσης τους, λόγω της κατάχρησης και κακοδιαχείρισης τους, που έχει σαν αποτέλεσμα τον περιορισμό της διαθεσιμότητας τους. Τα προβλήματα που συνδέονται με τους υδατικούς πόρους και τη χρήση τους (υγεία, τουρισμός, βιομηχανία, αγροτική παραγωγή κ.α.) σε συνδυασμό με τις γενικότερες περιβαλλοντικές πιέσεις που προέρχονται από τη πληθυσμιακή αύξηση (μεγαλύτερες απαιτήσεις για άρδευση και μεγαλύτερες ανάγκες σε νερό παγκοσμίως, έντονες και απρόβλεπτες κλιματολογικές αλλαγές), οξύνονται από την όλο ένα και μεγαλύτερη απαίτηση σε νερό. Ο ανταγωνισμός αυτός είναι εντονότερος στις ξηρές και ημίξηρες περιοχές, όπου η έλλειψη νερού ήταν και εξακολουθεί να είναι ακόμη, ένα φαινόμενο που παίζει καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση πολιτικών, κοινωνικών και οικονομικών σχέσεων.

Στην πλειονότητα των ποταμών διαλείπουσας ροής δεν υπάρχουν δεδομένα ικανά να περιγράψουν τις υδρολογικές και γεωχημικές συνθήκες που επικρατούν και σε συνδυασμό με την έντονη γεωμορφολογία των ποταμών αυτών δε δύναται να ενταχθούν στις παραδοσιακές γεωλογικές συνθήκες, σύμφωνα με τις οποίες έχουν αναπτυχθεί και κωδικοποιηθεί τα διάφορα υδρολογικά μοντέλα σήμερα. Η αποτελεσματική διαχείριση των εδαφικών και υδατικών πόρων προϋποθέτει την κατανόηση των βασικών οικολογικών και υδρολογικών διεργασιών που διέπουν μια περιοχή.

Η περιοχή μελέτης της παρούσας διατριβής είναι η ευρύτερη περιοχή της λεκάνης απορροής του ποταμού Ευρώτα, ο οποίος αποτελεί ένα σύνθετο υδρολογικό και υδρογεωλογικό σύστημα αποτελούμενο κυρίως από ποταμούς διαλείπουσας ροής σε καρστικούς σχηματισμούς και πηγές. Τα επιφανειακά νερά που διαρρέουν τα υδατορέματα του ποταμού παρουσιάζουν έντονη εποχικότητα ενώ ταυτόχρονα υπάρχει μια έντονη ζήτηση του νερού την ίδια περίοδο. Επί πρόσθετα οι πλημμύρες και η παραγόμενη διάβρωση αποτελούν επίσης σημαντικές πιέσεις στο σύστημα του ποταμού. Εκτός από την ανάλυση των επιφανειακών υδάτων ιδιαίτερα σημαντική είναι και η κατανόηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ των επιφανειακών και υπογείων υδάτων και η απόκριση τους στην κλιματική αλλαγή.

Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των υδατικών πόρων της περιοχής καθιστούν τη λεκάνη του ποταμού Ευρώτα μια περιοχή που έχει εγείρει το επιστημονικό ενδιαφέρον εδώ και αρκετά χρόνια. Οι άξονες που τέθηκαν στην παρούσα διατριβή ήταν:

- Η συλλογή πληροφοριών σχετικά με το γεωλογικό, υδρογεωλογικό και μορφολογικό καθεστώς της λεκάνης του ποταμού.
- Η ανάπτυξη και η συμπλήρωση του υφιστάμενου συστήματος παρακολούθησης των ποιοτικών και ποσοτικών χαρακτηριστικών όλων των υδατικών σωμάτων της περιοχής έρευνας.
- Η ανάλυση και η αξιολόγηση της υφιστάμενης περιβαλλοντικής κατάστασης του ποταμού.
- Η προσομοίωση των διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στην περιοχή μελέτης, με τη χρήση και συνδυασμό υπολογιστικών μοντέλων.
- Η μελέτη των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στους υδατικούς πόρους της περιοχής μελέτης.

Διάφοροι μέθοδοι μοντελοποίησης των υδατικών πόρων έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως για πάνω από 40 χρόνια για διάφορους σκοπούς, αλλά σχεδόν όλα αυτά τα εργαλεία μοντελοποίησης έχουν δημιουργηθεί και αναπτυχθεί κυρίως για περιοχές με υγρά κλίματα ενώ σε περιοχές με ξηρά και ημίξηρα κλίματα έχει δοθεί λιγότερη προσοχή λόγω της ιδιαιτερότητας των περιοχών αυτών. Έτσι η αποτελεσματική μελέτη και διαχείριση των υδατικών πόρων απαιτεί την χρησιμοποίηση ή την δημιουργία κατάλληλων συστημάτων διαχείρισης και εργαλείων μοντελοποίησης σε επίπεδο λεκάνης απορροής.

Στην λεκάνη απορροής του ποταμού Ευρώτα αναπτύχθηκε και εφαρμόστηκε ένα ολοκληρωμένο συνδυαστικό αριθμητικό μοντέλο επιφανειακών-υπόγειων υδάτων το οποίο αποτελείται από το υδρολογικό μοντέλο SWAT (Soil Water Assessment Tool), το οποίο προσομοιώνει τις συνθήκες που αφορούν στα επιφανειακά ύδατα της λεκάνης και τον κώδικα PTC (Princeton Transport Code) που προσομοιώνει την υπόγεια ροή και μεταφορά.

Με το μοντέλο SWAT μελετήθηκε η ποσότητα, η ποιότητα και η στερεοπαροχή των επιφανειακών υδάτων της λεκάνης απορροής του ποταμού καθώς και οι επιπτώσεις των υδρολογικών διεργασιών στην οικολογία της λεκάνης. Μηνιαία και ημερήσια δεδομένα παροχής καθώς και μηνιαία δεδομένα συγκεντρώσεων στερεοπαροχής από ένα εκτεταμένο δίκτυο συλλογής και παρακολούθησης χρησιμοποιήθηκαν για την βαθμονόμηση και επαλήθευση του υδρολογικού μοντέλου SWAT. Η προσομοίωση της υδρολογίας και της μεταφοράς ιζημάτων κρίθηκε ικανοποιητική μέσω στατιστικών δεικτών (NSE, PBIAS και RSR) με όλους τους δείκτες να βρίσκονται εντός των επιτρεπτών ορίων. Η μέση βροχόπτωση για την περίοδο 2000-2011 εκτιμήθηκε σε 903 mm yr⁻¹ η πραγματική εξατμισοδιαπνοή στο 46.9% (424 mm yr⁻¹) και η απορροή στο 13.4% (121 mm yr⁻¹). Το υπόλοιπο 33.4% (302 mm yr⁻¹) είναι ποσότητες που

καλύπτουν τις ανάγκες καθώς και ποσότητες υδάτων που χάνονται μέσω καρστικών συστημάτων του Ταΰγετου και του Πάρνωνα σε περιοχές εκτός της λεκάνης απορροής.

Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν πως η λεκάνη έχει σε ετήσια βάση αρκετές ποσότητες για να καλυφτούν οι ανάγκες εντούτοις μεγάλα προβλήματα παρουσιάζονται κυρίως κατά τις ξηρές περιόδους όπου η πλειονότητα των υδατορεμάτων (>85% του υδρογραφικού δικτύου) ξεραιίνεται τελείως. Η μέση ετήσια μεταφορά ιζημάτων για την περίοδο 2000-2011 υπολογίστηκε σε $0.85 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ με τις μεγαλύτερες ποσότητες διάβρωσης να εμφανίζονται στην περιοχή του Ταΰγετου ($3.5 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$). Με βάση τη σύγκριση της προσομοίωσης με το μοντέλο SWAT με πραγματικούς χάρτες στο πεδίο προέκυψε πάνω από το 85% των τμημάτων του ποταμού αντιπροσωπεύουν ίδια χαρακτηριστικά ροής με αυτά των πραγματικών χαρτών αποξήρανσης ποταμού παρέχοντας επιπλέον ενδείξεις ότι το μοντέλο μπορεί να απεικονίσει συστηματικά συνθήκες χαμηλής ή μηδενικής ροής στη λεκάνη. Η συχνότητα των πλημμυρών στον κεντρικό ρου του ποταμού εκτιμάται ότι είναι μεταξύ 5% και 7%.

Η μέση τιμή του δυναμικού σε νερό της περιόδου 1970-1988 έχει μειωθεί από 277.1 mm (21.2% της βροχόπτωσης) σε 134.8 mm (15.2% της βροχόπτωσης) κατά την περίοδο 1989-2011 ως αποτέλεσμα της μείωσης των βροχοπτώσεων από 1304.4 mm σε 884.1 mm στην ίδια περίοδο.

Οι διεργασίες που αφορούν τις ροές των υπογείων υδάτων και την επίδραση τους με τα επιφανειακά ύδατα στην περιοχή μελέτης προσομοιώθηκαν με τη χρήση συνδυασμού του υδρολογικού μοντέλου SWAT και του κώδικα PTC. Έπειτα από την επιτυχημένη βαθμονόμηση και επαλήθευση του μοντέλου SWAT, σύμφωνα με τα κριτήρια που επιλέχθηκαν, προσομοιώθηκαν οι διεργασίες που αφορούν τις ροές των υπογείων υδάτων στην περιοχή μελέτης με τη χρήση του κώδικα PTC. Τα δεδομένα ροής των επιφανειακών υδάτων από το μοντέλο SWAT χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισαγωγής και οριακών συνθηκών στο μοντέλο των υπογείων υδάτων το οποίο βαθμονομήθηκε και επαληθεύτηκε επιτυχώς για την περίοδο 2007-2011. Όσον αφορά στην εποχική διακύμανση των υδραυλικών υψών κατά την περίοδο 2007-2011 παρατηρήθηκε ότι είναι σχετικά μικρή, προφανώς επειδή τα υδατικά αποθέματα της λεκάνης είναι αρκετά μεγάλα.

Τέλος μελετήθηκε η απόκριση υδατικών πόρων (επιφανειακών και υπόγειων) και των υδρολογικών παραμέτρων (δείκτες ξηρασίας) της περιοχής μελέτης με την χρήση σεναρίων κλιματικής αλλαγής έως το 2060. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα προσομοιώσεων του μοντέλου SWAT μέσω των διαγραμμάτων συχνότητας της υδρόβιας κατάστασης ASGF (Aquatic States Frequency Graph) για τρία σενάρια κλιματικής αλλαγής (KNMI-RACMO2, MPI-M-REMO, SMHI-RCA) το μεγαλύτερο πρόβλημα επάρκειας επιφανειακών υδάτων προβλέπεται ότι θα υπάρξει στο υδατόρεμα της Μαγουλίτσας την περίοδο 2040-2060 ενώ αντίθετα περιοχές όπως η Ρασίνα δεν θα επηρεαστούν ιδιαίτερα.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης της επίδρασης της κλιματικής αλλαγής στον υπόγειο υδροφόρο συμπεραίνουμε ότι κατά την περίοδο 2043-2055, όπου ο δείκτης SPI παρουσιάζει μια τάση μεταβολής από υγρές περιόδους σε ξηρές σύμφωνα με το κλιματικό σενάριο 1 (KNMI-RACMO2), ο υδροφόρος παρουσιάζει μια μείωση των υδραυλικών υψών στην κοιλάδα της Σπάρτης ίση κατά μέσο όρο με 0.82 m. Η μείωση αυτή αντιστοιχεί σε απώλεια ίση με 72 εκ. m³ νερού κατά την διάρκεια των 12 αυτών χρόνων καθιστώντας σημαντική την ανάγκη για την εφαρμογή στρατηγικής διαχείρισης των υδατικών πόρων για να αποφευχθεί οποιαδήποτε περίπτωση λειψυδρίας στο μέλλον. Αντίστοιχα κατά την περίοδο 2055-2057 όπου έχουμε τάση μεταβολής από ξηρές σε υγρές περιόδους ο υδροφόρος παρουσιάζει αύξηση των υδραυλικών υψών κατά 0.16 m. Κατά το κλιματικό σενάριο 2 (MPI-M-REMO) ο υδροφόρος κατά την περίοδο 2043-2055 παρουσιάζει μια μείωση των υδραυλικών υψών στην κοιλάδα της Σπάρτης ίση κατά μέσο όρο με 0.47 m η οποία αντιστοιχεί σε απώλεια ίση με 42.3 εκ. m³ νερού. Ο υδροφόρος παρουσιάζει αύξηση των υδραυλικών υψών κατά 0.05 m κατά την περίοδο 2055-2057. Κατά το κλιματικό σενάριο 3 (SMHI-RCA) ο υδροφόρος κατά την περίοδο 2043-2055 παρουσιάζει μια μείωση των υδραυλικών υψών στην κοιλάδα της Σπάρτης ίση κατά μέσο όρο με 0.87 m η οποία αντιστοιχεί σε απώλεια ίση με 78.3 εκ. m³ νερού. Ο υδροφόρος παρουσιάζει αύξηση των υδραυλικών υψών κατά 0.16 m κατά την περίοδο 2055-2057.

Όσον αφορά τις γεωτρήσεις και για τα τρία κλιματικά σενάρια παρά τις κατά περιόδους αυξομειώσεις των υδραυλικών υψών τους, ο υδροφόρος ορίζοντας καταφέρνει και επανέρχεται στα αρχικά επίπεδα με εξαίρεση τις γεωτρήσεις P2 (Περιοχή Παλαιοπαναγιά) και N1 (περιοχή Καλύβια Σοχάς) στις οποίες εμφανίζεται μειωμένος κατά 0.5 και 1 m αντίστοιχα στο τέλος του 2058.

Βασική καινοτομία θεωρείται η μεθοδολογία στο σύνολό της που παρουσιάζει ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο προσομοίωσης των φυσικών διεργασιών και αντιμετώπιση των δυσκολιών παραμετροποίησης και βαθμονόμησης μιας σύνθετης υδρολογικής και υδρογεωλογικής λεκάνης στη Μεσόγειο λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαιτερότητες της περιοχής και εστιάζοντας στη συλλογή δεδομένων σε διάφορες κλίμακες για την ελαχιστοποίηση της αβεβαιότητας που προκύπτει από υφιστάμενους περιορισμούς.

ABSTRACT

Understanding the complex behaviour of the integrated surface and groundwater system is very important for the regional water resources management and requires an integrated modeling approach. Predicting the spatial patterns and intensity of hydrology, groundwater and sediment transport for large river basins can be problematic in areas where few reliable field data are available so other approaches that facilitate model simulations must be applied.

For the purposes of this study a comprehensive modelling framework for integrating a hydrologic (SWAT) and a groundwater (PTC) model was conceptualized, developed and tested in a large Mediterranean watershed (Evrotas River Basin).

The objective of this research was to study the spatial distribution of runoff, sediment transport and better understand the dynamics of surface-groundwater (SW-GW) interactions in a large Mediterranean watershed (Evrotas River Basin) consisting of temporary flow tributaries and high mountain areas and springs by focusing on the collection and use of a variety of data to constrain the model parameters and characterize hydrologic and geophysical processes at various scales and to improve the seasonal forecasting of a potential hydrological drought under future climate change scenarios.

Evrotas River Basin has a drainage area of 1348 km² and is a complex hydrological system consisting of intermittent flow tributaries, high relief areas and springs which are the main contributors to base-flow. It is located in the southeast part of Peloponnesus, Greece and drains into Laconikos Gulf.

Both monthly and daily discharge data (2004-2011) and monthly sediment concentration data (2010-2011) from an extended monitoring network of 8 sites were used to calibrate and validate the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model. In addition flow desiccation maps showing wet and dry aquatic states obtained during a dry year were used to calibrate the simulation of low flows. Annual measurements of sediment accumulation in two reaches were used to further calibrate the sediment simulation. Model simulation of hydrology and sediment transport was in good agreement with field observations as indicated by a variety of statistical measures used to evaluate the goodness of fit. A water balance was constructed using a 12 year long (2000-2011) simulation. The average precipitation of the basin for this period was estimated to be 903 mm yr⁻¹. The actual evapotranspiration was 46.9% (424 mm yr⁻¹), and the total water yield was 13.4% (121 mm yr⁻¹). The remaining 33.4% (302 mm yr⁻¹) was the amount of water that was lost through the deep groundwater of Taygetos and Parnonas Mountains to areas outside the watershed and for drinking water demands (6.3%). The results suggest that the catchment has on average significant water surplus to cover drinking water and irrigation demands. However, the situation is different during the dry years, where the majority of the reaches (85% of the river network are

perennial and temporary) completely dry up as a result of the limited rainfall and the substantial water abstraction for irrigation purposes. There is a large variability in the sediment yield within the catchment with the highest annual sediment yield ($3.5 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$) to be generated from the western part of the watershed.

The study of the surface-groundwater (SW-GW) interactions is achieved by integrating the quasi-distributed watershed Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model with the three-dimensional groundwater flow Princeton Transport Code (PTC) model. The combined models are applied to the alluvial plain (300 km^2) of Evrotas watershed by considering the interaction between the stream network and the aquifer to better spatially represent feedback fluxes within the surface and groundwater domains. The SWAT-PTC model was calibrated using field data for the 2007-2011 period. Model simulation was in good agreement with field observations demonstrating that this integrated modeling approach provides a more realistic representation of the water exchanges between surface and subsurface domains and constrains more the calibration with the use of both surface and subsurface observed data. Finally the SWAT and SWAT-PTC models were used to study the impact of future climate change on surface and ground water resources of the area under three different climate change scenarios.

The climate scenario results suggest that the Evrotas catchment area will be facing a different climate in the future. All three scenarios gave consistent results, predicting significant decreases in annual precipitation, actual ET and runoff after 2030. The results suggest a 10% decrease in precipitation, 4% decrease in ET and 19% decrease in flow in 2030-2050 compared to 2010-2020. The KNMI-RACMO-ECHAM5 scenario presents the highest percentage of drought occurrence (21.1 %) during the 2050-2060 period while for the SMHI-RCA-ECHAM5 and MPI-REMO-ECHAM5 scenarios this is 20.0% and 19.0%, respectively. The results indicate that the upstream reaches displayed a loss of surface water to underlying groundwater systems whereas downstream the main river received recharge from groundwater as the water table approached the surface topography. The low flow characterization for the current situation showed that a large part of the stream network will be too dry to accommodate the development of a viable aquatic ecological community throughout the year. In dry periods (2043-2055) the amount of water that is supplied to the aquifer is 40.9% less than the amount of water that was supplied under current climate conditions highlighting the need for new management strategies that must be implemented in order to avoid setbacks in the allocation of water resources in the future.

The results indicate also that the study area is very sensitive to potential future climate change. The developed methodology facilitated the simulation of hydrology, groundwater and sediment transport of the catchment providing consistent results and suggesting its usefulness as a tool for temporary rivers management.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Τοποθέτηση του προβλήματος

Η έλλειψη του νερού έχει καταστεί πλέον ένα μείζον παγκόσμιο πρόβλημα με την βιωσιμότητα των υδατικών πόρων να είναι ο σημαντικότερος στόχος της διαχείρισης των υδάτων. Τα προβλήματα που συνδέονται με τους υδατικούς πόρους και τη χρήση τους (αγροτική παραγωγή, τουρισμός, βιομηχανία, υγεία κ.α.) σε συνδυασμό με τις γενικότερες περιβαλλοντικές πιέσεις λόγω της πληθυσμιακής αύξησης (μεγαλύτερες απαιτήσεις για άρδευση και μεγαλύτερες ανάγκες σε νερό) ή από τις έντονες και απρόβλεπτες κλιματολογικές αλλαγές, οξύνονται από την όλο ένα και μεγαλύτερη απαίτηση σε νερό. Η βιώσιμη ή αειφόρος διαχείριση των υδατικών πόρων γίνεται ολόένα και περισσότερο σύνθετη λόγω της πεπερασμένης διάθεσης τους, καθώς και της υπερκατανάλωσης και κακοδιαχείρισης τους, που έχει ως αποτέλεσμα τον περιορισμό της διαθεσιμότητας τους (FAO, 2013).

Η Ευρωπαϊκή Ένωση, κατανοώντας τη σημασία της προστασίας και διατήρησης του υδάτινου περιβάλλοντος προχώρησε στη διαμόρφωση της Οδηγίας Πλαισίου (Οδηγία 2000/60/EK, 2000) που θα θεσπίζει τις βασικές αρχές μιας βιώσιμης πολιτικής των υδάτων στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Η Οδηγία 2000/60/EK συνδυάζει ποιοτικούς, οικολογικούς και ποσοτικούς στόχους για την προστασία υδάτινων οικοσυστημάτων και την καλή κατάσταση όλων των υδατικών πόρων και θέτει ως κεντρική ιδέα την ολοκληρωμένη διαχείριση τους στη γεωγραφική κλίμακα των Λεκανών Απορροής Ποταμών.

Το 2007 η τέταρτη “Έκθεση της IPCC” κατέληξε στο συμπέρασμα ότι το μεγαλύτερο μέρος της αύξησης στις μέσες παγκόσμιες θερμοκρασίες από το μέσον του 20ου αιώνα οφείλεται στην αύξηση των συγκεντρώσεων των αερίων του θερμοκηπίου από τις δραστηριότητες του ανθρώπου, και ως εκ τούτου είναι σημαντικό να αναλυθούν οι επιπτώσεις τόσο της φυσικής όσο και της ανθρωπογενούς κλιματικής αλλαγής και ο τρόπος που θα επηρεαστούν τα υπάρχοντα κλιματικά πρότυπα σε τοπική κλίμακα. Η έκθεση αυτή προβλέπει αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη από 1.8 έως 4 βαθμούς κελσίου αυτόν τον αιώνα (IPCC, 2007a,b).

Η αλλαγή του κλίματος έχει ήδη ισχυρές επιδράσεις στα οικοσυστήματα, στους υδάτινους πόρους και στις παράκτιες περιοχές της κεντρικής και νότιας Ευρώπης με τις περιοχές της Μεσογείου να υπόκεινται σε δραματικές αλλαγές λόγω της ταχείας αύξησης του πληθυσμού, της ταχείας αστικοποίησης και της οικονομικής ανάπτυξης επηρεάζοντας τη βιωσιμότητα, την ποσότητα, την ποιότητα και τη διαχείριση των υδατικών πόρων (Nikolaidis et al., 2014; IPCC, 2007a,b).

Η έλλειψη οποιασδήποτε ορθολογιστικής διαχείρισης των υδατικών πόρων είναι ένα πρόβλημα που αφορά όλη την Ελλάδα, και κυρίως τα νησιά του Αιγαίου όπου το

πρόβλημα εμφανίζεται ιδιαίτερα διογκωμένο και απαιτεί άμεση προσοχή. Η προσέγγιση της διαχείρισης των υδατικών πόρων και η ανάπτυξη εργαλείων για την παραγωγή των αντίστοιχων πολιτικών στα πλαίσια της βιώσιμης διαχείρισης οφείλει να γίνει σε πρώτη φάση σε τοπικό επίπεδο λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαιτερότητες κάθε περιοχής, τις συνθήκες ανάπτυξης των υδατικών πόρων και των χρήσεων τους σε επίπεδο λεκάνης απορροής. Η Ελλάδα παρά τον φυσικό της πλούτο σε υδατικούς πόρους και την καλή σε γενικές γραμμές, ποιότητα των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων παρουσιάζει συχνά προβλήματα διαθεσιμότητας νερού σε πολλές περιοχές λόγω της άνισης κατανομής των πόρων και λόγω της έντονης γεωμορφολογίας του εδάφους (**Karavoltzos et al., 2008**).

Το φαινόμενο της ανεπάρκειας νερού μπορεί να επιδεινωθεί από παρατεταμένες περιόδους ξηρασίας, αποτέλεσμα της κλιματικής αλλαγής και των διαδικασιών ερημοποίησης δηλαδή της υποβάθμισης της γης ως αποτέλεσμα διάφορων φυσικών παραγόντων και αγροτικών πρακτικών (**IPCC, 2007a,b**).

Κύριο χαρακτηριστικό των ξηρών και ημίξηρων περιοχών όπως η Μεσόγειος είναι οι ποταμοί διαλείπουσας ροής στην πλειονότητα των οποίων δεν υπάρχουν δεδομένα επαρκή και ικανά να περιγράψουν τις υδρολογικές, γεωχημικές και οικολογικές συνθήκες που επικρατούν στα περιβάλλοντα αυτά καθώς επίσης και το γεγονός ότι η έντονη γεωμορφολογία των ποταμών αυτών δε δύναται να ενταχθεί στις παραδοσιακές γεωλογικές συνθήκες, σύμφωνα με τις οποίες έχουν αναπτυχθεί και κωδικοποιηθεί τα διάφορα υδρολογικά μοντέλα σήμερα (**Larned et al., 2010**).

Τα ποτάμια διαλείπουσας ροής είναι μοναδικά συστήματα τόσο από πλευράς υδρολογίας όσο και από πλευράς βιογεωχημικών διεργασιών και βιοποικιλότητας. Παρέχουν υδρολογική διασύνδεση μεταξύ περιοχών εντός της λεκάνης απορροής, διάχυση της ενέργειας της ροής κατά τη διάρκεια υψηλών παροχών με αποτέλεσμα την μείωση της διάβρωσης και τη βελτίωση της ποιότητας του νερού, ανταλλαγή μεταξύ επιφανειακών και υπογείων υδάτων, μεταφορά και εναπόθεση φερτών υλικών, αποθήκευση θρεπτικών συστατικών, δίοδο μεταφοράς των ενδιαιτημάτων καθώς και υποστήριξη της παρόχθιας βλάστησης στην σταθεροποίηση των πρανών. Η μείωση της παροχής κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου και η επακόλουθη εναπόθεση φερτών υλικών στα κατάντη τμήματα οφείλεται σε απώλειες ύδατος ως αποτέλεσμα της διήθησης του νερού σε αλλούβιους σχηματισμούς μεγάλης υδραυλικής αγωγιμότητας. Η διαφορετική υδρολογική μεταβλητότητα των ποταμών διαλείπουσας ροής οδηγεί επίσης τη δυναμική της ρύπανσης και κατά συνέπεια στη διερεύνηση μέτρων που σχετίζονται με (i) τις εισροές θρεπτικών ουσιών και οργανικών από τα αστικά λύματα, (ii) την απώλεια-μεταφορά φερτών υλικών, σωματιδίων και προσροφημένων θρεπτικών συστατικών λόγω διάβρωσης, (iii) την αποκατάσταση των επικινδύνων ουσιών από τα ιζήματα των ποταμών και (iv) την ολοκληρωμένη διαχείριση των πλημμυρών (**Gallart et al., 2016; Gamvroudis et al., 2015; Lespinas et al., 2014**).

Λόγω των εντατικών πρακτικών χρήσεων γης, η διάβρωση έχει γίνει μια από τις πιο επικίνδυνες μορφές υποβάθμισης του εδάφους που οδηγεί σε σημαντική μείωση της γονιμότητας του εδάφους και της απόδοσης του (Nerantzaki et al., 2015). Τις τρεις τελευταίες δεκαετίες, έχει υπάρξει μια αυξανόμενη συνειδητοποίηση στη σημασία των προβλημάτων που σχετίζονται με τη διάβρωση στη Μεσόγειο ενώ υπάρχει περιορισμένος αριθμός μελετών στερεομεταφοράς στην περιοχή της Μεσογείου και αυτό δημιουργεί ένα σημαντικό κενό στην κατανόηση των διεργασιών διάβρωσης του εδάφους, καθώς και στις επιπτώσεις αυτής (Rovira και Batalla, 2006).

Της τελευταία δεκαετία έγιναν πολλές μελέτες που χρησιμοποίησαν μοντέλα διάβρωσης σε χώρες της Μεσογείου, κυρίως στην Ισπανία και την Ιταλία. Στις περισσότερες από αυτές τις μελέτες η ποσοτικοποίηση των φορτίων γίνεται είτε με τη χρήση στατιστικής σε υπάρχοντα ιστορικά δεδομένα (π.χ. καμπύλες στερεοπαροχής) είτε με τη δημιουργία χαρτών συνδυάζοντας μετρήσεις πεδίου (Vericat and Batalla, 2010; Rovira and Batalla, 2006; López-Tarazón et al., 2009; Rodríguez-Blanco et al., 2010; Nunes et al., 2011).

Μικρή έμφαση έχει δοθεί επίσης στην εκτίμηση της διάβρωσης σε ιδιαίτερα περιβάλλοντα και χαρακτηριστικά στις καρστικές περιοχές της Μεσογείου. Η Ελλάδα με έντονη τοπογραφία (μεγάλες υψομετρικές διακυμάνσεις σε μικρές αποστάσεις) παρουσιάζει έντονα φαινόμενα διάβρωσης. Οι ορεινές περιοχές με γεωλογικούς σχηματισμούς μεγάλης διαπερατότητας (π.χ. καρστικές περιοχές στην περιοχή της Μεσογείου) έχουν μόνο υδατορέματα διαλείπουσας ροής που ρέουν μόνο σε περιπτώσεις όπου η ένταση της βροχόπτωσης υπερβαίνει την ικανότητα απορρόφησης νερού από το καρστικό. Από την άλλη υδατορέματα διαλείπουσας ροής υπάρχουν σε περιοχές που έχουν επηρεαστεί από ανθρωπογενείς πιέσεις (π.χ. η άντληση νερού έχει χαμηλώσει τον υδροφόρο ορίζοντα, δεν υπάρχει αλληλεπίδραση επιφανειακού και υπογείου νερού και υπάρχουν σημαντικές απώλειες νερού (π.χ. Ισπανία, Ελλάδα, Ιταλία κλπ) (Νικολαΐδης κ.α 2009). Οι περιοχές χρίζουν ιδιαίτερης προσοχής διότι τα περιβάλλοντα τους (ασβεστολιθικά πετρώματα) είναι ευαίσθητα οικοσυστήματα λόγω της μικρής περιεκτικότητας σε θρεπτικά στοιχεία, της εύκολης διαβρωσιμότητάς τους και της δημιουργίας μη εύφορων εδαφών μικρού πάχους τα οποία είναι εκτεθειμένα σε ερημοποίηση λόγω μη κατάλληλων πρακτικών χρήσεων γης (Serpa et al., 2015; Terranova et al., 2009; Tzoraki et al., 2011).

Τα επιφανειακά νερά και τα υπόγεια νερά σε καρστικά συστήματα συχνά συνδέονται άμεσα (Nikolaidis et al., 2013; Nerantzaki et al., 2015). Η κατανόηση της σύνθετης συμπεριφοράς του συστήματος αλληλεπίδρασης επιφανειακών και υπόγειων υδάτων είναι πολύ σημαντική για τη διαχείριση των υδάτινων πόρων και απαιτεί μια ολοκληρωμένη προσέγγιση μοντελοποίησης. Διάφορες προσεγγίσεις μοντελοποίησης έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως για την ολοκληρωμένη διερεύνηση των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων. Οι πρώτες προσπάθειες έγιναν στη δεκαετία του 1980 ενώ από τη δεκαετία του 1990 οι έρευνες και τα μοντέλα έχουν αυξηθεί (Krause et al., 2009; Sophocleous et al., 1999; Graham and Butts, 2005; Brunner and Simmons, 2012;

Tian et al., 2015). Τα μοντέλα αυτά έχουν εφαρμοστεί για την αντιμετώπιση διαφόρων θεμάτων, όπως η διαχείριση της άρδευσης, οι αλληλεπιδράσεις SW-GW, η χρήση γης και η αλλαγή του κλίματος, η οικολογία και η ποιότητα του νερού. Τα περισσότερα μοντέλα έχουν σχεδιαστεί για την προσομοίωση της μέσης και υψηλής ροής και έχει αποδειχθεί ότι δίνουν καλά αποτελέσματα. Δυστυχώς, σε περιπτώσεις χαμηλών ροών συχνά τα αποτελέσματα δεν είναι ικανοποιητικά και δεν αντικατοπτρίζουν τις πραγματικές συνθήκες.

Η ανθρώπινη δραστηριότητα και η ρύπανση των καρστικών τοπίων μπορούν επίσης να έχουν αρνητική επίδραση στη βιολογική κοινότητα που αναπτύσσεται μέσα στις καρστικές περιοχές και να οδηγήσουν στη ρύπανση του υπόγειου υδροφορέα. Η ρύπανση των επιφανειακών και υπόγειων νερών οφείλεται σε διάφορες ανθρωπογενείς κυρίως δραστηριότητες που τα επιβαρύνουν με αστικά λύματα, βιομηχανικά απόβλητα, κτηνοτροφικά απόβλητα, αγροχημικά κ.λ.π. Η αντιμετώπιση της ρύπανσης των υπογείων νερών σε αντίθεση με των επιφανειακών νερών είναι δύσκολη, χρονοβόρα, κοστίζει και δεν δίδει πάντα καλά αποτελέσματα. Επομένως η καλύτερη μέθοδος αντιμετώπισης της είναι η προληπτική δηλαδή η αποφυγή της ρύπανσης (**Horne et al., 2016; Chen et al., 2016; Kahil et al., 2015**).

1.2 Σκοπός και πρωτοτυπία της διατριβής

Η περιοχή μελέτης της παρούσας διατριβής είναι η ευρύτερη περιοχή της λεκάνης απορροής του ποταμού Ευρώτα, ο οποίος ανήκει στο γεωγραφικό διαμέρισμα της Πελοποννήσου. Η λεκάνη απορροής του ποταμού Ευρώτα αποτελεί ένα σύνθετο υδρολογικό και υδρογεωλογικό σύστημα αποτελούμενο κυρίως από ποταμούς διαλείπουσας ροής σε καρστικούς σχηματισμούς και πηγές που είναι συνήθως η κύρια πηγή τροφοδοσίας της λεκάνης. Τα επιφανειακά νερά που διαρρέουν τα υδατορέματα του ποταμού παρουσιάζουν έντονη εποχικότητα ενώ ταυτόχρονα υπάρχει μια έντονη ζήτηση του νερού την ίδια περίοδο η οποία οφείλεται κυρίως από τη γεωργία και τον τουρισμό με τη μέγιστη κατανάλωση της να γίνεται κατά τους θερινούς μήνες. Επί πρόσθετα οι πλημμύρες, η ρύπανση και η παραγόμενη διάβρωση αποτελούν επίσης σημαντικές πιέσεις στο σύστημα του ποταμού. Οι ανθρώπινες δραστηριότητες και κυρίως η γεωργία, τα αντιπλημμυρικά έργα και η οικοδομική δραστηριότητα έχουν επιφέρει σημαντικές μορφολογικές τροποποιήσεις στον Ευρώτα και τους παραποτάμους του. Σοβαρές επιπτώσεις της διάβρωσης στον Ευρώτα εμφανίζονται στα κατώτερα αλλουβιακά πεδία (πεδινές περιοχές) όπου η απορροή μεταφέρει μεγάλες ποσότητες ιζημάτων από τις ορεινές περιοχές μειώνοντας την ικανότητα μεταφοράς νερού των ποταμών. Έτσι, η απορροή αυξάνει την εμφάνιση και το μέγεθος των πλημμυρών στα αλλουβιακά πεδία, αφήνοντας μεγάλες περιοχές υπό την απειλή του κινδύνου πλημμυρών. Εκτός από την ανάλυση των επιφανειακών υδάτων ιδιαίτερα

σημαντική είναι και η κατανόηση της αλληλεπίδρασης των επιφανειακών και υπογείων υδάτων στην περιοχή. Ο μεγάλος αριθμός γεωτρήσεων (δημόσιων ή ιδιωτικών) και υδροληψιών μέσα από την κοίτη έχουν ως αποτέλεσμα την μείωση της στάθμης των υδάτων κατά τη διάρκεια ξηρών περιόδων και η υπερεκμετάλλευση των πόρων απειλεί σημαντικά τα φυσικά ενδιαιτήματα της περιοχής και επηρεάζει αρνητικά την υδρόβια πανίδα και χλωρίδα.

Η αποτελεσματική διαχείριση των εδαφικών και υδατικών πόρων προϋποθέτει την κατανόηση των βασικών οικολογικών και υδρολογικών διεργασιών που διέπουν μια περιοχή. Το πολύπλοκο αυτό υδρογεωλογικό περιβάλλον στον Ευρώτα κάνει δύσκολη διαδικασία τη λήψη αποφάσεων. Η γνώση του υδρολογικού ισοζυγίου και της αλληλεπίδρασης μεταξύ των επιφανειακών και υπόγειων υδατικών αποθεμάτων της λεκάνης απορροής, αποτελεί πρωταρχικής σημασίας παράμετρο η οποία θα είναι σε θέση να οδηγήσει στην ορθολογικότερη αξιοποίηση του υδατικού δυναμικού της και την αντιμετώπιση των υφιστάμενων και μελλοντικών κλιματικών πιέσεων.

Η μελέτη του συστήματος του Ευρώτα απαιτεί μια σύνθετη και σύγχρονη διεπιστημονική μεθοδολογική προσέγγιση, και ως εκ τούτου η εύρεση των κατάλληλων εργαλείων και μοντέλων που να μπορούν να προσομοιώσουν αποτελεσματικά ένα τέτοιο οικοσύστημα είναι αναγκαία.

Βασική καινοτομία θεωρείται η μεθοδολογία στο σύνολό της που παρουσιάζει ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο προσομοίωσης των φυσικών διεργασιών και αντιμετώπιση των δυσκολιών παραμετροποίησης και βαθμονόμησης μιας σύνθετης υδρολογικής και υδρογεωλογικής λεκάνης στη Μεσόγειο λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαιτερότητες της περιοχής και εστιάζοντας στη συλλογή δεδομένων σε διάφορες κλίμακες για την ελαχιστοποίηση της αβεβαιότητας που προκύπτει από υφιστάμενους περιορισμούς.

Στόχος της παρούσας διατριβής αποτέλεσε η μελέτη της χωρικής και χρονικής κατανομής των επιφανειακών υδάτων και της στερεομεταφοράς καθώς και η κατανόηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ των επιφανειακών και υπόγειων νερών της περιοχής μελέτης και η απόκριση τους σε σενάρια κλιματικής αλλαγής.

Συγκεκριμένα μέσω του ευρέως διαδεδομένου μοντέλου (SWAT -Soil Water Assessment Tool) μελετήθηκαν οι υδρολογικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στη λεκάνη απορροής του ποταμού Ευρώτα, τόσο όσον αφορά την μεταφορά ύδατος, όσο και τη μεταφορά ιζημάτων και φορτίων ρύπων. Για την περαιτέρω εξέταση και επαλήθευση της υδρολογικής προσομοίωσης της λεκάνης απορροής του ποταμού Ευρώτα μέσω του μοντέλου SWAT σε ξηρές περιόδους δημιουργήθηκαν χάρτες απορροής προσδιορίζοντας τα τμήματα του ποταμού με επιφανειακή ροή ή όχι, χάρτες οι οποίοι στην συνέχεια συγκρίθηκαν με πραγματικούς χάρτες απορροής ενώ προκειμένου να περιοριστεί περαιτέρω η προσομοίωση των ιζημάτων μελετήθηκαν και αποτυπώθηκαν τοπογραφικά σε ετήσια βάση (συνολικά τρεις έρευνες πεδίου) κατά τη διάρκεια της περιόδου 2009-2011 δύο τμήματα του ποταμού. Τέλος συνδυάζοντας τα αποτελέσματα του μοντέλου SWAT με το μοντέλο υπογείων υδάτων PTC- Princeton

Transport Code μελετήθηκε η κατανόηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ των επιφανειακών και υπόγειων νερών καθώς και η απόκτηση τους σε τρία σενάρια κλιματικής αλλαγής (KNMI-RACMO2, MPI-M-REMO, SMHI-RCA) έως το 2060.

1.3 Δομή της διατριβής

Η διατριβή συγκροτήθηκε σε έξι κεφάλαια με τη δομή και το περιεχόμενο να έχει ως εξής.

Το πρώτο κεφάλαιο αποτελεί την εισαγωγή της διατριβής και περιλαμβάνει την περιγραφή του αντικειμένου, του σκοπού και των πρωτότυπων στοιχείων της διατριβής καθώς και τις εργασίες που έχουν δημοσιευθεί ή είναι προς δημοσίευση σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά και συνέδρια στο πλαίσιο της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

Σο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο στο οποίο στηρίχθηκε η παρούσα διατριβή. Παρουσιάζεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση των ποταμών διαλείπουσας ροής, της οδηγίας Πλαίσιο για τα νερά 2000/60/EK. Τέλος περιγράφονται αναλυτικά τα είδη μοντέλων (επιφανειακών, υπογείων, διάβρωσης) και περιγράφονται αναλυτικά τα κύρια χαρακτηριστικά (θεωρητικό υπόβαθρο, εφαρμογές, πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα κ.α) των δύο μοντέλων (SWAT και PTC) που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση των διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στη λεκάνη απορροής και αφορούν τόσο στα επιφανειακά όσο και στα υπόγεια ύδατα.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η αναλυτική περιγραφή της περιοχής μελέτης όπου και αναπτύσσονται τα γεωλογικά, υδρολογικά, υδρογεωλογικά και μορφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης του ποταμού Ευρώτα. Στο ίδιο κεφάλαιο περιγράφεται το σύστημα συλλογής δεδομένων που υπήρχε ή αναπτύχθηκε για την παρακολούθηση τόσο των επιφανειακών, όσο και των υπόγειων υδάτων καθώς και οι μέθοδοι και τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν τόσο για την επί τόπου παρακολούθηση των χαρακτηριστικών των υδάτων όσο και για τη διεξαγωγή των απαραίτητων αναλύσεων στο εργαστήριο.

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφεται η προσομοίωση του υδρολογικού καθεστώτος και της μεταφοράς ιζημάτων. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται επίσης τα αποτελέσματα της εφαρμογής του μοντέλου SWAT στη λεκάνη του ποταμού Ευρώτα. Συγκεκριμένα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης και της επαλήθευσης του μοντέλου.

Στο πέμπτο κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την ανάπτυξη και συνδυασμό των δύο μοντέλων καθώς και τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης και της επαλήθευσης τους. Επίσης παρουσιάζεται η απόκριση των επιφανειακών και υπόγειων υδατικών πόρων και των υδρολογικών παραμέτρων (δείκτες ξηρασίας) της περιοχής μελέτης με την χρήση σεναρίων κλιματικής αλλαγής έως το 2060.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα διδακτορική διατριβή και οι προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

1.4 Δημοσιεύσεις

Στην συνέχεια αναφέρονται οι εργασίες που έχουν δημοσιευθεί ή έχουν υποβληθεί προς δημοσίευση σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά και συνέδρια στο πλαίσιο της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

Δημοσιεύσεις σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά

- **Gamvroudis, C.**, Dokou, Z., Nikolaidis, N.P., Karatzas, G.P., 2016. Impacts of surface and groundwater variability response to future climate change scenarios in a large Mediterranean watershed. *Environmental Earth Sciences Journal*. (In Review).
- **Gamvroudis, C.**, Nikolaidis, N.P., Tzoraki, O., Papadoulakis, V., and Karalemas, N., 2014. Water and sediment transport modeling of a large temporary river basin in Greece. *Science of the Total Environment*, Volume 508, Pages 354–365.
- **Gamvroudis, C.**, Karalemas, N., Papadoulakis, V., Tzoraki, O. and Nikolaidis, N.P., 2011. Hydrograph analysis of Inountas River Basin (Lakonia, Greece). In: *Advances in the Research of Aquatic Environment*, Eds: Lambrakis, N., Stournaras, G., Katsanou, K., Springer Berlin Heidelberg, pp. 171-178.
- Tzoraki, O., Cooper, D., Kjeldsen, T., Nikolaidis, N. P., **Gamvroudis, C.**, Froebrich, J., Querner, E., Gallart, F. and Karalemas, N., 2013. Flood generation and classification of a semi-arid intermittent flow watershed. Evrotas river. *International Journal of River Basin Management*, 11 (1), pp. 77-92.
- Ourania Tzoraki , David Cooper , Thomas Kjeldsen , Nikolaos P. Nikolaidis , **Christos Gamvroudis** ,Jochen Froebrich , Erik Querner , Francesc Gallart & Nikolaos Karalemas (2013): Flood generation and classification of a semi-arid intermittent flow watershed: Evrotas river, *International Journal of River Basin Management*, 11:1, 77-92.
- Tzoraki, O., Papadoulakis, V., Christodoulou, A., Vozinaki, E., Karalemas, N., **Gamvroudis, C.**, and Nikolaidis, N.P., 2011. Hydrologic modelling of a complex hydrogeologic basin: Evrotas River Basin, In: *Advances in the Research of Aquatic Environment*, Eds: Lambrakis, N., Stournaras, G., Katsanou, K., Springer Berlin Heidelberg, pp. 179-186.

Δημοσιεύσεις σε επιστημονικά συνέδρια

- **Gamvroudis, C.**, Nikolaidis, N.P., Karatzas, G.P., Dokou, Z., 2016. Simulating the spatio-temporal distribution of groundwater levels under climate change scenarios using an integrated surface-ground water model. 2nd EWaS International Conference, 1- 4 June, 2016 - Chania, Crete, Greece
- **Γαμβρουδης X**, Νικολαΐδης Ν, Τζοράκη Ο., 2015. Επίδραση της κλιματικής αλλαγής στην υδρολογική δίαιτα ποταμών διαλείπουσας ροής, η περίπτωση του ποταμού Ευρώτα, 2015. 8ο Πανελλήνιο Συνεδρίο Περιβαλλοντικής Πολιτικής & Διαχείρισης, 5-7 Ιουνίου 2015, Μυτιλήνη, Λέσβος.
- **Γαμβρουδης X**, Νικολαΐδης Ν, Τζοράκη Ο., 2014. Μοντελοποίηση της υδρολογίας και της μεταφοράς ιζημάτων σε λεκάνες απορροής ποταμών διαλείπουσας ροής στη Μεσόγειο μέσω του υδρολογικού μοντέλου SWAT. Πανελλήνιο Συνέδριο «Η χρήση των νέων τεχνολογιών στην πρόληψη και τη διαχείριση φυσικών καταστροφών - Ο ρόλος της Πολιτικής Προστασίας». Ρόδος, 24 Οκτωβρίου 2014.
- **C. Gamvroudis**, N. P. Nikolaidis , N. Karalemas, V. Papadoulakis, O. Tzoraki, 2012. Hydrologic and sediment transport in complex Mediterranean catchment. 21st Century Watershed Technology Conference and Workshop. Improving Water Quality and the Environment Bari, Italy May 27th- June 1st, 2012.
- **C. Gamvroudis**, N. Karalemas, V. Papadoulakis, O. Tzoraki, N. P. Nikolaidis, 2011. Hydrograph analysis of Inountas River Basin (Lakonia, Greece), 2011. 9th International Hydrogeological Congress of Greece, Kalavryta, 5-8 October 2011.
- **Γαμβρούδης X.**, 2011. Ολοκληρωμένο πλαίσιο μοντελοποίησης υδρολογίας, ποιότητας νερών και στερεοπαροχής σε λεκάνες απορροής ποταμών διαλείπουσας ροής. 3η Συνάντηση Υποψηφίων Διδακτόρων του δικτύου Υδρομέδων, Αθήνα 11-12 Ιουλίου 2011.

2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 Η κλιματική αλλαγή και οι συνέπειες της στην Μεσόγειο

Μολονότι η Ευρώπη θεωρείται ότι ως επί το πλείστον διαθέτει επαρκείς υδάτινους πόρους, παρατηρούνται όλο και συχνότερα φαινόμενα λειψυδρίας και ξηρασίας. Κατά την προηγούμενη τριακονταετία σημειώθηκε ουσιαστική αύξηση των ξηρασιών ως προς τον αριθμό και την ένταση στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Το 2003, μία από τις πλέον εκτεταμένες ξηρασίες έπληξε πάνω από 100 εκατ. ανθρώπους και σχεδόν το ένα τρίτο της έκτασης της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Beretez et al., 2006).

Βασική αιτία εκδήλωσης μιας ξηρασίας καθώς και των υπολοίπων ακραίων καιρικών και κλιματικών φαινομένων είναι η φυσική διακύμανση του κλίματος ενός τόπου. Η διακύμανση του κλίματος ενός τόπου οφείλεται στη μείωση ή αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας (θερμότητας) που δέχεται κάθε τόπος στον πλανήτη σε διάφορες εποχές. Η αυξομείωση της θερμότητας με τη σειρά της επιφέρει αλλαγές στις κατευθύνσεις των αερίων μαζών διαταράσσοντας τον καιρό και το κλίμα.

Οι εισηγήσεις της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC, 2014) δείχνουν ότι η ανοδική τάση της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας θα συνεχιστεί στις περισσότερες περιοχές του πλανήτη και κατά τον 21^ο αιώνα. Ειδικότερα, βάσει του μέσου όρου ενός συνόλου κλιματικών προσομοιώσεων, η μέση θερμοκρασία της ατμόσφαιρας αναμένεται να αυξηθεί, ανάλογα με την εξέλιξη των συγκεντρώσεων των αερίων του θερμοκηπίου κατά 1.8-4°C κατά τον τρέχοντα αιώνα. Η άνοδος της θερμοκρασίας εκτιμάται ότι θα είναι σημαντικότερη στα μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη και εντονότερη στις ηπειρωτικές περιοχές σε σύγκριση με τους ωκεανούς. Η θέρμανση του πλανήτη θα έχει ως συνέπεια τη μείωση των θαλάσσιων και των χερσαίων εκτάσεων που καλύπτονται από πάγο, καθώς και την αύξηση της μέσης στάθμης της θάλασσας. Η αύξηση των ατμοσφαιρικών συγκεντρώσεων σε αέρια του θερμοκηπίου και αεροζόλ καθώς και οι αλλαγές στις χρήσεις γης λόγω της αποψίλωσης των δασών και της αστικοποίησης, έχουν και θα συνεχίσουν να έχουν αντίκτυπο στο κλίμα της γης, επηρεάζοντας ως εκ τούτου και τον υδρολογικό κύκλο αρχικά σε τοπικό και εν συνεχεία σε παγκόσμιο επίπεδο.

Η Νότια Ευρώπη, καθώς και η ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου, έχουν αναγνωριστεί ως ευάλωτες περιοχές σε ότι αφορά στις επιπτώσεις της ανθρωπογενούς συνιστώσας της κλιματικής αλλαγής (Hulme et al., 1999; Giorgi, 2006; IPCC, 2014). Πιο συγκεκριμένα, όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα μιας σειράς κλιματικών προσομοιώσεων που διεξήχθησαν υπό διάφορα σενάρια εκπομπών για την περιοχή της Μεσογείου, προβλέπεται ότι μέχρι τα τέλη του 21ου αιώνα η θερμοκρασία θα σημειώσει σημαντική άνοδο, ενώ παράλληλα το ύψος του νετού που αναμένεται στην

περιοχή θα μειωθεί (Gibelin and Déqué, 2003; Pal et al., 2004; Giorgi and Bi, 2005; Giorgi and Lionello, 2008; Zanis et al. 2009; Καψωμενάκης, 2009; Δουβής, 2009).

Μελέτες των Hertig and Jacobeit (2008), Zerefos et al. (2010), χρησιμοποιώντας μεθόδους στατιστικής υποκλιμάκωσης, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το ύψος του νετού θα μειωθεί σημαντικά στα ανατολικά και στα νότια τμήματα της Μεσογείου, κυρίως από τον Οκτώβριο μέχρι και το Μάιο. Άλλες εργασίες, που επικεντρώνονται στη μεταβολή των ακραίων τιμών της θερμοκρασίας και της βροχόπτωσης, έδειξαν ότι στο μέλλον, στην περιοχή της Μεσογείου, θα αυξηθούν δραστικά η ένταση των θερμών εισβολών (Diffenbaugh et al., 2007, Kuglitsch et al., 2010) και η διάρκεια των περιόδων ξηρασίας (Goubanova and Li, 2007), με συνέπεια, μεταξύ άλλων, τη σημαντική αύξηση του κινδύνου εκδήλωσης δασικών πυρκαγιών (Giannakopoulos, 2009).

2.2 Τα χαρακτηριστικά και η σημασία των ποταμών διαλείπουσας ροής ως υδατικά συστήματα

Τα επιφανειακά υδατικά συστήματα ταξινομούνται ανάλογα με το είδος τους και τα επιμέρους χαρακτηριστικά τους, με βάση συγκεκριμένους κανόνες.

Η κατηγοριοποίηση των ποταμών βάσει της ροής τους και οι αντίστοιχες επιδράσεις στις βιολογικές κοινότητες, παρουσιάζονται παρακάτω (Gallart F. et al., 2011):

- **Μόνιμης ροής (Permanent):** Δεν υπάρχει καμία επίδραση της υδρολογίας στις βιολογικές κοινότητες αφού δεν εμφανίζεται πρόβλημα έλλειψης νερού.
- **Διαλείπουσας ροής με δημιουργία λιμνίων (Intermittent-pools):** Το καθεστώς ροής του ποταμού επιτρέπει κάθε χρόνο την ανάπτυξη βιολογικών κοινοτήτων παρόμοιων με αυτών που αναπτύσσονται σε ποτάμια μόνιμης ροής την άνοιξη. Στην πορεία όμως η ροή γίνεται ασυνεχής και παραμένουν μόνο κάποια λιμνία όπου η ποιότητα των υδάτων δεν θεωρείται επαρκής για τις βιολογικές κοινότητες.
- **Διαλείπουσας ροής που ξηραίνονται (Intermittent-dry):** Τα ποτάμια ξηραίνονται εντελώς το καλοκαίρι, όμως κατά την άνοιξη υπάρχει μια κάποια ανάπτυξη των βιολογικών κοινοτήτων, παρόλο που αυτή μπορεί να διαφέρει από χρόνο σε χρόνο.
- **Επεισοδιακής-εφήμερης ροής (Episodic-ephemeral):** Η ροή και η δημιουργία λιμνίων είναι βραχύβια και περιστασιακή (που όμως δεν μπορεί να προβλεφθεί), και επομένως η εμφάνιση των περισσότερων μικροοργανισμών είναι σποραδική, ενώ κύρια προσαρμογή τους είναι η ταχεία ανάπτυξη του βιολογικού τους κύκλου.

Κύριο χαρακτηριστικό των ξηρών και ημίξηρων περιοχών όπως αυτών της Μεσογείου είναι οι ποταμοί διαλείπουσας ροής. Οι ποταμοί διαλείπουσας ροής είναι το καθοριστικό χαρακτηριστικό σε λεκάνες απορροής ξηρών ή ημίξηρων περιοχών οι οποίες αντιστοιχούν περίπου το ένα τρίτο των επιφανειών της Γης εξυπηρετώντας σημαντικό ρόλο στην προστασία και διατήρηση των υδατικών πόρων, την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από χαμηλή και ιδιαίτερα μεταβλητή ετήσια βροχόπτωση, όπου ή εξατμισοδιαπνοή υπερβαίνει την κατακρήμνιση (**Whitford, 2002**).

Τα υδατορέματα διαλείπουσας ροής έχουν τις ίδιες οικολογικές και υδρολογικές λειτουργίες όπως τα ποτάμια συνεχούς ροής παρέχοντας την κίνηση του νερού, των θρεπτικών συστατικών και των ιζημάτων κατά μήκος της λεκάνης απορροής. Τα υδατορέματα αυτά παρέχουν υδρολογική διασύνδεση μεταξύ περιοχών εντός της λεκάνης, διάχυση της ενέργειας της ροής κατά τη διάρκεια υψηλών παροχών ως αποτέλεσμα την μείωση της διάβρωσης και την βελτίωση της ποιότητας του νερού, ανταλλαγή μεταξύ επιφανειακών και υπογείων υδάτων, μεταφορά και εναπόθεση φερτών υλικών, αποθήκευση θρεπτικών συστατικών, δίοδο μεταφοράς των ενδιαιτημάτων, υποστήριξη τις παρόχθιας βλάστησης στην σταθεροποίηση των πρανών και τέλος την μεταφορά και φιλτράρισμα των υδάτων. Παρέχουν επίσης ένα ευρύ φάσμα οικολογικών λειτουργιών. Λόγω της σχετικά υψηλότερης περιεκτικότητας σε υγρασία στις ξηρές και ημίξηρες περιοχές η αφθονία και η ποικιλότητα της βλάστησης και της άγριας ζωής στις περιοχές αυτές είναι μεγαλύτερη από ό, τι στις γύρω περιοχές.

Η έκταση των ποταμών διαλείπουσας ροής στην περιοχή της Μεσογείου είναι μεγάλη, ενώ πολλοί ποταμοί ξεραίνονται κατά τη διάρκεια ξηρών χρόνων λόγω της μεγάλης απαίτησης σε ποσότητες νερού για γεωργικές, βιομηχανικές ή οικιακές ανάγκες (**Tzoraki and Nikolaidis, 2007**).

Οι ποταμοί διαλείπουσας ροής ανταποκρίνονται στην ετήσια μεταβλητότητα των βροχοπτώσεων με την παραγωγή πλημμυρικών γεγονότων υψηλής έντασης και φαινομένων διάβρωσης που είναι δύσκολο να μελετηθούν και να προβλεφθούν. Η εξέταση των επιπτώσεων από ανθρωπογενείς χρήσεις αθροιστικά είναι κρίσιμη και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στην εκτίμηση και διαχείριση των περιοχών αυτών για την διατήρηση της υγείας και της καλής ποιότητας των υδατικών πόρων (**Gallart et al., 2008; Kirkby, 2005**).

Λόγω των έντονων διακυμάνσεων των απορροών οι μελέτες σε ποταμούς διαλείπουσας ροής σε ξηρές και ημίξηρες περιοχές χαρακτηρίζονται κυρίως από την ανάλυση των πλημμυρών (**Graf, 1988**). Η εξαιρετικά μεταβλητή ροή στα υδατορέματα διαλείπουσας ροής εμφανίζεται συχνότερα ως μια πλημμύρα η οποία διαρκεί μόνο λίγα λεπτά ή ώρες (flash flood), ή διαρκεί για ημέρες ή εβδομάδες, ανάλογα με τις κλιματικές συνθήκες ή την φύση της λεκάνης απορροής. Οι πλημμύρες αυτές μπορεί να προκληθούν οποιαδήποτε στιγμή του έτους ως αποτέλεσμα μικρής διάρκειας και μεγάλης έντασης βροχόπτωσης εφόσον η λεκάνη απορροής έχει λάβει επαρκή

ποσότητα βροχής για να δημιουργήσει απορροή. Η απορροή σε ξηρές ή ημίξηρες περιοχές παρουσιάζει μοναδικά χαρακτηριστικά τόσο χωρικά όσο και χρονικά. Η μείωση της παροχής κατά μήκος των υδατορεμάτων οφείλεται σε απώλειες ύδατος ως αποτέλεσμα της διήθησης του νερού σε αλλούβιους σχηματισμούς μεγάλης υδραυλικής αγωγιμότητας. Επίσης η φύση ενός γεγονότος βροχής μπορεί να επηρεάσει την μείωση της παροχής. Όταν ένα φαινόμενο βροχόπτωσης είναι εκτεταμένο στο μεγαλύτερο μέρος μιας λεκάνης απορροής η συνεισφορά των υδατορεμάτων μπορεί να αυξήσει την παροχή στις κατάντη περιοχές ενώ οι απώλειες μπορεί να είναι μεγάλες.

Στην **Εικόνα 2.1** παρουσιάζεται ένα ασυνήθιστα μεγάλο πλημμυρικό γεγονός στην λεκάνη απορροής του ποταμού Ευρώτα.



Εικόνα 2.1. Ο ποταμός Ευρώτας στη περιοχή της Σκούρας μετά την πλημμύρα του Νοεμβρίου 2005 (Φωτογραφία από Φουντούλη Ιωάννη. Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος).

Σε αντίθεση με τα υδατορέματα συνεχούς ροής που μεταφέρουν συνεχώς ιζήματα κατά μήκος της λεκάνης απορροής στα υδατορέματα διαλείπουσας ροής η μεταφορά των ιζημάτων γίνεται ως αποτέλεσμα των χαρακτηριστικών μικρής διάρκειας και μεγάλης έντασης βροχοπτώσεων. Οι υψηλής ταχύτητας τυρβώδης απορροές περιέχουν μεγάλα φορτία ιζημάτων και παρασύρουν μεγάλες ποσότητες χονδρόκοκκων ιζημάτων μέσω του υδρογραφικού δικτύου. Τα υδατορέματα στις ξηρές και ημί-ξηρες περιοχές αποτελούνται συνήθως από βαθιά στρώματα άμμου και χαλικιών μικρής συνεκτικότητας. Τα στρώματα αυτά μπορεί να προκαλέσουν μεγάλες απώλειες ύδατος με αποτέλεσμα την μείωση τόσο του όγκου όσο και της ταχύτητας της ροής κατά μήκος του ρέματος και την επακόλουθη εναπόθεση γερτών υλικών στα κατάντη τμήματα (Whitford, 2002).

Οι καταιγίδες μικρής διάρκειας συνήθως απορροφούνται πλήρως από το υδρογραφικό δίκτυο πριν φτάσουν την έξοδο της λεκάνης. Οι απώλειες και η μείωση της παροχής προς τα κατάντη προωθεί την σταδιακή κίνηση, εναπόθεση και

αποθήκευση των ιζημάτων στα εφήμερα δίκτυα του ρέματος. Το αποτέλεσμα είναι μια παλμική-σταδιακή κίνηση των ιζημάτων τα οποία πολλές φορές δεν καταλήγουν άμεσα στην έξοδο της λεκάνης αλλά αντίθετα κινητοποιούνται ξανά κατά την διάρκεια της επόμενης μεγάλης παροχής και αναδιανέμονται μέσα στο δίκτυο καναλιών της λεκάνης απορροής. Οι μεγάλες παροχές που μπορούν να μετακινήσουν μεγάλες ποσότητες ιζημάτων είναι σχετικά σπάνιες στις ξηρές και ημίξηρες περιοχές ωστόσο, τα ιζήματα που μεταφέρθηκαν από μικρότερες και πιο συχνές ροές μπορεί να αποτελέσουν μια σημαντική ποσότητα. Οι ιλύς και οι άργιλοι που μπορεί να εναποτεθούν στα υδατορέματα, ως αποτέλεσμα της μείωσης της παροχής στα κατάντη μπορεί να είναι επωφελή για τις βιοκοινότητες (Nichols, 2006).

Τα μικρότερα σε μέγεθος κανάλια που βρίσκονται στα ανώτερα σημεία ενός υδρογραφικού δικτύου είναι σημαντικά καθώς καθορίζουν την ποσότητα των ιζημάτων που μεταφέρονται και εναποτίθενται στα κατάντη κατά τη διάρκεια καταιγίδων. Το αυξημένο φορτίο ιζημάτων προς τα κατάντη μπορεί να έχει αρνητικές συνέπειες στη βιοποικιλότητα καθώς και στη συνολική παραγωγικότητα του ρέματος. Οι αποθέσεις φερτών υλικών μπορεί να έχουν διάφορες συνέπειες. Για παράδειγμα, τα ιζήματα που αποτίθεται κατά τη διάρκεια εκδηλώσεων ροής μπορούν να ενθαρρύνουν τη βλάστηση των φυτών αλλά μπορεί επίσης να αναστέλλουν την ανάπτυξη δενδρυλλίων σε ορισμένους τύπους βλάστησης. Αυτό μπορεί να είναι ωφέλιμο σε ορισμένες περιπτώσεις αποκατάστασης των υδατορεμάτων ωστόσο, μερικά υδρόβια είδη μπορεί να επηρεαστούν αρνητικά από την υπερβολική ποσότητα ιζημάτων η οποία μπορεί να παρεμβαίνει στην αναπαραγωγή και σίτιση τους. Οι αποθέσεις φερτών υλικών μπορεί να έχουν διάφορες συνέπειες. Για παράδειγμα, τα ιζήματα που αποτίθεται κατά τη διάρκεια εκδηλώσεων ροής μπορούν να ενθαρρύνουν τη βλάστηση των φυτών αλλά μπορεί επίσης να αναστέλλουν την ανάπτυξη δενδρυλλίων σε ορισμένους τύπους βλάστησης. Αυτό μπορεί να είναι ωφέλιμο σε ορισμένες περιπτώσεις αποκατάστασης των υδατορεμάτων ωστόσο, μερικά υδρόβια είδη μπορεί να επηρεαστούν αρνητικά από την υπερβολική ποσότητα ιζημάτων η οποία μπορεί να παρεμβαίνει στην αναπαραγωγή και σίτιση τους (Meyer and Wallace, 2001).

2.2.1 Σύνδεση των ποταμών διαλείπουσας ροής με την οικολογία

Τα υδατορέματα διαλείπουσας ροής υποφέρουν από τις επαναλαμβανόμενες διακοπές της ροής ή την πλήρη ξήρανση της κοίτης τους. Η διακοπή των υδρόβιων συνθηκών σε αυτά τα υδατορέματα παίζει καθοριστικό ρόλο στις οικολογικές κοινότητες (Gallart et al., 2012). Με την οδηγία πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τα ύδατα, η κατάσταση της υδρόβιας ζωής των υδατορεμάτων είναι το κύριο κριτήριο για τον προσδιορισμό της οικολογικής ποιότητας των υδάτων. Αλλά στα υδατορέματα διαλείπουσας ροής λόγω της επίδρασης ξηρών περιόδων το νερό μπορεί να μην είναι πάντα παρόν την ημερομηνία δειγματοληψίας ή οι βιολογικές κοινότητες που θα

βρεθούν να είναι σημαντικά φτωχότερες από ό,τι οι κοινότητες αναφοράς που ζουν σε υδατορέματα μόνιμης ροής. Συνεπώς είναι απαραίτητος ένας καταλληλότερος χαρακτηρισμός του καθεστώτος των υδατορέματων ο οποίος θα περιλαμβάνει υπόψη του και τους υδρολογικούς περιορισμούς στην ανάπτυξη της υδρόβιας ζωής. Ο χαρακτηρισμός των καθεστώτων ροής γίνεται συνήθως από την άποψη των μετρήσεων απορροής.

Στα υδατορέματα διαλείπουσας ροής τα κλασικά πέντε στατιστικά στοιχεία των μετρήσεων ροής (μέγεθος, συχνότητα, χρόνος, διάρκεια και ρυθμός μεταβολής) πρέπει να αντικατασταθούν από στατιστικά στοιχεία της συχνότητας των ενδαιτημάτων για τον χαρακτηρισμό των συστημάτων τους.

Σύμφωνα με τους **Gallart et al., 2012** ο χαρακτηρισμός των υδάτινων οικοτόπων μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε 6 κατηγορίες (**Εικόνα 5.18**):

1. **Floods:** σημαντική κίνηση στην αλλουβιακή κοίτη του ποταμού και μετατόπιση της υδρόβιας πανίδας στην περιοχή εμβέλειας.
2. **Riffles:** Υπάρχει συνδεσιμότητα όλων των διαθέσιμων ενδαιτημάτων στην περιοχή εμβέλειας. Χαρακτηριστικό στις μόνιμες ροές.
3. **Connected:** Τα υδάτινα ενδαιτήματα περιορίζονται σε υδατολίμνες (Pools) που συνδέονται με ρυάκια νερού χωρίς την εμφάνιση ρηχών υφάλων (Riffles).
4. **Pools:** Τα υδάτινα ενδαιτήματα περιορίζονται σε υδατολίμνες χωρίς επιφανειακή ροή και σύνδεσής τους.
5. **Dry:** Δεν υπάρχει επιφανειακό νερό, αλλά το αλλουβιακό περιεχόμενο σε νερό είναι υψηλότερο από την ικανότητα του εδάφους, επιτρέποντας υποροϊκή ζωή.
6. **Arid:** Δεν υπάρχει επιφανειακό νερό, και το αλλουβιακό περιεχόμενο σε νερό είναι χαμηλότερα από την ικανότητα του εδάφους, μη επιτρέποντας υποροϊκή ζωή.

Οι μόνες πληροφορίες που διατίθενται σήμερα για τον χαρακτηρισμό των καθεστώτων ροής είναι δεδομένα παροχών είτε από μετρήσεις σε σταθμούς μέτρησης ή δεδομένα που προήλθαν από προσομοιώσεις χρησιμοποιώντας μοντέλα βροχής-απορροής.

Τα δεδομένα παροχής μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον στατιστικό υπολογισμό εμφάνισης των χαρακτηριστικών υδρόβιων οικοτόπων (Flood, riffles, connected) εάν πρώτα οριστούν οι τιμές ροής που αντιπροσωπεύουν τα κατώτατα όρια που χωρίζουν την εμφάνιση των διαφόρων υδρόβιων καταστάσεων. Η μηνιαία χρονική κλίμακα είναι η καταλληλότερη και οι μετρούμενες τιμές παροχής είναι απαραίτητες για την ανάλυση αυτή. Η μορφή της καμπύλης διάρκειας ροής (Flow Duration Curve) βοήθεια στο έργο αυτό. Η υδάτινη κατάσταση της μηδενικής παροχής εξαρτάται από το σχεδιασμό του σταθμού μέτρησης και τα χαρακτηριστικά της κοίτης.

2.2 Μοντέλα Προσομοίωσης

Η κατανόηση και εκτίμηση των φυσικών και τεχνητών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα σε μια λεκάνη απορροής ποταμού αποτελεί πρόβλημα και πρόκληση για τους ερευνητές. Η ραγδαία ανάπτυξη των υπολογιστικών συστημάτων τα τελευταία χρόνια κατέστησε δυνατή τη σχεδίαση και δημιουργία δεκάδων μοντέλων τα οποία παρέχουν τη δυνατότητα γρήγορης, ακριβούς και ευέλικτης αναπαράστασης και μελέτης ενός συστήματος. Τα μοντέλα αποτελούν σήμερα ένα εργαλείο διαχείρισης φυσικών και τεχνητών συστημάτων, πρόγνωσης της συμπεριφοράς τους και πρόληψης τυχόν επικίνδυνων καταστάσεων.

Μοντέλο είναι η αναπαράσταση ενός συστήματος με σκοπό τη διερεύνηση και την κατανόηση της λειτουργίας και της τρέχουσας συμπεριφοράς του, τη σύγκριση εναλλακτικών σχημάτων λειτουργίας και την εκτίμηση και την πρόβλεψη της μελλοντικής συμπεριφοράς του κάτω από διαφορετικές συνθήκες. Η επιλογή του μοντέλου εξαρτάται από παράγοντες όπως ο σκοπός της μελέτης, η εμπειρία του μελετητή ή το εύρος και μέγεθος των διαθέσιμων δεδομένων. Ένα από τα προβλήματα των επιστημόνων και ερευνητών είναι η έλλειψη επαρκών και ποιοτικών πραγματικών δεδομένων. Το πρόβλημα αυτό λύνεται με την σύνθεση δεδομένων μέσω προσομοίωσης δηλαδή την παραγωγή τεχνητών δεδομένων ίδιων χαρακτηριστικών με τα πραγματικά που χρησιμοποιήθηκαν σαν αφετηρία.

Τα στάδια δημιουργίας ενός μοντέλου χωρίζονται σε **(Schnoor, 1997)**:

- Επιλογή τρόπου προσομοίωσης (Conceptualization)
- Κωδικοποίηση – Δημιουργία μοντέλου
- Βαθμονόμηση Μοντέλου (Model Calibration)
- Επαλήθευση Μοντέλου (Verification)
- Αξιοπιστία Μοντέλου (Validation)
- Σύγκριση προβλέψεων με δεδομένα στο μέλλον
- Ανάλυση ευαισθησίας (Sensitivity Analysis)
- Ανάλυση αβεβαιότητας (Uncertainty Analysis)

2.2.1 Υδρολογικά μοντέλα

Τα αποθέματα νερού όλο και περισσότερο απειλούνται από ανθρωπογενής ή μη δραστηριότητες οδηγώντας σε μείωση της ποιότητας των αποθεμάτων αυτών λόγω μόλυνσης από χημικές ουσίες σημειακών και μη πηγών καθώς και μεταφορά ιζημάτων από χερσαίες ή ποτάμιες διεργασίες διάβρωσης **(Borah and Bera 2003)**.

Για τον εντοπισμό, αντιμετώπιση και διαχείριση των προβλημάτων αυτών έχουν αναπτυχθεί πολλά υδρολογικά μοντέλα. Τα μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό των ρυπαντικών φορτίων που μπορεί να εισρέουν μέσα σε μια λεκάνη απορροής ή για την πρόβλεψη της απόκρισης ενός συστήματος κάτω από διάφορα σενάρια όπως η υπεράντληση, η αλλαγή των χρήσεων γης, η αλλαγή των κλιματικών χαρακτηριστικών μιας περιοχής κ.α.

Τα υδρολογικά μοντέλα είναι γενικά μαθηματικά μοντέλα ικανά να προσομοιώνουν της υδρολογικές διεργασίες στο εδαφικό τμήμα του υδρολογικού κύκλου. Τα μοντέλα αυτά προσπαθούν να παραστήσουν φυσικές διεργασίες (π.χ. βροχόπτωση, εξάτμιση, διήθηση, επιφανειακή απορροή) μέσω διακριτών, αναλυτικών και αλγεβρικών μαθηματικών εκφράσεων (**Borah and Bera 2003; Migliaccio and Srivastava 2007**).

Ο Υδρολογικός κύκλος αναπαριστάται φυσικά μέσω της αρχής διατήρησης της μάζας.

Όπως περιγράφηκε από τον **Dingman (2002)**, το υδατικό ισοζύγιο για μια λεκάνη απορροής μπορεί να εκφραστεί ως :

$$P + G_{in} - (Q + ET + G_{out}) = \Delta S \quad (2.1)$$

Όπου,

P : Κατακρήμνιση (βροχόπτωση, χιόνι)

G_{in} : Εισροή υπογείων υδάτων

Q : Απορροή

ET: Εξατμισοδιαπνοή (Εξάτμιση και διαπνοή των φυτών)

G_{out} : Εκροή υπογείων υδάτων

ΔS : Η μεταβολή της αποθηκευτικότητας του νερού στην λεκάνη απορροής

Εκτός από την προσομοίωση της κίνησης του νερού μέσω του υδρολογικού κύκλου, μια σημαντική συνιστώσα των υδρολογικών μοντέλων είναι η χρησιμοποίηση μαθηματικών εξισώσεων προσομοίωσης και ποσοτικοποίησης διαδικασιών που είναι απαραίτητες για την ποιότητα του νερού, όπως η διάβρωση, η μεταφορά ιζημάτων, μεταφορά θρεπτικών συστατικών και η μεταφορά φυτοφαρμάκων (**Borah και Bera 2003**).

Τα υδρολογικά μοντέλα είναι συνήθως σχεδιασμένα να λειτουργούν σε μια συγκεκριμένη χωρική και χρονική κλίμακα (**Merritt et al. 2003**). Τα δεδομένα που απαιτούνται γενικά σε μοντέλα λεκάνης απορροής περιλαμβάνουν μετεωρολογικά, τοπογραφικά και εδαφολογικά δεδομένα καθώς και δεδομένα χρήσεων γης (**Engel et al.**

2007) ενώ τα αποτελέσματα παρέχουν εκτιμήσεις της ποσότητας και ποιότητας των υδατικών πόρων και της στερεοπαροχής στην έξοδο της λεκάνης απορροής.

Οι εκτιμήσεις των υδρολογικών μοντέλων έχουν αποδειχθεί αρκετά χρήσιμες στην διαχείριση των υδατικών πόρων όπως η πρόβλεψη των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής ή της αλλαγής των χρήσεων γης, η αξιολόγηση των βέλτιστων πρακτικών διαχείρισης για την προστασία της ποιότητας των υδατικών πόρων, η πρόβλεψη των απωλειών θρεπτικών συστατικών του εδάφους (π.χ. του φωσφόρου) στον γεωργικό τομέα (**White and Hammond 2009**) ή την εκτίμηση βακτηριακών ρύπων (π.χ. *Escherichia coli*) σε παράκτιες εκβολές (**Bougeard et al. 2011**).

Ένα βασικό στοιχείο εφαρμογής των υδρολογικών μοντέλων είναι η ικανότητά τους να επεκταθούν από μελέτες σε τοπικό επίπεδο σε μεγαλύτερες κλίμακες ωστόσο ο τρόπος εφαρμογής τους μπορεί να μην ισχύει πάντα σε άλλες περιοχές. Αυτή η έλλειψη δυνατότητας εφαρμογής οφείλεται συνήθως στην μεταβλητότητα των χαρακτηριστικών του εδάφους, της βλάστησης, του κλίματος και των πρακτικών διαχείρισης κατά μήκος του εδάφους. Το υδρολογικό μοντέλο που τυγχάνει σήμερα την μεγαλύτερη αποδοχή κάτι που αποδεικνύεται και από τα διεθνή συνέδρια και το πλήθος δημοσιεύσεων σε επιστημονικά περιοδικά είναι το μοντέλο SWAT (Soil and Water Assessment Tool). Οι δημοσιεύσεις αφορούν πλήθος επιστημονικών πεδίων όπως η ανάλυση ευαισθησίας και ρύθμιση του μοντέλου σε λεκάνες απορροής, η εκτίμηση του ρυπαντικού φορτίου ποταμών, η διερεύνηση των επιδράσεων της κλιματικής αλλαγής και εναλλακτικών αγροτικών χρήσεων στην ποσότητα και ποιότητα του νερού κ.α.

Οι **White et al. (2009)** ανέπτυξαν ένα απλοποιημένο εργαλείο διαχείρισης με βάση το μοντέλο SWAT για τον συνδυασμό διαχείρισης σε μικρή κλίμακα της ποσοτικής απώλειας φωσφόρου με την εκτίμηση της ποιότητας του φωσφόρου σε επίπεδο λεκάνης απορροής. Πρόσφατα οι **Malago et al., 2016** ανέπτυξαν μια μεθοδολογία χρησιμοποίησης του μοντέλου KSWAT για την ποσοτική εκτίμηση ισοζυγίου μάζας καρστικών σχηματισμών στην Κρήτη προκειμένου να εκτιμηθεί η το υδατικό ισοζύγιο της περιοχής.

Τα υδρολογικά μοντέλα μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την ανάπτυξη των ολικών μέγιστων ημερήσιων φορτίων (TMDL) για υδατικά συστήματα (**Radcliffe et al. 2009; O'Neill et al. 2006**). Τα TMDL είναι υπολογισμοί του μέγιστου ποσού ενός ρύπου που ένα υδάτινο σώμα μπορεί να λάβει ενώ πληρεί τα καθιερωμένα πρότυπα ποιότητας του νερού.

Ένα άλλο μοντέλο λεκάνης απορροής είναι το HSPF (Hydrological Simulation Program – Fortran), το οποίο αναπτύχθηκε από την EPA (**Bicknell et al., 1997**). Υπάρχουν εκατοντάδες εργασίες αναφορικά με τη χρήση του μοντέλου HSPF, από προσομοίωση θρεπτικών του νερού σε χρονική βάση επεισοδίου (**Ribarova et al., 2008**) έως την συνεχή προσομοίωση της απόκρισης λεκάνης απορροής με εκτίμηση φερτών υλών και θρεπτικών (**Hunter and Walton, 2008**), αλλά και πολλών βιολογικών παραμέτρων του ποταμού (**Tzoraki and Nikolaidis, 2007**). Οι **Kourgialas et al. (2010)**

βαθμονόμησαν επιτυχώς το μοντέλο HSPF σε μία μικρή λεκάνη της Δυτικής Κρήτης, και μάλιστα το συνδύασαν με μοντέλα καρστικής υδρολογίας και τήξης του χιονιού για την αύξηση της ακρίβειας των εκτιμήσεων.

Το μοντέλο MIKE SHE έχει τη δυνατότητα να προσομοιώνει το σύνολο της ροής των υδατορεμάτων που περιλαμβάνει την άμεση ροή και τη βασική ροή (DHI, 2004).

Το μοντέλο TOPMODEL (Beven, 1997) έχει αναπτυχθεί για τη μοντελοποίηση λεκανών απορροής λαμβάνοντας υπόψη τα γεωγραφικά, γεωλογικά και εδαφολογικά χαρακτηριστικά τους.

Το μοντέλο AnnAGNPS (Annualized Agricultural Non-Point Source Pollution Model), είναι ένα συνεχές μοντέλο λεκάνης απορροής που αποτελεί τη μετεξέλιξη του μεμονωμένου υδρολογικού γεγονότος μοντέλου AGNPS (Young et al., 1995; Cronshey and Theurer, 1998). Αναπτύχθηκε σε συνεργασία της Υπηρεσίας Διατήρησης των Φυσικών Πόρων (NRCS) και της Υπηρεσίας Αγροτικής Έρευνας (ARS) των ΗΠΑ. Η προσομοίωση των διαδικασιών της επιφανειακής απορροής και της διάβρωσης γίνεται με χρήση της μεθόδου των αριθμών καμπύλης κατά SCS (Soil Conservation Service) και της αναθεωρημένης εξίσωσης εδαφικής απώλειας (Revised Universal Soil Loss Equation) αντίστοιχα.

2.2.2 Μοντέλα Διάβρωσης

Οι έρευνες σε χώρες της Μεσογείου σχετικά με την διάβρωση των εδαφών υπέστησαν μια σημαντική ώθηση κατά την τελευταία δεκαετία με την χρησιμοποίηση μεγάλου αριθμού εμπειρικών, εννοιολογικών ή φυσικών μοντέλων (κυρίως στην Ισπανία και την Ιταλία) για την καλύτερη κατανόηση των διεργασιών διάβρωσης και μεταφοράς ιζημάτων. Στις περισσότερες από αυτές τις έρευνες, η ποσοτικοποίηση των φορτίων υπολογίζεται είτε χρησιμοποιώντας στατιστικές τεχνικές χρησιμοποιώντας μετρήσεις πεδίου είτε με τη δημιουργία συνδυαστικών γραφημάτων (Vericat and Batalla, 2010; Rovira and Batalla, 2006; López-Tarazón et al., 2009; Rodríguez-Blanco et al., 2010; Martín-Vide et al., 1999; López-Bermúdez et al., 1998; Nunes et al., 2011).

Η μοντελοποίηση της διάβρωσης βασίζεται στην κατανόηση των φυσικών νόμων και διεργασιών όπως η απορροή και η διάταξη του εδάφους στο φυσικό περιβάλλον. Η μοντελοποίηση μετατρέπει αυτά τα στοιχεία σε μαθηματικές σχέσεις, περιγράφοντας τις θεμελιώδεις διαδικασίες διάβρωσης, μεταφοράς και εναπόθεσης (Jetten et al., 2003).

Σε γενικές γραμμές τα μοντέλα διάβρωσης εμπίπτουν σε τρεις κύριες κατηγορίες, ανάλογα με τις φυσικές διεργασίες προσομοίωσης, τους αλγόριθμους που περιγράφουν αυτές τις διεργασίες και την απαίτηση των δεδομένων του μοντέλου. Οι τρεις κατηγορίες είναι τα εμπειρικά, εννοιολογικά και φυσικά μοντέλα.

Εμπειρικά μοντέλα Διάβρωσης

Τα εμπειρικά μοντέλα είναι συνήθως τα πιο απλά από τους τρεις τύπους μοντέλων. Βασίζονται κυρίως στην ανάλυση πειραμάτων πεδίου και τη δημιουργία χαρτών και γραφημάτων και εκτίμηση χαρακτηριστικών της διάβρωσης. Η απαίτηση σε δεδομένα είναι συνήθως λιγότερη από ό, τι για τα εννοιολογικά και φυσικά μοντέλα (**Li et al., 2009**).

Τα μοντέλα αυτά έχουν συνήθως υψηλή χωρική και χρονική κατανομή και βασίζονται στην ανάλυση των διαδικασιών διάβρωσης χρησιμοποιώντας στατιστικές τεχνικές. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμα ως το πρώτο βήμα για τον προσδιορισμό της προέλευσης των ιζημάτων. Ωστόσο, τα εμπειρικά μοντέλα συχνά έχουν επικριθεί για την εφαρμογή μη ρεαλιστικών υποθέσεων για τη φύση της λεκάνης απορροής, για την αγνόηση της ετερογένειας των εισροών και των χαρακτηριστικών της λεκάνης, όπως οι βροχοπτώσεις και οι τύποι εδάφους και για την αγνόηση μη γραμμικότητας σε ένα σύστημα απορροής (**Foster, 1996**). Ενώ αυτές οι επικρίσεις είναι έγκυρες, τα ανεπαρκή μετεωρολογικά δίκτυα και η χωρική ετερογένεια του εδάφους περιορίζουν τη χρήση πιο σύνθετων μοντέλων. Τα μοντέλα αυτά βασίζονται γενικά στην υπόθεση μιας αμετάβλητης κατάστασης, η οποία υποθέτει ότι οι υποκείμενες συνθήκες παραμένουν αμετάβλητες κατά τη διάρκεια της περιόδου μελέτης. Η υπόθεση αυτή περιορίζει την δυνατότητα των εμπειρικών μοντέλων για την πρόβλεψη των επιπτώσεων σε αλλαγές της λεκάνης απορροής. Επιπλέον, τα εμπειρικά μοντέλα αδυνατούν να προσομοιώσουν τις διαδικασίες βροχής-απορροής στη λεκάνη απορροής (**Kandel et al., 2004**).

Παρ' όλα αυτά, τα εμπειρικά μοντέλα χρησιμοποιούνται συχνά κατά προτίμηση από πιο πολύπλοκα μοντέλα, δεδομένου ότι μπορούν να εφαρμοστούν σε συνθήκες με περιορισμένα δεδομένα και είναι ιδιαίτερα χρήσιμα ως ένα πρώτο βήμα για τον προσδιορισμό των αιτιών και της προέλευσης των διαβρωμένων ιζημάτων.

Εννοιολογικά μοντέλα Διάβρωσης

Τοποθετούνται κάπου μεταξύ των εμπειρικών και φυσικών μοντέλα, και επιδιώκουν να εκφράσουν τις φυσικές διεργασίες που διέπουν το σύστημα περιγράφοντας τις με εμπειρικές σχέσεις. Αυτά τα μοντέλα βασίζονται συνήθως στην αναπαράσταση της λεκάνης απορροής ως μια σειρά από μικρότερες λεκάνες (**Sivapalan et al., 2002**). Συνήθως ενσωματώνουν τους μηχανισμούς μεταφοράς των ιζημάτων και παραγωγής της απορροής στη δομή τους αντιπροσωπεύοντας τις διαδρομές ροής στη λεκάνη απορροής, ως μια σειρά από αποθηκευτικούς χώρους όπου ο καθένας χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένη δυναμική συμπεριφορά (**Viney και Sivapalan, 1999**). Τα εννοιολογικά μοντέλα περιλαμβάνουν μια γενική περιγραφή των διαδικασιών απορροής, χωρίς να συμπεριλαμβάνονται συγκεκριμένα στοιχεία που

εμφανίζονται σε πολύπλοκες διεργασίες. Αυτό επιτρέπει στα μοντέλα αυτά να παρέχουν μία ένδειξη των ποιοτικών και ποσοτικών επιπτώσεων των αλλαγών της χρήσης γης, χωρίς να απαιτούν μεγάλες ποσότητες χωρικών και χρονικά καταναμημένων δεδομένων εισόδου.

Πρόσφατα αναπτυγμένα εννοιολογικά μοντέλα έχουν δώσει αποτελέσματα με ένα χωρικά καταναμημένο τρόπο. Εναλλακτικά, τα εννοιολογικά μοντέλα μπορούν να εφαρμοστούν με ένα ημι-καταναμημένο τρόπο υποδιαιρώντας τη λεκάνη απορροής σε μικρότερες υπολεκάνες που συνδέονται μεταξύ τους και στις οποίες εφαρμόζεται το μοντέλο (**Arnold and Allen, 1996; Arnold and Fohrer, 2005**). Οι τιμές των παραμέτρων στα εννοιολογικά μοντέλα συνήθως λαμβάνονται μέσω βαθμονόμησης έναντι παρατηρούμενων δεδομένων, όπως η παροχή των ρεμάτων ή οι συγκεντρώσεις των ιζημάτων (**de Jong et al., 1999**). Επειδή οι τιμές των παραμέτρων καθορίζονται μέσω βαθμονόμησης έναντι παρατηρούμενων δεδομένων, τα εννοιολογικά μοντέλα υποφέρουν από προβλήματα που σχετίζονται με τον προσδιορισμό των τιμών των παραμέτρων. Εξακολουθούν να αντικατοπτρίζουν την υπόθεση σχετικά με τις διεργασίες που διέπουν τη συμπεριφορά του συστήματος. Αυτό είναι το κύριο χαρακτηριστικό που διακρίνει τα εννοιολογικά μοντέλα σε σχέση με τα εμπειρικά μοντέλα. Τα εννοιολογικά μοντέλα δεν κάνουν υποθέσεις ως προς τις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στο πεδίο και βασίζονται σε παρατηρούμενες ή στατιστικές σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών και των παραγόμενων αποτελεσμάτων του μοντέλου.

Φυσικά μοντέλα Διάβρωσης

Τα μοντέλα αυτά βασίζονται στην κατανόηση της φύσης της διάβρωσης και των διαδικασιών μεταφοράς των ιζημάτων και περιγράφουν το σύστημα χρησιμοποιώντας εξισώσεις που διέπουν τη μεταφορά μάζας, ορμής και ενέργειας (**Doe et al., 1999; Kandel et al., 2004**). Μπορούν να εφαρμοστούν εκτός του εύρους των όρων που χρησιμοποιούνται για τη βαθμονόμηση καθώς οι παράμετροι τους έχουν φυσική σημασία και μπορούν να αξιολογηθούν από άμεσες μετρήσεις και χωρίς την ανάγκη μακροχρόνιων υδρομετεωρολογικών δεδομένων (**Smith et al., 1995**). Περιορίζονται μόνο από την καταλληλότητα των φυσικών νόμων επί των οποίων βασίζονται. Η διάβρωση υπολογίζεται χρησιμοποιώντας μια μαθηματική αναπαράσταση των βασικών υδρολογικών διεργασιών και των διεργασιών διάβρωσης. Τα φυσικά μοντέλα δεν εμφανίστηκαν μέχρι τη δεκαετία του 1970, όπου οι υπολογιστές έγιναν άμεσα διαθέσιμοι. Παραδείγματα των πρώτων φυσικών μοντέλων είναι το ANSWERS (**Beasley et al., 1980**), το CREAMS (**Knisel, 1980**), το WEPP (**Nearing et al., 1989**) και πιο πρόσφατα το SHETRAN (**Bathurst et al., 1996, 2002**) και το SWAT (**Arnold and Fohrer, 2005**). Οι εξισώσεις είναι σχεδιασμένες για χρήση συνεχών χωρικά και χρονικά δεδομένων, όμως τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται στην πράξη είναι συχνά

σημειακά δεδομένα αντιπροσωπεύοντας για παράδειγμα, μια ολόκληρη επιφάνεια στη λεκάνη. Οι **Nearing et al. (1999)** αναφέρουν ότι οι παράμετροι του μοντέλου που προκύπτουν με τον τρόπο αυτό δεν αποτελούν τίποτα περισσότερο παρά συντελεστές πέρα από κάθε φυσική σημασία.

Η χρήση μικρής κλίμακας παραμέτρων σε μικρής κλίμακας μοντέλα μπορεί να χάσει την φυσική σημασία σε μεγαλύτερες κλίμακες. Συγκεκριμένα, υπάρχει έλλειψη θεωρητικής δικαιολόγησης για να υποθεθεί ότι οι εξισώσεις ισχύουν εξίσου καλά στην κλίμακα στην οποία αντιπροσωπεύουν το σύνολο των συγκεντρωμένων ετερογενών διαδικασιών. Ομοίως, υπάρχουν λίγες πληροφορίες που αποδεικνύουν ότι πολλές από τις εξισώσεις που χρησιμοποιούνται στα μοντέλα ισχύουν πέραν της μικρής κλίμακας. Τα μοντέλα αυτά είναι σε θέση να προσομοιώσουν την πλήρη διάβρωση των ιζημάτων παρέχοντας πολλαπλά δεδομένα εξόδου σε χωρικά κατανεμημένη βάση (**Pullar and Springer, 2000**). Έχουν επίσης σημαντικές απαιτήσεις υπολογιστικής ισχύς και απαιτούν την αξιολόγηση ενός μεγάλου αριθμού παραμέτρων σε μια χωρικά κατανεμημένη βάση. Το πλεονέκτημα των φυσικών μοντέλων είναι η σχετική ευκολία προσαρμογής τους, η οποία ευνοεί την πρόβλεψη της διάβρωσης κάτω από διαφορετικά κλιματολογικά και φυσιογραφικά σενάρια και την ικανότητά τους να εξετάσουν περιβαλλοντικά ζητήματα όπως η κλιματική αλλαγή.

2.2.2.1 Παγκόσμια Εξίσωση Απώλειας Εδάφους (USLE)

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως τα μοντέλα διάβρωσης χρησιμοποιούν μαθηματικές εκφράσεις για να αντιπροσωπεύσουν τις σχέσεις μεταξύ των διαφόρων παραγόντων και διεργασιών που συμβαίνουν στο πεδίο. Αυτοί οι παράγοντες περιλαμβάνουν γενικά την τοπογραφία, μετεωρολογικές μεταβλητές, τις ιδιότητες του εδάφους, καθώς των χρήσεων γης καθώς και τα χαρακτηριστικά κάλυψης της γης.

Ένας μεγάλος αριθμός μοντέλων διάβρωσης όπως το ANSWERS (**Beasley et al., 1980; Dabral and Cohen, 2001**), το EPIC (**Sharpley and Williams, 1990**) το SWAT (**Arnold and Allen, 1996**) ή το Pesera (**Kirkby et al., 2003**) είναι βασισμένα στην εξίσωση USLE.

Άλλα μοντέλα όπως το KINEROS2 (**Smith et al., 1995**) ή το EUROSEM (**Morgan et al., 1998**) στοχεύουν σε αναπαράσταση της λεκάνης απορροής σε διάταξη επιπέδων και στοιχείων των ρεμάτων ή χρησιμοποιούνται σε μικρότερη κλίμακα όπως το CREAMS (**Knisel, 1980**). Μία εκτεταμένη περιγραφή των μοντέλων αυτών περιγράφεται από τους **Merrit et al. (2003)**.

Το USLE (**Wischmeier and Smith, 1978**) είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο εμπειρικό μοντέλο διάβρωσης. Οι **Wischmeier and Smith (1965, 1978)** πραγματοποίησαν συλλογή δεδομένων για την διάβρωση του εδάφους από 8.000 κοινότητες σε 21 Πολιτείες των Η.Π.Α και αφού ανέλυσαν και αξιολόγησαν διάφορους

παράγοντες που κυριαρχούν στη διάβρωση του εδάφους, εισήγαγαν την Παγκόσμια Εξίσωση Απώλειας Εδάφους (USLE).

Μολονότι το μοντέλο USLE αναπτύχθηκε στις ΗΠΑ, έχει χρησιμοποιηθεί σε όλο τον κόσμο (Pilesjo, 1992; Mellerowicz et al., 1994; Bartsch et al., 2002) επειδή ανταποκρίνεται καλύτερα στις ανάγκες των ερευνητών από οποιοδήποτε άλλο διαθέσιμο εργαλείο.

Η Παγκόσμια Εξίσωση Απώλειας Εδάφους (USLE) εκφράζεται ως συνάρτηση έξι παραγόντων:

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (2.2)$$

όπου,

A : Εδαφική απώλεια ανά μονάδα επιφανείας ($t \text{ ha}^{-1}$)

R : Διαβρωτική ικανότητα βροχοπτώσεων ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$)

K : Συντελεστής διαβρωσιμότητας εδάφους ($t \text{ h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$)

LS : Τοπογραφικός συντελεστής

C : Συντελεστής φυτοκάλυψης

P : Συντελεστής διαχειρίσεων των εδαφών

Το μοντέλο έχει τροποποιηθεί και προσαρμόστεί κατά τη διάρκεια των τελευταίων 35 ετών από ένα μεγάλο αριθμό ερευνητών. Το MUSLE (Williams, 1975), το RUSLE (Renard et al., 1997), το ANSWERS (Beasley et al., 1980) και το RUSLE-3D (Mitasova et al., 1996; Mitasova, 2000) βασίζονται στο μοντέλο USLE και αποτελούν τροποποιήσεις ή βελτιώσεις του. Η ιστορική εξέλιξη του USLE και των τροποποιήσεων του περιγράφονται από τους Lane et al. (1995) και Renard et al. (1997).

Το CREAMS είναι ένα μοντέλο μικρής κλίμακας που προβλέπει την απορροή, τη διάβρωση και η μεταφορά των χημικών από γεωργικές περιοχές. Το μοντέλο αναπτύχθηκε ως ένα εργαλείο για την αξιολόγηση των επιπτώσεων των διαφόρων γεωργικών πρακτικών για τους ρύπους στην επιφανειακή απορροή και στο νερό του εδάφους κάτω από το ριζικό σύστημα. Λειτουργεί σε απλές εκδηλώσεις μιας καταιγίδας ή σε συνεχή τρόπο. Η συνεχής λειτουργία μπορεί να προβλέψει μακροπρόθεσμους μέσους όρους από δύο έως 50 χρόνια. Παρόλο που το μοντέλο CREAMS χρησιμοποιεί διάφορες πτυχές της εξίσωσης USLE διαφέρει ριζικά από την USLE στο ότι χρησιμοποιεί μια φυσική προσέγγιση για τον υπολογισμό των διαφόρων συνιστωσών της διάβρωσης και της μεταφοράς των ιζημάτων. Το μοντέλο, σε αντίθεση με την USLE, αντιπροσωπεύει τη χαραδρωτή διάβρωση και εναπόθεση. Το CREAMS αντιπροσωπεύει (Knisel, 1995) μια πρώτη σημαντική τεχνολογική πρόοδο στην

έκφραση της απώλειας του εδάφους ως ένα φαινόμενο διαδικασιών συμπεριλαμβάνοντας τη διάβρωση, μεταφορά και τη εναπόθεση.

Το μοντέλο WEPP (**Nearing et al., 1989**) επρόκειτο να αντικαταστήσει τα μοντέλα που είχαν βασιστεί στην εξίσωση USLE και να επεκτείνει τις δυνατότητες πρόβλεψης της διάβρωσης σε μια ευρεία κλίμακα τοπίων και συνθηκών. Είναι ένα φυσικό μοντέλο με κατανεμημένες παραμέτρους που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε σε μεμονωμένα επεισόδια ή σε συνεχή κλίμακα υπολογίζοντας τη διάβρωση σε αυλάκια, υποθέτοντας ότι ο ρυθμός απομάκρυνσης και εναπόθεσης είναι συνάρτηση της ικανότητας μεταφοράς.

Το μοντέλο ANSWERS (**Beasley et al., 1980**) αποτέλεσε ένα από τα πρώτα λειτουργικά, πλήρως κατανεμημένα στο χώρο μοντέλα διάβρωσης και στερεοπαροχής σε λεκάνες απορροής. Το κύριο συστατικό του μοντέλου διάβρωσης-μεταφοράς είναι η εξίσωση συνέχειας των ιζημάτων των **Foster and Meyer (1977)**, ενώ η εννοιολογική βάση της κίνησης του νερού λήφθηκε από τους **Nearing et al. (1999)**. Το ANSWERS προσπάθησε να αξιολογήσει τις επιπτώσεις της χρήσης γης, των συστημάτων διαχείρισης και των γεωργικών πρακτικών με τη χρήση υδρολογικών διεργασιών.

Το μοντέλο KINEROS2 είναι ένα δυναμικό ημι-κατανεμημένο φυσικό μοντέλο (**Smith et al., 1995**) το οποίο αντιμετωπίζει μια λεκάνη απορροής ως ένα σύνολο από ευθύγραμμες επιφάνειες και κανάλια. Πρόκειται για μοντέλο μεμονωμένων επεισοδίων το οποίο χρησιμοποιεί το μοντέλο διείσδυσης Smith/Parlange και την κινηματική προσέγγισης ροής για να προσομοιώσει την επιφανειακή απορροή και τα ιζήματα (**Julien et al., 1995**).

Το μοντέλο EUROSEM (**Morgan et al., 1998**) είναι ένα φυσικό μοντέλο μεμονωμένου συμβάντος για την πρόβλεψη της διάβρωσης του εδάφους σε χωράφια και σε μικρές λεκάνες απορροής. Πρώτα προσομοιώνεται η διάβρωση σε ένα μικρό τμήμα. Στη συνέχεια, τα επιμέρους τμήματα συνδέονται για την προσομοίωση ολόκληρης της πλαγιάς. Η απώλεια του εδάφους υπολογίζεται ως παροχή ιζημάτων που ορίζονται από το ρυθμό απορροής και τη συγκέντρωση των ιζημάτων στη ροή (**de Roo et al., 1996**). Η αποσύνδεση λόγω της βροχόπτωσης που προσκρούει στο έδαφος αντιπροσωπεύει την διαβρωσιμότητα του εδάφους και προέρχεται από τη μέτρηση της συνοχής του εδάφους.

Το SHETRAN (**Zhang ET AL., 2015**) είναι ένα φυσικό χωρικά κατανεμημένο μοντέλο διάβρωσης, μέρος του υφιστάμενου Ευρωπαϊκού υδρολογικού συστήματος SHE και προορίζεται για χρήση σε επίπεδο λεκάνης απορροής. Για τις πλαγιές των λόφων το SHETRAN προσομοιώνει τη διάβρωση του εδάφους από την επίδραση της βροχόπτωσης που προσκρούει στο έδαφος και τη μεταφορά των διαβρωμένων υλικών με την επιφανειακή απορροή. Στα κανάλια, το μοντέλο προσομοιώνει την διάβρωση υλικού βάσης και την κατάντη μεταφορά του υλικού αυτού μαζί με εκείνο που προέρχεται από την επιφανειακή απορροή. Στα κανάλια κατά τη διαδικασία ροής των ιζημάτων γίνεται η παραδοχή ότι η ροή μπορεί να μεταφέρει οποιοδήποτε διαθέσιμο

φορτίο λεπτών ιζημάτων (λιγότερο από 0,062 mm σε διάμετρο), αλλά για χονδρότερα ιζήματα το φορτίο περιορίζεται από την υπολογιζόμενη ικανότητα μεταφοράς της ροής (Banis et al., 2004).

Το μοντέλο CASC2D-SED, που αναπτύχθηκε στο Colorado State University (CSU), είναι ένα φυσικό καταναμημένο μοντέλο υδρολογίας και διάβρωσης που προσομοιώνει την υδρολογική απόκριση μιας λεκάνης σε ένα επεισόδιο καταιγίδας (Julien and Saghafian, 1991; Julien et al., 1995; Johnson et al., 2000). Οι βροχοπτώσεις μεταβάλλονται στο χώρο και το χρόνο. Το CASC2D-SED μπορεί να προσομοιώσει την παραγωγή ιζημάτων και εναπόθεση ως ένα κλάσμα μεγέθους σε οποιοδήποτε σημείο της λεκάνης απορροής. Το ίζημα μεταφέρεται από το ένα κελί στο άλλο χρησιμοποιώντας το 2D σύστημα διάχυσης της επιφανειακής απορροής. Πλήρης περιγραφή του μοντέλου CASC2D-SED περιγράφεται από τον Rojas (2002).

Οι Viney and Sivapalan (1999) ενσωμάτωσαν μια επίνοια του USLE για να προβλέψουν την παραγωγή φερτών υλικών στο μεγάλης κλίμακας μοντέλο λεκάνης απορροής LASCAM. Η μεταφορά φερτών υλικών περιλαμβάνει τις διαδικασίες της εναπόθεσης, της εκ νέου παράσυρσης και υποβάθμισης του καναλιού, τα οποία υποτίθεται ότι διέπονται από την ικανότητα μεταφοράς ιζήματος στο ρεύμα.

Το μοντέλο μεταφοράς ιζημάτων αντιλαμβάνεται τις διαδικασίες των υφιστάμενων φυσικών μοντέλων, καθιστώντας την περιγραφή της διαδικασίας όσο το δυνατόν απλούστερη, διατηρώντας την ικανότητα του μοντέλου να προσομοιώσει τα αποτελέσματα της χρήσης γης και της αλλαγή του κλίματος (Viney and Sivapalan, 2001). Το μοντέλο περιλαμβάνει έξι παραμέτρους οι οποίες απαιτούν βαθμονόμηση σε σχέση με παρατηρούμενα δεδομένα φορτίων ιζημάτων σε μία ή περισσότερες περιοχές της λεκάνης απορροής.

Το μοντέλο EROSION-3D (Schmidt et al., 1999) είναι ένα φυσικό μοντέλο καταιγίδας για μικρές λεκάνες απορροής. Η φυσική προσέγγιση του μοντέλου διάβρωσης βασίζεται στον υπολογισμό της αποκόλλησης των σωματιδίων χώματος από την επιφάνεια του εδάφους εξαρτώμενη από την ορμή της επιφανειακής απορροής ή την ένταση των σταγόνων βροχόπτωσης. Συγκρίνονται με την κρίσιμη ορμή (Schmidt et al., 1999) που χαρακτηρίζει τη συγκεκριμένη διαδικασία διάβρωσης του εδάφους. Η απόσπαση του στερεού υλικού μπορεί να υπολογιστεί με τον προκύπτον αδιάστατο συντελεστή, ο οποίος χρησιμοποιείται σε μια εμπειρική εξίσωση. Βάσει των μεμονωμένων επεισοδίων βροχής, το μοντέλο υπολογίζει την αποκόλληση, εναπόθεση και διάβρωση για κάθε κελί της λεκάνης απορροής. Επιπλέον υπολογίζονται η ποσότητα της απορροής, η συγκέντρωση των ιζημάτων, καθώς και η κατανομή του μεγέθους των κόκκων (ποσοστό της αργίλου και της ιλύος).

Το μοντέλο LISEM (de Roo et al., 1996; de Roo and Jetten, 1999) είναι ένα καταναμημένο φυσικό μοντέλο υδρολογίας και διάβρωσης που αναπτύχθηκε για διαχειριστικούς σκοπούς. Το LISEM ενσωματώνει μια σειρά από διαφορετικές διεργασίες (van der Perk and Slavik, 2003) και προσομοιώνει την διάβρωση σε

λιμναίες περιοχές. Διεργασίες που περιγράφουν την αποκόλληση των ιζημάτων από τις βροχοπτώσεις ή την επιφανειακή απορροή περιλαμβάνονται επιπλέον εκτός της ικανότητας μεταφοράς της ροής.

Το SEDNET (Wilkinson et al., 2004) είναι ένα χωρικά κατανεμημένο μοντέλο διάβρωσης. Είναι μοντέλο σταθερής κατάστασης που αναπτύχθηκε για την εκτίμηση της παραγωγής φερτών υλικών και της εναπόθεσης σε αυλάκια, χαράδρες και όχθες ποταμών και σε ένα υδρογραφικό δίκτυο. Κάθε σύνδεσμος του ποταμού είναι συνδεδεμένος με μια εσωτερική λεκάνη που συνεισφέρει ίζημα. Μοντέλα διάβρωσης της όχθης καθώς και μοντέλα εναπόθεσης και μεταφοράς ιζημάτων λόγω πλημμυρών χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση μεταφοράς ιζημάτων μέσω του υδρογραφικού δικτύου (Prosser and Rustomji, 2000). Τα αιωρούμενα στερεά είναι δεδομένα εισόδου για τα προαναφερθέντα μοντέλα.

2.2.3 Μοντέλα υπογείων υδάτων

Η μελέτη της κίνησης του νερού σε υπόγειους υδροφορείς περιορίζεται από την έλλειψη δεδομένων και μετρήσεων. Τόσο οι υδραυλικές, όσο και οι φυσικές ιδιότητες των υδροφορέων, χαρακτηρίζονται από μεγάλη χωρική μεταβλητότητα η οποία στην πραγματικότητα δεν μπορεί να είναι ποτέ πλήρως γνωστή. Η ελάχιστη πληροφορία που απαιτείται για την κατασκευή του πιο στοιχειώδους μοντέλου υπογείων υδάτων είναι η γνώση του υδατικού ισοζυγίου. Αυτή η πληροφορία περιλαμβάνει την έκταση του υδροφορέα, τις φορτίσεις (αντλήσεις, κατείσδυση) και τις εκφορτίσεις όπως οι πηγές (Ρόζος, 2010).

Η ραγδαία ανάπτυξη των υδατικών πόρων τις τελευταίες δεκαετίες έχει μεγάλες επιπτώσεις στα υδρολογικά συστήματα σε κλίμακα λεκάνης απορροής. Κάποιες από τις συχνά αναφερόμενες αρνητικές επιπτώσεις είναι η εξάντληση του υδροφορέα, η μείωση της βασικής απορροής, η υποβάθμιση των ποτάμιων οικοσυστημάτων καθώς και της ποιότητας του νερού. Οι περισσότεροι υδροφορείς εκτείνονται σε μεγάλη έκταση και έτσι μπορούν να θεωρηθούν σαν υπόγειες δεξαμενές. Ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες με βάση την θέση του υδροφόρου ορίζοντα, τους ελεύθερους υδροφορείς (unconfined aquifers), όπου η ανώτερη επιφάνεια τους είναι ο υδροφόρος ορίζοντας και τους περιορισμένους ή αρτεσιανούς υδροφορείς (confined aquifers), οι οποίοι περιέχουν νερό υπό πίεση μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής και περιορίζονται (Καρατζάς, 2009).

Τα μοντέλα υπογείων υδάτων διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη και τη διαχείριση των υπογείων πόρων καθώς και στην πρόβλεψη των επιπτώσεων των μέτρων διαχείρισης. Η μοντελοποίηση των υπογείων υδάτων έχει γίνει ένα πρότυπο εργαλείο διαχείρισης χάρη στην ταχεία αύξηση της υπολογιστικής ισχύς και της ευρείας διαθεσιμότητας ηλεκτρονικών υπολογιστών και λογισμικών.

Η εφαρμογή και προσομοίωση μεγάλης κλίμακας υδροφορέα μέσω μοντέλων ροής υπογείων υδάτων ξεκίνησε το 1978 στις Η.Π.Α μέσω του προγράμματος RASA (Sun and Johnson, 1994).

Στη συνέχεια κατασκευάστηκαν αριθμητικά μοντέλα ροής υπόγειων υδάτων σε υπολογιστές για τον χαρακτηρισμό και προσομοίωση υπόγειων συστημάτων ροής.

Εκτός των Η.Π.Α και άλλες χώρες όπως η Ολλανδία (Engelen και Kloosterman, 1996) και η Κίνα (Wang et al., 2009) έχουν συμβάλει στη διεύρυνση των εννοιών και των μεθοδολογιών ανάλυσης ενός υδρολογικού συστήματος.

Σημαντική πρόοδος έχει επιτευχθεί τα τελευταία χρόνια στην ανάπτυξη 3D μοντέλων ροής των υπογείων υδάτων. Από την δημιουργία του το 1988, το μοντέλο MODFLOW έχει γίνει πρότυπο μοντελοποίησης των υπόγειων υδάτων παγκοσμίως κυρίως λόγω της ευέλικτης δομής του και της ευρείας κάλυψης πολλών υδρογεωλογικών διαδικασιών.

Το MODFLOW-88 αναβαθμίστηκε σε MODFLOW-2000 (Harbaugh et al., 2000) και στην συνέχεια σε MODFLOW-2005 (Harbaugh, 2005). Η μοντελοποίηση μεγάλων λεκανών υπογείων υδάτων έγινε πολύ εύκολη με την ταχεία ανάπτυξη και χρήση των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS). Άλλα μοντέλα υπογείων υδάτων εκτός του MODFLOW που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι το (Winston and Voss, 2003), το MT3DMS (Zheng, 2010), το SWIM (Wang et al., 1996) και το SEAWAT (Langevin and Guo, 2006).

2.2.3.1 Θεμελιώδης εξίσωση ροής μοντέλων υπογείων υδάτων

Τα μοντέλα, ανάλογα με τη χωρική τους διάταξη και τη δομή του πλέγματός τους, μπορεί να είναι δισδιάστατα επιφανειακά μοντέλα, ημι-τρισδιάστατα μοντέλα, δισδιάστατα μοντέλα προφίλ και τρισδιάστατα μοντέλα (Anderson and Woessner, 1992).

Η ροή των υπογείων υδάτων χαρακτηρίζεται από τη σχέση που προκύπτει από το μαθηματικό συνδυασμό της εξίσωσης του υδραυλικού ισοζυγίου (αρχή διατήρησης της μάζας ή εξίσωση συνέχειας) και του νόμου του Darcy.

Η βασική μορφή της εξίσωσης της υπόγειας ροής θεμελιώθηκε από τους Jacob (1944, 1950), Cooper (1966), Domenico (1972), (Λαμπράκης, 2010).

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_x \frac{\partial h}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_y \frac{\partial h}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_z \frac{\partial h}{\partial z}\right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - R^* \quad (2.3)$$

Όπου:

h , το υδραυλικό ύψος,

S , ο συντελεστής αποθηκευτικότητας,

K_x , K_y και K_z , οι συνιστώσες αυτός υδραυλικής αγωγιμότητας,

S_s , η ειδική αποθηκευτικότητα,

R^* , γενικός όρος εμπλουτισμού ή άντλησης ο οποίος είναι θετικός σε περίπτωση εμπλουτισμού και δηλώνει την εισροή στο σύστημα ανά μονάδα όγκου υδροφορέα ανά μονάδα χρόνου. Για την προσομοίωση άντλησης $R^* = -W^*$.

Για τη διατύπωση της παραπάνω εξίσωσης χρησιμοποιείται κύβος αναφοράς, πορώδους υλικού, ο οποίος είναι αρκετά μεγάλος ώστε να θεωρείται αντιπροσωπευτικός του πορώδους μέσου αλλά και αρκετά μικρός ώστε η μεταβολή του υδραυλικού ύψους μέσα σε αυτόν να είναι σχετικά μικρή. Αυτός ο κύβος είναι γνωστός ως αντιπροσωπευτικός στοιχειώδης όγκος (Representative Elementary Volume, REV).

Ο όγκος του κύβου ισούται με:

$$V = \Delta x \Delta y \Delta z \quad (2.4)$$

Η ροή διαμέσω του όγκου αναφοράς εκφράζει το ρυθμό εκφόρτισης, q . Το q είναι ένα διάνυσμα και το μέγεθός του εκφράζεται με τους όρους των τριών συνιστωσών στους τρεις άξονες q_x , q_y και q_z και για το οποίο ισχύει ότι :

$$q = q_x i_x + q_y i_y + q_z i_z \quad (2.5)$$

Όπου i_x , i_y , i_z , τα μοναδιαία διανύσματα στους άξονες x , y και z αντιστοίχως.

Η εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου ή αρχή διατήρησης της μάζας εκφράζεται γενικά:

Εκροή – Εισροή = Μεταβολή του όγκου

Θεωρώντας ότι: α) η ροή πραγματοποιείται κατά μήκος του άξονα y του όγκου αναφοράς, β) η επιφάνεια διαμέσου της οποίας λαμβάνει χώρα η ροή είναι η $\Delta x \Delta z$, γ) η εισροή ισούται με $(q_y)_{IN}$ και δ) η εκροή ισούται με $(q_y)_{OUT}$, η διαφορά του ογκομετρικού ρυθμού εκροής μείον τον ογκομετρικό ρυθμό εισροής κατά μήκος του άξονα y ισούται με:

$$[(q_y)_{OUT} - (q_y)_{IN}] \Delta x \Delta z \quad (2.6)$$

«Ολοκληρωμένο πλαίσιο μοντελοποίησης υδρολογίας, ποιότητας νερών και στερεοπαροχής σε λεκάνες απορροής ποταμών διαλείπουσας ροής»

που επίσης μπορεί να γραφτεί:

$$\frac{(q_y)_{OUT} - (q_y)_{IN}}{\Delta y} (\Delta x \Delta y \Delta z) \quad (2.7)$$

και μετατρέποντας την εξίσωση σε μερική διαφορική η αλλαγή του ρυθμού ροής κατά μήκος του άξονα y είναι :

$$\frac{\partial q_y}{\partial y} (\Delta x \Delta y \Delta z) \quad (2.8)$$

Η συνολική μεταβολή του όγκου εκφράζεται με τη σχέση :

$$\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \Delta x \Delta y \Delta z = \text{μεταβολή όγκου} \quad (2.9)$$

Αν εισάγουμε και τον όρο εμπλουτισμού ή άντλησης, R^* :

$$\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} - R^* \right) \Delta x \Delta y \Delta z = \text{μεταβολή όγκου} \quad (2.10)$$

Η μεταβολή του όγκου ισούται με την ειδική αποθηκευτικότητα S_s , η οποία ορίζεται ως ο όγκος αποθηκευμένου νερού που απελευθερώνεται ανά μονάδα αλλαγής υδραυλικού ύψους και ανά μονάδα όγκου του υδροφορέα:

$$S_s = - \frac{\Delta V}{\Delta h \Delta x \Delta y \Delta z} \quad (2.11)$$

Ο ρυθμός της μεταβολής του όγκου αναφοράς ισούται με:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = -S_s \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (2.12)$$

Το μείον προκύπτει από την παραδοχή ότι το ΔV είναι θετικό όταν το Δh είναι αρνητικό ή με άλλα λόγια, ότι το νερό απελευθερώνεται όταν το υδραυλικό ύψος μειώνεται. Από το συνδυασμό των (16) και (17) και διαιρώντας με $\Delta x \Delta y \Delta z$ έχουμε:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = -S_s \frac{\partial h}{\partial t} + R^* \quad (2.13)$$

Η παραπάνω εξίσωση αποτελεί την τελική μορφή του ισοζυγίου της μάζας του νερού. Στην πράξη όμως, γίνεται αντικατάσταση του q από το νόμο του Darcy. Ο νόμος του Darcy ισχύει για τη ροή των υπογείων υδάτων σε πορώδη μέσα επειδή το είδος αυτό της ροής χαρακτηρίζεται από μεγάλη βραδύτητα (Ρόζος, 2010):

$$q_x = -K \frac{\partial h}{\partial x} \quad (2.14)$$

Όπου:

q , ειδική παροχή,

K , αγωγιμότητα υδροφορέα,

h , πιεζομετρικό φορτίο.

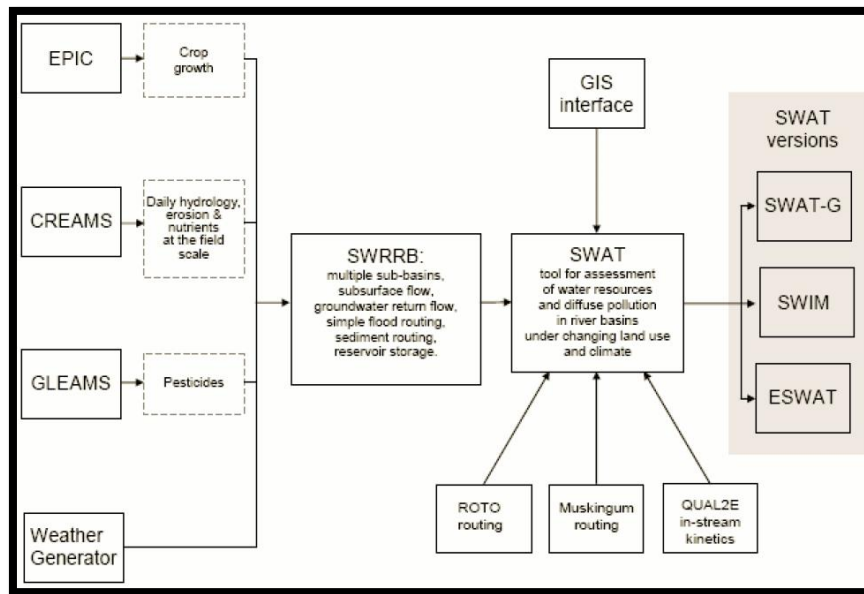
2.3 Περιγραφή μοντέλου SWAT

Το SWAT είναι ένα μακράς προσομοίωσης, ημερήσιου βήματος, ημι-κατανεμημένο υδρολογικό μοντέλο. Αναπτύχθηκε από το Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης των ΗΠΑ - Υπηρεσία Αγροτικών Έρευνών (USDA-ARS) στο Ερευνητικό Εργαστήριο στο Τέξας (Gassman et al. 2007).

Το SWAT χρησιμοποιείται ως μέρος του προγράμματος CEAP του Υπουργείου Γεωργίας των ΗΠΑ το οποίο στοχεύει στην ποσοτικοποίηση των περιβαλλοντικών οφελών των προγραμμάτων του Υπουργείου σε καλλιεργούμενες και αρδευόμενες εκτάσεις των ΗΠΑ. Το SWAT είναι σε θέση να προσομοιώνει και να ποσοτικοποιεί τις ποσότητες νερού, ιζημάτων και χημικών συστατικών σε μη ελεγχόμενες λεκάνες απορροής (Gassman et al. 2007).

Το μοντέλο SWAT, κυκλοφόρησε για πρώτη φορά στις αρχές της δεκαετίας του 1990, ενσωματώνοντας στοιχεία από διάφορα μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία 30 χρόνια, συμπεριλαμβανομένων των μοντέλων CREAMS, GLEAMS, EPIC, SWRRB, ROTO και QUAL2E (Gassman et al. 2007).

Το SWAT σχεδιάστηκε με σκοπό να αξιολογήσει τις μακροπρόθεσμες επιπτώσεις των πρακτικών διαχείρισης σε λεκάνες απορροής με μικρό αριθμό σταθμών παρακολούθησης, και να προσομοιώσει την επίδρασή τους στον υδρολογικό κύκλο, τον κύκλο των θρεπτικών συστατικών, τα ιζήματα και την παραγωγή χημικών (Neitsch et al., 2005). Τα κυριότερα στοιχεία που απαρτίζουν το μοντέλο, αφορούν τον καιρό, την υδρολογία, τη θερμοκρασία του εδάφους, την ανάπτυξη των φυτών, τα θρεπτικά συστατικά, τα φυτοφάρμακα, τη διαχείριση της γης, τα βακτηρίδια και τέλος τους παθογόνους οργανισμούς (Arnold et al., 1998; Gassman et al., 2007; Neitsch et al., 2005).



Εικόνα 2.2. Ιστορική εξέλιξη μοντέλου SWAT (Gassman et al. 2007)

Ιστορικά, το SWAT αποτελεί τη μετεξέλιξη και συγχώνευση προγενέστερων μοντέλων της Υπηρεσίας Αγροτικών Ερευνών των ΗΠΑ, όπως το CREAMS (Chemicals Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems), το GLEAMS (Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems), (Leonard et al., 1987) και του EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator), (Sharpley and Williams, 1990).

Το SWAT έχει την δυνατότητα να διαιρεί την λεκάνη απορροής σε υπο-λεκάνες οι οποίες στην συνέχεια μπορούν να υποδιαιρεθούν σε πολλαπλές υδρολογικές μονάδες απόκρισης (HRU) οι οποίες αποτελούνται από σύνολα παραμέτρων εισαγωγής οι οποίες καθορίζουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά εδάφους, διαχείρισης και χρήσεων γης (Gassman et al. 2007). Οι υδρολογικές μονάδες απόκρισης (HRU) έχουν ίδια χαρακτηριστικά χρήσεων γης, εδάφους και κλίσεων.

Ένα σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών (GIS) το ArcSWAT, είναι διαθέσιμο για την απλοποίηση της δημιουργίας των αρχείων δεδομένων εισόδου του μοντέλου καθώς και της προσομοίωσης (Di Luzio et al. 2004).

Η επιφανειακή απορροή και η διήθηση υπολογίζονται με βάση την εμπειρική Soil Conservation Service (SCS) Curve Number μέθοδο ή εναλλακτικά από την μέθοδο Green-Ampt-Mein-Larso. Η Δυνητική εξατμισοδιαπνοή (PET) υπολογίζεται από την εξίσωση Penman-Monteith ή προαιρετικά από την Priestly-Taylor ή την Hargreaves-Samani μέθοδο. Η αναδιανομή του νερού στο έδαφος προσομοιώνεται χρησιμοποιώντας την μέθοδο της εναποθήκευσης (Neitsch et al. 2005; Gassman et al. 2007).

Στη βιβλιογραφία έχουν δημοσιευθούν πάρα πολλές υδρολογικές μελέτες με το μοντέλο SWAT (**Gassman et al. 2007**). Σύμφωνα με τα κριτήρια που ορίστηκαν από τον **Moriasi et al. (2008)** οι περισσότερες από τις μελέτες που εξετάστηκαν από τον **Gassman et al. (2007)** κρίθηκαν στατιστικά ικανοποιητικές ($NSE > 0.5$) για την προσομοίωση της παροχής του νερού σε μηνιαία βάση.

Οι **Ahl et al. (2008)** σύγκριναν μη βαθμονομημένες και βαθμονομημένες προσομοιώσεις του SWAT σε 2251 ha ορεινής λεκάνης απορροής στην Μοντάνα των ΗΠΑ. Στην μελέτη χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα τεσσάρων ετών. Τα μη βαθμονομημένα αποτελέσματα ήταν ικανοποιητικά μόνο για προσομοίωση σε ετήσια βάση ενώ τα βαθμονομημένα ήταν ικανοποιητικά τόσο με ετήσια όσο και σε μηνιαία ή ημερήσια προσομοίωση. Αρνητικές τιμές του NSE ελήφθησαν μόνο κατά την αξιολόγηση της περιόδου της βασικής ροής (baseflow).

Οι **White and Chaubey (2005)** διεξήγαγαν μια μελέτη χρησιμοποιώντας το μοντέλο SWAT σε υδρολογική λεκάνη 362 km² στο Αρκάνσας των U.S.A. Μετά από προσομοίωση 2 ετών το βαθμονομημένο μοντέλο παρείχε $NSE=0.89$ ενώ κατά τη διάρκεια της διετούς περιόδου επικύρωσης της μελέτης παρείχε $NSE=0.85$.

Οι **Du et al. (2009)** πέτυχαν μια ικανοποιητική προσομοίωση κατά την βαθμονόμηση και επαλήθευση του μοντέλου SWAT στην λεκάνη απορροής Upper Oyster Creek (276 km²) στο Τέξας των ΗΠΑ χρησιμοποιώντας περιορισμένο αριθμό παρατηρούμενων δεδομένων. Τα δεδομένα τους αποτελούνταν από ασυνεχείς, στιγμιαίες μετρήσεις της ροής σε πέντε κύρια υδατορέματα που συλλέγονταν κατά τη διάρκεια 24μηνιαίας περιόδου. Οι **Du et al. (2009)** επισήμαναν το πρόβλημα ότι πολλές λεκάνες απορροής δεν διαθέτουν συνεχής μετρήσεις της παροχής. Η σύγκριση των παραγόμενων μέσω του μοντέλου και αυτών των μετρούμενων παροχών έδωσε $NSE=0,66$ κατά την περίοδο βαθμονόμησης (41 ημέρες κατά το έτος 2004) και $NSE=0,56$ κατά την περίοδο της επαλήθευσης (70 ημέρες κατά τη διάρκεια του 2002-2003).

Οι **Stone et al. (2001)** χρησιμοποίησαν ένα κλιματικό μοντέλο σε συνδυασμό με το SWAT για να εκτιμηθεί το αποτέλεσμα του διπλασιασμού των επίπεδων του ατμοσφαιρικού διοξειδίου του άνθρακα στην απόδοση του νερού στη λεκάνη απορροής του ποταμού Μιζούρι, η οποία περιλαμβάνει 310 υδρολογικές υπολεκάνες απορροής. Η προσομοίωση έδειξε μεγάλες αυξήσεις (>70%) στην ποσότητα του νερού σε υπολεκάνες στα βόρεια και βορειοδυτικά τμήματα της λεκάνης ωστόσο, η συνολική αλλαγή στην ποσότητα του νερού για το σύνολο της λεκάνης εκτιμήθηκε να είναι μειωμένη κατά 10 με 20 %.

Το μοντέλο SWAT δεν περιορίζεται για χρήση μόνο στις ΗΠΑ και στην Ευρώπη. Το μοντέλο εφαρμόζεται τα τελευταία χρόνια σε πολλές χώρες, συμπεριλαμβανομένου όχι μόνο των ανεπτυγμένων χωρών αλλά και πολλών αναπτυσσόμενων όπως η Νότια Κορέα (**Bae et al. 2011**), η Κίνα (**Li et al., 2010**), η Αιθιοπία (**Setegn et al. 2010**) το Ιράν (**Ghaffari et al. 2010**).

Πρόσφατα, οι **Baffaut και Benson (2009)** τροποποίησαν τον κώδικα του SWAT 2005 για την ταχύτερη προσομοίωση του εμπλουτισμού του υδροφόρου ορίζοντα σε καρστικά περιβάλλοντα (SWAT-B&B) τροποποιώντας τις υπορουτίνες της επαναπλήρωσης των υπόγειων υδάτων καθώς και τη μεγιστοποίηση της υδραυλικής αγωγιμότητας αντιπροσωπεύοντας τις καταβόθρες ως μικρές λίμνες.

Ο **Yachtao (2009)** τροποποίησε περαιτέρω τις έρευνες των Baffaut και Benson σε κλίμακα υδρολογικής μονάδας απόκρισης (HRU). Ο **Yachtao (2009)** διαπίστωσε ότι είχε μια πιο αξιοσημείωτη επίδραση στην υδρολογία χρησιμοποιώντας τα HRUs αντιπροσωπεύοντας της καταβόθρες. Αναφέρει επίσης ότι και οι δύο αυτές τροποποιημένες εκδόσεις του SWAT δίνουν καλύτερα αποτελέσματα στην εκτίμηση της απορροής σε καρστικά συστήματα.

Στην Ελλάδα το SWAT έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως κυρίως την τελευταία πενταετία αποτυπώνοντας ικανοποιητικά τη χρονική μεταβλητότητα τόσο της επιφανειακής απορροής, της στερεοπαροχής και της ποιότητας των υδάτων (**Gamvroudis et al., 2015; Nikolaidis et al., 2013; Sibetheros et al., 2013; Malago et al., 2016; Nerantzaki et al., 2015; Nerantzaki et al., 2016; Panagopoulos et al., 2014; Pisinaras et al., 2010; Boskidis et al., 2010**). Τα αποτελέσματα αποδεικνύουν ουσιαστικά, ότι το μοντέλο SWAT είναι ένα σημαντικό εργαλείο για την ολοκληρωμένη διαχείριση λεκανών απορροής στην Μεσόγειο.

2.3.1 Σύγκριση μοντέλου SWAT με άλλα μοντέλα

Το μοντέλο SWAT αποτελεί ένα από τα πιο διαδεδομένα και αξιόπιστα υδρολογικά μοντέλα με έναν μεγάλο αριθμό εφαρμογών στη διεθνή βιβλιογραφία. Ο κώδικας του μοντέλου διανέμεται δωρεάν ενώ η αλληλεπίδραση του μοντέλου με Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών καθιστά το περιβάλλον εργασίας φιλικό προς το χρήστη. Τα δεδομένα εξόδου του μοντέλου είναι εύκολα διαχειρίσιμα και δεν απαιτούν περεταίρω επεξεργασία. Τέλος το μοντέλο παρέχει μεγάλες δυνατότητες παραμετροποίησης.

Οι **Borah και Bera (2003, 2004)** σύγκριναν το μοντέλο SWAT με άλλα παρόμοιου τύπου μοντέλα. Στις μελέτες τους το 2003 έδειξαν ότι τα μοντέλα DWSM (**Borah και Bera, 2004**), HSPF (**Bicknell et al, 1997**) και SWAT αντιμετωπίζουν με παρόμοιο τρόπο τις υδρολογικές, χημικές και μεταφοράς ιζημάτων διεργασίες χωρίζοντας την λεκάνη απορροής σε μικρότερες υπολεκάνες. Επίσης κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το μοντέλο SWAT είναι ένα πολλά υποσχόμενο μοντέλο για μακροπρόθεσμες προσομοιώσεις κυρίως σε αγροτικές λεκάνες απορροής. Το 2004 έδειξαν σε μελέτες τους ότι τα μοντέλα SWAT και HSPF μπορούν να προβλέψουν με ακρίβεια τον ετήσιο όγκο των υδάτων και της ρύπανσης εκτός από περιόδους έντονων βροχοπτώσεων και ασυνήθιστων υδρολογικών συνθηκών όπου τα αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι χειρότερα.

Οι **Van Liew και Garbrecht (2003)** σύγκριναν τα υδρογραφήματα των μοντέλων SWAT και HSPF σε 8 λεκάνες απορροής στη νοτιοανατολική Οκλαχόμα. Συμπέραναν ότι το μοντέλο SWAT είναι καλύτερο από ότι μοντέλο HSPF όσον αφορά την πρόβλεψη της απορροής σε διαφορετικές κλιματικές συνθήκες και μπορεί να είναι ακόμη καλύτερο για μακροχρόνιες προσομοιώσεις όπου οι επιπτώσεις των κλιματικών παραγόντων αλλάζουν τους επιφανειακούς υδάτινους πόρους.

Οι **Srinivasan et al. (2005)** χρησιμοποιώντας το μοντέλο SWAT συμπέραναν ότι το μοντέλο δίνει παρόμοια αποτελέσματα με αυτά που λήφθηκαν από το μοντέλο SMDR (**Mehta et al., 2004**) στην πειραματική λεκάνη απορροής FD-36 έκτασης 39.5 ha στην Πενσυλβάνια ενώ το 2006 (**Srivastava et al. 2006**) διαπιστώθηκε ότι το μοντέλο των συνθετικών νευρωνικών δικτύων (ANN) παρείχε καλύτερα αποτελέσματα υπολογισμού της απορροής σε μικρές λεκάνες απορροής στην Πενσυλβάνια από ότι το μοντέλο SWAT.

2.3.2 Υδρολογία μοντέλου SWAT

Στο μοντέλο SWAT το ισοζύγιο του νερού είναι η κινητήρια δύναμη πίσω από οτιδήποτε συμβαίνει στην λεκάνη απορροής. Για να προβλεφθούν με ακρίβεια οι κινήσεις των φερτών, φυτοφαρμάκων ή των θρεπτικών ο υδρολογικός κύκλος πρέπει να συμφωνεί με κάθε τι που συμβαίνει στη λεκάνη.

Οι κλιματολογικές συνθήκες της λεκάνης παρέχουν τα δεδομένα εισόδου υγρασίας και ενέργειας στο μοντέλο που ελέγχουν την ισορροπίας του νερού και καθορίζουν τη σπουδαιότητα των διαφόρων συνιστωσών του υδρολογικού κύκλου. Οι κλιματολογικές μεταβλητές που απαιτούνται στο SWAT αποτελούνται από το ημερήσιο ύψος βροχής, τη μέγιστη/ελάχιστη θερμοκρασία του αέρα, την ηλιακή ακτινοβολία, την ταχύτητα του ανέμου και τη σχετική υγρασία. Το μοντέλο επιτρέπει οι τιμές αυτές των παραμέτρων είτε να εισαχθούν από αρχεία παρατηρούμενων δεδομένων είτε να δημιουργηθούν κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Οι ημερήσιες τιμές για τον καιρό παράγονται από μέσες μηνιαίες τιμές. Το μοντέλο παράγει μια σειρά από στοιχεία για τον καιρό για κάθε υπολεκάνη. Οι τιμές για κάθε μία υπολεκάνη παράγονται ανεξάρτητα και δεν υπάρχει χωρική συσχέτιση των παραγόμενων τιμών μεταξύ των διαφόρων υπολεκανών.

Το SWAT χρησιμοποιεί ένα μοντέλο που αναπτύχθηκε από τον **Nicks (1974)** για την παραγωγή ημερήσιου ύψους βροχής και συμπλήρωση δεδομένων που λείπουν. Η γεννήτρια χρησιμοποιεί μια αλυσίδα Markov πρώτης τάξης για την παραγωγή συνθετικών κατακρημνισμάτων.

Το νερό της βροχής, είτε απορρέει επιφανειακά, είτε διηθείται στο έδαφος. Το ποσοστό που θα απορρεύσει ρυθμίζεται από το συντελεστή απορροής, ανάλογα με τον τύπο εδάφους και τη χρήση γης. Εκτιμάται με μια τροποποιημένη μέθοδο του αριθμού

καμπύλης CN κατά SCS. Το νερό που απορρέει επιφανειακά, καταλήγει στους υδάτινους αποδέκτες και αποτελεί τον πλημμυρικό όγκο του θεωρούμενου επεισοδίου. Το SWAT ταυτόχρονα, περιλαμβάνει σχέσεις για τον υπολογισμό της απορροής από παγωμένα εδάφη.

Το νερό που διηθείται ακολουθεί μια οριζόντια ή κατακόρυφη διαδρομή μέσα στο έδαφος. Το μοντέλο χωρίζει το έδαφος στο εδαφικό προφίλ (root zone & vadose unsaturated zone), έναν επιφανειακό υδροφορέα (shallow unconfined aquifer) και έναν βαθύ υδροφορέα (deep confined aquifer).

Ένα μέρος από το νερό του εδαφικού προφίλ περνάει σε αέρια φάση, είτε με την εδαφική εξάτμιση, είτε έμμεσα, με τη δέσμευσή του από τα φυτά και τη διαπνοή των φυλλωμάτων τους. Προκειμένου να υπολογιστεί η εξατμισοδιαπνοή, το μοντέλο ενσωματώνει τρεις διαφορετικές μεθόδους, ανάλογα με τα υπάρχοντα δεδομένα.. Ένα μέρος του νερού που υπάρχει στο εδαφικό προφίλ, συμβάλλει στην απορροή στην έξοδο της λεκάνης με την υποδερμική ροή (lateral flow), ενώ ένα άλλο κατεισδύει στον επιφανειακό υδροφορέα. Η κατακόρυφη ροή λαμβάνει μέρος όταν η υδατοϊκανότητα μιας εδαφικής στρώσης ξεπερνιέται και η κάτω στρώση δεν είναι κορεσμένη.

Πέρα από το εδαφικό προφίλ, ο επιφανειακός υδροφορέας τροφοδοτείται με διήθηση από υδατορέματα και ταμειντήρες. Η αποφόρτισή του γίνεται είτε με την υπόγεια ροή (return flow), δηλαδή με οριζόντια κίνηση του νερού, που τροφοδοτεί τους υδάτινους αποδέκτες, είτε με την κατεισδυσή του στο βαθύ υδροφορέα. Την ίδια στιγμή, ένα μέρος του νερού που βρίσκεται στον επιφανειακό υδροφορέα, κινείται κάτω από ορισμένες συνθήκες προς την επιφάνεια και τροφοδοτεί το εδαφικό στρώμα, με μια διαδικασία που το μοντέλο ονομάζει Renar. Το μοντέλο θεωρεί πως το νερό που φτάνει στο βαθύ υδροφορέα χάνεται εκτός λεκάνης απορροής.

Κατά τη διάρκεια όλων των φάσεων διόδευσης του νερού, το μοντέλο λαμβάνει υπόψη τις απώλειες μετάβασης και απορρόφησης, οι οποίες μειώνουν τους όγκους απορροής και τις οποίες αφαιρεί. Για την εκτίμηση αυτών των απωλειών το μοντέλο SWAT χρησιμοποιεί τη μέθοδο Lane. Βάση αυτής της μεθόδου, οι απώλειες υπολογίζονται ως συνάρτηση του μήκους και πλάτους των καναλιών και της διάρκειας της ροής.

Η εξίσωση που χρησιμοποιεί το SWAT για την περιγραφή του υδρολογικού κύκλου είναι:

$$SW_t = SW_o + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}) \quad (2.15)$$

όπου,

SW_t : η τελική περιεκτικότητα υγρασίας του εδάφους την ημέρα t

SW_o : η αρχική περιεκτικότητα υγρασίας του εδάφους τη χρονική στιγμή 0

«Ολοκληρωμένο πλαίσιο μοντελοποίησης υδρολογίας, ποιότητας νερών και στερεοπαροχής σε λεκάνες απορροής ποταμών διαλείπουσας ροής»

R_{day} : η ημερήσια κατακρήμνιση την ημέρα i (mm H₂O)

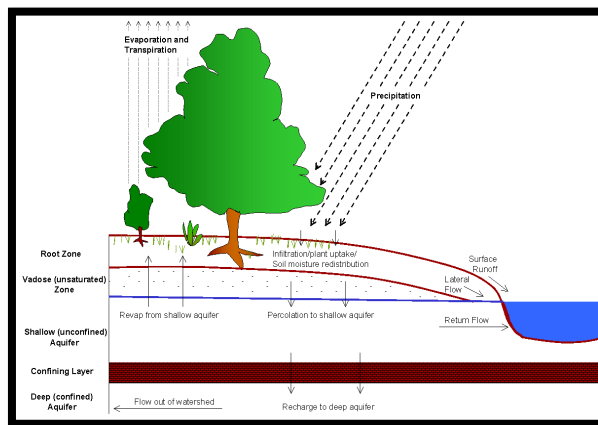
Q_{surf} : η ημερήσια επιφανειακή απορροή την ημέρα i (mm H₂O)

E_a : η ημερήσια εξατμισοδιαπνοή την ημέρα i (mm H₂O)

w_{seep} : η ποσότητα νερού που εξέρχεται από τη ζώνη ριζοστρώματος και εισέρχεται στη ζώνη vadose την ημέρα i (mm H₂O)

Q_{gw} : η υπόγεια ροή την ημέρα i (mm H₂O).

Με δεδομένη την ημερήσια βροχόπτωση, το μοντέλο προσομοιώνει την επιφανειακή απορροή, χρησιμοποιώντας μια τροποποιημένη μέθοδο των καμπυλών της SCS. Η μέθοδος συσχετίζει την επιφανειακή απορροή με τη βροχόπτωση και τη μέγιστη δυνατή κατακράτηση του εδάφους. Η τελευταία είναι απόρροια της υδρομορφίας του εδάφους (A, B, C, ή D, με A να δηλώνει πολύ και D ελάχιστα διαπερατό έδαφος), του είδους φυτοκάλυψης και της πυκνότητας φύτευσης. Οι παράγοντες αυτοί εκφράζονται αθροιστικά με τον αριθμό καμπύλης CN κατά SCS, ενώ πίνακες με τέτοιους αριθμούς υπάρχουν στα σχετικά εγχειρίδια (**USDA, Soil Conservation Service, 1972**).



Εικόνα 2.3. Σχηματική απεικόνιση υδρολογικού κύκλου στο μοντέλο SWAT (Neitch et al., 2005a)
Οι σχέσεις που αποτελούν τη μέθοδο είναι οι κάτωθι:

$$Q_{\text{surf}} = \frac{(R_{\text{day}} - 0.2S)^2}{(R_{\text{day}} + 0.8S)} \quad (2.16)$$

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{\text{CN}} - 10 \right) \quad (2.17)$$

όπου,

Q_{surf} : η ημερήσια επιφανειακή απορροή (mm),

R_{day} : η ημερήσια βροχόπτωση (mm) και

S : παράμετρος που εκφράζει τη μέγιστη κατακράτηση του εδάφους σε νερό (mm).

Η σχέση υπολογισμού της επιφανειακής απορροής ισχύει μόνο στην περίπτωση που η ημερήσια βροχόπτωση είναι μεγαλύτερη από τις αρχικές απώλειες στο έδαφος που υπολογίζονται ως το 20% της συνολικής κατακράτησης S. Διαφορετικά η επιφανειακή απορροή είναι μηδενική. Ένα από τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι το γεγονός ότι καταρτίστηκε με δεδομένα πεδίου των ΗΠΑ και έως σήμερα η γενικότερη ισχύς της στην παρούσα μορφή δεν έχει ακόμα γίνει απόλυτα αποδεκτή, με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται και εναλλακτικές μεθοδολογίες (Soulis et al., 2009).

Το SWAT υπολογίζει την ενδιάμεση ή πλάγια ροή με ένα μοντέλο κινηματικής αποθήκευσης, που χρησιμοποιεί την εξίσωση συνέχειας λαμβάνοντας υπόψη ολόκληρο το εδαφικό προφίλ σαν όγκο ελέγχου. Η ποσότητα νερού που μεταφέρεται με αυτό το είδος της ροής αναμένεται να είναι μεγάλη όταν η υδραυλική αγωγιμότητα του κατώτερου στρώματος του εδάφους είναι μικρή και δεν επιτρέπει την κατεύθυνση προς τον αβαθή υδροφορέα και όταν οι κλίσεις εδάφους είναι μεγάλες (Neitch et al., 2005a). Το υπόγειο νερό που συνεισφέρει στη ροή του ποταμού (βασική ροή) διέπεται από τις εξισώσεις ενός απλού μοντέλου, που υπολογίζει το ισοζύγιο του αβαθούς υδροφορέα σε ημερήσιο βήμα. Για την ποσότητα νερού που επιστρέφει στο ριζόστρωμα (reap), εκείνη που κατεισδύει στο βαθύ υδροφορέα και χάνεται καθώς και εκείνη που αποτελεί την επιστρέφουσα ροή στο ποτάμι, σημαντικό ρόλο παίζουν οι παράμετροι υπόγειου νερού στα σχετικά αρχεία του προγράμματος. Το SWAT ως μοντέλο επιφανειακής υδρολογίας χρησιμοποιεί απλουστευμένες εξισώσεις ώστε να επιτρέψει τη συνεισφορά των υπόγειων υδροφορέων στη συνολική παροχή του ποταμού. Για το λόγο αυτό, πολύ συχνά συστήνεται η χρήση φίλτρων που διαχωρίζουν την παρατηρούμενη χρονοσειρά παροχής σε χρονοσειρά βασικής και άμεσης απορροής. Τέλος, η συνολική παροχή του ποταμού διοδεύεται από κάθε υπολεκάνη έως την τελική έξοδο της λεκάνης απορροής με μία από τις μεθόδους διόδευσης που ήδη αναφέρθηκαν. Οι εξισώσεις που διέπουν όλες τις συνιστώσες του υδρολογικού κύκλου περιγράφονται αναλυτικά στο εγχειρίδιο θεωρητικής βάσης του μοντέλου SWAT (Neitch et al., 2005a).

2.3.3 Διεργασίες διάβρωσης στο μοντέλο SWAT

Η παραγωγή, μεταφορά και εναπόθεση ιζημάτων έχει επιπτώσεις στον κύκλο του νερού και του αζώτου σε παγκόσμια κλίμακα. Η παραγωγή ιζημάτων υπολογίζεται παγκοσμίως ίση με 20×10^9 tn y^{-1} εκ των οποίων άνω του 25% παγιδεύεται σε μεγάλα φράγματα (Takeuchi, 2004). Η ποσοτικοποίηση της μεταφερόμενης ποσότητας ιζήματος είναι σημαντική για να χαρακτηριστούν συνθήκες και διεργασίες όπως η ποιότητα των υδάτων, η οικολογία των ασπόνδυλων και των ενδιαιτημάτων μιας περιοχής ή η δυναμική μιας ακτογραμμής (Bull and Kirkby, 2002; Vericat and Batalla, 2010; Syvitski et al., 2003). Οι πιο σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις της μεταφοράς ιζημάτων εκδηλώνονται σε πεδινές περιοχές.

Το SWAT χρησιμοποιεί μία τροποποιημένη έκδοση της Παγκόσμιας Εξίσωσης Εδαφικής Απώλειας (Universal Soil Loss Equation – USLE) για τον υπολογισμό της διαβρωθείσας ποσότητας εδάφους που καταλήγει στο υδρογραφικό δίκτυο, λαμβάνοντας υπόψη ουσιαστικά το συντελεστή στερεοαπορροής. Αυτό επιτυγχάνεται με την αντικατάσταση του όρου διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης που υπήρχε στην αρχική εξίσωση με τους όρους της επιφανειακής απορροής και της παροχής αιχμής.

Η Τροποποιημένη Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας (**Modified Universal Soil Loss Equation - MUSLE**) του SWAT είναι η εξής (**Neitch et al., 2005a**):

$$sed = 11.8(Q_{surf} \times q_{peak} \times area_{hru})^{0.56} \times K_{usle} \times C_{usle} \times P_{usle} \times L_{usle} \times CFRG \quad (2.18)$$

όπου,

sed : η ποσότητα φερτών που καταλήγει στο ποτάμι από κάθε HRU (tn/ημέρα),

Q_{surf} : η επιφανειακή απορροή (mm/ha/ημέρα),

q_{peak} : η παροχή αιχμής (m^3/s),

$area_{hru}$: η έκταση κάθε HRU (ha),

K_{usle} : ο παράγοντας διαβρώσεως εδάφους,

C_{usle} : ο παράγοντας κάλυψης και διαχείρισης γης,

P_{usle} : ο παράγοντας διαχείρισης εδαφών κατά της διάβρωσης,

L_{usle} : ο παράγοντας τοπογραφίας και

CFRG : παράγοντας που εκφράζει την επίδραση στη στερεοαπορροή της περιεκτικότητας του εδάφους σε χοντρά θραύσματα.

Ο συντελεστής εδάφους K_{usle} εκφράζει την ευαισθησία ενός εδαφολογικού σχηματισμού στη διάβρωση ως απόρροια της κοκκομετρικής σύστασης, του σχήματος των εδαφικών σωματιδίων, της δομής και της περιεκτικότητας σε οργανική ουσία. Ο συντελεστής C_{usle} εκφράζει την προστασία που παρέχει ένας τύπος φυτοκάλυψης στο έδαφος, κάτι που εξαρτάται από το ποσοστό κάλυψης λόγω της ανάπτυξης φυλλωμάτων και της πυκνότητας φύτευσης. Ο συντελεστής αυτός εξαρτάται από το στάδιο ανάπτυξης μιας καλλιέργειας και το SWAT τον επικαιροποιεί κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Ο παράγοντας P_{usle} εκφράζει με τη σειρά του την προστασία που παρέχεται ενάντια στη διάβρωση του εδάφους από ανθρωπογενείς πρακτικές διαχείρισης π.χ. διαμόρφωση αναβαθμίδων, καλλιέργεια κατά τις ισοϋψείς κλπ, ενώ ο τοπογραφικός παράγοντας L_{usle} προσθέτει την πολύ σημαντική επίδραση της τοπογραφίας στη διάβρωση. Ο τελευταίος παράγοντας αναφέρεται στην %

περιεκτικότητα του εδάφους σε χοντρά θραύσματα (rock) με μεγάλες τιμές να μειώνουν την εκτίμηση εδαφικών απωλειών σύμφωνα με τη σχέση $CFRG = e^{-0.053 \times \text{rock}}$. Αντίθετα, για τους προηγούμενους τέσσερις παράγοντες μεγάλες τιμές αυξάνουν την εδαφική απώλεια.

Τέλος, σημαντική επίδραση στους υπολογισμούς έχει η παροχή αιχμής. Πρόκειται για έναν δείκτη που εκφράζει την διαβρωτικότητα ενός επεισοδίου βροχής και υπολογίζεται με μία τροποποιημένη τεχνική της ορθολογικής μεθόδου λαμβάνοντας υπόψη το χρόνο συγκέντρωσης της λεκάνης, ως άθροισμα της ροής στην επιφάνεια του εδάφους (overland flow) και στο υδατόρεμα (channel flow). Για τον υπολογισμό του εν λόγω δείκτη χρησιμοποιείται ακόμα, η μέγιστη βροχύπτωση διάρκειας μισής ώρας που έχει παρατηρηθεί στη λεκάνη σε κάθε μήνα του έτους, μεταβλητή που έχει οριστεί από το χρήστη με βάση ιστορικά δεδομένα στην αρχή της προσομοίωσης.

Οι φερτές ύλες, που υπολογίζεται με βάση την ανωτέρω εξίσωση ότι εγκαταλείπουν το έδαφος και εισέρχονται στο ποτάμι, διοδεύονται στα κατάντη του ποταμού. Εντός του ποταμού το μοντέλο SWAT επιτρέπει την προσομοίωση δύο διαδικασιών, της εναπόθεσης φερτών και της διάβρωσης του πυθμένα, οι οποίες καθορίζουν αθροιστικά τη στερεοπαροχή του ποταμού σε συγκεκριμένη θέση. Για την προσομοίωση των εν λόγω διαδικασιών το SWAT λαμβάνει υπόψη του την ποσότητα εδαφικού υλικού που εισέρχεται στο ποτάμι από την ανάντη λεκάνη και την μεταφορική ικανότητα φερτών του ποταμού, η οποία εκτιμάται με εμπειρικές σχέσεις. Όταν η εισερχόμενη ποσότητα φερτών είναι μεγαλύτερη από τη μεταφορική ικανότητα του ποταμού, τότε λαμβάνει χώρα εναπόθεση, ενώ όταν συμβαίνει το αντίθετο, το μοντέλο προσομοιώνει διάβρωση από τον πυθμένα (Neitsch et al., 2005a).

2.4 Περιγραφή λογισμικού ARGUS ONE και μοντέλου PTC

2.4.1 Λογισμικό ARGUS ONE

Το λογισμικό Argus One είναι ένα γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών (Geographical Information System, GIS) που χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση των υπογείων υδάτων με χρήση αριθμητικών μεθόδων. Υποστηρίζει τα περισσότερα μοντέλα υπογείων υδάτων που κυκλοφορούν στην αγορά και χρησιμοποιείται κατά κόρον από επαγγελματίες υδρογεωλόγους για την ανάπτυξη μοντέλων προσομοίωσης διάφορων υδροφορέων.

Η μεγάλη ποικιλία μοντέλων υπογείων υδάτων που υποστηρίζει το Argus One έχει σαν αποτέλεσμα να αποτελεί το ιδανικό περιβάλλον μοντελοποίησης της ροής υπογείων υδάτων, βασισμένο σε GIS.

Το Argus One GIS υποστηρίζει τα εξής μοντέλα:

- Το MODFLOW, ένα αρθρωτό τρισδιάστατο μοντέλο υπογείων υδάτων, που χρησιμοποιεί πεπερασμένες διαφορές και μπορεί να προσομοιώσει τη μεταφορά διαλυμένων ουσιών και να εκτιμήσει παραμέτρους.
- Το PTC (Princeton Transport Code), ένα προηγμένο τρισδιάστατο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών, που προσομοιώνει την υπόγεια ροή και μεταφορά.
- Το NAPL, ένα μοντέλο προσομοίωσης της ρύπανσης του εδάφους και των υδροφορέων από οργανικά υγρά, γνωστά ως υγρά μη υδατώδους φάσης (Non Aqueous Phase Liquids, NAPLs).
- Το SUTRA, μοντέλο το οποίο προσομοιώνει κορεσμένη και ακόρεστη ροή, ροή υγρού σταθερής ή μεταβλητής πυκνότητας και μεταφορά διαλυμένων ουσιών ή ενέργειας.
- Το HST3D, ένα πρόγραμμα μοντελοποίησης πεπερασμένων διαφορών για την προσομοίωση ρευστών, διαλυμάτων μίας ουσίας και μεταφοράς θερμότητας στις τρεις διαστάσεις και υπό συνθήκες κορεσμού. Ακόμη, επιτρέπει την προσομοίωση της προσρόφησης και της αποσύνθεσης.

Το Argus One παρέχει τη βάση στην οποία οι διάφορες πληροφορίες συντίθενται και εισάγονται στα αριθμητικά μοντέλα. Δημιουργεί πλέγματα πεπερασμένων στοιχείων ή πεπερασμένων διαφορών και παρέχει τη δυνατότητα εισαγωγής ψηφιακών χαρτών, δημιουργίας ορίων της περιοχής και αυτόματης δημιουργίας πλεγμάτων πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών με γραφικό τρόπο. Επιπλέον, μπορεί να συνδυάσει διαφορετικές μεταβλητές στο πλέγμα ή στα στοιχεία και στους κόμβους του πλέγματος, όπως οριακές και αρχικές συνθήκες, συγκεντρώσεις κ.λ.π. παρέχοντας τη δυνατότητα γραφικής παρουσίασης των αποτελεσμάτων. Η χρήση του Argus One βασίζεται στα διάφορα επίπεδα (layers) τα οποία είναι διαφανή φύλλα εργασίας και το καθένα περιέχει πληροφορίες. Ο χρήστης μπορεί να επεξεργαστεί τις πληροφορίες οι οποίες αποθηκεύονται στα επίπεδα και δημιουργούνται χρησιμοποιώντας μαθηματικές και ορθολογικές συναρτήσεις, συναρτήσεις του χώρου καθορίζοντας έτσι τις σχέσεις μεταξύ των επιπέδων. Επιπλέον, το Argus One μπορεί να συνθέσει αυτόματα νέες πληροφορίες ή αλλαγές στα πλέγματα σύμφωνα με τους κανόνες του μοντέλου. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να εισάγει, να ψηφιοποιήσει και να μεταβάλλει κάθε είδους πληροφορία όπως οριακές συνθήκες, σημειακές πηγές, δεξαμενές, τοπογραφία και φυσικές παράμετροι. Με τις πληροφορίες αυτές καθορίζεται το περίγραμμα της περιοχής της μελέτης, η πυκνότητα του πλέγματος, ενώ στη συνέχεια μπορεί να υπολογισθεί το πάχος του σχηματισμού κ.α.. Από το Layer Data είναι δυνατή η εισαγωγή και η ανάγνωση διαφόρων στοιχείων σχετικά με το πλέγμα και δεδομένα από άλλα προγράμματα.

2.4.2 Ο κώδικας PTC (Princeton Transport Code)

Ο κώδικας μεταφοράς του Princeton, PTC (Princeton Transport Code), είναι ένα υβριδικό τρισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών το οποίο προσομοιώνει τη ροή υπογείων υδάτων και τη μεταφορά ρύπων. Ο κώδικας PTC είναι αποτέλεσμα συνεισφορών πολλών ατόμων στο πανεπιστήμιο του Princeton. Αρχικά αναπτύχθηκε σε δύο διαστάσεις, από τους Pinder & Gray και αργότερα ο κώδικας επεκτάθηκε στον τρισδιάστατο χώρο από τον Babu (**Babu et al., 1997**). Ο κώδικας PTC γραμμένος σε γλώσσα FORTRAN, επιλύει χωρικές διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν την ροή των υπογείων υδάτων και την μεταφορά ρύπων. Έχει σχεδιαστεί κατά βάση για πρακτικούς σκοπούς παρά για θεωρητικούς και επικεντρώνεται στις αριθμητικές μεθόδους επίλυσης και στην βιβλιογραφία όσον αφορά πηγές υδάτων.

Ο κώδικας PTC καθορίζει τα χαρακτηριστικά ενός υπόγειου συστήματος ροής επιλύοντας την παρακάτω μερική διαφορική εξίσωση με την οποία υπολογίζεται το υδραυλικό ύψος h :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - S \frac{\partial h}{\partial t} + \sum_{i=1}^R Q_i \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \delta(z - z_i) = 0 \quad (2.19)$$

όπου:

K_{xx} : η υδραυλική αγωγιμότητα στην οριζόντια x διεύθυνση [LT^{-1}],

K_{yy} : η υδραυλική αγωγιμότητα στην οριζόντια y διεύθυνση [LT^{-1}],

K_{zz} : η υδραυλική αγωγιμότητα στην κάθετη z διεύθυνση [LT^{-1}],

S : ο συντελεστής ειδικής αποθήκευσης [L^{-1}],

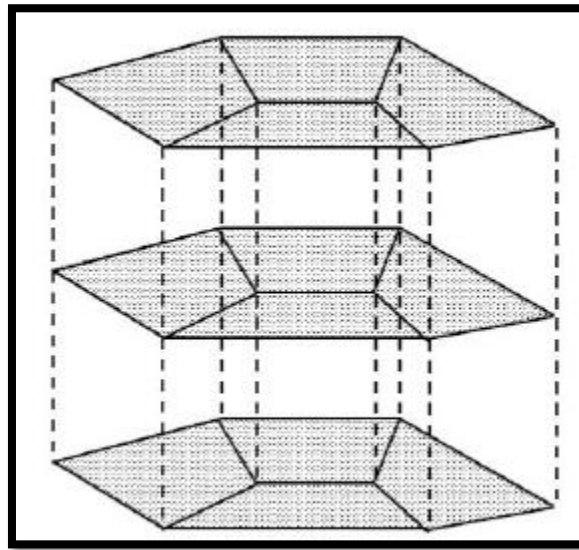
Q_i : η παροχή της πηγής ή του ταμιευτήρα στο σημείο i ,

Δ : η συνάρτηση δέλτα,

R : ο αριθμός των πηγών ή των ταμιευτήρων.

Για ευκολία, ο τελευταίος όρος της εξίσωσης θα συντμηθεί σε Q . Η παραπάνω εξίσωση επιλύεται αριθμητικά από τον κώδικα PTC χρησιμοποιώντας μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων και διαφορών. Ο κώδικας PTC χρησιμοποιεί ένα μοναδικό αλγόριθμο διαχωρισμού, ο οποίος μειώνει σημαντικά τον υπολογιστικό φόρτο. Ο αλγόριθμος αυτός περιλαμβάνει διαχωρισμό της περιοχής ελέγχου σε παράλληλα οριζόντια επίπεδα. Μέσα σε καθένα από τα επίπεδα χρησιμοποιείται διακριτοποίηση πεπερασμένων στοιχείων, η οποία επιτρέπει ορθή απεικόνιση πεδίων ακανόνιστου σχήματος. Τα επίπεδα συνδέονται κάθετα με διακριτοποίηση πεπερασμένων διαφορών.

Ο κώδικας PTC προσαρμόζει και τους τρεις τύπους οριακών συνθηκών στην εξίσωση της ροής. Οι οριακές συνθήκες μπορούν να αλλαχθούν από το χρήστη κατά τη διάρκεια της πραγματοποίησης μίας προσομοίωσης. Η προεπιλεγμένη οριακή συνθήκη για όλα τα όρια είναι η μηδενική δρώσα δύναμη. Αυτό υπονοεί έναν περιορισμένο υδροφορέα με αδιαπέρατο βυθό και πλάγια σύνορα. Επιλέγοντας διαφορετικές οριακές συνθήκες εντός του πεδίου, ο χρήστης μπορεί να αναπαραστήσει διαφορετικές υδρολογικές συνθήκες. Ο κώδικας PTC πραγματοποιεί κάθετη διακριτοποίηση για τις χωρικές παραγώγους στη διεύθυνση z , με τη χρήση οριζόντιου πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων σε στρώματα τα οποία αντικαθίστανται από κόμβους εναποτίθενται το ένα πάνω στο άλλο (Babu et al.,1997).



Εικόνα 2.4. Οριζόντιο δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων (Babu et al., 1997)

Εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων

Σύμφωνα με τους Babu et al. (1997), ο PTC προσεγγίζει τους όρους της παραπάνω εξίσωσης που περιέχουν παραγώγους ως προς x και y με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, υποτίθεται ότι υπάρχει ένα άθροισμα άπειρων συναρτήσεων το οποίο αναπαριστά ακριβώς τη λύση της μερικής διαφορικής εξίσωσης που περιγράφει την υπόγεια ροή.

Μια πεπερασμένη προσεγγιστική μορφή της σειράς αυτής είναι:

$$h(x, y, z, t) \sim \hat{h}(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^N h_i(z, t) w_{i(x,y)} \quad (2.20)$$

όπου:

h το υδραυλικό ύψος [L]

\hat{h} η σειρά που προσεγγίζει το h [L]

h_i ένας απροσδιόριστος συντελεστής [L]

w_i μια βασική (ή παρεμβολική) συνάρτηση (αδιάστατη)

N ο αριθμός των κόμβων στο δίκτυο των πεπερασμένων στοιχείων

Η προσεγγιστική σειρά (**Εξίσωση 2.20**) παρέχει μία ακριβή αναπαράσταση όσο το N προσεγγίζει το άπειρο (το \hat{h} προσεγγίζει το h). Επιλέγοντας προσεκτικά τις βασικές συναρτήσεις w_i , ο απροσδιόριστος συντελεστής h_i γίνεται η τιμή του υδραυλικού ύψους στους κόμβους με συντεταγμένες (x, y, z) . Με χρήση συνεχών βασικών συναρτήσεων τμηματικά (όπως π.χ. γραμμικών βασικών συναρτήσεων που χρησιμοποιεί ο PTC) αυξάνεται η υπολογιστική απόδοση της μεθόδου. Στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων παρατηρείται ότι παρόλο που ο διαφορικός τελεστής L (της **Εξίσωσης 2.19**) που περιέχει το h ισούται με μηδέν, όταν ο L περιέχει την προσεγγιστική συνάρτηση παρουσιάζεται σφάλμα. Μαθηματικά, η **Εξίσωση 2.19** ξαναγράφεται ως: $L(h)=0$ όταν $L(\hat{h})=R$ όπου R το υπολειμματικό σφάλμα.

Για την επίλυση της **Εξίσωσης 2.20** με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων επιχειρείται η ελαχιστοποίηση του σφάλματος R . Αυτό επιτυγχάνεται θεωρώντας αρχικά μια ολοκληρωμένη ομάδα συναρτήσεων w_j . Υποχρεώνοντας το σφάλμα R να είναι ορθογωνικό σε όλες τις πιθανές τιμές του w_j , ουσιαστικά το R υποχρεώνεται να τείνει στο μηδέν και λαμβάνεται η λύση της.

Δηλαδή έχουμε $L(\hat{h})=L(h)$ όταν $R=0$. Με περαιτέρω διαδικασίες προκύπτει η εξίσωση:

$$\iint_{\Omega} \left[K_{xx} \left(\sum_{j=1}^N h_j \frac{\partial w_j}{\partial x} \right) \frac{\partial w_i}{\partial x} + K_{yy} \left(\sum_{j=1}^N h_j \frac{\partial w_j}{\partial y} \right) \frac{\partial w_i}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial}{\partial z} \sum_{j=1}^N h_j w_j \right) w_i + \right. \\ \left. S \frac{\partial}{\partial t} \left(\sum_{j=1}^N h_j w_j \right) w_i - Q w_i \right] dx dy - \int_{\sigma} \left[K_{xx} \frac{\partial \hat{h}}{\partial x} l_x + K_{yy} \frac{\partial \hat{h}}{\partial y} l_y \right] w_i d\sigma = 0 \quad (2.21)$$

όπου:

$i = 1, 2, \dots, N$

Ω η περιοχή ολοκλήρωσης που καλύπτει ολόκληρη την οριζόντια τομή της περιοχής ροής.

l_x, l_y τα συνημίτονα κατεύθυνσης των γωνιών που σχηματίζονται μεταξύ του κανονικού και του διατμητικού ορίου σ στους άξονες x και y αντίστοιχα.

Εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών

Με χρήση διανυσμάτων η **Εξίσωση 2.10** γράφεται ως εξής (**Babu et al., 1997**):

$$Ah + B \frac{\partial h}{\partial t} - v + f = 0 \quad (2.22)$$

όπου A και B είναι διανύσματα (N×N) και h, $\frac{\partial h}{\partial t}$, v και f είναι διανύσματα στήλες μήκους N. Τα στοιχεία A, B, v και f είναι :

$$A_{ij} = \iint_{\Omega} \left[K_{xx} \frac{\partial w_i}{\partial x} \frac{\partial w_j}{\partial x} + K_{yy} \frac{\partial w_i}{\partial y} \frac{\partial w_j}{\partial y} \right] dx dy \quad (2.23)$$

$$B_{ij} = \iint_{\Omega} S w_i w_j dx dy \quad (2.24)$$

$$f_i = - \iint_{\Omega} Q w_i dx dy - \left[K_{xx} \frac{\partial \hat{h}}{\partial x} l_x + K_{yy} \frac{\partial \hat{h}}{\partial y} l_y \right] w_i d\sigma \quad (2.25)$$

$$v_i = \sum_{j=1}^N \left[\iint_{\Omega} \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h_j}{\partial z} \right) w_i w_j dx dy \right] \quad (2.26)$$

Κάθετη παραγωγή

Βασικό χαρακτηριστικό του παρόντος κώδικα είναι η χρήση ενός σχήματος κεντρικών διαφορικών εξισώσεων για τις χωρικές παραγώγους της **Εξίσωσης 2.26** στην z κατεύθυνση. Η κάθετη διακριτοποίηση επιτυγχάνεται με την επανάληψη των οριζόντιων δικτύων πεπερασμένων στοιχείων σε στρώματα, με τους κόμβους να βρίσκονται ο ένας πάνω στον άλλο.

Αυτό σημαίνει ότι στην κάθετη διεύθυνση μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια μονοδιάστατη εξίσωση πεπερασμένων διαφορών για την προσέγγιση της **Εξίσωσης 2.26**.

Χρησιμοποιώντας τον κάθετο δείκτη k, όπου k = 1 για το κάτω στρώμα, αυτή η προσέγγιση γραμμένη σε μορφή διανυσμάτων δίνει :

$$v \cong C_k^+ (h_{k+1} - h_k) - C_k^- (h_k - h_{k-1}) \quad (2.27)$$

όπου ο αρμονικός μέσος των ιδιοτήτων των παρακείμενων στρωμάτων χρησιμοποιείται για τον καθορισμό των στοιχείων του, κάθετου όρου μεταξύ των στρωμάτων k και k+1, και C_k^- , κάθετου όρου μεταξύ των στρωμάτων k και k-1.

«Ολοκληρωμένο πλαίσιο μοντελοποίησης υδρολογίας, ποιότητας νερών και στερεοπαροχής σε λεκάνες απορροής ποταμών διαλείπουσας ροής»

$$C_{ij:k}^{\pm} = \iint_{\Omega} \frac{2}{\Delta z_k \left[\frac{\Delta z_{k+1}}{(K_{ZZ})_k} + \frac{\Delta z_k}{(K_{ZZ})_{k+1}} \right]} w_i w_j dx dy \quad (2.28)$$

όπου (Δz_k) είναι το πάχος του k^{ov} στρώματος στο σημείο της προσέγγισης. Ο αρμονικός μέσος δίνει τα πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα στις ετερογενείς καταστάσεις που συναντώνται συνήθως.

Με αντικατάσταση της **Εξίσωσης 2.27** στην **Εξίσωση 2.22** προκύπτει η παρακάτω εξίσωση για ένα τυπικό k^o στρώμα:

$$A_k h_k + B_k \frac{\partial h_k}{\partial t} - [C_k^+ (h_{k+1} - h_k) - C_k^- (h_k - h_{k-1})] + f_k = 0 \quad (2.29)$$

όπου το h_k αντιπροσωπεύει το διάνυσμα h των υδραυλικών υψών στο k^o στρώμα, $k = 1, 2, \dots, M$ και όπου M ο αριθμός των στρωμάτων στη διεύθυνση z (**Babu et al., 1997**).

Η χρονική παράγωγος

Η χρήση οπίσθιας διαφοράς προσέγγισης για την παράγωγο του χρόνου παρέχει την πιο ακριβή λύση για τα προβλήματα ροής υπογείων υδάτων, για ένα δεδομένο κόστος. Για την προσέγγιση της χρονικής παραγωγού χρησιμοποιείται διόρθωση 1^{ης} τάξης και οι χωρικές παράγωγοι γράφονται με βάση τη νέα χρονική στιγμή.

Έτσι, η **Εξίσωση 2.29** για κάθε στρώμα γράφεται ως :

$$A_k h_k^{(t+\Delta t)} + \frac{(B_D)_k}{\Delta t} [h_k^{(t+\Delta t)} - h_k^t] - [C_k^+ (h_{k+1} - h_k) - C_k^- (h_k - h_{k-1})]^{(t+\Delta t)} + f_k^t = 0 \quad (2.30)$$

Οριακές συνθήκες

Ο κώδικας PTC χρησιμοποιεί τρία είδη οριακών συνθηκών στην εξίσωση ροής: τις συνθήκες Dirichlet (σταθερού υδραυλικού ύψους), Neumann (σταθερής ροής) και το τρίτο είδος (για διαρροή). Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να αλλάξει τις οριακές συνθήκες κατά την προσομοίωση. Η προκαθορισμένη οριακή συνθήκη που χρησιμοποιείται σε όλα τα όρια είναι η συνθήκη μηδενικής ροής, πράγμα που υποδηλώνει την ύπαρξη περιορισμένου υδροφορέα με αδιαπέραστες πλευρές και πυθμένα. Επιλέγοντας διαφορετικές οριακές συνθήκες εντός της περιοχής, ο χρήστης μπορεί να αναπαραστήσει άλλες υδρολογικές συνθήκες (**Babu et al., 1997**).

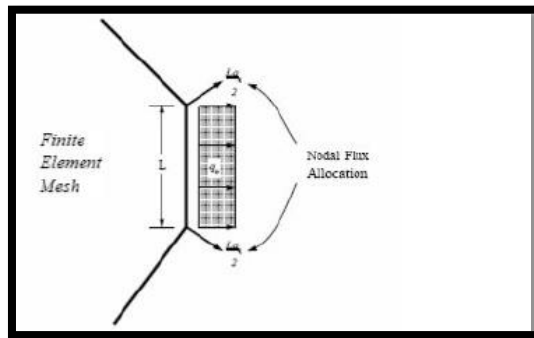
Οριακές συνθήκες σταθερού υδραυλικού ύψους

Οι συνθήκες σταθερού υδραυλικού ύψους (1^{ου} είδους) επιτυγχάνονται προσδιορίζοντας τους κόμβους και τις τιμές των υδραυλικών υψών που είναι ορισμένα σε αυτούς. Ο κώδικας αυτομάτως ορίζει ως σταθερές τις στήλες και τις γραμμές του πίνακα συντελεστών που σχετίζεται με αυτούς τους κόμβους. Όταν οι κόμβοι σταθερού υδραυλικού ύψους απαλειφθούν από την εξίσωση του πίνακα τότε μένουν $(N \times M - N_c)$ εξισώσεις με $(N \times M - N_c)$ αγνώστους, όπου N_c είναι ο συνολικός αριθμός των κόμβων με οριακές συνθήκες σταθερού υδραυλικού ύψους (Babu et al., 1997).

Οριακές συνθήκες σταθερής ροής

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων παρέχει έναν απλό τρόπο για τον καθορισμό των οριακών συνθηκών σταθερής ροής (2^{ου} είδους). Η κομβική κατανομή της ροής η οποία θεωρείται σταθερή κατά μήκος ενός στοιχείου μήκους L υπολογίζεται ολοκληρώνοντας τη διαφορική εξίσωση:

$$-\int_{\sigma} \left[K_{xx} \frac{\partial \bar{h}}{\partial x} l_x + K_{yy} \frac{\partial \bar{h}}{\partial y} l_y \right] \omega_i d\sigma = -\int_{\sigma} q_n \omega_i d\sigma \quad (2.31)$$



Εικόνα 2.5. Κομβική κατανομή ροής μέσω ενός στοιχείου μήκους L (Babu et al., 1997)

Οριακές συνθήκες τρίτου είδους

Οι οριακές συνθήκες διαρροής προκύπτουν αντικαθιστώντας στην Εξίσωση 2.25 την τιμή

$$Q = k_L(h_{j,L}^t - h_{j,k}^t) \quad (2.32)$$

Όπου

$h_{j,k}^t$ το άγνωστο υδραυλικό ύψος στον κόμβο j του στρώματος k , τη χρονική στιγμή t

$h_{j,L}^t$ το αντίστοιχο υδραυλικό ύψος στο σημείο αναφοράς της διαρροής

k_L η αγωγιμότητα της διαρροής (υδραυλική αγωγιμότητα προς απόσταση)

Ο όρος της αγωγιμότητας ολοκληρώνεται επιφανειακά και έτσι αναπαριστά την κάθετη διαρροή. Ωστόσο, με κατάλληλο προσδιορισμό της καθοριζόμενης από το χρήστη σταθεράς, μπορεί να προσδιοριστεί η διαρροή προς οποιαδήποτε κατεύθυνση (Babu et al., 1997).

Συνθήκες για τον υδροφόρο ορίζοντα

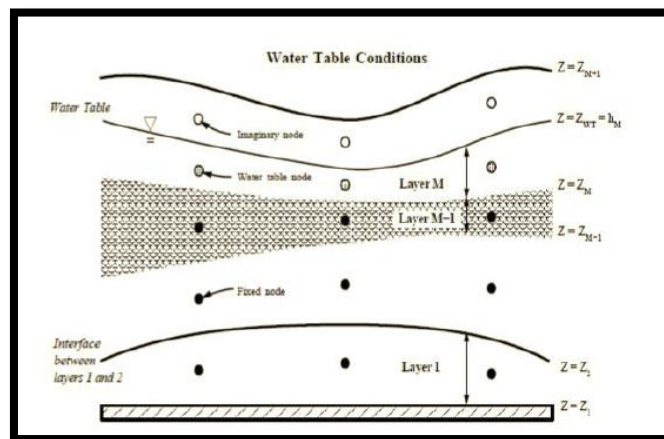
Σύμφωνα με τους Babu et al. (1997), η επιβολή οριακών συνθηκών για τον υδροφόρο ορίζοντα ή για ελεύθερο υδροφορέα απαιτεί την εφαρμογή δύο οριακών συνθηκών για το επίπεδο του νερού στο πάνω στρώμα. Η πρώτη οριακή συνθήκη δηλώνει ότι το επίπεδο του νερού στο ανώτερο επίπεδο, h_M , καθορίζει το πάχος του υδροφορέα στο ανώτερο στρώμα, $z_{WT}-z_M$. Σε κάθε κόμβο θα πρέπει να ισχύει:

$$(z_{WT})_i = (h_M)_i \quad (2.33)$$

Υποθέτουμε ότι ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται πάντα εντός του πάνω στρώματος ($k = M$). Κατά τη διάρκεια του υπολογισμού των υδραυλικών υψών, το πρόγραμμα ελέγχει αν οι τιμές του h_M , στους κόμβους βρίσκονται μέσα στο ακόλουθο εύρος υψομέτρων:

$$z_M \leq h_M \leq z_{M+1} \quad (2.34)$$

Η σχηματική αναπαράσταση του υδροφόρου ορίζοντα εικονίζεται στην **Εικόνα 2.8**. Το καθορισμένο επίπεδο του ανώτερου ορίου της ροής της περιοχής θα πρέπει να δίνεται από την εξίσωση $z_{w+1}(x, y, t)$ και το πραγματικό επίπεδο της στάθμης του νερού, από την εξίσωση $z_{WT}(x, y, t)$ (Babu et al., 1997).



Εικόνα 2.6. Συνθήκες στάθμης υδροφόρου ορίζοντα. Η επιφάνειες ορίζονται από τις εξισώσεις $z=z_1, z=z_2$ κλπ., και είναι καθορισμένα όρια στο χώρο και καθορίζουν τα στρώματα (Babu et al., 1997)

Το μοντέλο PTC εμφανίζει ένα μήνυμα στην περίπτωση όπου η παραπάνω συνθήκη παραβιάζεται. Στη συνέχεια η εκτέλεση αυτή τερματίζεται. Η παραπάνω σχέση πρέπει να ικανοποιεί και τις οριακές συνθήκες για το υδραυλικό ύψος. Καθώς το PTC καθορίζει το πάχος του πάνω στρώματος, το οποίο εμφανίζεται στα μητρώα συντελεστών, η **Εξίσωση 2.33** εισάγει μη γραμμικότητα στη λύση των εξισώσεων του συστήματος ροής. Αυτή η μη γραμμικότητα διευθετείται μέσω επαναλήψεων στο δεύτερο βήμα του διαχωριστικού αλγόριθμου. Η δεύτερη οριακή συνθήκη περιγράφει την μεταβλητή απόκριση του υδροφόρου ορίζοντα στη διήθηση και εκφράζεται με την ακόλουθη εξίσωση:

$$S_y \frac{\partial h}{\partial t} + K_z \frac{\partial h}{\partial z} - R \quad (2.35)$$

Ο όρος S_y συμβολίζει την ειδική απόδοση κοντά στον υδροφόρο ορίζοντα.

2.5 Το φαινόμενο της ξηρασίας – Δείκτες Ξηρασίας

Η ξηρασία σαν μετεωρολογικό φαινόμενο αναφέρεται στο γεγονός και τα αποτελέσματα μιας χρονικής περιόδου με ασυνήθιστα χαμηλά ύψη κατακρημνισμάτων. Η μετεωρολογική ξηρασία έχει άμεσες επιπτώσεις τόσο στο περιβάλλον όσο και στο μέρος της γεωργίας που στηρίζεται αποκλειστικά στις βροχοπτώσεις. Ωστόσο τα υδάτινα σώματα καθώς και οι χρήσεις, όπως ύδρευση και η άρδευση, εξαρτώνται από τη διαθεσιμότητα των επιφανειακών και υπόγειων πόρων και όχι άμεσα από τις βροχοπτώσεις. Μια περίοδος με ασυνήθιστα χαμηλή διαθεσιμότητα νερού σε ότι αφορά τις επιφανειακές παροχές και τις στάθμες των φυσικών λιμνών και των υπόγειων ταμιευτήρων, χαρακτηρίζεται σαν περίοδος υδρολογικής ξηρασίας.

Σε περιπτώσεις μεγάλων υδρολογικών λεκανών όπου οι βροχοπτώσεις ή χιονοπτώσεις που τροφοδοτούν έναν ποταμό ή και έναν υπόγειο υδροφορέα, λαμβάνουν χώρα σε μεγάλη απόσταση από την περιοχή ενδιαφέροντος, είναι δυνατόν να παρατηρηθεί υδρολογική ξηρασία χωρίς να έχει παρατηρηθεί μετεωρολογική ξηρασία στην υπό εξέταση περιοχή. Η Ελλάδα έχει από καιρό αναγνωρίσει την ανάγκη για διαχείριση και έλεγχο του φαινομένου της ξηρασίας, με τις περίπλοκες δυναμικές της οι οποίες επηρεάζονται τόσο από τα φυσικά φαινόμενα όσο και από την ανθρώπινη δραστηριότητα και τις επιδράσεις στο φυσικό περιβάλλον και την κοινωνία. Η διαχείριση των συνεπειών της ξηρασίας πρέπει να έχει ως στόχο την ποσοτικοποίηση της μέσω ενός συστήματος δεικτών οι οποίοι μέσω του υπολογισμού τους θα παρέχουν τη δυνατότητα διάγνωσης για την ύπαρξη ξηρασίας και αφετέρου θα συνδράμουν στον περιορισμό των δυσμενών επιπτώσεων του φαινομένου. Ένα σύστημα δεικτών ξηρασίας πρέπει να συμπυκνώνει ένα μεγάλο αριθμό μετρήσεων και τα αποτελέσματα σύνθετων αναλύσεων σε λίγες τιμές, εύκολα κατανοητές, οι οποίες να μεταδίδουν βασικές πληροφορίες απαραίτητες για την ανάληψη και επιλογή δράσεων

αντιμετώπισης των επιπτώσεων της ξηρασίας. Λόγω της ιδιαιτερότητας του κλίματος, της υδρολογίας και των συστημάτων διαχείρισης των υδατικών πόρων κάθε χώρας υπάρχει μια σημαντική διαφοροποίηση των δεικτών μεταξύ χωρών.

Δείκτες οι οποίοι βρίσκουν ευρύτερη εφαρμογή σήμερα είναι :

- Ο δείκτης ποσοστού επί της κανονικής κατακρήμνισης (Percent of Normal) υπολογίζεται διαιρώντας την πραγματική βροχόπτωση με την κανονική βροχόπτωση (μέσος όρος των 30 τελευταίων ετών) και πολλαπλασιάζοντας επί 100. Μπορεί εύκολα να παρερμηνευτεί μιας και ο όρος «κανονική» είναι ένα μαθηματικό κατασκευάσμα το οποίο δεν αντιστοιχεί αναγκαστικά στο πως αναμένεται να είναι ο καιρός.
- Ο δείκτης βροχόπτωσης (RI) ο οποίος δημιουργήθηκε για να συγκρίνει τιμές βροχόπτωσης με έντονη διακύμανση σε ηπειρωτική κλίμακα στην Αφρική (Hayes, 1999).
- Δείκτης ξηρότητας (Aridity Index – AI) ο οποίος ορίζεται ως το πηλίκο του μέσου ετήσιου ύψους βροχής προς το μέσο ετήσιο ύψος της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής (UNESCO, 1979).
- Δείκτης δριμύτητας ξηρασίας κατά Palmer (Palmer Drought Severity Index – PDSI) ο οποίος χρησιμοποιείται ευρέως στις ΗΠΑ και απαιτεί εκτεταμένες περιοχές με μικρή μεταβλητότητα σε υδρο-μετεωρολογικά χαρακτηριστικά (Palmer 1965).
- Τυποποιημένος δείκτης βροχόπτωσης (Standardized Precipitation Index – SPI) ο οποίος έχει υιοθετηθεί στις ΗΠΑ αλλά και σε πολλές Ευρωπαϊκές χώρες λόγω της άμεσης εφαρμοσιμότητας του οπουδήποτε υπάρχουν επαρκή στοιχεία βροχόπτωσης (McKee et al. 1993).
- Τα δεκατημόρια (Deciles) παρέχουν μια ακριβή στατιστική μέτρηση της βροχόπτωσης και εφαρμόζονται κυρίως στην Αυστραλία κατατάσσοντας το υπό εξέταση ύψος βροχής σε υποδιαιρέσεις διαθέσιμων ιστορικών χρονοσειρών βροχόπτωσης (Gibbs and Maher, 1967).
- Δείκτης επανόρθωσης ξηρασίας (Reclamation Drought Index RDI) κυρίως σε επίπεδο λεκάνης απορροής ενσωματώνοντας δεδομένα όπως η βροχόπτωση, η χιονόπτωση, η παροχή και η στάθμη.
- Δείκτης υγρασίας καλλιέργειας (Crop Moisture Index – CMI) ο οποίος είναι παράγωγο του δείκτη Palmer και αντανακλά την προσφορά υγρασίας σε σύντομο χρονικό διάστημα σε μεγάλες καλλιεργήσιμες περιοχές παραγωγής ενώ δεν έχει σκοπό την αξιολόγηση μακροπρόθεσμης ξηρασίας (Palmer 1968).
- Ο δείκτης προσφοράς επιφανειακών υδάτων (Surface Water Supply Index – SWSI) ο οποίος χρησιμοποιείται στις ΗΠΑ κυρίως για ορεινές περιοχές. Ο δείκτης είναι μοναδικός για κάθε λεκάνη απορροής, γεγονός που περιορίζει τις συγκρίσεις μεταξύ λεκανών ο (Shafer and Dezman 1982).

Ο πλέον κατάλληλος δείκτης για την παρακολούθηση των φαινομένων ξηρασίας στην Ελλάδα είναι ο δείκτης SPI ο οποίος δίνει την δυνατότητα άμεσης σύγκρισης μεταξύ των διαφορετικών υδρολογικών περιοχών και τυγχάνει ευρύτατης εφαρμογής διεθνώς.

Δείκτης Ξηρασίας SPI

Η κατανόηση ότι ελλείμματα κατακρημνισμάτων έχουν διαφορετικές επιπτώσεις για τα υπόγεια ύδατα, τους ταμιευτήρες, την εδαφική υγρασία, τη χιονόπτωση (snowpack) και την απορροή (streamflow) οδήγησε τον **McKee et al. (1993)** να αναπτύξουν τον Δείκτη τυποποιημένης Βροχόπτωσης (SPI). Ο SPI έχει σχεδιαστεί για την ποσοτικοποίηση του ελλείμματος βροχοπτώσεων για πολλαπλές χρονικές κλίμακες. Αυτές οι χρονικές κλίμακες αντανakλούν τις επιπτώσεις της ξηρασίας στη διαθεσιμότητα των διαφόρων υδάτινων πόρων. Οι συνθήκες υγρασίας του εδάφους ανταποκρίνονται σε σχετικά μικρή χρονική κλίμακα στις ανωμαλίες που σχετίζονται με την βροχόπτωση, ενώ τα υπόγεια ύδατα, η επιφανειακή απορροή (streamflow), και οι ταμιευτήρες αντανakλούν τις μακροπρόθεσμες ανωμαλίες κατακρήμνισης. Για τους λόγους αυτούς ο **McKee et al. (1993)** υπολόγισε αρχικά τον SPI για χρονικές κλίμακες 3, 6, 12, 24 και 48 μηνών.

Ο υπολογισμός του SPI για οποιαδήποτε θέση βασίζεται στην μακροχρόνια καταγραφή βροχόπτωσης για την επιθυμητή περίοδο. Αυτή η μακροπρόθεσμη καταγραφή έχει τοποθετηθεί σε μια κατανομή πιθανοτήτων, η οποία στη συνέχεια μετατρέπεται σε κανονική κατανομή, έτσι ώστε ο μέσος SPI για τη θέση και το επιθυμητό χρονικό διάστημα να είναι μηδέν (**Edwards και McKee 1997**). Θετικές τιμές SPI υποδεικνύουν μεγαλύτερη από τη μέση βροχόπτωση, ενώ οι αρνητικές τιμές σημαίνουν μικρότερη από μέση βροχόπτωση. Επειδή ο SPI κανονικοποιείται, πιο υγρά και πιο ξηρά κλίματα μπορούν να αντιπροσωπεύονται με τον ίδιο τρόπο, και υγρές περίοδοι μπορεί επίσης να παρακολουθούνται με χρήση του SPI.

Ο **McKee et al. (1993)** χρησιμοποίησε το σύστημα ταξινόμησης που παρατίθεται στον πίνακα τιμών του SPI για τον καθορισμό της έντασης ξηρασίας που προκύπτει βάσει του SPI. Ο **McKee et al. (1993)** όρισε επίσης τα κριτήρια για ένα "συμβάν ξηρασίας" για οποιαδήποτε από τις χρονικές κλίμακες. Επεισόδιο ξηρασίας εκδηλώνεται κάθε φορά που ο SPI είναι συνεχώς αρνητικός και φτάνει μια ένταση, όπου ο SPI είναι -1,0 ή μικρότερος. Η εκδήλωση της ξηρασίας τελειώνει όταν ο SPI γίνεται θετικός. Κάθε περίπτωση ξηρασίας, ως εκ τούτου, έχει χρονική διάρκεια που καθορίζεται από την αρχή και το τέλος της, και μια ένταση για κάθε μήνα που το φαινόμενο συνεχίζεται. Το συσσωρευμένο μέγεθος της ξηρασίας μπορεί επίσης να είναι το μέγεθος της ξηρασίας, και είναι το θετικό άθροισμα των SPI για όλους τους μήνες σε περίπτωση ξηρασίας.

3. ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ – ΔΙΚΤΥΟ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ

3.1 Περιγραφή περιοχής μελέτης

3.1.1 Γεωγραφική θέση και διοικητική υπαγωγή

Η περιοχή μελέτης της παρούσας διατριβής είναι η ευρύτερη περιοχή της λεκάνης απορροής του ποταμού Ευρώτα.

Η Λεκάνη Απορροής του ποταμού Ευρώτα (Κωδικός GR33) ανήκει στο Υδατικό Διαμέρισμα Ανατολικής Πελοποννήσου (ΠΛΑΠ 03) και βρίσκεται στο νοτιοανατολικό τμήμα της Πελοποννήσου. Η έκταση της Λεκάνης απορροής είναι 2.239 km². Το μεγαλύτερο τμήμα της εκτείνεται στην Περιφερειακή Ενότητα Λακωνίας. Τα γεωγραφικά όρια της περιοχής είναι στα δυτικά η οροσειρά του Ταϋγέτου (**Εικόνα 3.1**), στα βόρεια οι ορεινές περιοχές της Δημοτικής Ενότητας Σκιρίτιδας, στα ανατολικά η οροσειρά του Πάρνωνα και στα νότια ο Λακωνικός Κόλπος. Στην υπό μελέτη περιοχή βρίσκονται δύο κύριες πεδιάδες, η κοιλάδα της Σπάρτης και το δυτικό τμήμα της πεδιάδας της Σκάλας. Η μακρόστενη κοιλάδα της Σπάρτης στο μέσο ρου του Ευρώτα, έχει ΒΔ-ΝΑ διεύθυνση. Στο βόρειο ανατολικό ανάπτυγμα της κοιλάδας του Ευρώτα, στον άνω ρου αυτού αναπτύσσεται επίσης μια πεδινή ζώνη (Πελλάνα-Καστορείου) που απομονώνεται από την κύρια πεδινή ζώνη της Σπάρτης μέσω την λόφων που αναπτύσσονται στα ΒΔ της πόλης. Στο κέντρο περίπου της κοιλάδας παρατηρούνται λοφώδεις εξάρσεις, οι οποίες κατανέμονται γραμμικά, παράλληλα με τη γενική διεύθυνση της κοιλάδας. Η κοιλάδα διατρέχεται κατά μήκος από τον ποταμό Ευρώτα και κατά πλάτος από μια σειρά δευτερευόντων ρεμάτων που συμβάλλουν στο ποτάμι. Τέλος, στον κάτω ρου αναπτύσσεται η πεδιάδα της Σκάλας, που περιλαμβάνει την παράκτια ήπια ζώνη που καταλήγει στον Λακωνικό κόλπο και ορίζεται από μια λοφώδη περιοχή βορειοδυτικά και από μια ορεινή περιοχή στα ανατολικά (**Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2013**).

Μέσα στη λεκάνη απορροής του ποταμού Ευρώτα βρίσκονται συνολικά περίπου 95 δημοτικά διαμερίσματα από τα οποία τα 90 βρίσκονται στο Ν. Λακωνίας και τα υπόλοιπα ανήκουν στο Ν. Αρκαδίας. Ο συνολικός πληθυσμός της λεκάνης απορροής του ποταμού Ευρώτα ανέρχεται περίπου σε 63.000 κατοίκους και η λεκάνη θεωρείται αραιοκατοικημένη, σε σύγκριση με τις 15 κύριες ποτάμιες λεκάνες των Βαλκανίων (**Skoulikidis et al., 2009**).

Το μεγαλύτερο αστικό κέντρο που βρίσκεται μέσα στη λεκάνη είναι η Σπάρτη, πρωτεύουσα του νομού Λακωνίας η οποία βρίσκεται στο ΒΔ τμήμα του νομού, στις όχθες του Ευρώτα, σε υψόμετρο 210 m και έχει πληθυσμό περίπου 15000 κατοίκους.



Εικόνα 3.1. Ο Ταΰγετος

3.1.2. Γεωμορφολογικά στοιχεία

Το μεγαλύτερο τμήμα της λεκάνης απορροής είναι ορεινό και ημιορεινό. Συγκεκριμένα, το 25.6% είναι πεδινό (υψόμετρο από 0-150 m), το 37.8% ημιορεινό (υψόμετρο 150-600 m) και το 36.6% ορεινό (μεγαλύτερο από 600 m). Μεγάλο μέρος της λεκάνης καλύπτουν οι δυο μεγάλοι ορεινοί όγκοι του Ταΰγετου και του Πάρνωνα. Η υψηλότερη κορυφή του Ταΰγετου είναι ο Προφήτης Ηλίας (2404 m), μέρος του οποίου βρίσκεται στο νομό Μεσσηνίας και του Πάρνωνα η Μεγάλη Τούρλα (1935 m) η οποία βρίσκεται στα σύνορα με το νομό Αρκαδίας.

Στην περιοχή της λεκάνης απορροής του ποταμού Ευρώτα βρίσκονται δυο κύριες κοιλάδες: της Σπάρτης και της Σκάλας. Η κοιλάδα της Σπάρτης ακολουθεί ΒΔ-ΝΑ διεύθυνση. Στο κέντρο της περίπου παρατηρούνται λοφώδεις εξάρσεις, οι οποίες κατανέμονται γραμμικά, παράλληλα με τη γενική διεύθυνση της κοιλάδας. Η κοιλάδα διατρέχεται κατά μήκος από τον ποταμό Ευρώτα και κατά πλάτος από μια σειρά δευτερευόντων υδρορεμάτων, διαλείπουσας και μόνιμης ροής, με γενική διεύθυνση κάθετη προς τον Ευρώτα, στον οποίο και εκβάλλουν. Ανατολικά και δυτικά η περιοχή οριοθετείται από τους ορεινούς όγκους του Πάρνωνα και του Ταΰγέτου αντίστοιχα ([Αντωνάκος, 1997](#)). Η περιοχή της Σκάλας περιλαμβάνει μια πεδιάδα που καταλήγει στον Λακωνικό κόλπο. Οι οροσειρές φτάνουν σε υψόμετρα 200-340 m δυτικά και βορειοδυτικά και μέχρι 900 m ανατολικά. Οι κλίσεις στην βόρεια λοφώδη περιοχή είναι πιο μικρές από αυτές που παρουσιάζονται ανατολικά και δυτικά και παρουσιάζουν μέσο υψόμετρο 160-180 m ([Ανδριανάκη, 2007](#)).

3.1.3 Γεωλογία

Η σημερινή γεωμορφολογική εικόνα της Πελοποννήσου είναι αποτέλεσμα αφενός της γεωλογικής και τεκτονικής δομής και αφετέρου των εξωγενών διεργασιών που επίδρασαν επί αυτής. Στη λεκάνη απορροής του Ευρώτα ποταμού απαντώνται οι γεωτεκτονικές ζώνες της Πίνδου, της Τρίπολης, η Ιόνιος ζώνη ή Ενότητα Μάνης, τα

Στρώματα Τυρού, η Φυλλιτική – Χαλαζιτική Σειρά ή Ενότητα Άρνας και τέλος τα μεταλλικά ιζήματα.

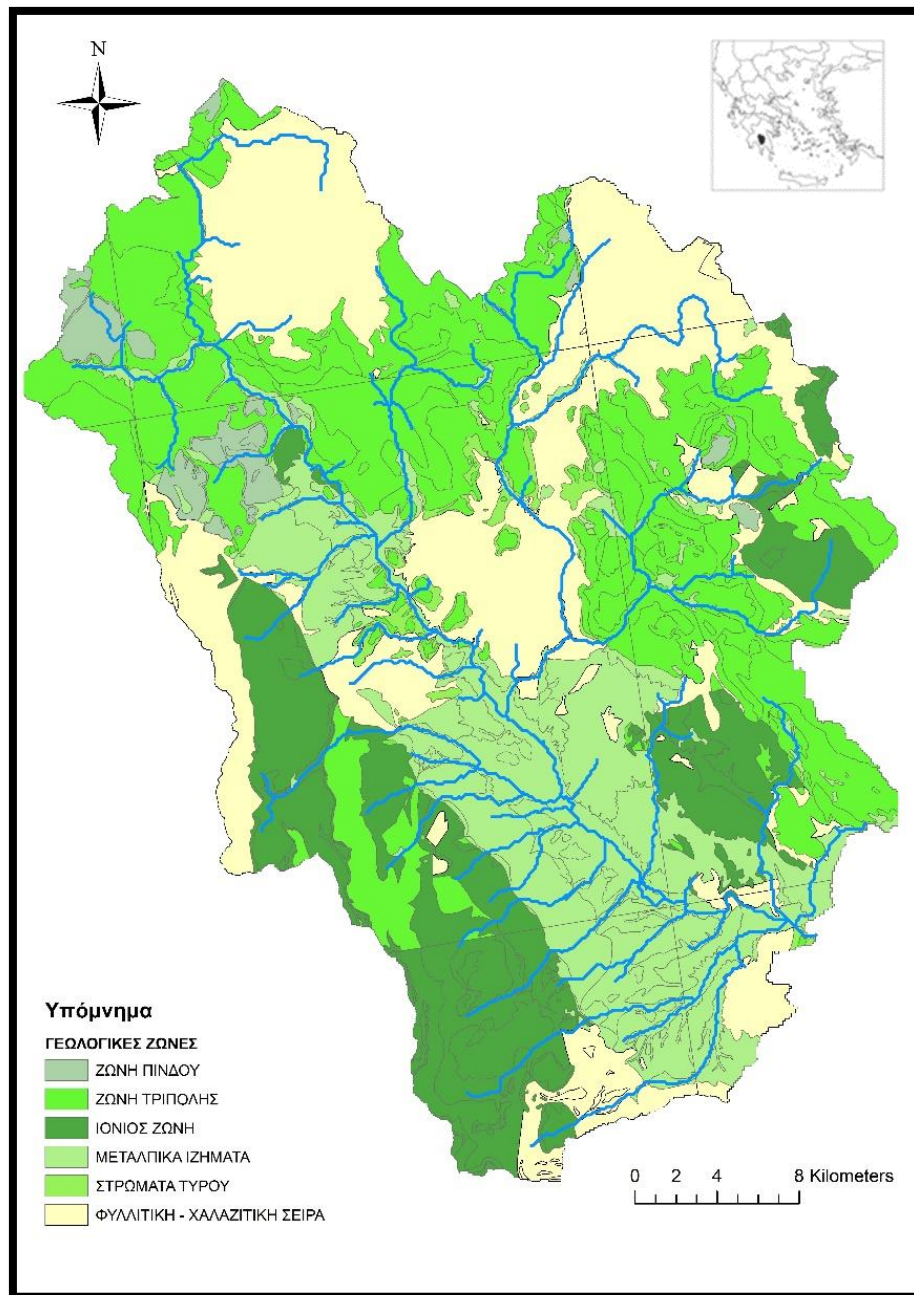
Ιόνιος ζώνη : Η Ιόνιος ζώνη αρχίζει από την Αλβανία και εκτείνεται προς τα νότια, προς τη δυτική ηπειρωτική Ελλάδα (Ηπειρο και Ακαρνανία), τα Ιόνια νησιά (Κέρκυρα, ανατολικό τμήμα Λευκάδας, Ιθάκη, ανατολική Κεφαλονιά και ένα μικρό τμήμα της Ζακύνθου) και τη βορειοδυτική Πελοπόννησο. Στο χώρο της Πελοποννήσου-Κρήτης και των άλλων νησιών οι σχηματισμοί της Ιόνιας ζώνης είναι μεταμορφωμένοι και συνιστούν τη σειρά των Plattenkalk, και μόνο στην περιοχή της Μάνης έχουμε ορατή τεκτονική επαφή της ζώνης αυτής πάνω στη σειρά των μαρμάρων της Μάνης που ανήκουν στη ζώνη των Παξών.

Η συνθετική στρωματογραφική επαλληλία της σειράς των Plattenkalk, όπως αυτή έχει διαμορφωθεί από τη συσχέτιση των επί μέρους στρωματογραφικών τομών στις περιοχές του Ταΰγετου και του Πάρωνα έχει ως εξής: σχιστόλιθοι οι οποίοι διαπιστώθηκαν σε διάφορες περιοχές κατά τη γεωλογική χαρτογράφηση της περιοχής του Ταΰγετου από το Ι.Γ.Μ.Ε., κρυσταλλικοί δολομίτες και δολομιτικοί ασβεστόλιθοι, κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι, χαλαζίτες, μάρμαρα και φλύσχης (**Κατσικάκος, 1992**). Οι ανθρακικοί σχηματισμοί είναι συνήθως μέσω έως παχυστρωματώδεις, βιτουμενιούχοι και έντονα καρστικοποιημένοι.

Ζώνη Γαβρόβου – Τρίπολης : Αποτελεί το υπόβαθρο της ζώνης της Πίνδου στην Πελοπόννησο και εμφανίζεται σε τμήματα της Κεντρικής, Ανατολικής και Δυτικής Πελοποννήσου και ως τεκτονικό παράθυρο στο βόρειο κεντρικό τμήμα αυτής (**Αντωνάκος, 1997**). Η στρωματογραφική στήλη της ενότητας της Τρίπολης απαρτίζεται από τρία σύνολα. Στην βάση της βρίσκεται ένα σύνολο ελαφρώς μεταμορφωμένων σχηματισμών, γνωστό ως «στρώματα Τυρού». Τα στρώματα Τυρού χαρακτηρίζονται από δύο σημαντικές σειρές, μία ιζηματογενή από κλαστικά και ανθρακικά πετρώματα, ηλικίας Ανώτερο Παλαιοζωικό και μία ηφαιστειοϊζηματογενή, τριαδικής ηλικίας. Πάνω από τα στρώματα Τυρού, βρίσκεται μία ανθρακική ακολουθία.

Η ακολουθία αυτή αποτελείται από βιτουμενιούχους παχυστρωματώδεις έως άστρωτους ασβεστόλιθους και δολομίτες, γνωστούς σαν Tripolitza kalk. Βασικό στοιχείο που διαφοροποιεί τα ανθρακικά της στρωματογραφικής στήλης μεταξύ τους είναι τα απολιθώματα. Πάνω από την ανθρακική ακολουθία υπάρχει ο φλύσχης, του οποίου η ιζηματογένεση αρχίζει στο ανώτερο Ηώκαινο. Η επαφή των ασβεστόλιθων με τον φλύσχη μπορεί να είναι στρωματογραφική ή τεκτονική. Στο ανώτερο τμήμα του ο φλύσχης περιέχει ένα συνονθύλευμα από διάφορα εξωτικά τεμάχια ποικίλης φύσης, σχήματος και μεγέθους. Ο σχηματισμός αυτός είναι γνωστός ως «άγιος φλύσχης» (**Καραλέμας, 2006**).

Στην **Εικόνα 3.2** παρουσιάζεται η γεωλογία της περιοχής της λεκάνης απορροής του ποταμού Ευρώτα ως προς τις γεωτεκτονικές ενότητες της περιοχής.



Εικόνα 3.2. Γεωλογία της λεκάνης απορροής του ποταμού Ευρώτα ως προς τις γεωτεκτονικές ενότητες

Στην περιοχή του Ταΰγετου απαντώνται όλα τα τμήματα της στρωματογραφικής στήλης της ενότητας, εκτός από τον «άγριο φλύσχη», όμως η εμφάνιση της ενότητας περιορίζεται στο βόρειο και στο νοτιοανατολικό τμήμα του. Στα σημεία όπου υπέρκειται των φυλλιτών–χαλαζιτών, πάνω από την τεκτονική επαφή παρατηρείται είτε το ανθρακικό τμήμα της στρωματογραφικής στήλης της Τρίπολης, είτε τα στρώματα Τυρού (Καραλέμας, 2006, Κατσιακάκος, 1992). Επίσης, στο νότιο τμήμα της Πελοποννήσου, πάνω στην Ιόνιο ζώνη και στη περιοχή του όρους Κυλλήνης παρουσιάζεται μια επιμέρους ενότητα σχηματισμών (φυλλιτών–χαλαζιτών), η

προέλευση και ο σχηματισμός της οποίας ακόμη δεν έχει εξακριβωθεί πλήρως. Η παρουσιαζόμενη στα φύλλα του Ι.Γ.Μ.Ε. 1:50.000 (Σπάρτη, Καλαμαί, Καρδαμύλη) άποψη, ότι οι σχηματισμοί της σειράς αυτής αποτελούν μέλη των βαθύτερων οριζόντων της ζώνης Γαβρόβου- Τρίπολης, είναι μία από τις επικρατέστερες σήμερα από πολλούς ερευνητές.

Ζώνη Πίνδου : Η ζώνη της Πίνδου, βρίσκεται τεκτονικά πάνω από τις προηγούμενες ενότητες. Στην περιοχή μελέτης εμφανίζεται ένα τμήμα της στρωματογραφικής στήλης της ενότητας, το οποίο αποτελεί τμήμα του Αρκαδικού Καλύμματος ή Αρκαδικής Τράπεζας. Ο κατώτερος στρωματογραφικός ορίζοντας που παρατηρείται είναι μία κλαστική σειρά από εναλλαγές ψαμμιτών, πηλινών και ραδιολαριτών με ενδιαστρώσεις λατυποπαγών ασβεστόλιθων, κενομάνιας ηλικίας, για την οποία έχει επικρατήσει ο όρος «Πρώτος Φλύσχη». Ακολουθούν οι «πλακώδεις ασβεστόλιθοι» με *Globotruncanidae*, οι οποίοι αποτελούν την πλέον διαδεδομένη φάση της ενότητας στην κεντρική και νότια Πελοπόννησο. Πρόκειται για μικριτικούς ασβεστόλιθους με λίγες ενδιαστρώσεις ή κονδύλους πυριτόλιθων. Πάνω από τους ασβεστόλιθους αυτούς βρίσκονται τα μεταβατικά προς το φλύσχη στρώματα και ο φλύσχη της ενότητας. Επιπροσθέτως, έχει αναφερθεί η ύπαρξη ανθρακικών πετρωμάτων μικρού πάχους κάτω από τους ανωκρητιδικούς ασβεστόλιθους και κάτω από το σχηματισμό του «Πρώτου Φλύσχη» στην περιοχή του Πάρνωνα. Από τους παραπάνω σχηματισμούς, στην περιοχή του Ταΰγετου απαντώνται μόνο ο Πρώτος Φλύσχη και οι ανωκρητιδικοί ασβεστόλιθοι.

Η ενότητα της Πίνδου εμφανίζεται σε μικρά υπολειμματικά ράκη, στο βόρειο τμήμα της περιοχής μελέτης. Τα μικρά αυτά καλύμματα, τα οποία είναι αποκομμένα μεταξύ τους, έχουν υποστεί μετακαλυμματικές ολισθήσεις εξαιτίας της βαρύτητας με αποτέλεσμα να απαντώνται σε ορισμένα σημεία πάνω από το φλύσχη της ενότητας της Τρίπολης και σε άλλα πάνω από τους φυλλίτες- χαλαζίτες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η επαφή μικρής κλίσης του Πρώτου Φλύσχη της ενότητας της Πίνδου, πάνω στους φυλλίτες-χαλαζίτες που παρατηρείται βορείως του Δ.Δ. Γεωργιτσίου (Καραλέμας, 2006).

Μεταλλικοί σχηματισμοί : Η παρουσία των μεταλλικών σχηματισμών στην περιοχή μελέτης επικεντρώνεται στα μεγάλα τεκτονικά βυθίσματα, τα οποία είναι κατά κύριο λόγο το βύθισμα της Πελλάνας, το βύθισμα της Σπάρτης και το βύθισμα των Αιγίων βορείως του Γυθείου. Τα δύο πρώτα βυθίσματα οριοθετούνται δυτικά από το περιθωριακό ρήγμα του Ταΰγετου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αναπτύσσονται μεγάλης έκτασης και πάχους κώνοι κορημάτων πλειστοκαινικής ηλικίας, οι οποίοι προέρχονται από την διάβρωση εξαιτίας της μεγάλης ανύψωσης του κέρατος του Ταΰγετου. Οι κώνοι αυτοί, όπως είναι φυσικό αποτελούνται από κροκάλες και λεπτομερές υλικό των σχηματισμών που δομούν το κέρα, δηλαδή των Φυλλιτών-Χαλαζιτών και των μαρμάρων της Μάνης. Τα υλικά αυτά παρουσιάζονται χαλαρά και

σχεδόν αδιαβάθμητα. Κάτω από τους κώνους βρίσκονται πλειο-πλειστοκαινικοί, λιμναίοι σχηματισμοί, οι οποίοι παρουσιάζουν διάφορες λιθολογίες. Μπορούν να διαχωριστούν σε ένα σχηματισμό συνεκτικών ανθρακικών κροκαλοπαγών, πλειο-πλειστοκαινικής ηλικίας, που εναλλάσσεται με μάργες και ψαμμίτες και ένα δεύτερο σχηματισμό πλειστοκαινικής ηλικίας, αποτελούμενο από αργίλους, άμμους, λατύπες και εναλλαγές κροκαλοπαγών, τα οποία κατά θέσεις παρουσιάζουν διαβάθμιση ενώ σε άλλα σημεία εμφανίζονται διάσπαρτα. Πάνω από όλους τους σχηματισμούς βρίσκονται οι αλλουβιακές αποθέσεις ολοκαινικής ηλικίας, οι οποίες καταλαμβάνουν μεγάλη έκταση εξαιτίας της μεταφορικής ικανότητας του ποταμού Ευρώτα και των παραποτάμων του. Νοτίως της ζώνης Χάνια Τάραψας–Δαφνί, οι λιμναίοι σχηματισμοί δίνουν την θέση τους σε θαλάσσιους. Παράλληλα, σταματά η εξάπλωση των κώνων κορημάτων, με αποτέλεσμα την επικράτηση θαλασσίων σχηματισμών, οι οποίοι αποτελούνται από ασβεστοψαμμιτικούς και αμιγείς αργίλους, τεφρές μάργες και αραιές στρώσεις οργανογενών ψαμμιτικών ασβεστόλιθων πλειοκαινικής ηλικίας **(Καραλέμας, 2006)**.

3.1.4 Επιφανειακά υδρολογικά συστήματα

Το βασικό υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης απορροής της περιοχής μελέτης έχει μήκος 1500 km. Τα κύρια υδρολογικά συστήματα της περιοχής μελέτης που εκβάλουν στον Δέλτα στο Ευρώτα μπορούν να διαχωριστούν σε τρεις ομάδες υδρολογικών συστημάτων.

- Το υδρολογικό σύστημα του Ευρώτα, που αποστραγγίζει το μεγαλύτερο τμήμα του ανατολικού Ταυγέτου και του δυτικού Πάρνωνα. Ξεκινάει από την Αρκαδία, και καταλήγει στο Λακωνικό κόλπο. Από την περιοχή της Σκάλας και νότια, ο Ευρώτας εισέρχεται στη δελταϊκή του περιοχή και δεν υπάρχουν υπολεκάνες που συμβάλλουν απευθείας στην κύρια κοίτη του ποταμού.
- Το δελταϊκό σύστημα του Ευρώτα, στο οποίο εκτός από την κύρια κοίτη του ποταμού συμβάλλουν λεκάνες από το νότιο Πάρνωνα και το ανατολικό περιθώριο του Δέλτα (που καταλήγουν στη περιοχή Έλος), αλλά και από το δυτικό περιθώριο του Δέλτα (που συμβάλλουν στο Βασιλοπόταμο).
- Τα υδρολογικά συστήματα που απορρέουν απευθείας στο Λακωνικό Κόλπο, από τον Μακρύγιαλο μέχρι τον όρμο της Ελαίας στα ανατολικά, και από την Τρίνησα μέχρι τον όρμο του Στομίου στα δυτικά **(Μαριολάκος κ.ά., 2007)**.

Ο ποταμός Ευρώτας τροφοδοτείται από μια σειρά πηγών, πολλές από τις οποίες βρίσκονται κατά μήκος της κοίτης του και είναι σταθερής ή διαλείπουσας παροχής. Χαρακτηριστικό του ποταμού Ευρώτα είναι η ύπαρξη τμημάτων κατά μήκος του, που στερεύουν το καλοκαίρι λόγω της υπεράντλησης του νερού των πηγών και του

υπόγειου νερού που τον τροφοδοτούν για αρδευτικούς λόγους. Ο Ευρώτας ακολουθεί την τάφρο της Τριπόλεως και μέσω χαραδρώσεων και ελιγμών εισέρχεται στην πεδιάδα της Σπάρτης, για να καταλήξει στο ύψος του Πυρί Λευκοχώματος σε ασβεστολιθικούς όγκους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο Ευρώτας να χάνεται στους ασβεστολιθικούς όγκους (υδροπερατό πέτρωμα) και να εμφανίζεται πάλι στην περιοχή της Σκάλας, για να εκβάλλει στο Λακωνικό κόλπο **(Μαυρομιχάλης, 1993)**.

Με εξαίρεση το τμήμα μεταξύ Φούσσας και Μύλου, μέχρι την γέφυρα της Σκάλας, ο Ευρώτας παραμένει μέσα στον καρστικό ασβεστολιθικό όγκο, ενώ, μεταξύ Φούσσας και Μύλου, διέρχεται μέσα από νέα διαπερατά ιζήματα που υπέρκεινται των ασβεστόλιθων. Από το Φιλίσσι μέχρι την γέφυρα της Σκάλας, το ίζημα του ποταμού αποτελείται από χαλίκι και άμμο πάχους περίπου 40 m, που υπέρκεινται άμεσα των ασβεστόλιθων. Αξίζει να σημειωθεί ακόμη, ότι κατά μήκος του καρστικού όγκου, που διαρρέει ο Ευρώτας από την γέφυρα του Βρονταμά έως και (μερικά εκατοντάδες μέτρα μετά) τη γέφυρα της Σκάλας, ανάλογα με το υδραυλικό ισοζύγιο, μπορεί να συμβεί διήθηση προς τους ασβεστολίθους ή επαναδιήθηση από το καρστ στο ποτάμι. Ο εν λόγω καρστικός υπόγειος ταμιευτήρας συνδέεται μερικώς με τους ιζηματογενείς, αρτεσιανούς υδροφόρους των περιοχών Έλους και Τρινάσσου.

Στη συνέχεια, ο ποταμός Ευρώτας από την περιοχή της Σκάλας και μετά (με νότια κατεύθυνση) εισέρχεται στην δελταϊκή του περιοχή, στην οποία δεν υπάρχουν υπολεκάνες, οι οποίες να τροφοδοτούν απευθείας την κύρια κοίτη του. Το δελταϊκό σύστημα του Ευρώτα περιλαμβάνει την κύρια κοίτη του ποταμού, αλλά και τη συμβολή υπολεκανών από το νότιο Πάρνωνα και το ανατολικό περιθώριο του δέλτα (που καταλήγουν στην περιοχή Έλος) και το δυτικό περιθώριο του δέλτα (που συμβάλουν στην τάφρο Ω). Ο Ευρώτας έχει αποστραγγιστικό ρόλο για τις παράπλευρες περιοχές του Έλους και του Τρινάσσου. Έπειτα από μερικά εκατοντάδες μέτρα μετά την γέφυρα της Σκάλας δεν σημειώνονται αξιοσημείωτες βαθιές κατεισδύσεις καθώς υπάρχουν αδιαπέρατα στρώματα που διαχωρίζουν το βαθύτερο αρτεσιανό υδροφορέα από τον ανώτερο ελεύθερο υδροφορέα. Τέλος, στην περιοχή εμφανίζονται υδρολογικά συστήματα που απορρέουν απευθείας στον Λακωνικό Κόλπο, από τον Μακρύγιαλο μέχρι τον όρμο Ελαίας στα ανατολικά, και από την Τρίνη μέχρι τον όρμο του Στομίου δυτικά **(Νικολαΐδης κ.α., 2006)**.

Οι σημαντικότεροι παραπόταμοι και χείμαρροι του ποταμού Ευρώτα είναι:

Κελεφίνα ή Οινούς ποταμός

Ο σημαντικότερος παραπόταμος του Ευρώτα από την πλευρά του Πάρνωνα. Παλαιά είχε ροή όλο το χρόνο, αλλά τώρα διατηρεί νερό μόνο το τελευταίο τμήμα του. Σε περιόδους ξηρασίας στερεύει σε όλο το μήκος του **(Εικόνα 3.3)**.

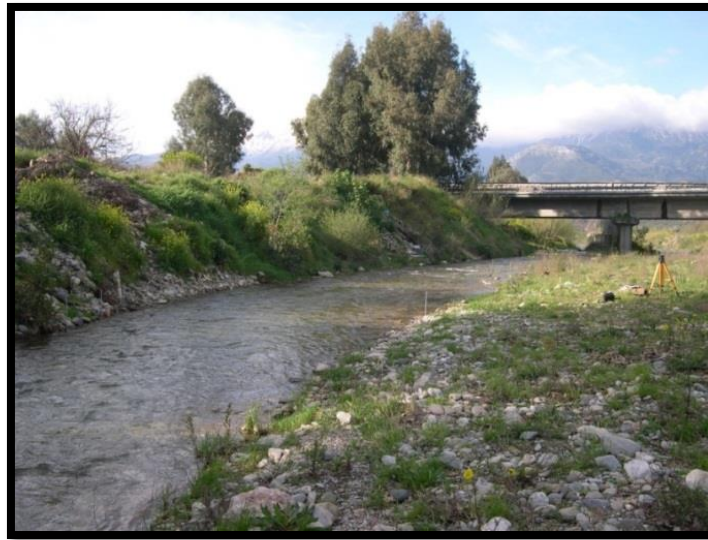
«Ολοκληρωμένο πλαίσιο μοντελοποίησης υδρολογίας, ποιότητας νερών και στερεοπαροχής σε λεκάνες απορροής ποταμών διαλείπουσας ροής»

Μαριόρεμα

Συναντά τον Ευρώτα στο κατώτερο τμήμα του από τη πλευρά του Πάρνωνα και δίνει μόνο πλημμυρικές παροχές. Το 2005 πλημμύρισε προκαλώντας μεγάλες καταστροφές.

Γερακάρης, Κάκαρης, Ρασίνα.

Διατηρούν ροή στα ψηλότερα τμήματά τους, αλλά λόγω αρδεύσεων το νερό δεν φθάνει στον Ευρώτα.



Εικόνα 3.3. Παραπόταμος Κελεφίνα (περιοχή Κλαδάς)

Μαγουλίτσα

Μικρό σε μήκος, αλλά σημαντικό από πλευράς παροχής ρέμα, που κινείται παράλληλα στο δρόμο Σπάρτης - Καλαμάτας. Τροφοδοτείται από σημαντικές πηγές, όπως αυτή της Τρύπης. Λόγω δέσμευσης νερού για την άρδευση και ύδρευση της Σπάρτης, το νερό δεν φθάνει στον Ευρώτα (**Εικόνα 3.4**). Ο χείμαρρος Μαγουλίτσα σύμφωνα με μαρτυρίες κατοίκων εμφανίζει πλημμυρικά φαινόμενα κατά μέσο όρο ανά τρία χρόνια την τελευταία δεκαετία. Η κυριότερη αιτία έγκειται στην καταπάτηση της παρόχθιας ζώνης του παραπόταμου, σε κακοτεχνίες και σε ανεξέλεγκτη διάθεση μάζων στην κοίτη του Ευρώτα.

Ξεριάς

Ήταν κάποτε σημαντικός παραπόταμος με έντονη υπόγεια υδροφορία. Από την περιοχή αυτή υδρεύεται η Σπάρτη.



Εικόνα 3.4. Παραπόταμος Μαγουλίτσα (δίπλα στο εκκλησάκι Αγ. Ειρήνη)

Ποταμός Βασιλοπόταμος (σήμερα ονομάζεται τάφρος Ω)

Το όνομα Βασιλοπόταμος δίνεται σε τρία διαφορετικά υδάτινα συστήματα που διαρρέουν το κατώτερο άκρο της Λακωνικής πεδιάδας, μεταξύ Γυθείου και εκβολών Ευρώτα. Μόνο το ένα από αυτά (αυτό που εκβάλλει βόρεια του Γυθείου) έχει τα χαρακτηριστικά ποταμού. Η ροή του νερού κατά τη καλοκαιρινή περίοδο είναι ασθενής και υπάρχει παρουσία φυτικής βλάστησης.

Στο βόρειο τμήμα της λεκάνης απορροής του Ευρώτα οι κυριότεροι παραπόταμοι είναι ο ποταμός Κάστωρ και το Βαθύρρεμα ή Βρυσσιώτικο ρέμα το οποίο διατηρεί ροή καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου.

Σημαντικά ρέματα στο νοτιότερο τμήμα της λεκάνης απορροής του ποταμού Ευρώτα είναι ο ποταμός Σμύνους ή Βαρδούνιας. Ο ποταμός Βαρδούνιας πηγάζει από το νότιο τμήμα του Ταΰγετου κοντά στην Αγ. Μαρίνα, και εκβάλλει στη θάλασσα νότια του Γυθείου, κοντά στο χωριό Κάμπος. Τα πρώτα 5-6 χιλιόμετρα διατηρούν νερό όλο το χρόνο (Νικολαΐδης κ.α., 2006).

Στη λεκάνη του Ευρώτα έχουν κατασκευαστεί αποστραγγιστικές τάφροι στην περιοχή μεταξύ Γυθείου και εκβολών Ευρώτα. Οι τάφροι αυτοί δεν επικοινωνούν με τον Ευρώτα, αλλά τα νερά τους συγκεντρώνονται σε αντλιοστάσιο στη Τρίνισα και διοχετεύονται στη θάλασσα. Η πλησιέστερη προς τον Ευρώτα τάφρος (Τάφρος Ω-Βασιλοπόταμος), δέχεται νερά από τις πηγές της Σκάλας, από τις οποίες τροφοδοτείται και το κατώτερο τμήμα του Ευρώτα.

Συνεπώς, η τάφρος Ω διατηρεί επικοινωνία με τον Ευρώτα. Η τάφρος έχει αρκετό βάθος (σε ορισμένα σημεία μεγαλύτερο από τρία μέτρα) και πλούσια υδροχαρή βλάστηση. Έχει νερό όλο το χρόνο, αλλά σε ορισμένες περιόδους το νερό είναι στάσιμο. Η δεύτερη τάφρος βρίσκεται κοντά στο Σούλιο (τάφρος Π), η οποία επίσης

διατηρεί αρκετό νερό με μικρότερη, όμως, ροή. Τα νερά απομακρύνονται προς τη θάλασσα μέσω αντλιοστασίου, υπάρχει όμως και απ' ευθείας επικοινωνία με τη θάλασσα (Ανδριανάκη, 2007; Νικολαΐδης κ.ά., 2006).

3.1.5 Υδροφορίες

Από την λιθοστρωματογραφία των σχηματισμών που περιγράφεται παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι η περιοχή μελέτης απαρτίζεται από πλήθος υδροφορέων, ο καθένας από τους οποίους χαρακτηρίζεται από διαφορετικές υδρογεωλογικές ιδιότητες. Παράλληλα, η τεκτονική δομή της περιοχής φέρνει ποικιλοτρόπως σε επαφή τους διάφορους σχηματισμούς με αποτέλεσμα να υπάρχει υδραυλική επικοινωνία μεταξύ τους.

Σε γενικές γραμμές, διακρίνονται τρεις τύποι υδροφορέων στην ευρύτερη περιοχή, όσον αφορά την φύση του υδροφορέα:

- Καρστικοί υδροφορείς.
- Κοκκώδεις, φρεάτιοι ή μερικώς υπό πίεση υδροφορείς που αναπτύσσονται στα ιζήματα των λεκανών και στον αποσαθρωμένο μανδύα κλαστικών πετρωμάτων.
- Υδροφόροι που αναπτύσσονται σε μέσο ασυνεχειών, μέσα στο δευτερογενές πορώδες (σε μεταμορφωμένα και πυριγενή πετρώματα λόγω τεκτονισμού, που υπό άλλες συνθήκες θεωρούνται αδιαπέρατα, π.χ. χαλαζίτες).

Πίνακας 3.1. Συστήματα κοκκωδών σχηματισμών

Σύστημα	Έκταση (km ²)	Αποθέματα (m ³ ×10 ⁶)	Κύριοι υδροφόροι σχηματισμοί
Λεκάνη Άνω ρου Ευρώτα	220	22,5	Τεταρτογενή/Νοεγενή
Λεκάνη Μέσου και Κάτω ρου Ευρώτα	275	16	Τεταρτογενή/Νοεγενή

Πίνακας 3.2. Καρστικά πεδία ευρύτερης περιοχής

Σύστημα	Έκταση (km ²)	Αποθέματα (m ³ ×10 ⁶)	Κύριοι υδροφόροι σηματισμοί	Εκφόρτιση
Κεντρικού Ταΰγετου	175	32	Μάρμαρα και ασβεστόλιθοι	Πηγές Γοράνων, Τρύπης. Ξηροκαμπίου κ.α
Πελάνας, Βιβαρίου, Κονιδίτσας	150	65	Κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι	Πηγές Πελάνας και Κονιδίτσας
Κεντρικού Πάρνωνα	420	70	Κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι και μάρμαρα	Πλευρικές μεταγγίσεις στις αποθέσεις της λεκάνης του Ευρώτα (μέσος και άνω ρους)

Κοιλάδα της Σπάρτης

Η κοιλάδα της Σπάρτης (**Εικόνα 3.5**) χαρακτηρίζεται από μια σειρά επάλληλων, ελεύθερων-ημιαρτεσιανών και αρτεσιανών υδροφορέων στις αποθέσεις του ολοκαίνου και πλειστοκαίνου, καθώς και από την ύπαρξη του καρστικού υδροφορέα στους ασβεστόλιθους και δολομίτες στα δυτικά της περιοχής. Ο ελεύθερος υδροφορέας παρουσιάζεται ενιαίος και μεταπίπτει σε ημιεγκλωβισμένο στο κέντρο της κοιλάδας με πάχος 5-15 m και ακόρεστη ζώνη 2-13 m σε όλη την περιοχή. Ακόμη, φαίνεται να έχει μια θετική υδραυλική σε σχέση με τον Ευρώτα στα κεντρικά και νότια της περιοχής ενώ η σχέση αυτή δε διακρίνεται στα βόρεια της περιοχής. Επίσης, διαφαίνεται μια σχέση τροφοδοσίας με τα παραπλήσια καρστικά υδροφόρα συστήματα. Η υδραυλική αγωγιμότητα του υδροφόρου κυμαίνεται από 1×10^{-4} έως και 6×10^{-4} m/s. Η γεωγραφική κατανομή της υδραυλικής αγωγιμότητας φανερώνει μια περιοχή υψηλών τιμών κατά μήκος της κοίτης του ρέματος Ξεριάς καθώς επίσης και μια ζώνη υψηλών τιμών κατά μήκος της κοίτης του Ευρώτα (**Αντωνάκος, 1997**).



Εικόνα 3.5. Η κοιλάδα της Σπάρτης

Πεδιάδα της Σκάλας

Στην περιοχή του κάτω ρου του Ευρώτα νότια της περιοχής της Σκάλας υπάρχει ελεύθερος υδροφορέας, ο οποίος διαχωρίζεται από τον αρτεσιανό από αδιαπέραστα στρώματα (μάργες ή ιλυώδης μάργες). Η τροφοδοσία του υδροφορέα προέρχεται από την διήθηση των βροχοπτώσεων, από την ροή του υπογείου νερού από τα ανάντη και από τους κατώτερους αρτεσιανούς υδροφορείς (καρστικοί και αδρομερείς ιζηματογενείς), με πολύ μικρό όμως ρυθμό, λόγω των αδιαπέρατων στρωμάτων μεγάλου πάχους που τους χωρίζει. Ο υδροφορέας αποτελείται από μαργαϊκά στρώματα τα οποία είναι αναμεμιγμένα με άμμο και νεκρά κελύφη. Μόνο στα νότια της πεδιάδας της Σκάλας εντοπίζονται στρώματα λεπτόκοκκης άμμου πάχους μέχρι και 30-40 m. Λόγω του μικρού πάχους του, και του χαμηλού πορώδους που εμφανίζει, ο εν λόγω υδροφορέας δεν έχει τόσο μεγάλα αποθέματα νερού. Ακόμη, η μεταβιβασιμότητα T , όπως επίσης και η αποθηκευτική ικανότητα είναι τόσο μικρή που δεν είναι δυνατή η μεγάλης κλίμακας εκμετάλλευσή του.

Από την άλλη πλευρά ο αρτεσιανός υδροφορέας του κάτω ρου του Ευρώτα τροφοδοτείται από περιοχές βόρεια και βορειοανατολικά της Σκάλας και ίσως από πιο βόρειες περιοχές της λεκάνης απορροής. Είναι σίγουρο ότι περιοχές σημαντικής διήθησης εντοπίζονται ανατολικά και βορειοανατολικά του Βρονταμά, όπως επίσης και βορειοανατολικά του χωριού Αγ. Ανδρέας. Σε αυτές τις περιοχές, μάλιστα, ένα αξιοσημείωτο τμήμα της επιφάνειας αποτελείται από καρστικοποιημένους ασβεστόλιθους της ζώνης Τρίπολης, με αποτέλεσμα να επιτρέπεται η γρήγορη βαθιά διήθηση των βροχοπτώσεων. Μεταξύ των περιοχών Αγ. Ανδρέας και Γεράκι υπάρχει μια επίπεδη μορφολογικά λεκάνη με βόρεια κατεύθυνση. Η λεκάνη είναι πληρωμένη με

πολύ αδρόκκοκα ιζήματα που υπέρκεινται των νεογενών και του καρστ. Έτσι, σύμφωνα με την γεωλογική στρωματογραφία που παρουσιάζει η περιοχή το διηθημένο νερό της λεκάνης του άνω ρου του Ευρώτα δεν έχει άλλη δυνατότητα από το να τροφοδοτήσει τους αρτεσιανούς υδροφορείς του κάτω ρου και να καταλήξει στον Λακωνικό Κόλπο (τροφοδοτεί ακόμη της πηγές της Σκάλας). Βόρεια του Μύλου, ανατολικά του Ευρώτα, εμφανίζεται μια περιοχή με νεογενή ιζήματα με μικρότερους ρυθμούς στράγγισης (Αντωνάκος, 1997).

3.1.6 Πηγές

Οι καρστικοί υδροφορείς και οι καρστικές πηγές παίζουν σημαντικό ρόλο στην υδρογεωλογία και υδρολογία της λεκάνης απορροής του ποταμού Ευρώτα. Στην περιοχή μελέτης, καθώς και σε ολόκληρη την Ελλάδα, η καρστικοποίηση συνδέεται σχεδόν αποκλειστικά με τους ανθρακικούς σχηματισμούς, καθώς τα συγκεκριμένα πετρώματα παρουσιάζουν πολύ μεγάλη εξάπλωση. Καρστικοί σχηματισμοί μπορούν να βρεθούν οπουδήποτε και ιδιαίτερα κατά μήκος τεκτονικών δομών και ρηγμάτων.

Σε όλες τις γεωλογικές ενότητες που εμφανίζονται στην ορεινή περιοχή της λεκάνης απορροής του ποταμού Ευρώτα παρουσιάζονται τμήματα ανθρακικών πετρωμάτων τα οποία είναι έντονα καρστικοποιημένα. Οι υδροφορείς των σχηματισμών αυτών παρουσιάζουν μεγάλη δυναμικότητα. Επίσης όταν ένας καρστικός σχηματισμός έρθει σε επαφή με σχηματισμούς μικρότερης διαπερατότητας, όπως συμβαίνει κατά κόρον στους πρόποδες του Ταΰγετου, δημιουργεί τη συγκέντρωση μεγάλης ποσότητας νερού στον καρστικό σχηματισμό. Όταν το νερό αυτό φτάνει στην επιφάνεια, δημιουργείται μια ρηξιγενής πηγή υπερπλήρωσης. Τέτοιου είδους πηγές μπορεί να εκφορτίζουν και σε κοκκώδεις υδροφορείς. Ο μηχανισμός που περιγράφηκε παραπάνω αποτελεί των μηχανισμό λειτουργίας των περισσότερων πηγών που απαντώνται στην περιοχή μελέτης. Στον **Πίνακα 3.3** παρουσιάζονται οι κυριότερες πηγές της λεκάνης απορροής του ποταμού Ευρώτα, ο μηχανισμός λειτουργίας τους και άλλα χαρακτηριστικά.

Μία σημαντική ομάδα πηγών είναι οι πηγές της Σκάλας, οι οποίες συνοψίζονται σε 11 ομάδες πηγών και εντοπίζονται στους πρόποδες του βουνού, στην δυτική πλευρά του χωριού της Σκάλας. Οι πηγές της Σκάλας τροφοδοτούν τον Βασιλοπόταμο (Τάφρος Ω) και οφείλουν την ύπαρξη τους στην επαφή των βορειότερων καρστικών ασβεστόλιθων με τα νεογενή και τεταρτογενή ιζήματα της κοιλάδας κατά μήκος της Δ-Α ρηγματογενούς ζώνης (καρστικές πηγές επαφής-υπερπλήρωσης).



Εικόνα 3.6. Οι πηγές της Τρύπης

Το καρστικό σώμα που εντοπίζεται βορειοδυτικά της Σκάλας, σε μεγάλη έκταση, με βορειοδυτική κατεύθυνση και μεγάλο πάχος, διαπερνάτε από τον ποταμό Ευρώτα και αποτελεί έναν σημαντικό ταμιευτήρα υπόγειου νερού. Κατά μήκος του ανατολικού τμήματος της περιοχής της Σκάλας ο καρστικός ασβεστόλιθος υπέρκειται και πάλι του αδιαπέρατου στρώματος Τυρού. Όμως εξαιτίας του πάχους του, το συγκεκριμένο καρστ είναι σε θέση να αποθηκεύσει μόνο μικρές ποσότητες νερού, το οποίο εκφορτίζεται σε κάποιες πηγές κοντά στην Άνω Γλυκόβρυση. Παρόμοιες συνθήκες δημιουργούν και τις πηγές Πανιγίστρα, κάτω από την γέφυρα της Σκάλας, οι οποίες όμως είναι μικρότερης σημασίας. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι το εν λόγω καρστικό όγκος τροφοδοτείται, πέρα από τον Ευρώτα, και από τον χείμαρρο Κεφαλάρι, αλλά και από σημαντικές ποσότητες υπόγειας ροής από την ανώτερη λεκάνη. Το υπόγειο νερό που δεν μπορεί να εκφορτιστεί από τις πηγές, τροφοδοτεί τους αρτεσιανούς υδροφορείς της Σκάλας (Ανδριανάκη, 2007).

Πίνακας 3.3. Κυριότερες πηγές που βρίσκονται στη λεκάνη απορροής του ποταμού Ευρώτα, οι
μηχανισμοί λειτουργίας τους και τα χαρακτηριστικά τους (Νικολαΐδης κ.ά., 2006)

Πηγή	Τοποθεσία	Τύπος	Εκτίμηση παροχής (m ³ /h)	Μέση παροχή (m ³ /h)	Cl ⁻ (mg/l)	Χρήση
Πενταύλοι	Ξηροκάμπιο	Καρστική επαφής- υπερπλήρωσης	96		9	Υδρευση- Άρδευση
Σκάλας	Σκάλα	Καρστική επαφής- υπερπλήρωσης		7393	31	Υδρευση- Άρδευση
Αγ. Μαρίνα	Άρνα	Καρστική επαφής- υπερπλήρωσης	475		9	Υδρευση- Άρδευση
Αγ. Μαμά	Καστόριο	Καρστική επαφής- υπερπλήρωσης	133		11	Υδρευση- Άρδευση
Κρίσα	Φοινίκι	Καρστική επαφής- υπερπλήρωσης				
Πελλάνα	Πελλάνα	Καρστική επαφής- υπερπλήρωσης				Υδρευση- Άρδευση
Ζορός	Κονιδίτσα	Καρστική επαφής- υπερπλήρωσης				Υδρευση- Άρδευση
Στερνάκλες	Γύθειο	Καρστική παράκτια	146		2535	Ανεκμετάλλευτη
Λακωνίς	Γύθειο	Καρστική παράκτια	50		4202	Ανεκμετάλλευτη
Ελαία Μολάων	Ελαία	Καρστική παράκτια	5400		879	Ανεκμετάλλευτη
Βιβαρίου	Σελλασία	Καρστική επαφής- υπερπλήρωσης		3825	14	Υδρευση- Άρδευση
Δημαρά	Βρέσθενα	Καρστική επαφής- υπερπλήρωσης	126		18	Υδρευση- Άρδευση
Τρύπης	Τρύπη	Καρστική επαφής- υπερπλήρωσης	>150		9	Υδρευση- Άρδευση
Παρορείου	Παρόρειο	Καρστική επαφής- υπερπλήρωσης	108		7	Υδρευση- Άρδευση
Σωτήρος	Ανώγεια	Καρστική επαφής- υπερπλήρωσης	707		6	Υδρευση- Άρδευση

3.1.7 Κλιματολογικά στοιχεία

Στο Νομό Λακωνίας όπως και στο μεγαλύτερο μέρος του Ελλαδικού χώρου έχουμε ανισομερή κατανομή των βροχοπτώσεων τόσο στο χώρο όσο και στο χρόνο με μια γενική τάση μείωσης απ' τα Δυτικά προς τα Ανατολικά και απ' τα Βόρεια προς τα Νότια.

Η λεκάνη απορροής του ποταμού Ευρώτα παρουσιάζει μεσογειακού τύπου κλίμα, με θερμά καλοκαίρια και υγρούς χειμώνες. Η μέση ετήσια θερμοκρασία κυμαίνεται από 4-11°C τον χειμώνα και μεταξύ 22-29 °C το καλοκαίρι. Οι βροχοπτώσεις έχουν τάση αύξησης από τα νότια προς τα βόρεια τμήματα και από τα ανατολικά προς στα δυτικά. Το μεγαλύτερο ποσοστό βροχοπτώσεων παρατηρείται την περίοδο Οκτωβρίου-Μαρτίου, με πιο υγρό μήνα το Δεκέμβριο, ενώ ο πιο ξηρός μήνας είναι ο Ιούνιος. Η ορεινή περιοχή παρουσιάζει βαρύ χειμώνα με μεγάλες διακυμάνσεις θερμοκρασίας μεταξύ υγρής και θερμής περιόδου, καθώς και μεταξύ ημέρας και νύχτας. Βροχοπτώσεις παρατηρούνται καθ' όλη την διάρκεια του έτους, ενώ το φαινόμενο του παγετού είναι εμφανές από τον Οκτώβριο μέχρι και τον μήνα Απρίλιο. Οι άνεμοι που επικρατούν είναι βορειανατολικοί και σπανιότερα νοτιοδυτικοί. Από την άλλη μεριά, στα πεδινά, χαρακτηριστικά είναι επίσης τα φαινόμενα ομίχλης και παγετού, κυρίως στη διάρκεια του φθινοπώρου και του χειμώνα (Tzoraki et al., 2011).

Οι μετεωρολογικοί σταθμοί που λειτουργούν στη λεκάνη απορροής του ποταμού Ευρώτα και παρέχουν ημερήσια δεδομένα θερμοκρασίας, βροχόπτωσης και εξάτμισης είναι ο σταθμός του Έλους (στα 4 m υψόμετρο από την επιφάνεια της λεκάνης απορροής) και της Ριβιώτισσας (στα 163.5 m υψόμετρο), ενώ οι σταθμοί του Βρονταμά (στα 280 m υψόμετρο), των Περιβολιών (στα 490 m υψόμετρο), της Σελλασίας (στα 590 m υψόμετρο), του Βασαρά (στα 646 m υψόμετρο) και της Πετρίνας (στα 240.2 m υψόμετρο), παρέχουν μόνο δεδομένα βροχόπτωσης. Οι σταθμοί παρουσιάζουν πολύ καλή ομοιογένεια ενώ βάσει της ανάλυσης των μέσων μηνιαίων τιμών είχαν εντοπισθεί αδυναμίες στα δεδομένα (Νικολαΐδης κ.ά., 2006).

Τα κατακρημνίσματα στην περιοχή της λεκάνης είναι αρκετά σημαντικά, και φτάνουν τα 900 mm το χρόνο. Οι βροχές είναι μικρότερες προς τα ανατολικά και σημαντικότερες στις περιοχές μεγαλύτερου υψομέτρου, λόγω της σαφούς συσχέτισης που παρατηρείται μεταξύ της βροχόπτωσης και του υψομέτρου. Τα ανωτέρω μέσα ετήσια κατακρημνίσματα αντιστοιχούν κατά προσέγγιση σε έναν όγκο 2.031 hm³ (2.0 δις m³) νερού ανά έτος, το οποίο τροφοδοτεί τον υδρολογικό κύκλο της λεκάνης. Το πλείστο των βροχοπτώσεων παρουσιάζεται κατά τους μήνες Οκτώβριο ως και Μάρτιο, με πιο υγρό μήνα το Νοέμβριο και πιο ξηρό τον Ιούνιο. Αντίστοιχα, η μέση υπερετήσια πραγματική εξάτμισοδιαπνοή έχει εκτιμηθεί σε 500 mm περίπου ανά έτος (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2013).

3.1.8 Περιβάλλον και Οικολογία

Η Ελλάδα είναι χώρα όπου υπάρχουν ιδιαίτερες συνθήκες ειδογένεσης (δημιουργία νέων ειδών) γεγονός που οφείλεται κυρίως στη γεωλογική και κλιματική ιστορία της, σε συνδυασμό με τη γεωγραφική απομόνωση και την περιβαλλοντική ποικιλομορφία που παρουσιάζει. Ιδιαίτερα στο νότιο άκρο της βαλκανικής χερσονήσου και συγκεκριμένα στην Πελοπόννησο, παρατηρείται μεγάλη αύξηση ενδημικών ειδών σε χερσαία και υδάτινα περιβάλλοντα, τόσο που η περιοχή της νότιας Ελλάδας αναφέρεται ως “θερμό σημείο” (hotspot) βιοποικιλότητας σε παγκόσμιο επίπεδο (Myers et al. 2000).

Η περιοχή της λεκάνης απορροής του Ευρώτα έχει ιδιαίτερη σημασία όχι μόνο για μεμονωμένα είδη, αλλά και για διακριτές κοινότητες ειδών (βιοκοινότητες) που δημιουργούν συναθροίσεις που δεν υπάρχουν πουθενά αλλού. Επιπλέον, κάποια από τα φυσικά περιβάλλοντα υδάτινων και παρόχθιων σχηματισμών που απαντούν στον Ευρώτα είναι πράγματι σπάνια στη θερμομεσογειακή βιοκλιματική ζώνη της νότιας Ελλάδας. Αυτά τα σχετικά σπάνια περιβάλλοντα περιλαμβάνουν μεγάλες καρστικές πηγές, παρόχθια δάση, παρόχθια έλη, μεγάλα πηγαία τμήματα ποταμών διαρκούς ροής, δυσπρόσιτα φαράγγια και χαράδρες, δελταϊκά έλη και γλυκόβαλτους καθώς και εκβολικά στόμια ποταμών (Skoulikidis et al., 2011).

Η ευρύτερη περιοχή της λεκάνης απορροής ποταμού Ευρώτα χαρακτηρίζεται από μεγάλο αριθμό ενδημικών ειδών χλωρίδας και πανίδας και μια υψηλή και σπάνια βιοποικιλότητα. Η σπανιότητα αυτή οφείλεται κατά έναν μεγάλο βαθμό στην ύπαρξη του ποταμού Ευρώτα καθώς στις όχθες του αναπτύσσονται σπάνια, παρόχθια δάση και παρόχθια έλη. Σε σχέση με άλλους μεγάλους ποταμούς της Πελοποννήσου ο Ευρώτας έχει πολλά σημεία και σημαντικές εκτάσεις με υδρόβια και υγροτοπικά φυτά λόγω της σχετικά ομαλής κλίσης και της πολύ διευρυμένης παρόχθιας ζώνης που παρουσιάζεται σε αρκετά σημεία. Η εν λόγω βιοποικιλότητα ήταν ακόμα πιο έντονη στους ιστορικούς χρόνους. Σήμερα όμως έχουν απομείνει μικρά τμήματα δάσους στον άνω ρου του Ευρώτα (πλατάνια, ιτιές, ασημόλευκες). Στις εκβολές του ποταμού κάνουν την εμφάνιση τους εκτεταμένοι χαμηλοί θαμνώνες με αλμυρίκια και σε πολλούς παραποτάμους διαλείπουσας ροής κυριαρχούν συστάδες πικροδάφνης και λυγαριάς (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2013).

Στα χαμηλά υψόμετρα του Ταΰγету και συγκεκριμένα, από την επιφάνεια της θάλασσας μέχρι και τα 750 m έχουμε τη ζώνη των μεσογειακών θαμνώνων όπου κυριαρχεί το πουρνάρι, η κουμαριά, το σκίνο, το ρέικι και η αγρελιά. Από εκεί και μέχρι τα 1.650 m περνάμε στην ορεινή ζώνη. Τα δάση των κωνοφόρων κυριαρχούν, με επικρατέστερα είδη τη μαύρη πεύκη και το ελληνικό έλατο. Στην υποαλπική ζώνη που φτάνει ως τα 2.000 m, τα δάση δίνουν τη θέση τους σε γυμνά λιβάδια και βραχώδεις σχηματισμούς. Η αλπική ζώνη αρχίζει στα 2.000 m και εδώ οι κορυφές είναι γυμνές. Εκτός από τις τέσσερις αυτές ζώνες, παρατηρείται και μια ακόμα διαφορετική μορφή βλάστησης, η αζωνική βλάστηση στις ρεματιές και τα φαράγγια. Εδώ, το κλίμα είναι

πιο δροσερό και κυριαρχούν τα πλατάνια, οι λυγαριές, οι μυρτιές και ο κισσός (**Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2013**).

Στον ποταμό Ευρώτα αναπτύσσονται πλήθος ειδών ιχθυοπανίδας τα οποία είναι τυπικά για τα ελληνικά ποτάμια συστήματα. Η ιδιαιτερότητα του ποταμού έγκειται στην ύπαρξη πέντε (5) αυτοχθόνων ειδών ιχθυοπανίδας και δύο (2) εκβολικών. Στην περιοχή υπάρχουν αρκετές προστατευόμενες περιοχές οι οποίες ανήκουν στο δίκτυο ΦΥΣΗ 2000 (**Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2013**).

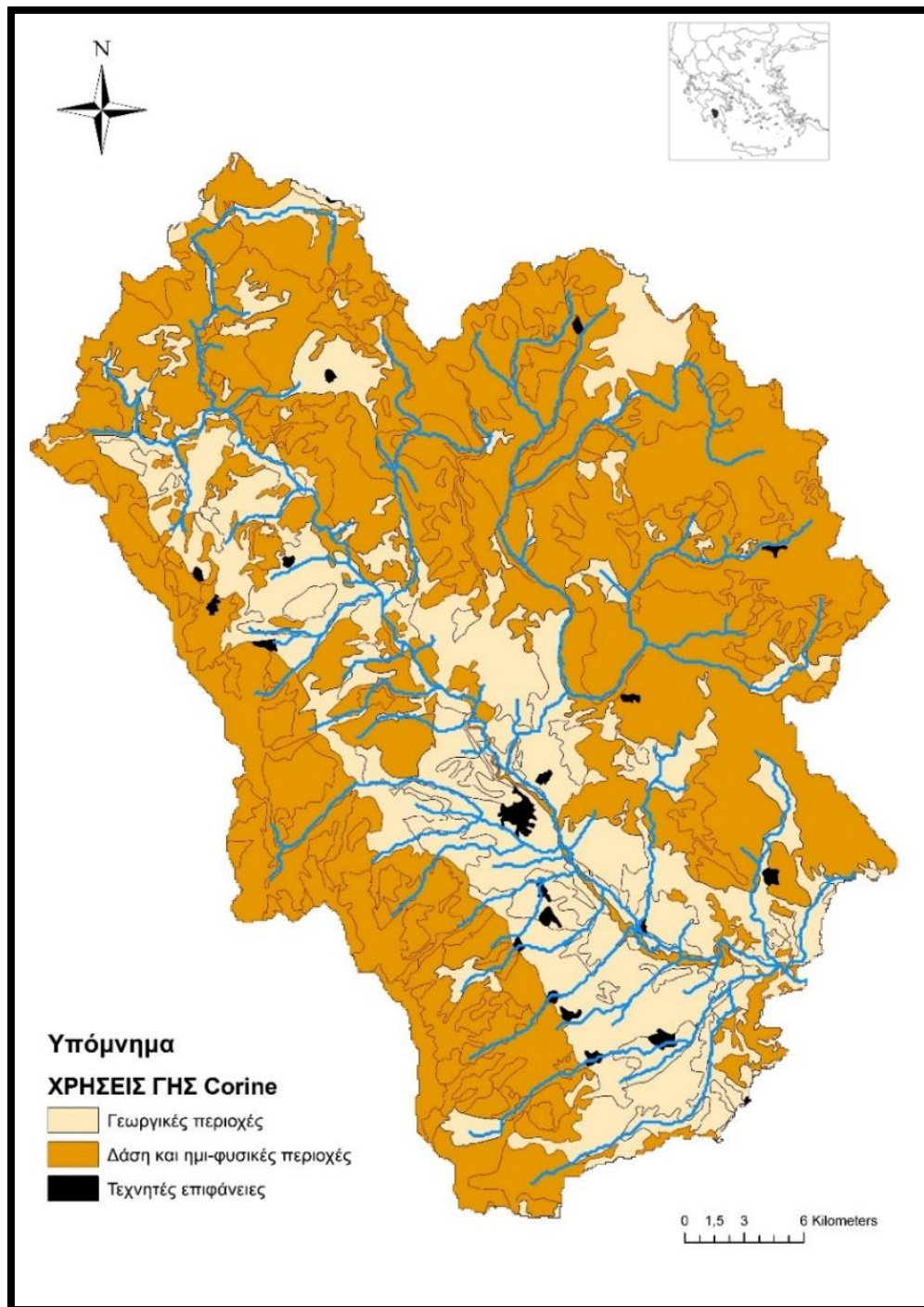
3.1.9 Χρήσεις Γης

Το μεγαλύτερο ποσοστό της λεκάνης απορροής του ποταμού Ευρώτα καλύπτεται από φυσικές εκτάσεις όπως δάση, λιβάδια κτλ., ενώ ακολουθούν οι καλλιεργήσιμες εκτάσεις και οι αστικές επιφάνειες (**Εικόνα 3.7**). Πριν από τις φωτιές του Αυγούστου το 2007, το 61.25% της λεκάνης ήταν φυσικές επιφάνειες, δάση, λιβάδια κτλ, το 37.85% καλλιεργήσιμη γη και το 0.9% αστικές επιφάνειες (**Νικολαΐδης κ.ά., 2006**).

Οι πυρκαγιές του 2007 έκαψαν 216 Km² δάσους, χορτολιβαδικής έκτασης και ελαιόδεντρων στον Πάρωνα (**Νικολαΐδης κ.ά., 2007**) με αποτέλεσμα να μειωθούν οι καλλιεργήσιμες εκτάσεις κατά ποσοστό 4.5 % ενώ οι δασικές και χορτολιβαδικές κατά 11.8 %.

3.1.10 Πιέσεις στην λεκάνη απορροής του ποταμού Ευρώτα

Η λεκάνη απορροής του ποταμού Ευρώτα είναι μια περιοχή κυρίως αγροτική, χωρίς ανεπτυγμένη βιομηχανία. Οι κύριες πιέσεις στην περιοχή προέρχονται από τη γεωργία, την κτηνοτροφία και από κάποιες μεταποιητικές μονάδες γεωργικών προϊόντων. Όσον αφορά στους υδατικούς πόρους πλήθος γεωτρήσεων, αποστραγγιστικών τάφρων, δέσεων και καναλιών εκτροπής του νερού έχουν κατασκευαστεί τα τελευταία χρόνια με απώτερο στόχο την κάλυψη υδροαρδευτικών αναγκών.



Εικόνα 3.7. Χρήσεις Γης

Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ)

Στη λεκάνη απορροής του Ευρώτα υπάρχουν 2 οικισμοί Γ προτεραιότητας και 1 οικισμός Β προτεραιότητας. Σήμερα είναι κατασκευασμένες και λειτουργούν ΕΕΛ σε έναν οικισμό Β προτεραιότητας (Σπάρτη) και σε έναν οικισμό Γ προτεραιότητας (Γεράκι). Το αποτέλεσμα της επεξεργασίας λυμάτων από αυτές τις ΕΕΛ καταλήγει σε

επιφανειακούς ποτάμιους αποδέκτες και συγκεκριμένα στον ποταμό Ευρώτα ή στο ρέμα Καμίνι (παραπόταμος του Ευρώτα). Η συγκέντρωση λυμάτων στις ΕΕΛ γίνεται είτε μέσω αποχετευτικού δικτύου είτε μέσω μεταφοράς με βυτία. Στην ΕΕΛ Γερακίου μεταφέρονται καθημερινά με βυτία περίπου 30-40 m³ απ' όλο το Δήμο Ευρώτα. Εξάλλου, τμήμα του δικτύου αποχέτευσης της Σπάρτης δεν έχει κατασκευαστεί (9%) και γι' αυτό το τμήμα τα βοθρολύματα μεταφέρονται με βυτία προς την αντίστοιχη ΕΕΛ **(Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2013)**.

Η πιο σημαντική ΕΕΛ ως προς την ποσότητα του ρυπαντικού φορτίου που καταλήγει σε αυτήν είναι η μονάδα της Σπάρτης, η οποία εξυπηρετεί την πόλη της Σπάρτης. Η μονάδα της Σπάρτης λειτουργεί με δευτεροβάθμια επεξεργασία με απονιτροποίηση και αποφωσφόρωση (2ΝΠ) ενώ η μονάδα του Γερακίου με τριτοβάθμια επεξεργασία. Η παραγόμενη ιλύς από τις ΕΕΛ διατίθενται με τη συνήθη πρακτική σε ΧΥΤΑ ή όπου δεν υπάρχει, σε άλλους χώρους εναπόθεσης απορριμμάτων **(Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2013)**.

Μεγάλες Ξενοδοχειακές μονάδες

Στην λεκάνη απορροής του Ευρώτα δεν υπάρχουν μεγάλα ξενοδοχειακά συγκροτήματα ή μεγάλες ξενοδοχειακές μονάδες (άνω των 300 κλινών) **(Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2013)**.

Βιομηχανικές μονάδες

Η πλειοψηφία των βιομηχανικών δραστηριοτήτων στην περιοχή της λεκάνης απορροής του Ευρώτα σχετίζεται με την παραγωγή τροφίμων και ιδίως με την ελαιοπαραγωγή **(Εικόνα 3.9)** και την τυροκομία. Από τις συνολικά 115 βιομηχανίες που καταγράφονται στην περιοχή μελέτης, 33 έχουν αξιολογηθεί ως σημαντικές. Οι περισσότερες από αυτές αφορούν στην παραγωγή ελαιόλαδου (49% των μονάδων) αλλά και στην παραγωγή γαλακτοκομικών και τυροκομικών προϊόντων (21%). Ακόμη μέσα στις σημαντικές πιέσεις περιλαμβάνονται και αρκετές μονάδες παραγωγής χυμών φρούτων **(Εικόνα 3.8)** και λαχανικών (9%), ενώ υπάρχει και αξιόλογος αριθμός μονάδων επεξεργασίας και συντήρησης κρέατος (9%). Τέλος πρέπει να υπογραμμιστεί η ύπαρξη σημαντικού αριθμού μονάδων παραγωγής χημικών, χρωμάτων και πλαστικών **(Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2013)**.

«Ολοκληρωμένο πλαίσιο μοντελοποίησης υδρολογίας, ποιότητας νερών και στερεοπαροχής σε λεκάνες απορροής ποταμών διαλείπουσας ροής»



Εικόνα 3.8. Ρύπανση από τα υγρά απόβλητα των χυμοποιείων



Εικόνα 3.9. Δεξαμενή σταθεροποίησης οργανικού υλικού αποβλήτων ελαιουργείου

Κτηνοτροφικές μονάδες

Στην λεκάνη απορροής του Ευρώτα απαντώνται 373 κτηνοτροφικές μονάδες και 29 μεγάλες κτηνοτροφικές μονάδες. Συνολικά η ποσότητα των παραγόμενων ρυπαντικών φορτίων εκτιμάται σε 4.280 tn BOD, 830 tn N και 305,9 tn P ανά έτος (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2013).

Διαρροές από ΧΑΔΑ και ΧΥΤΑ

Στην λεκάνη απορροής του Ευρώτα η ανεξέλεγκτη διάθεση των απορριμμάτων αποτελεί μια σημαντική πίεση. Στην περιοχή υπάρχουν αρκετοί ΧΑΔΑ, οι οποίοι είναι ακόμη ενεργοί είτε δεν έχουν αποκατασταθεί πλήρως. Συνολικά οι ενεργοί ΧΑΔΑ φτάνουν τους οχτώ (8) **(Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2013)**.

3.1.10.11 Συνολική επισκόπηση των πιέσεων στην λεκάνη απορροής του ποταμού Ευρώτα

Στην λεκάνη απορροής του Ευρώτα τα συνολικά ετήσια επιφανειακά φορτία που προκύπτουν από το άθροισμα των επιμέρους διάχυτων, σημειακών και άλλων ανθρωπογενών πιέσεων είναι 2.773 tn/έτος BOD, 702 tn/έτος N και 50 tn/έτος P. Για τη θερινή περίοδο, τα παραγόμενα ρυπαντικά φορτία είναι 935 tn/έτος BOD, 230 tn/έτος N και 17 tn/έτος P αντίστοιχα **(Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2013)**.

3.1.11 Ανάγκες και απολήψεις νερού

Οι συνολικές ετήσιες ανάγκες νερού για όλες τις δραστηριότητες και χρήσεις ανέρχονται σε 92 εκ. m³. Στη γεωργία (αρδευθείσες εκτάσεις), που είναι και ο βασικός χρήστης νερού, καταναλώνεται περίπου το 90% των συνολικών αναγκών νερού, ενώ στη βιομηχανία, στην ύδρευση και στην κτηνοτροφία το υπόλοιπο 10% **(Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2013)**.

Οι συνολικές ετήσιες απολήψεις νερού, για όλες τις δραστηριότητες χρήσεις ανέρχονται σε 148,5 εκ m³. Στη γεωργία (αρδευθείσες εκτάσεις), που είναι και ο βασικός χρήστης νερού, καταναλώνεται περίπου το 92% των συνολικών αναγκών νερού, στην ύδρευση 6% ενώ στη βιομηχανία και στην κτηνοτροφία το υπόλοιπο 2% **(Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2013)**.

Η υπεράντληση από τις γεωτρήσεις (160% των αναγκών) έχει σαν αποτέλεσμα τη μεγάλη ταπείνωση των υδροφορέων.

3.2 Δίκτυο ποσοτικής και ποιοτικής παρακολούθησης

Ο σχεδιασμός της δειγματοληψίας της υδρολογίας και της μεταφοράς ιζημάτων της λεκάνης απορροής στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής επικεντρώθηκε στη συλλογή δεδομένων σε διάφορες κλίμακες.

Τα δεδομένα αυτά σε συνδυασμό με τα δεδομένα του υφιστάμενου δικτύου παρακολούθησης της ποσότητας και ποιότητας των υδάτων από το Τμήμα Περιβάλλοντος και Υδρολογίας της Περιφέρειας Πελοποννήσου, της Περιφερειακής Ενότητας Λακωνίας καθώς και δεδομένα από το δίκτυο δειγματοληψίας επιφανειακών και υπογείων υδάτων (Νικολαΐδης κ.α 2009) για τη μελέτη βιοτικών και αβιοτικών παραμέτρων και την παρακολούθηση τεχνολογιών του Πολυτεχνείου Κρήτης και του Ελληνικού Κέντρου Θαλάσσιων Ερευνών (ΕΛΚΕΘΕ), συνέβαλλαν στην βελτίωση της προγνωστικής ικανότητας του μοντέλου και την ελαχιστοποίηση της αβεβαιότητας που προκύπτει από υφιστάμενους περιορισμούς και την μεγάλη έκταση της λεκάνης απορροής

3.2.1 Σημεία δειγματοληψίας επιφανειακού και υπόγειου νερού

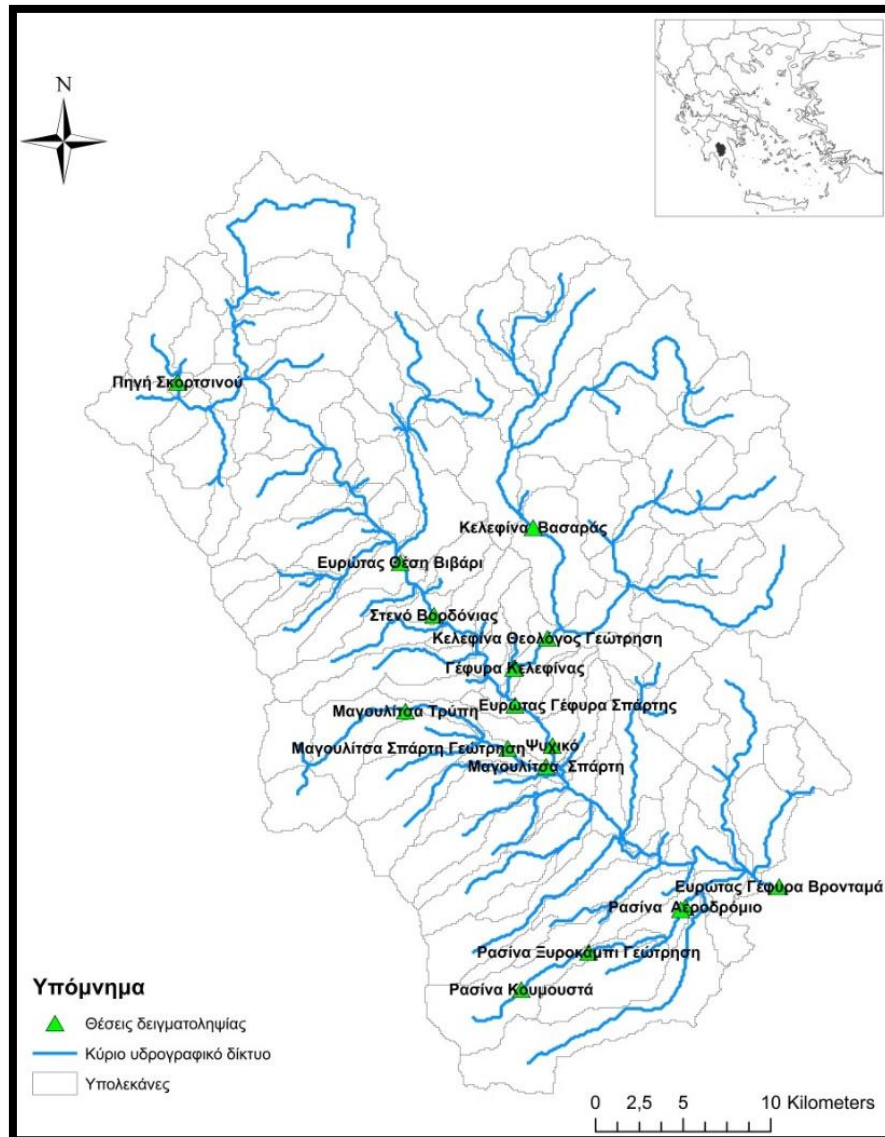
Για την αποτελεσματική παρακολούθηση των ποιοτικών και ποσοτικών χαρακτηριστικών της περιοχής μελέτης δημιουργήθηκε ένα εκτεταμένο δίκτυο σταθμών μέτρησης. Το δίκτυο περιλάμβανε επιτόπου δειγματοληψίες και μετρήσεις σε θέσεις παρακολούθησης με τη χρήση κατάλληλου εξοπλισμού. Οι δειγματοληψίες πραγματοποιήθηκαν από το προσωπικό του Τμήματος Περιβάλλοντος και Υδρολογίας της Περιφέρειας Πελοποννήσου, της Περιφερειακής Ενότητας Λακωνίας.

Η δειγματοληψία στην λεκάνη απορροής του ποταμού Ευρώτα περιλαμβάνει τη λήψη δειγμάτων επιφανειακού και υπογείου νερού, συντήρηση αυτών και τέλος μεταφορά τους στο Εργαστήριο Υδρογεωχημικής Μηχανικής και Αποκατάστασης Εδαφών του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης προς ανάλυση. Το πρόγραμμα δειγματοληψιών διήρκεσε περίπου 3 χρόνια καλύπτοντας χρονικά την περίοδο από τον Ιανουάριο του 2009 έως τον Οκτώβριο του 2011.

Από τον Φεβρουάριο του 2009 έως τον Απρίλιο του 2011 διενεργήθηκαν σε 12 σημεία δειγματοληψίας μηνιαίες δειγματοληψίες επιφανειακού νερού για τη μέτρηση των φυσικοχημικών παραμέτρων της λεκάνης απορροής του ποταμού Ευρώτα. Το χρονικό διάστημα μεταξύ των δειγματοληψιών επιδιώχθηκε να είναι σταθερό όσο αυτό ήταν δυνατόν, λόγω των καιρικών συνθηκών που επικρατούσαν στην περιοχή. Εκτός από την ανάλυση των επιφανειακών υδάτων ιδιαίτερα σημαντική είναι και η κατανόηση του δυναμικού των υπογείων υδάτων στην περιοχή. Οι χημικές ιδιότητες των υπογείων νερών, που επηρεάζονται τόσο από φυσικά αίτια όσο και από τις ανθρώπινες δραστηριότητες δίνουν σπουδαίες ενδείξεις για τη φύση των υδροφόρων οριζόντων. Τον Δεκέμβριο του 2009 προστέθηκαν 5 θέσεις δειγματοληψίας υπογείου

νερού. Από τον Φεβρουάριο του 2010 τα ίδια δείγματα επιφανειακού νερού πέρα από την μέτρηση των φυσικοχημικών παραμέτρων χρησιμοποιούνταν και για τον υπολογισμό των αιωρούμενων στερεών. Η συλλογή του νερού γινόταν σε φιάλες 1½ λίτρου αφού πρώτα είχαν ξεπλυθεί καλά με το ίδιο νερό. Τα δείγματα φυλάσσονταν σε ψυγείο με θερμοκρασία 4 °C για την αναστολή ανεπιθύμητων βιολογικών και χημικών αντιδράσεων μέχρι την μεταφορά τους στο εργαστήριο. Οι θέσεις δειγματοληψίας τόσο των επιφανειακών όσο και υπόγειων δειγμάτων παρουσιάζονται στην **Εικόνα 3.10**.

Για κάθε δειγματοληψία ήταν απαραίτητη η προετοιμασία του απαραίτητου εξοπλισμού και των δοχείων και βοηθητικών μέσων για τη λήψη και τη σωστή συντήρηση των ληφθέντων δειγμάτων. Ακολουθούσε η διεξαγωγή της δειγματοληψίας, η συντήρηση και τέλος η μεταφορά των δειγμάτων στο εργαστήριο προς ανάλυση.



Εικόνα 3.10. Θέσεις δειγματοληψίας επιφανειακών και υπόγειων δειγμάτων

Οι παράμετροι που μετρήθηκαν για όλα τα δείγματα είναι: pH, ηλεκτρική αγωγιμότητα (conductivity), διαλυμένο οξυγόνο (DO), χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (Chemical Oxygen Demand, COD), νιτρικό άζωτο ($\text{NO}_3\text{-N}$), νιτρώδες άζωτο ($\text{NO}_2\text{-N}$), αμμωνιακό άζωτο ($\text{NH}_3\text{-N}$), φωσφορικός φώσφορος ($\text{PO}_4\text{-P}$), ολικές φαινόλες (Total phenols) και το οργανικό άζωτο με την μέθοδο Kjeldahl. Η επιλογή της μέτρησης των παραπάνω φυσικοχημικών παραμέτρων οφείλεται στο γεγονός ότι η λεκάνη απορροής του ποταμού Ευρώτα είναι μια περιοχή κυρίως αγροτική, χωρίς ανεπτυγμένη βιομηχανία. Επομένως, οι κύριοι ρύποι που αναμένεται να επιβαρύνουν την περιοχή προέρχονται από τη γεωργία, την κτηνοτροφία και από μεταποιητικές μονάδες γεωργικών προϊόντων.

3.2.1.1 Αποτελέσματα φυσικοχημικών παραμέτρων

Οι αναλύσεις φυσικοχημικών παραμέτρων των δειγμάτων έγιναν στο Εργαστήριο Υδρογεωχημικής Μηχανικής και Αποκατάστασης Εδαφών του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης. Αναλυτικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων των φυσικοχημικών παραμέτρων για όλες τις δειγματοληψίες παρουσιάζονται στο **Παράρτημα Ι**. Οι μέσες τιμές τους δίνονται στον **Πίνακα 3.4**.

Από τις φυσικοχημικές παραμέτρους κρίσιμη σημασία παρουσιάζει το διαλυμένο οξυγόνο (DO), αφού είναι απαραίτητο για τη ζωή των οργανισμών που ζουν στα φυσικά νερά. Το οξυγόνο αυξάνεται με τη διάλυσή του στο νερό από την ατμόσφαιρα και με τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης από τα υδρόβια φυτά. Το τρεχούμενο νερό λόγω της κίνησής του διαλύει περισσότερο από το στάσιμο νερό. Τα επίπεδα διαλυμένου οξυγόνου ποικίλουν εποχιακά και εξαρτώνται από τη θερμοκρασία και το υψόμετρο. Καταναλώνεται από την αναπνοή των υδρόβιων ζώων, την αποσύνθεση οργανικού υλικού και διάφορες άλλες χημικές αντιδράσεις. Χαμηλά επίπεδα διαλυμένου οξυγόνου και μπορούν να προκαλέσουν ακόμα και τον θάνατο των οργανισμών που ζουν στο νερό καθώς και σημαντική υποβάθμιση των υδάτων (**Οικονομόπουλος, 2001**).

Για το λόγο αυτό η αμερικανική EPA έχει θεσπίσει κριτήριο συγκέντρωσης διαλυμένου οξυγόνου στα φυσικά νερά τα 5 mg/L. Επίσης χαμηλές συγκεντρώσεις οξυγόνου στα νερά είναι δείκτης ρύπανσης από οργανικό υλικό, η αποσύνθεση του οποίου οδηγεί στην κατανάλωσή του. Η τιμές του DO που παρατηρούνται στον Ευρώτα είναι φυσιολογικές ενώ και οι τιμές του pH κυμαίνονται σε φυσιολογικά επίπεδα γύρω στο 8.

Η αγωγιμότητα επηρεάζεται από την παρουσία ανόργανων διαλυμένων στερεών, όπως ανιόντα χλωρίου, νιτρικά, θειικά και φωσφορικά και κατιόντα νατρίου, μαγνησίου, ασβεστίου, σιδήρου και αργιλίου τα οποία αυξάνουν την αγωγιμότητα. Η αγωγιμότητα στα ποτάμια και ρέματα επηρεάζεται κυρίως από τη γεωλογία της περιοχής από την οποία περνάει το ποτάμι. Επίσης αύξηση της αγωγιμότητας μπορεί να παρατηρηθεί από τις εισροές ρύπων στο ποτάμι. Τιμές μεταξύ των 150 και 500 $\mu\text{S/cm}$

είναι κατάλληλες για υποστήριξη ζωής πολλών ειδών ενώ τιμές έξω από αυτή την κλίμακα μπορεί να είναι ακατάλληλες για την ανάπτυξη ορισμένων ειδών ψαριών και ασπόνδυλων (Οικονομόπουλος, 2001). Η Κοινή Υπουργική Απόφαση ΚΥΑ Υ2/2600/2001 ορίζει το όριο της αγωγιμότητας για το πόσιμο νερό σε 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Πίνακας 3.4. Μετρήσεις φυσικοχημικών παραμέτρων στις θέσεις δειγματοληψίας επιφανειακού και υπόγειου νερού

	pH		Conductivity (μS)		DO (mg/L)	
Θέση Δειγματοληψίας	Μέση Τιμή	STD	Μέση Τιμή	STD	Μέση Τιμή	STD
Πηγή Σκορτσινού	7,32	0,24	596,04	104,36	7,74	1,56
Βιβάρι Σελλασίας	7,57	0,23	547,31	155,76	7,72	1,42
Στενό Βορδόνιας	7,75	0,30	571,46	172,52	7,72	1,56
Κελεφίνα - Βασαράς	7,79	0,23	630,62	96,35	7,64	1,56
Κελεφίνα - Κλαδάς	7,83	0,27	542,61	96,65	7,58	1,90
Γέφυρα Σπάρτης	7,83	0,23	561,04	50,92	7,44	1,61
Ψυχικό Σπάρτης	7,72	0,29	568,71	164,35	7,49	2,09
Μαγουλίτσα - Αγία Ειρήνη	7,94	0,23	340,17	58,99	7,65	1,65
Μαγουλίτσα Σπάρτη	8,09	0,15	343,81	65,13	7,56	1,71
Ρασίνα Κουμουτσά	7,99	0,22	270,59	72,51	7,73	1,62
Ρασίνα Αεροδρόμιο	7,97	0,17	477,00	165,60	7,39	1,85
Γέφυρα Βρονταμά	7,89	0,19	569,58	59,20	7,52	1,74
Πηγάδι 1 - Ανάντη της Κελεφίνας	7,54	0,26	640,06	121,60	7,69	1,53
Πηγάδι 2 - Κελεφίνα Γ. Κλαδά	7,67	0,18	596,94	50,65	7,86	1,51
Πηγάδι 3 - Μαγουλίτσα Σπάρτη	7,42	0,21	623,90	74,20	7,85	1,47
Πηγάδι 4 - Ρασίνα Ξηροκάμπιο	7,49	0,22	507,63	59,42	7,27	2,12
Πηγάδι 5 - Ρασίνα Λευκόχωμα	7,69	0,24	722,47	138,62	7,69	1,67

Όπως έχει ήδη αναφερθεί οι χημικές παράμετροι που μετρήθηκαν στο εργαστήριο είναι COD, N-NO_3^- , N-NO_2^- , N-NH_3 , P-PO_4 , ολικές φαινόλες και το οργανικό άζωτο με την μέθοδο Kjeldahl. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.5 ενώ αναλυτικά τα αποτελέσματα για κάθε δειγματοληψία δίνονται στο Παράρτημα Ι.

Το COD ορίζεται ως το ισοδύναμο οξυγόνο που απαιτείται για την οξείδωση της οργανική ύλης. Η μεγαλύτερη συγκέντρωση COD παρατηρείται στην περιοχή της Γέφυρας της Σπάρτης καθώς και στην περιοχή της Ρασίνας. Το γεγονός ότι οι τιμές του COD σε όλες τις θέσεις δειγματοληψίας είναι ιδιαίτερα υψηλές δηλώνει πως έχουμε σημαντική ρύπανση οργανικού φορτίου. Τα πηγάδια στην περιοχή της Κελεφίνας έχουν μικρότερες συγκεντρώσεις COD από ότι τα πηγάδια στην ευρύτερη περιοχή της Ρασίνας και της Μαγουλίτσας. Ρύπανση από οργανικό φορτίο πιθανόν λόγω κτηνοτροφικών δραστηριοτήτων έχουν οι πηγές στο Βιβάρι ενώ η πηγή Σκορτσινού παρουσιάζει μικρότερες συγκεντρώσεις COD.

Τα νιτρικά (NO_3^-) είναι η πιο οξειδωμένη μορφή των αζωτούχων ενώσεων και μπορεί να είναι και το τελικό προϊόν της αποδόμησης των αζωτούχων οργανικών ενώσεων. Τα φυσικά επίπεδα των νιτρικών είναι χαμηλά, συνήθως κάτω από 1 mg/L. Υψηλές συγκεντρώσεις νιτρικών στο πόσιμο νερό μπορούν να αποτελέσουν απειλή για την υγεία ιδιαίτερα των βρεφών κάτω των τριών μηνών. Νερό το οποίο έχει ρύπανση από αζωτούχες οργανικές ενώσεις μπορεί να μη δείξει υψηλές συγκεντρώσεις νιτρικών, αφού η αποσύνθεση του οργανικού υλικού μειώνει τη συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου και επομένως μειώνεται και ο ρυθμός οξείδωσης της αμμωνίας σε νιτρικά. Τα νιτρώδη (NO_2^-) και η αμμωνία (NH_3) είναι τοξικότερα από ότι τα νιτρικά (Οικονομόπουλος, 2001). Η Κοινή Υπουργική Απόφαση ΚΥΑ Υ2/2600/2001 ορίζει όριο στο πόσιμο νερό για τα νιτρικά τα 50 mg/L, που αντιστοιχεί σε περίπου 11 mg/L νιτρικό άζωτο (N-NO_3^-), ενώ για τα νιτρώδη το όριο είναι 0,50 mg/L δηλαδή 0,15 mg/L νιτρώδες άζωτο (N-NO_2^-).

Γενικότερα οι τιμές των συγκεντρώσεων των νιτρικών (N-NO_3^-) παρουσιάζονται χαμηλές ενώ όσον αφορά τα νιτρώδη (N-NO_2^-) οι περισσότερες θέσεις παρουσιάζουν συγκεντρώσεις κάτω του ορίου ανίχνευσης της μεθόδου. Οι συγκεντρώσεις του αμμωνιακού αζώτου (N-NH_3) είναι χαμηλές, λαμβάνοντας υπόψη το όριο της συγκέντρωσης που προτείνεται από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (Π.Ο.Υ.) και μπορεί να προκαλέσει ενοχλήσεις στον άνθρωπο και είναι ίσο με 1,2 mg/L N-NH_3 .

Ο Π.Ο.Υ. προτείνει ότι για να χρησιμοποιηθεί νερό για άρδευση χωρίς περιορισμούς πρέπει η συγκέντρωση N-NO_3^- να μην υπερβαίνει τα 5 mg/L. Οι συγκεντρώσεις από 5 – 30 mg/L δεν έχουν σοβαρές επιπτώσεις ενώ συγκεντρώσεις N-NO_3^- μεγαλύτερες από 30 mg/L έχουν σοβαρές επιπτώσεις στις καλλιέργειες. Το νερό των πηγαδιών από όπου ελήφθησαν δείγματα χρησιμοποιείται για αρδευτικούς σκοπούς. Όπως παρατηρείται από τις μέσες συγκεντρώσεις του N-NO_3^- στις θέσεις δειγματοληψίας του υπόγειου νερού οι τιμές δεν υπερβαίνουν τα 5 mg/L.

Η μορφή στην οποία απαντάται, συνήθως, ο φώσφορος στη φύση είναι τα φωσφορικά και ο οργανικός φώσφορος. Ο φώσφορος μαζί με τα νιτρικά αποτελούν τα βασικά θρεπτικά για την ανάπτυξη των φυτών. Ο φώσφορος στα φυσικά νερά βρίσκεται σε πολύ μικρές συγκεντρώσεις και για αυτό συνήθως αποτελεί τον περιοριστικό παράγοντα ανάπτυξης. Πολύ μικρές αλλαγές στις συγκεντρώσεις του μπορούν αν προκαλέσουν προβλήματα στα ποτάμια και σε λίμνες όπως υπέρμετρη ανάπτυξη των φυτών και ευτροφισμό.

Οι συγκεντρώσεις P-PO_4^{3-} που μετρήθηκαν στα δείγματα επιφανειακού νερού υπερβαίνουν τα 0,020 mg/L πράγμα που δηλώνει πως η συγκέντρωση του φωσφόρου που μετρήθηκε στο επιφανειακό νερό θα μπορούσε να προκαλέσει προβλήματα ευτροφισμού τόσο σε περιοχές όπου το νερό δεν έχει μεγάλη ροή όσο και στην παράκτια ζώνη. Όντως, σύμφωνα με παρατηρήσεις στην παράκτια περιοχή της λεκάνης απορροής και συγκεκριμένα στην περιοχή της Σκάλας, ο Βασιλοπόταμος αλλά και οι εκβολές του ποταμού Ευρώτα φαίνεται ότι έχουν ευτροφισμό. Η κατάσταση στην

παράκτια ζώνη είναι καλή, αφού στον Λακωνικό κόλπο επικρατούν θαλάσσια ρέματα τα οποία ανανεώνουν τα ύδατα και αποφεύγονται με αυτό τον τρόπο προβλήματα ευτροφισμού.

Οι ολικές φαινόλες υπάρχουν στα υγρά απόβλητα των ελαιουργείων. Γενικά τα υγρά απόβλητα ελαιουργείων περιέχουν υψηλό οργανικό φορτίο και μεγάλες συγκεντρώσεις φαινολών. Οι συγκεντρώσεις των φαινολών κυμαίνονται από 0,5 – 24 g/L, τιμές οι οποίες εξαρτώνται από τη διαδικασία παραγωγής ελαιολάδου. Οι ολικές φαινόλες μετρήθηκαν με τη φασματοφωτομετρική μέθοδο Folin – Ciocalteu. Η μέτρηση των ολικών φαινολών μπορεί να δώσει ενδείξεις για τη ρύπανση των νερών από υγρά απόβλητα ελαιουργείων. Τα υγρά απόβλητα ελαιουργείων παρουσιάζουν τοξικές ιδιότητες οι οποίες από κάποιους συγγραφείς έχουν αποδοθεί στο περιεχόμενό τους σε φαινόλες. Η Κοινή Υπουργική Απόφαση ΚΥΑ Υ2/2600/2001 ορίζει όριο συγκέντρωσης ολικών φαινολών στο πόσιμο νερό τα 0,05 mg/L. Η μέση συγκέντρωση των ολικών φαινολών, σχεδόν σε όλες τις θέσεις υπερβαίνει την τιμή του 0,4 mg/L, ενώ στα πηγάδια είναι ελαφρώς μεγαλύτερη. Η διαφορά αυτή μπορεί πιθανόν να οφείλεται στη ρύπανση του υδροφορέα της περιοχής από υγρά απόβλητα ελαιουργείων.

Πίνακας 3.5. Μετρήσεις χημικών παραμέτρων στις θέσεις δειγματοληψίας επιφανειακού και υπόγειου νερού

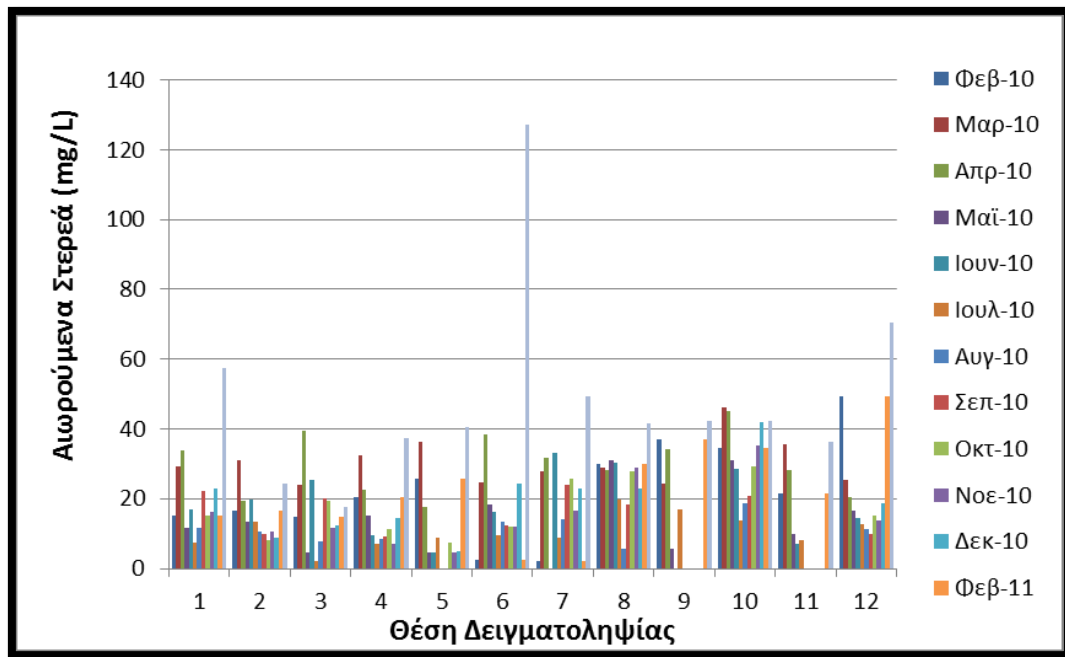
	COD (mg/L)		N-NO ₂ ⁻ (mg/L)		N-NO ₃ ⁻ (mg/L)		N-NH ₃ (mg/L)		TKN (mg/L)		TN (mg/L)		P-PO ₄ (mg/L)		Tphenols (mg/L)	
Θέση Δειγματοληψίας	Μέση Τιμή	STD	Μέση Τιμή	STD	Μέση Τιμή	STD	Μέση Τιμή	STD	Μέση Τιμή	STD	Μέση Τιμή	STD	Μέση Τιμή	STD	Μέση Τιμή	STD
Πηγή Σκορτσινού	4,26	5,71	0,00	0,00	1,17	0,76	0,04	0,06	1,96	1,46	3,20	1,89	0,08	0,14	0,47	0,35
Βιβάρι Σελλασίας	7,76	8,79	0,00	0,01	1,18	0,70	0,10	0,29	1,69	0,98	2,92	1,27	0,07	0,08	0,47	0,18
Στενό Βορδόνιας	8,28	10,26	0,01	0,01	1,15	0,69	0,04	0,04	1,79	0,99	3,00	1,18	0,04	0,06	0,44	0,22
Κελεφίνα - Βασαράς	4,79	7,40	0,00	0,01	0,75	0,44	0,04	0,03	1,47	0,79	2,23	0,88	0,03	0,02	0,42	0,17
Κελεφίνα - Κλαδάς	6,89	6,91	0,01	0,01	0,73	0,42	0,05	0,03	1,31	0,66	2,07	0,67	0,08	0,17	0,43	0,20
Γέφυρα Σπάρτης	11,19	31,19	0,01	0,01	1,08	0,16	0,08	0,16	2,23	3,66	3,30	3,71	0,07	0,13	0,46	0,29
Ψυχικό Σπάρτης	8,89	22,37	0,05	0,09	1,51	0,99	0,09	0,15	1,84	2,03	3,55	2,22	0,10	0,09	0,42	0,15
Μαγουλίτσα - Αγία Ειρήνη	8,20	16,14	0,00	0,01	1,03	0,80	0,03	0,03	1,37	0,73	2,52	1,17	0,05	0,10	0,48	0,38
Μαγουλίτσα Σπάρτη	7,07	9,87	0,01	0,01	1,32	0,56	0,04	0,04	1,50	0,93	2,83	1,01	0,05	0,07	0,42	0,15
Ρασίνα Κουμουτσά	12,05	22,81	0,00	0,00	0,62	0,36	0,04	0,03	1,32	0,82	1,95	0,84	0,07	0,12	0,54	0,66
Ρασίνα Αεροδρόμιο	11,56	17,71	0,02	0,02	1,25	0,72	0,11	0,14	1,52	0,88	2,78	0,98	0,10	0,16	0,59	0,27
Γέφυρα Βρονταμά	3,32	6,09	0,03	0,05	1,64	1,05	0,05	0,02	1,78	1,34	3,67	1,61	0,06	0,07	0,48	0,25
Πηγάδι 1 – Ανάντη της Κελεφίνας	7,52	18,38	0,01	0,01	0,85	0,52	0,07	0,16	1,85	1,13	2,76	1,32	0,13	0,23	0,58	0,54
Πηγάδι 2 – Κελεφίνα Γ. Κλαδά	7,54	21,88	0,01	0,01	0,82	0,53	0,10	0,20	1,85	0,92	2,83	1,15	0,12	0,32	0,60	0,43
Πηγάδι 3 – Μαγουλίτσα Σπάρτη	11,12	27,60	0,01	0,01	3,43	3,03	0,04	0,03	2,51	1,56	6,60	2,83	0,10	0,28	0,98	2,03
Πηγάδι 4 – Ρασίνα Ξηροκάμπιο	15,01	26,74	0,02	0,33	1,62	1,55	0,16	0,25	2,64	0,94	4,51	1,92	0,09	0,16	0,61	0,32
Πηγάδι 5 – Ρασίνα Λευκόχωμα	16,85	31,69	0,01	0,01	1,26	1,75	0,04	0,04	3,05	2,98	4,49	4,53	0,20	0,39	0,85	1,07

3.2.1.2 Αποτελέσματα υπολογισμού των αιωρούμενων στερεών

Οι αναλύσεις αιωρούμενων στερεών των δειγμάτων έγιναν στο Εργαστήριο Υδρογεωχημικής Μηχανικής και Αποκατάστασης Εδαφών της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως από τον Φεβρουάριο του 2010 τα μηνιαία δείγματα επιφανειακού νερού πέρα από την μέτρηση των φυσικοχημικών παραμέτρων χρησιμοποιούνταν και για τον υπολογισμό των αιωρούμενων στερεών δεδομένα τα οποία στην συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν για την βαθμονόμηση των αποτελεσμάτων στερεοπαροχής του μοντέλου SWAT. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων παρουσιάζονται στον **Πίνακα 3.7** ενώ στο **Παράρτημα Ι** παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων ανά μήνα δειγματοληψίας.

Δείγματα νερού συλλεγόντουσαν σε μπουκάλια 1 L μία φορά το μήνα από το προσωπικό του Τμήματος Περιβάλλοντος και Υδρολογίας της Περιφέρειας Πελοποννήσου, της Περιφερειακής Ενότητας Λακωνίας, σε κάθε θέση (τα περισσότερα από τα δείγματα ελήφθησαν υπό συνθήκες χαμηλής ροής) για να προσδιοριστεί η συγκέντρωση των αιωρούμενων στερεών. Τα δείγματα νερού διηθούνταν στο εργαστήριο χρησιμοποιώντας ένα προζυγισμένο φίλτρο. Το υπόλειμμα που διατηρούνταν επί του φίλτρου ξηραίνονταν σε κλίβανο μεταξύ 103 έως 105 ° C μέχρις ότου το βάρος του φίλτρου δεν μεταβάλλονταν. Η αύξηση του βάρους κάθε φίλτρου αντιπροσώπευε την συγκέντρωση των αιωρούμενων ιζημάτων για κάθε δείγμα νερού. Η μεθοδολογία είναι σύμφωνη με την μέθοδο EPA 160.2 Residue, Non-Filterable method (**EPA, 1979**).

Γενικά οι μέγιστες τιμές αιωρούμενων στερεών εμφανίζονται τους χειμερινούς μήνες και ειδικά σε μήνες με έντονες βροχοπτώσεις (Φεβρουάριος 2010 και Μάρτιος 2011) ενώ τους καλοκαιρινούς μήνες οι ελαττώνονται αισθητά. Η μέγιστη τιμή παρουσιάζεται στην θέση Γέφυρα Σπάρτης με τιμή 127.2 mg/L (**Εικόνα 3.11**).



Εικόνα 3.11. Γράφημα αιωρούμενων στερεών στις θέσεις δειγματοληψίας επιφανειακού νερού

Επί πρόσθετα στις αρχές του 2011 ελήφθησαν 4 δείγματα επιφανειακού νερού για τον υπολογισμό των αιωρούμενων στερεών μετά από φαινόμενα βροχοπτώσεων στις θέσεις Κελεφίνα Κλαδάς, Γέφυρα Βρονταμά, Ρασίνα Αεροδρόμιο και Ρασίνα Ξηροκάμπι. Οι τιμές των αιωρούμενων στερεών αμέσως μετά από φαινόμενα βροχοπτώσεων παρουσιάζονται στον **Πίνακα 3.6** ενώ στο **Παράρτημα Ι** παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

Πίνακας 3.6. Μετρήσεις αιωρούμενων στερεών αμέσως μετά από φαινόμενα βροχοπτώσεων

Αιωρούμενα Στερεά		
Θέση Δειγματοληψίας	Ημερομηνία	Τιμή (mg/L)
Κελεφίνα Κλαδάς	26/2/2011	77,50
Γέφυρα Βρονταμά	22/2/2011	250,00
Ρασίνα Αεροδρόμιο	30/1/2011	208,50
Ρασίνα Ξηροκάμπι	30/1/2011	125,00

Πίνακας 3.7. Μετρήσεις αιωρούμενων στερεών στις θέσεις δειγματοληψίας επιφανειακού νερού

Αιωρούμενα Στερεά (mg/L)															
2010												2011			
No	Θέση Δειγματοληψίας	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΪ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ
1	Πηγή Σκορτσινού	32,7	29,3	33,8	11,5	17,0	7,5	11,7	22,3	15,0	16,3	23,0	15,3	57,6	30,8
2	Βιβάρι Σελλασίας	29,2	31,0	19,3	13,5	19,8	13,5	10,5	10,0	8,0	10,8	8,8	16,7	24,4	18,0
3	Στενό Βορδόνιας	113,3	23,8	39,5	4,5	25,5	2,3	7,7	20,0	19,3	11,8	12,5	14,8	17,6	56,0
4	Κελεφίνα - Βασαράς	47,8	32,5	22,5	15,0	9,5	7,0	8,5	9,3	11,3	7,0	14,5	20,5	37,2	32,8
5	Κελεφίνα - Κλαδάς	45,3	36,3	17,8	4,7	4,5	8,7	-	-	7,5	4,8	5,0	25,8	40,4	25,2
6	Γέφυρα Σπάρτης	34,4	24,7	38,5	18,2	16,2	9,5	13,5	12,5	12,0	12,0	24,2	2,5	127,2	47,2
7	Ψυχικό Σπάρτης	133,1	28,0	31,7	-	33,0	9,0	14,0	24,0	25,8	16,8	23,0	2,3	49,2	55,6
8	Μαγουλίτσα - Αγία Ειρήνη	36,9	28,8	28,2	31,0	30,3	19,7	5,5	18,5	28,0	29,0	22,8	30,0	41,6	38,4
9	Μαγουλίτσα Σπάρτη	46,9	24,5	34,3	5,5	-	17,0	-	-	-	-	-	37,0	42,4	24,4
10	Ρασίνα Κουμουτσά	62,9	46,3	45,3	31,0	28,5	13,7	18,8	20,8	29,3	35,3	42,0	34,5	42,4	38,8
11	Ρασίνα Αεροδρόμιο	41,8	35,5	28,2	9,8	7,0	8,0	-	-	-	-	-	21,5	36,4	26,8
12	Γέφυρα Βρονταμά	30,4	25,3	20,5	16,8	14,5	12,8	11,3	9,8	15,0	13,8	18,7	49,3	70,4	20,8

3.2.2 Μετρήσεις Παροχής

Στην περιοχή μελέτης χρησιμοποιήθηκε συνδυασμός μέτρησης της στάθμης με σταθμήμερα και όργανα αυτόματης καταγραφής στάθμης (σταθμηγράφοι) καθώς και μετρήσεις της ταχύτητας ροής σε διάφορες θέσεις του ποταμού Ευρώτα με τη βοήθεια μυλίσκου. Στην ευρύτερη περιοχή της λεκάνης απορροής του ποταμού Ευρώτα υπήρχε δίκτυο υπαρχόντων εγκατεστημένων αυτόματων καταγραφέων στάθμης (Νικολαΐδης κ.α 2009) στο οποίο προστέθηκαν επιπλέον θέσεις εκτός του κύριου ρου στα πλαίσια της παρούσας Διατριβής για την καλύτερη ομοιογένεια των θέσεων μέτρησης.

Το Τμήμα Περιβάλλοντος και Υδρολογίας της Περιφέρειας Πελοποννήσου, της Περιφερειακής Ενότητας Λακωνίας ελέγχει την ροή του ποταμού Ευρώτα από το 1974-2006 σε δώδεκα θέσεις κατά μήκος του κύριου ρου του ποταμού σε μηνιαία βάση. Το 2007 σε έξι από αυτές τις περιοχές εγκαταστάθηκαν αυτόματοι καταγραφείς της στάθμης σε ωριαία βάση. Οι περιοχές Βιβάρι και Βρονταμάς βρίσκονται κατά μήκος του κύριου ρου του ποταμού Ευρώτα.

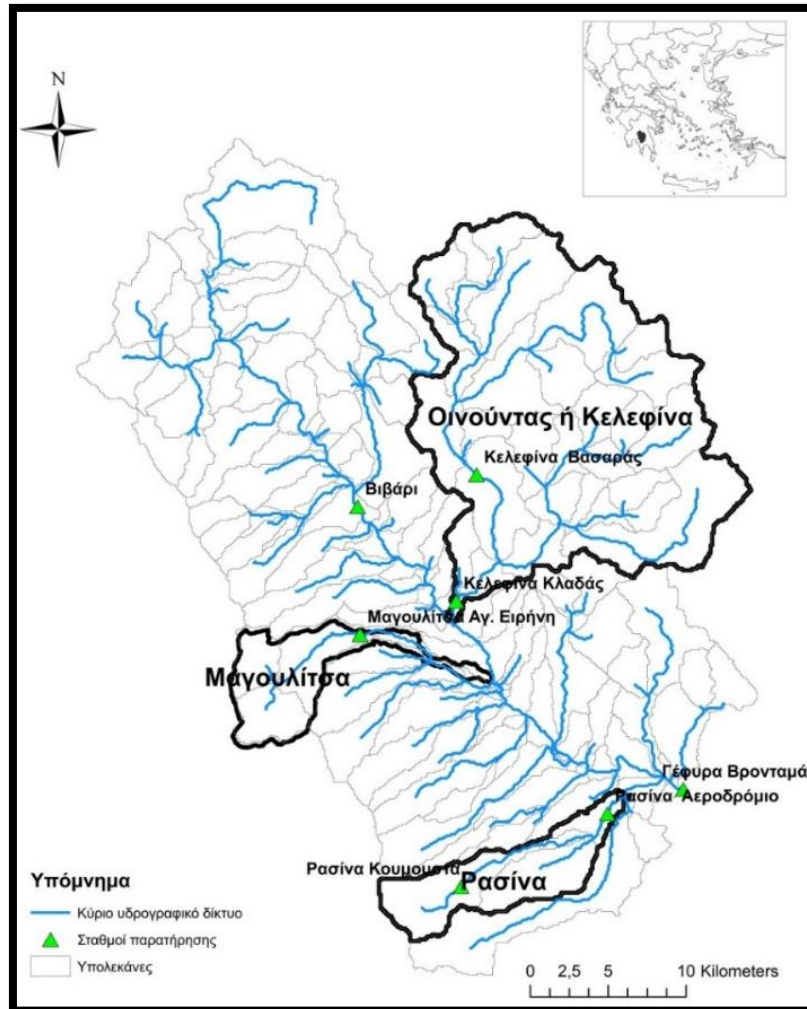
Στην παρούσα Διατριβή εγκαταστάθηκαν στις αρχές του 2009 συνολικά 5 σταθμοί μετρήσεων (σε 3 υπολεκάνες) με αυτόματους καταγραφείς (Onset Computers και μετατροπείς πίεσης HOBO (U20-001-04)) για τη συνεχή παρακολούθηση της στάθμης του νερού κάθε 10-15 min (Εικόνα 3.12). Οι δύο από τις υπολεκάνες (Μαγουλίτσα και Ρασίνα) αποστραγγίζουν τον Ταΰγετο ενώ η τρίτη (Κελεφίνα) τον Πάρνωνα.



Εικόνα 3.12. Θέση Κελεφίνα Κλαδάς. Καταγραφής στάθμης ποταμού με αυτόματο καταγραφέα (levellogger)

«Ολοκληρωμένο πλαίσιο μοντελοποίησης υδρολογίας, ποιότητας νερών και στερεοπαροχής σε λεκάνες απορροής ποταμών διαλείπουσας ροής»

Οι θέσεις καταγραφής των μηνιαίων παροχών με μολύσκο οι οποίες πραγματοποιήθηκαν από το προσωπικό του Τμήματος Περιβάλλοντος και Υδρολογίας της Περιφέρειας Πελοποννήσου, της Περιφερειακής Ενότητας Λακωνίας καθώς και οι θέσεις μέτρησης της στάθμης με αυτόματους καταγραφείς φαίνονται στην **Εικόνα 3.13**.



Εικόνα 3.13. Θέσεις σταθμών αυτόματων καταγραφών στάθμης και σημεία μέτρησης μηνιαίας παροχής

3.2.2.1 Εκτίμηση καμπύλης Στάθμης-Παροχής

Για τον υπολογισμό της παροχής μετά από επεξεργασία των τιμών της στάθμης και της παροχής υπολογίστηκε η καλύτερη καμπύλη στάθμης παροχής σε κάθε θέση μέτρησης. Ο υπολογισμός των καμπυλών αυτών γίνεται με τη χρήση σειρών μετρήσεων παροχής για διάφορες στάθμες με την προϋπόθεση ότι η γεωμετρία της διατομής παραμένει αμετάβλητη.

Η γενική μορφή της καμπύλης είναι (USGS, 1982; Maidment, 1993) η εξής :

$$Q = a \times (H - H_0)^b \quad (3.1)$$

Όπου

Q : παροχή (m/s)

H : στάθμη (m)

H₀ : στάθμη της μηδενικής ροής της διατομής (m)

a,b : σταθερές που προκύπτουν από την εξίσωση της γραμμικής παλινδρόμησης

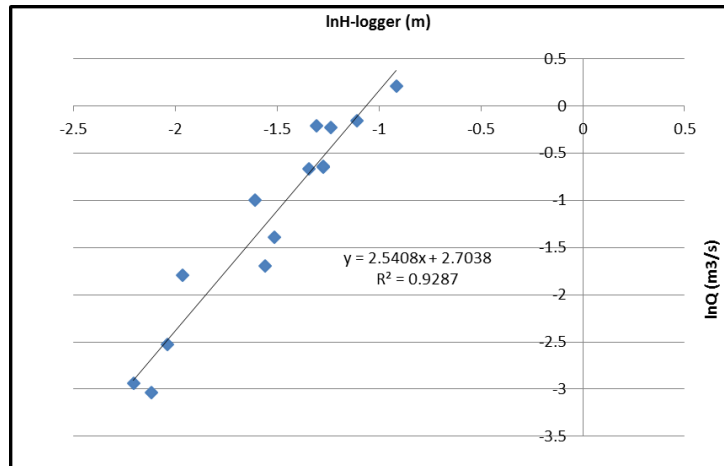
Οι λογάριθμοι των Q και H συνδέονται με τη γραμμική σχέση και μπορεί να υπολογιστεί με γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ των λογάριθμων της παροχής (Y) και της στάθμης (X). Οι μετρήσεις στάθμης-παροχής γίνονται συνήθως σε συνθήκες συνθήκες ενώ πολλές φορές δεν υπάρχουν μετρήσεις παροχής για υψηλές παροχές (πλημμύρες).

Στις Εικόνες 3.14 έως 3.18 παρουσιάζονται οι βέλτιστες καμπύλες στάθμης παροχής για τον υπολογισμό των συντελεστών a και b. Οι αυτόματοι καταγραφείς εγκαταστάθηκαν τον Ιανουάριο του 2009 ενώ τους πρώτους μήνες χρησιμοποιήθηκαν δοκιμαστικά για τον έλεγχο της θέσης και των δεδομένων. Τα τελευταία δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα Διατριβή ελήφθησαν τον Οκτώβριο του 2011.

Ο υπολογισμός των καμπυλών αυτών έγινε με τη χρήση αυτόματων σταθμηγράφων και σειρών μετρήσεων παροχής για διάφορες στάθμες εξασφαλίζοντας την απλότητα και ομοιομορφία της γεωμετρίας τόσο της διατομής όσο και της οριζοντιογραφίας του ποταμού. Η καμπύλη στάθμης-παροχής για κάθε μια διατομή έχει καλύτερη εφαρμογή κυρίως στο εύρος των τιμών των μετρήσεων που αναπτύχθηκε ενώ για υψηλές στάθμες έπρεπε να επεκταθεί. Στην παρούσα εργασία η καμπύλη στάθμης παροχής επεκτάθηκε στην γραμμικοποιημένη μορφή (λογαριθμική μέθοδος επέκτασης) για υψηλότερες στάθμες αντιστοιχούν σε πλημμυρικά γεγονότα, λόγω της δυσκολίας που υπήρχε στην μέτρηση των ταχυτήτων ροής, σε υψηλές ροές. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι τιμές μετρήσεων στάθμης, παροχής (Q, H) που αντιστοιχούν σε πλημμυρικά γεγονότα είναι μειωμένης ακρίβειας όμως για να διασφαλιστούν κατά το δυνατό συνθήκες ομοιόμορφης ροής, η διατομή των μετρήσεων γινόταν σε ευθύγραμμο τμήμα της κοίτης, κανονικού σχήματος και αμετάβλητη στο χρόνο.

Κελεφίνα Κλαδάς

Για τον υπολογισμό της ωριαίας και ημερήσιας παροχής στην περιοχή Κελεφίνα Κλαδάς μετά από επεξεργασία των τιμών της στάθμης και της παροχής από 1/01/2009 έως 22/09/2011 καταλήξαμε στην καμπύλη που απεικονίζεται στην συνέχεια.



Εικόνα 3.14. Λογαριθμικό διάγραμμα H-Q στην περιοχή Κελεφίνα Κλαδάς

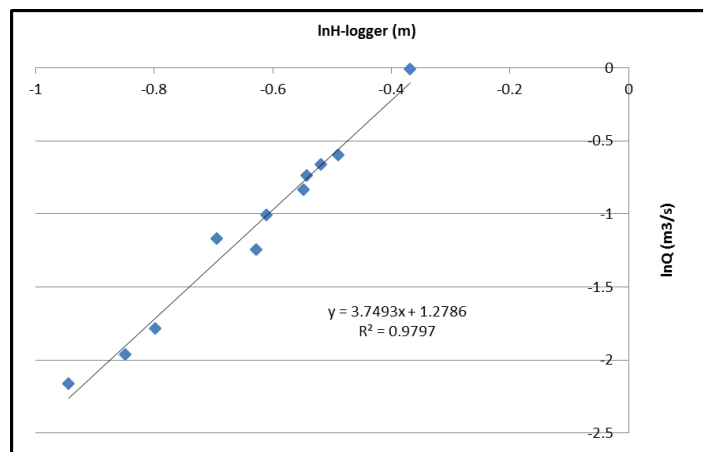
Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει η εξίσωση :

$$y=2,5408x+2,7038$$

όπου $a=\exp(2,5408)=14,9364$ και $b=2,7038$

Κελεφίνα Βασσαράς

Για τον υπολογισμό της ωριαίας και ημερήσιας παροχής στην περιοχή Κελεφίνα Βασσαράς μετά από επεξεργασία των τιμών της στάθμης και της παροχής από 20/09/2009 έως 20/09/2011 καταλήξαμε στην καμπύλη που απεικονίζεται στην συνέχεια.



Εικόνα 3.15. Λογαριθμικό διάγραμμα H-Q στην περιοχή Κελεφίνα Βασσαράς

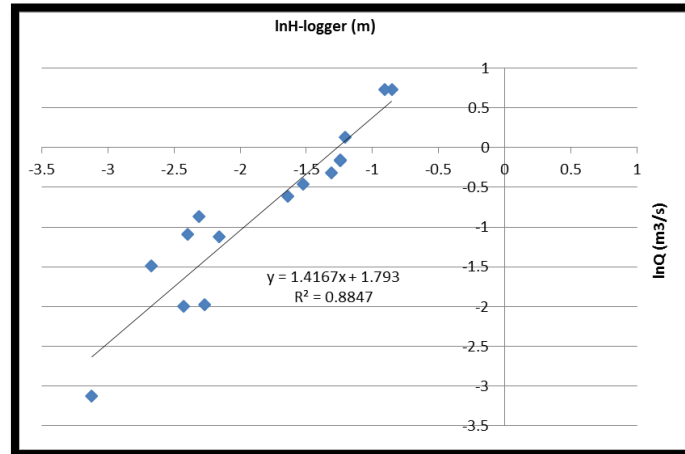
Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει η εξίσωση :

$$y=3,7493x+1,2786$$

όπου $a=\exp(1,2786)=3,5916$ και $b=3,7493$

Μαγουλίτσα Αγ. Ειρήνη

Για τον υπολογισμό της ωριαίας και ημερήσιας παροχής στην περιοχή Μαγουλίτσα Αγ. Ειρήνη μετά από επεξεργασία των τιμών της στάθμης και της παροχής από 08/07/2009 έως 24/10/2011 καταλήξαμε στην καμπύλη που απεικονίζεται στην συνέχεια.



Εικόνα 3.16. Λογαριθμικό διάγραμμα H-Q στην περιοχή Μαγουλίτσα Αγ. Ειρήνη

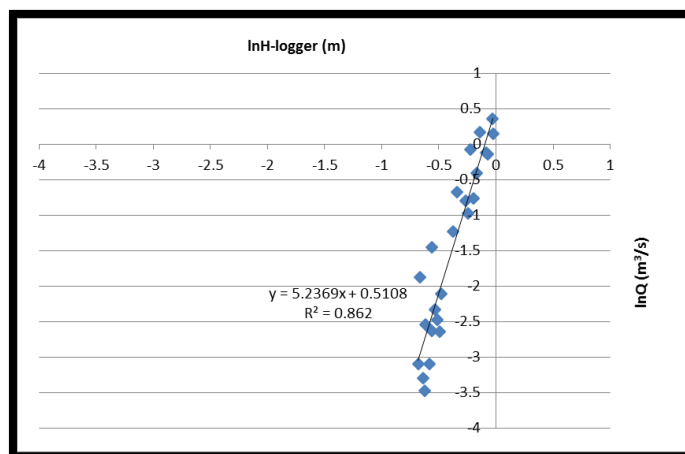
Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει η εξίσωση :

$$y = 1,4167x + 1,7930$$

όπου $a = \exp(1,7930) = 6,007$ και $b = 1,4167$

Ρασίνα Κουμουστά

Για τον υπολογισμό της ωριαίας και ημερήσιας παροχής στην περιοχή Ρασίνα Κουμουστά μετά από επεξεργασία των τιμών της στάθμης και της παροχής από 21/07/2009 έως 24/10/2011 καταλήξαμε στην καμπύλη που απεικονίζεται στην συνέχεια.



Εικόνα 3.17. Λογαριθμικό διάγραμμα H-Q στην περιοχή Ρασίνα Κουμουστά

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει η εξίσωση :

$$y=5,2369x+0,5108$$

όπου $a=\exp(0,5108)=1,665$ και $b=5,2369$

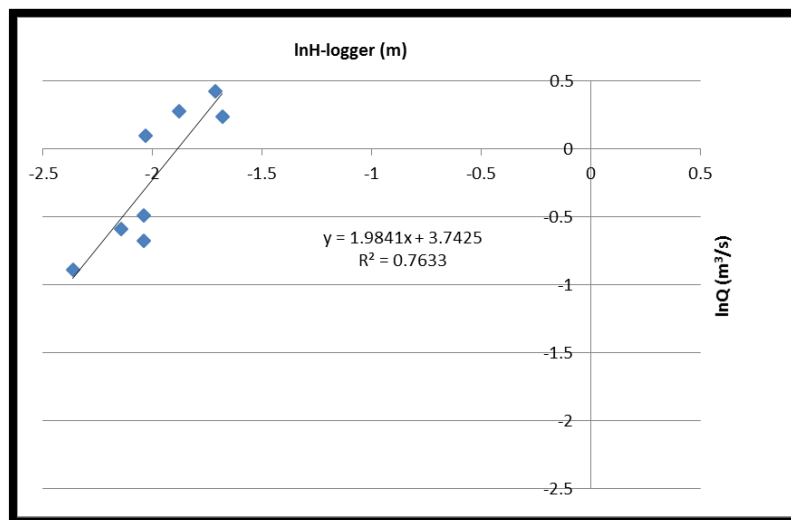
Ρασίνα Αεροδρόμιο

Για τον υπολογισμό της ωριαίας και ημερήσιας παροχής στην περιοχή Ρασίνα Αεροδρόμιο μετά από επεξεργασία των τιμών της στάθμης και της παροχής από 08/07/2009 έως 13/10/2011 καταλήξαμε στην καμπύλη που απεικονίζεται στην συνέχεια.

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει η εξίσωση :

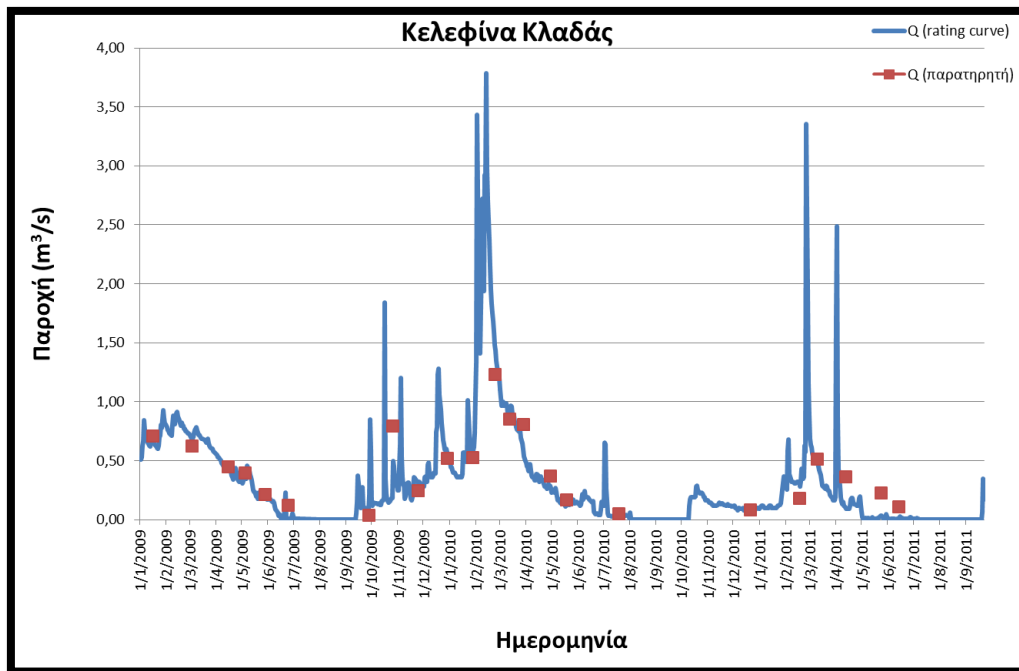
$$y=1,9841x+3,7425$$

όπου $a=\exp(3,7425)=42,203$ και $b=1,9841$

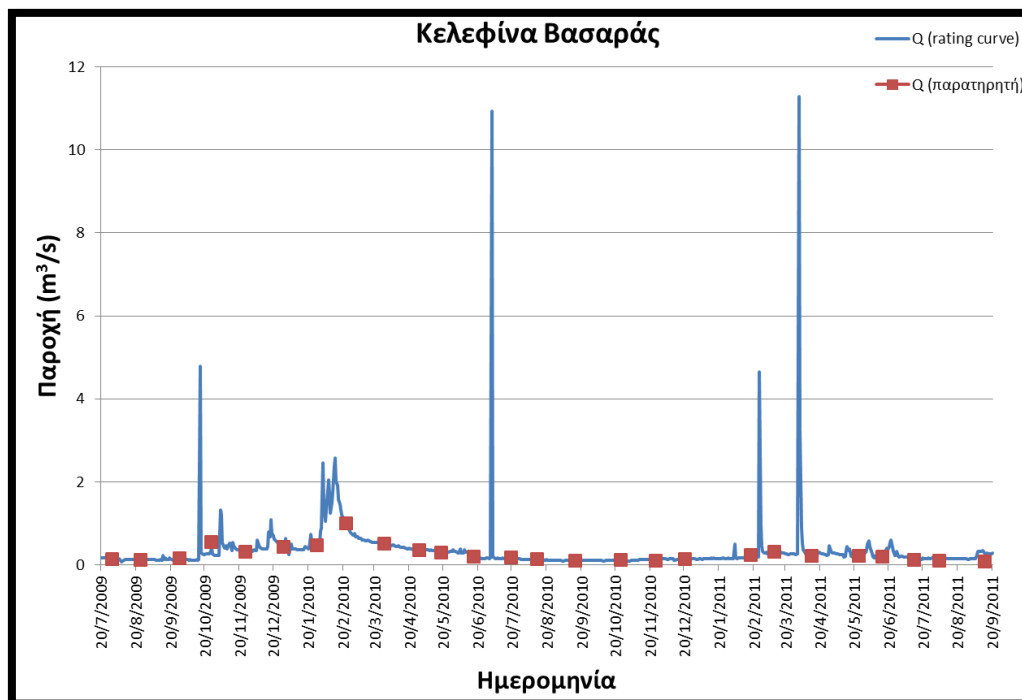


Εικόνα 3.18. Λογαριθμικό διάγραμμα H-Q στην περιοχή Ρασίνα Αεροδρόμιο

Στην συνέχεια μετατρέποντας τα 10λεπτα ή 15λεπτα δεδομένα στάθμης του αυτόματου καταγραφέα (levellogger) σε ωριαία και ημερήσια και στη συνέχεια χρησιμοποιώντας την **Εξίσωση 3.1** με τα αντίστοιχα a και b υπολογίζουμε την ημερήσια παροχή για το αντίστοιχο διάστημα. Στις **Εικόνες 3.19** έως **3.23** απεικονίζονται οι ημερήσιες παροχές για κάθε θέση και το αντίστοιχο χρονικό διάστημα μελέτης.

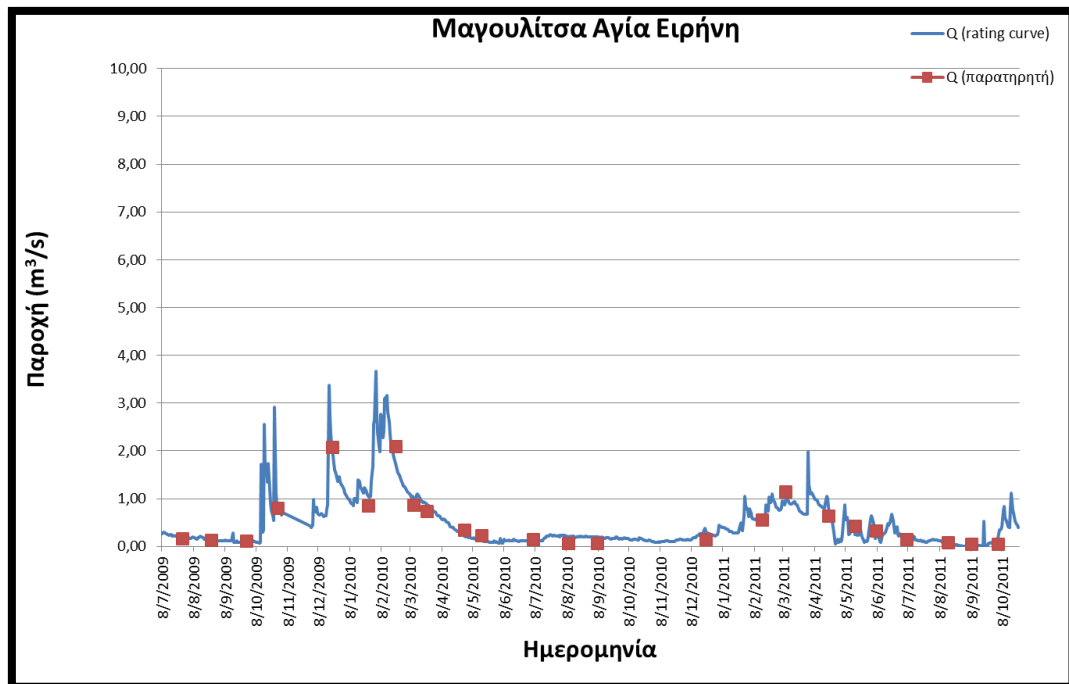


Εικόνα 3.19. Ημερήσια παροχή για το χρονικό διάστημα από 1/01/2009 έως 22/09/2011 στην θέση Κελεφίνα Κλαδάς

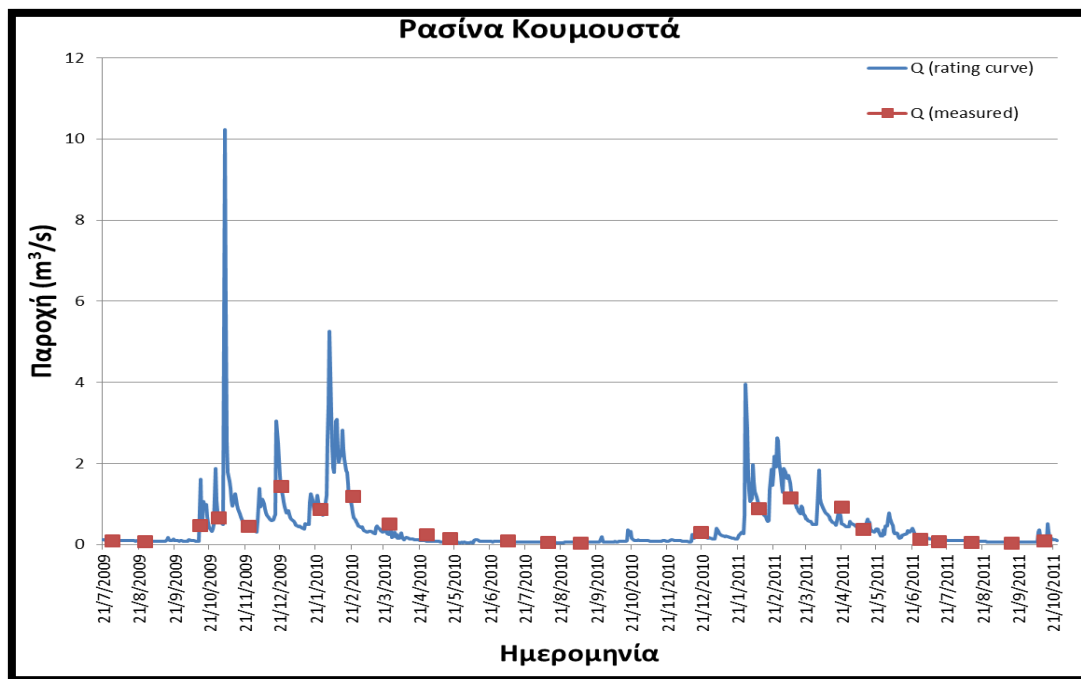


Εικόνα 3.20. Ημερήσια παροχή για το χρονικό διάστημα από 20/09/2009 έως 20/09/2011 στην θέση Κελεφίνα Βασαράς

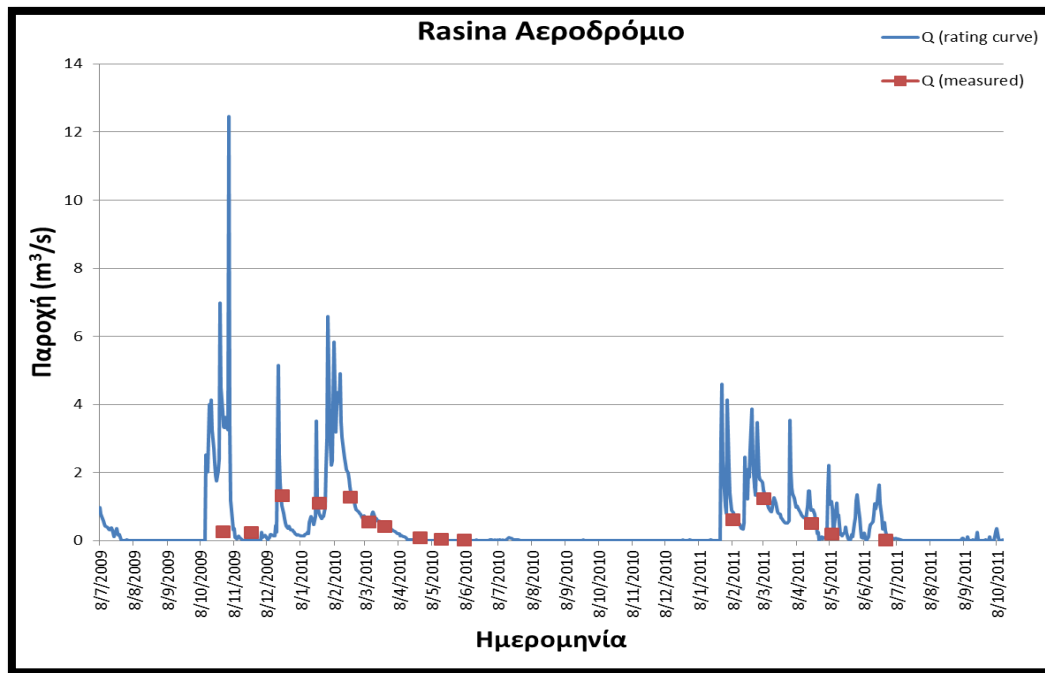
«Ολοκληρωμένο πλαίσιο μοντελοποίησης υδρολογίας, ποιότητας νερών και στερεοπαροχής σε λεκάνες απορροής ποταμών διαλείπουσας ροής»



Εικόνα 3.21. Ημερήσια παροχή για το χρονικό διάστημα από 08/07/2009 έως 24/10/2011 στην θέση Μαγουλίτσα Αγ. Ειρήνη



Εικόνα 3.22. Ημερήσια παροχή για το χρονικό διάστημα από 21/07/2009 έως 24/10/2011 στην θέση Ρασίνα Κουμουστά



Εικόνα 3.23. Ημερήσια παροχή για το χρονικό διάστημα από 08/07/2009 έως 13/10/2011 στην θέση Ρασίνα Αεροδρόμιο

Οι προκύπτουσες παροχές που υπολογίστηκαν μέσω των καμπυλών στάθμης-παροχής χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα πεδίου για την βαθμονόμηση των αποτελεσμάτων του επιφανειακού μοντέλου SWAT.

3.2.3 Τοπογραφική αποτύπωση διατομών ποταμού - Αποτελέσματα

Προκειμένου να περιοριστεί περαιτέρω η αβεβαιότητα στην προσομοίωση των ιζημάτων μελετήθηκαν και αποτυπώθηκαν τοπογραφικά σε ετήσια βάση (συνολικά τρεις έρευνες πεδίου) κατά τη διάρκεια της περιόδου 2009-2011 τρία τμήματα του ποταμού (θέσεις Μαγουλίτσα Αγ. Ειρήνη, Ρασίνα (**Εικόνες 3.24 και 3.25**). Οι υπό εξέταση περιοχές χωρίστηκαν σε 10 διατομές με σταθερά σημεία και επαρκή χώρο μεταξύ τους, προκειμένου να μετρηθούν οι διαφοροποιήσεις του όγκου λόγω μεταφοράς ιζημάτων ή της διάβρωσης της κοίτης. Η υπό εξέταση επιφάνεια που μελετήθηκε στην Μαγουλίτσα ήταν 1000 m² και στην Ρασίνα 2500 m².

Χρησιμοποιώντας το λογισμικό διαμόρφωσης τρισδιάστατης αναπαράστασης (Surfer) τα δεδομένα των τοπογραφικών διατομών χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση των αλλαγών του όγκου της κάθε περιοχής. Ταυτόχρονα το μοντέλο SWAT χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση των παραγόμενων στερεών στα ίδια τμήματα των υπολεκάνων.



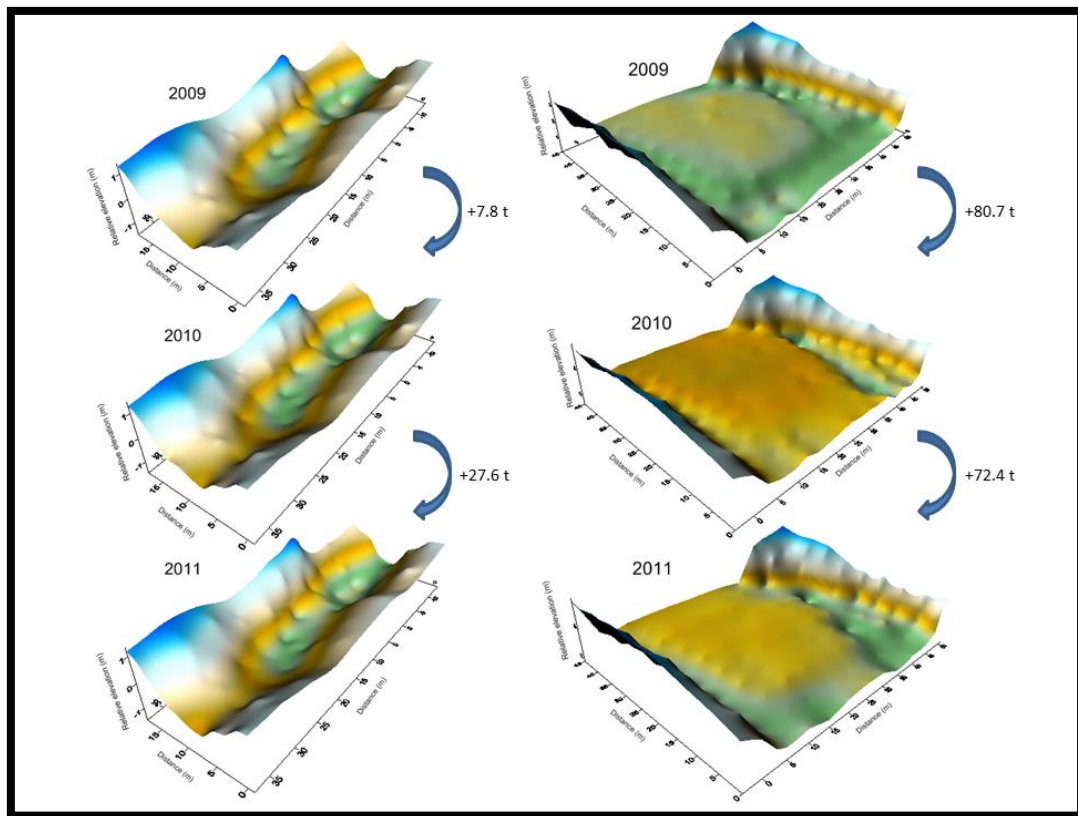
Εικόνα 3.24. Η Μαγουλίτσα Αγ.Ειρήνη τον Νοέμβριο του 2009 (αριστερά) και τον Ιούνιο του 2010 (δεξιά)



Εικόνα 3.25. Η Ρασίνα τον Νοέμβριο του 2009 (αριστερά) και τον Ιούνιο του 2010 (δεξιά)

Η διαφοροποίηση στο δυναμικό των ιζημάτων μεταξύ της αρχής και του τέλους της περιόδου προσομοίωσης αποτυπώνει την διάβρωση ή εναπόθεση της συγκεκριμένης υπό εξέταση περιοχής. Γνωρίζοντας το μήκος, το πλάτος και την έκταση κάθε τμήματος υπολογίστηκε η διάβρωση/απόθεση ανά μονάδα επιφανείας για να είναι συγκρίσιμη με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της τοπογραφικής αποτύπωσης.

Η τρισδιάστατη αναπαράσταση της κάθε τοπογραφικά υπό εξέταση περιοχής (Μαγουλίτσα Αγ. Ειρήνη και Ρασίνα) παρουσιάζεται στην **Εικόνα 3.26**. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα υπήρξε μια αύξηση στον όγκο των δύο περιοχών μεταξύ του Μαρτίου 2009 και του Ιουλίου 2011 υποδηλώνοντας την απόθεση ιζημάτων στις κοίτες.



Εικόνα 3.26. Τρισδιάστατες (3-D) τοπογραφικές απεικονίσεις των τμημάτων Μαγουλίτσα Αγ. Ειρήνη (αριστερά) και Ρασίνα (δεξιά).

4 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΥ ΚΑΘΕΣΤΩΤΟΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΙΖΗΜΑΤΩΝ ΣΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΑ ΝΕΡΑ

Οι περιοχές της Μεσογείου υπόκεινται σε δραματικές αλλαγές λόγω της ταχείας αύξησης του πληθυσμού, της ταχείας αστικοποίησης και της οικονομικής ανάπτυξης επηρεάζοντας τη βιωσιμότητα, την ποσότητα, την ποιότητα και τη διαχείριση των υδατικών πόρων. Η έκταση των ποταμών διαλείπουσας ροής στην περιοχή της Μεσογείου είναι μεγάλη, ενώ πολλοί ποταμοί ξεραίνονται κατά τη διάρκεια ξηρών χρόνων λόγω της μεγάλης απαίτησης σε ποσότητες νερού για γεωργικές, βιομηχανικές ή οικιακές ανάγκες (Nikolaidis et al., 2014; Tzoraki and Nikolaidis, 2007).

Οι ποταμοί διαλείπουσας ροής ανταποκρίνονται στην ετήσια μεταβλητότητα των βροχοπτώσεων με την παραγωγή πλημμυρικών γεγονότων υψηλής έντασης και φαινομένων διάβρωσης που είναι δύσκολο να μελετηθούν και να προβλεφθούν. Δεδομένης της σημασίας τους και της τεράστιας έκτασης τους τα υδατορέματα εφήμερης και διαλείπουσας ροής δεν θα πρέπει να εξετάζονται τμηματικά ούτε μεμονωμένα.

Τις τρεις τελευταίες δεκαετίες, έχει υπάρξει μια αυξανόμενη συνειδητοποίηση στη σημασία των προβλημάτων που σχετίζονται με τη διάβρωση στη Μεσόγειο. Η παραγωγή, μεταφορά και εναπόθεση ιζημάτων έχει επιπτώσεις στον κύκλο του νερού και του αζώτου σε παγκόσμια κλίμακα. Η παραγωγή ιζημάτων υπολογίζεται παγκοσμίως ίση με $20 \times 10^9 \text{ tn y}^{-1}$ εκ των οποίων άνω του 25% παγιδεύεται σε μεγάλα φράγματα (Takeuchi, 2004). Λόγω των εντατικών πρακτικών χρήσεων γης, η διάβρωση έχει γίνει μια από τις πιο επικίνδυνες μορφές υποβάθμισης του εδάφους που οδηγεί σε σημαντική μείωση της γονιμότητας του εδάφους και της απόδοσης του (Nerantzaki et al., 2015).

Η ποσοτικοποίηση της μεταφερόμενης ποσότητας ιζήματος είναι σημαντική για να χαρακτηριστούν συνθήκες και διεργασίες όπως η ποιότητα των υδάτων, η οικολογία των ασπόνδυλων και των ενδιαιτημάτων μιας περιοχής ή η δυναμική μιας ακτογραμμής (Bull and Kirkby, 2002; Vericat and Batalla, 2010; Syvitski et al., 2003). Οι πιο σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις της μεταφοράς ιζημάτων εκδηλώνονται σε πεδινές περιοχές.

Υπάρχει περιορισμένος αριθμός μελετών στερεομεταφοράς στην περιοχή της Μεσογείου και αυτό δημιουργεί ένα σημαντικό κενό στην κατανόηση των διεργασιών διάβρωσης του εδάφους, καθώς και στις επιπτώσεις αυτής (Rovira και Batalla, 2006). Μοντέλα όπως το USLE (Wischmeier και Smith, 1965), το SHETRAN (Bathurst et al., 1996, 2002), το RUSLE (Renard et al. 1997), το EUROSEM (Quinton, 1997) ή το WEPP (Flanagan et al., 2001) έχουν αναπτυχθεί για την ποσοτική εκτίμηση της διάβρωσης σε επίπεδο λεκάνης απορροής, ενώ άλλα μοντέλα όπως το Corine (Corine, 1992), το Pesera (Kirkby et al., 2003), το Medalus (Kirkby, 1998) έχουν

χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση αυτών των ποσοτήτων σε μεγαλύτερη κλίμακα. Οι μελέτες και τα μοντέλα διάβρωσης σε χώρες της Μεσογείου υπέστησαν σημαντική ώθηση κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας κυρίως στην Ισπανία και την Ιταλία. Στις περισσότερες από αυτές τις μελέτες η ποσοτικοποίηση των φορτίων γίνεται είτε με τη χρήση στατιστικής σε υπάρχοντα ιστορικά δεδομένα (π.χ καμπύλες στερεοπαροχής) είτε με τη δημιουργία χαρτών συνδυάζοντας μετρήσεις πεδίου νερού (**Vericat and Batalla, 2010; Rovira and Batalla, 2006; López-Tarazón et al., 2009; Rodríguez-Blanco et al., 2010; Nunes et al., 2011**).

Στην Ελλάδα έχουν διεξαχθεί λίγες μελέτες που αφορούν την μεταφορά ιζημάτων και αυτά ως επί το πλείστον σε λίμνες και παράκτια περιβάλλοντα. Οι **Valmis et al. (2005)** ανέπτυξαν μια συνάρτηση χρησιμοποιώντας των δείκτη αστάθειας για την εκτίμηση του ρυθμού διάβρωσης του εδάφους. Οι **Hrissanthou et al. (2010)** υπολόγισαν την εισροή ιζημάτων στην λίμνη Βιστωνίδα, συνδυάζοντας ένα φυσικό μοντέλο διάβρωσης με ένα υδρολογικό μοντέλο και ένα μοντέλο μεταφοράς ιζημάτων. Οι **Kosmas et al. (2003)** αξιολόγησαν την επίδραση των παραμέτρων της γης, όπως η υφή του εδάφους μας, το πάχος του εδάφους, το μητρικό πέτρωμα, η τοπογραφία και το κλίμα στις επιδόσεις της βλάστησης και τον βαθμό διάβρωσης για το νησί της Λέσβου. Οι **Zarris et al. (2007)** ανέπτυξαν δύο εξισώσεις για να περιγράψουν ποιοτικά τα φαινόμενα διάβρωσης από την άποψη της σχέσης μεταξύ της γεωμορφολογίας και της παραγόμενης ποσότητας ιζημάτων σε έντεκα λεκάνες απορροής στη Βορειοδυτική Ελλάδα. Οι **Panagopoulos et al. (2008)** υπολόγισαν την παραγόμενη ποσότητα ιζήματος στον ποταμό Άραχθο χρησιμοποιώντας το μοντέλο SWAT και σχέσεις που αφορούν υδρομετεωρολογικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης.

Πρόσφατα οι **Gamvroudis et al., (2015)** χρησιμοποίησαν το μοντέλο SWAT για τον προσδιορισμό της ποσότητας νερού και μεταφοράς ιζημάτων στον ποταμό Ευρώτα ενώ οι **Nerantzaki et al., (2015)** μελέτησαν την μεταφορά ιζημάτων σε καρστικά συστήματα στην Κρήτη και οι **Nerantzaki et al., (2016)** έδειξαν πως το μοντέλο SWAT μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στην συσσώρευση ιζημάτων σε μεγάλους ταμιευτήρες όπως τα φράγματα.

Σκοπός του παρόντος κεφαλαίου είναι η μελέτη της χωρικής και χρονικής κατανομής των επιφανειακών υδάτων και της στερεομεταφοράς εστιάζοντας στη συλλογή δεδομένων σε διάφορες κλίμακες για την ελαχιστοποίηση της αβεβαιότητας που προκύπτει στον υδατικό ισοζύγιο από υφιστάμενους περιορισμούς όπως π.χ η μεγάλη έκταση της λεκάνης. Ειδικότερα για την περαιτέρω εξέταση και επαλήθευση της προσομοίωσης της λεκάνης απορροής του ποταμού Ευρώτα μέσω του μοντέλου SWAT δημιουργήθηκαν σε ξηρές περιόδους χάρτες απορροής, προσδιορίζοντας τα τμήματα του ποταμού με επιφανειακή ροή ή όχι, χάρτες οι οποίοι στην συνέχεια συγκρίθηκαν με πραγματικούς χάρτες απορροής ενώ προκειμένου να περιοριστεί περαιτέρω η προσομοίωση των ιζημάτων μελετήθηκαν και αποτυπώθηκαν

τοπογραφικά σε ετήσια βάση κατά τη διάρκεια της περιόδου 2009-2011 δύο τμήματα του ποταμού.

4.1 Προσομοίωση του υδρολογικού καθεστώτος και της μεταφοράς ιζημάτων στα επιφανειακά νερά του ποταμού Ευρώτα

Η προσομοίωση του υδρολογικού και ποιοτικού καθεστώτος της λεκάνης και της μεταφοράς ιζημάτων στα επιφανειακά νερά έγινε μέσω του μοντέλου SWAT. Η προσομοίωση της περιοχής μελέτης μέσω του μοντέλου SWAT απαιτεί τον καθορισμό μεγάλου αριθμού παραμέτρων στα αρχεία εισόδου του. Ωστόσο, η έλλειψη επαρκών δεδομένων καθιστά τον καθορισμό τους μία πολύπλοκη και αβέβαιη διαδικασία που είναι όμως εφικτή μέσω της διαδικασίας της βαθμονόμησης του μοντέλου με προσομοίωση των παρατηρούμενων δεδομένων.

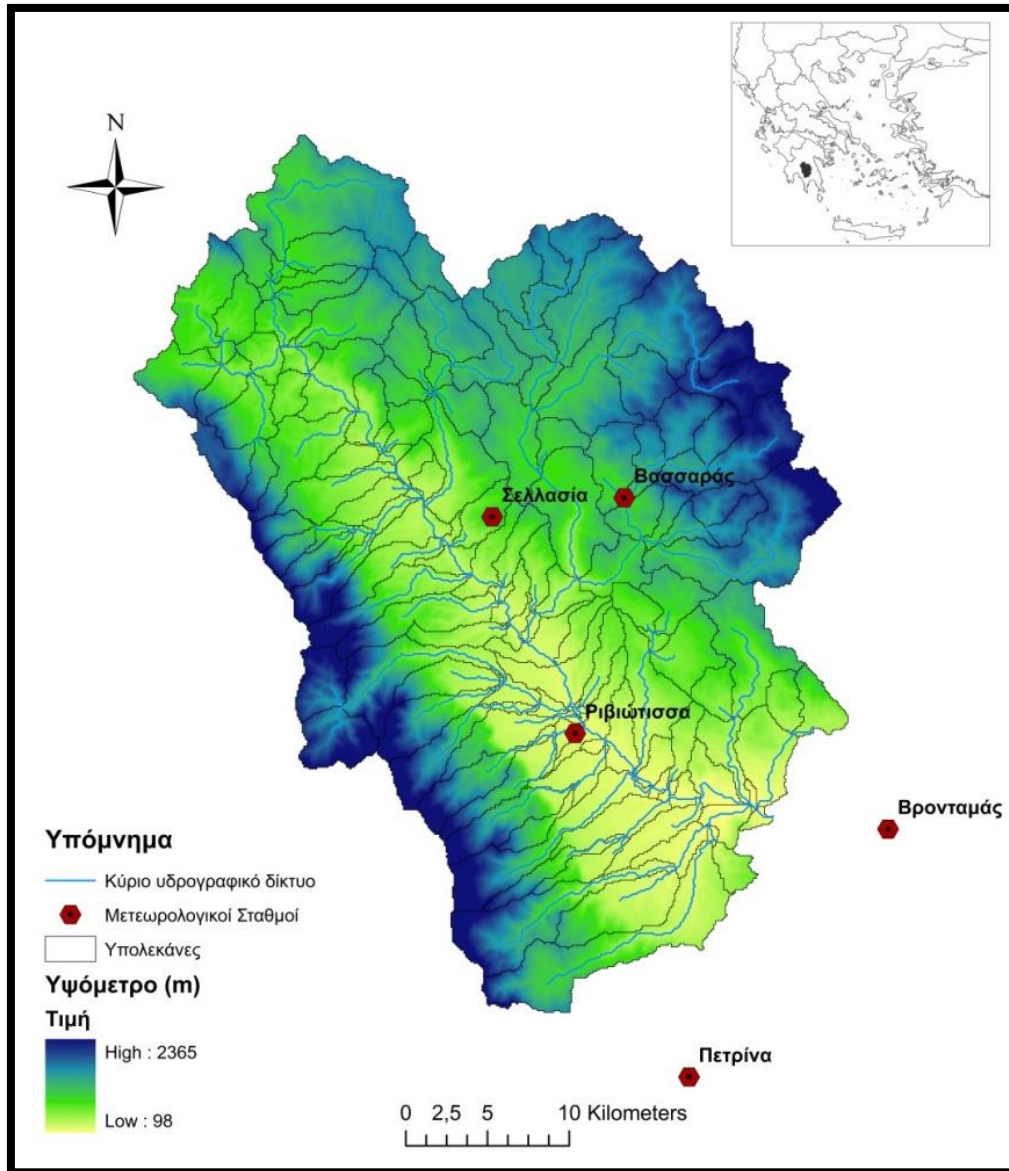
Δεδομένου ότι στην Ελλάδα τα μετρούμενα δεδομένα δεν μπορούν να καλύψουν ποτέ το σύνολο των απαιτούμενων δεδομένων εισαγωγής ενός μοντέλου σαν το SWAT για την προσομοίωση των διεργασιών μιας λεκάνης απορροής χρειάζεται πάντα να γίνονται υποθέσεις και απλουστευτικές παραδοχές, θεμελιωμένες όμως στην εμπειρία και στην επιστημονική γνώση. Η προσομοίωση της υφιστάμενης κατάστασης της λεκάνης απορροής του ποταμού Ευρώτα μέσω του μοντέλου SWAT περιγράφεται μαζί με όλες τις αποφάσεις που ελήφθησαν για να ξεπεραστούν τα προβλήματα αναπαράστασης δεδομένων στη λεκάνη. Οι αποφάσεις αυτές βασίστηκαν στα ήδη υπάρχοντα δεδομένα, σε βιβλιογραφικές πηγές, στην υφιστάμενη γνώση καθώς και στην εμπειρία χρήσης του μοντέλου SWAT.

4.1.1 Σχηματοποίηση της λεκάνης απορροής

Το πρώτο βήμα της μοντελοποίησης με το SWAT περιλαμβάνει τη σχηματοποίηση της λεκάνης απορροής που θα ορίσει το βασικό χαρακτηριστικό της κλίσης εδάφους στα διάφορα τμήματα της λεκάνης. Η διαδικασία αυτή γίνεται σε περιβάλλον ΓΣΠ στο οποίο έχουν ενσωματωθεί οι βασικές διεργασίες της εφαρμογής του μοντέλου SWAT. Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε η έκδοση SWAT2009 με περιβάλλον εργασίας το "ARCSWAT", ενσωματωμένο στο πρόγραμμα "ARCGIS 10".

Η σχηματοποίηση της λεκάνης ξεκινά με την εισαγωγή του ψηφιακού μοντέλου εδάφους (Digital Elevation Model – DEM), που αποτελεί το υπόβαθρο με βάση το οποίο τα ΓΣΠ θα σχεδιάσουν το υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης. Το αρχείο αυτό διατίθεται σε μορφή καννάβου (grid) με τα κελιά να χαρακτηρίζονται από μία και μοναδική τιμή υψομέτρου. Για την δημιουργία του ψηφιακού μοντέλου εδάφους χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα της βάσης δεδομένων STRM (Shuttle Radar Topographic

Mission) της NASA με ευκρίνεια 90 m. Το ψηφιακό τοπογραφικό ανάγλυφο της λεκάνης απορροής του ποταμού Ευρώτα φαίνεται στην **Εικόνα 4.1**.



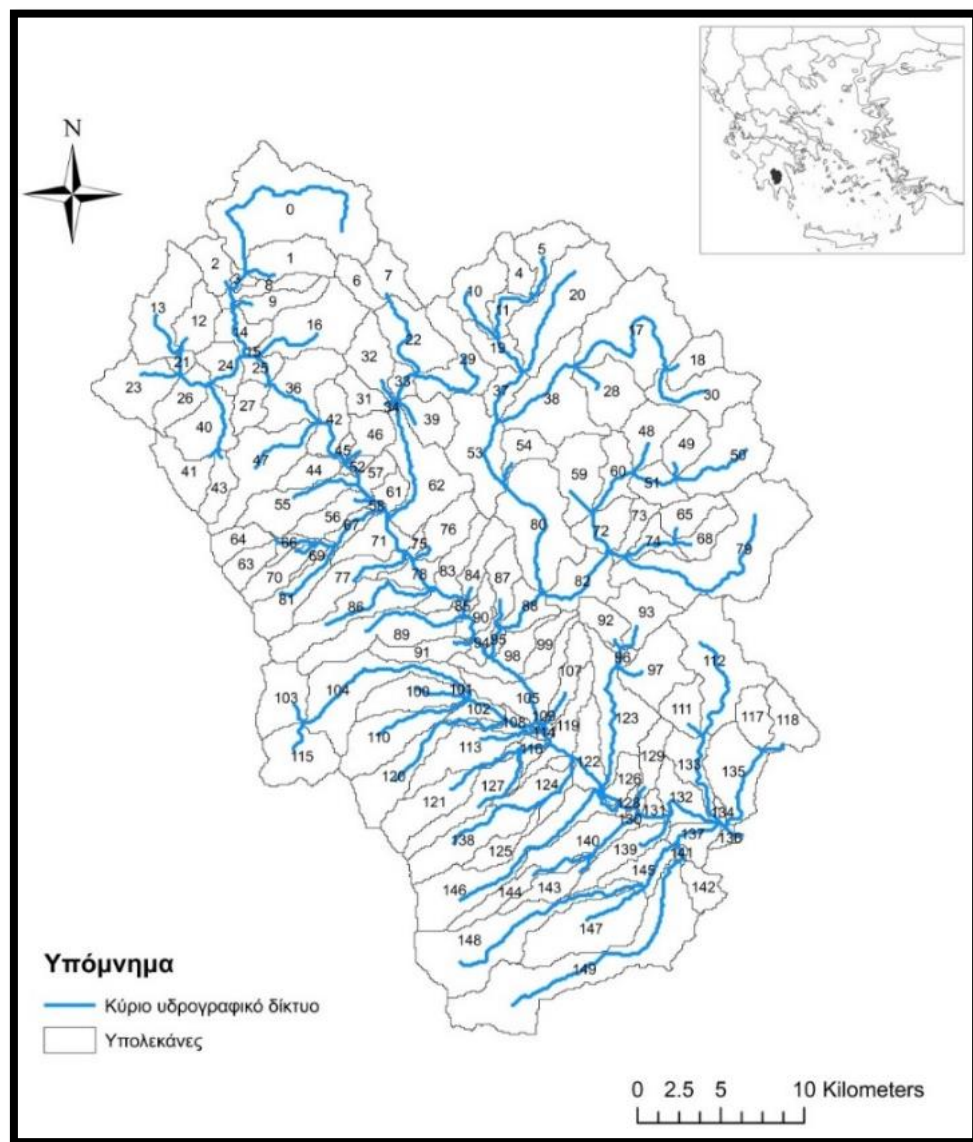
Εικόνα 4.1. Ψηφιακό τοπογραφικό ανάγλυφο (DEM) της λεκάνης απορροής του ποταμού Ευρώτα

Επιπλέον ορίζεται στο πρόγραμμα η τιμή κατωφλίου η οποία αντιπροσωπεύει την ελάχιστη έκταση σε ha, που απαιτείται για τη δημιουργία συγκεντρωτικής ροής ή αλλιώς για δημιουργία τμήματος ποταμού. Όσο μικρότερη είναι η τιμή αυτή, τόσο πιο πυκνό είναι το υδρογραφικό δίκτυο που σχεδιάζεται. Για τη λεκάνη απορροής του ποταμού Ευρώτα χρησιμοποιήθηκε τιμή κατωφλίου ίση με 500ha. Δημιουργήθηκαν 150 υπολεκάνες, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 4.2** ώστε ο διαχωρισμός να είναι επαρκής για την ακρίβεια των εκτιμήσεων του μοντέλου και καίριες θέσεις παρατήρησης κατά

«Ολοκληρωμένο πλαίσιο μοντελοποίησης υδρολογίας, ποιότητας νερών και στερεοπαροχής σε λεκάνες απορροής ποταμών διαλείπουσας ροής»

μήκος του υδρογραφικού δικτύου να αντιπροσωπεύονται από έξοδο υπολεκάνης ώστε το μοντέλο να εξάγει αποτελέσματα σε αυτές.

Σημαντικές θέσεις εντός της λεκάνης απορροής αποτελούν τα σημεία ένωσης των παραποτάμων Μαγουλίτσα, Ρασίνα, Οινούντα με τον κύριο ρού του Ευρώτα όπως επίσης και η περιοχή του Βιβαρίου. Στις θέσεις αυτές διατίθενται όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενες ενότητες παρατηρούμενα δεδομένα παροχών, στερεοπαροχών και συγκεντρώσεων θρεπτικών για χρήση κατά τη βαθμονόμηση του μοντέλου.



Εικόνα 4.2. Διαχωρισμός της λεκάνης του ποταμού Ευρώτα σε υπολεκάνες με βάση το ψηφιακό τοπογραφικό ανάγλυφο.

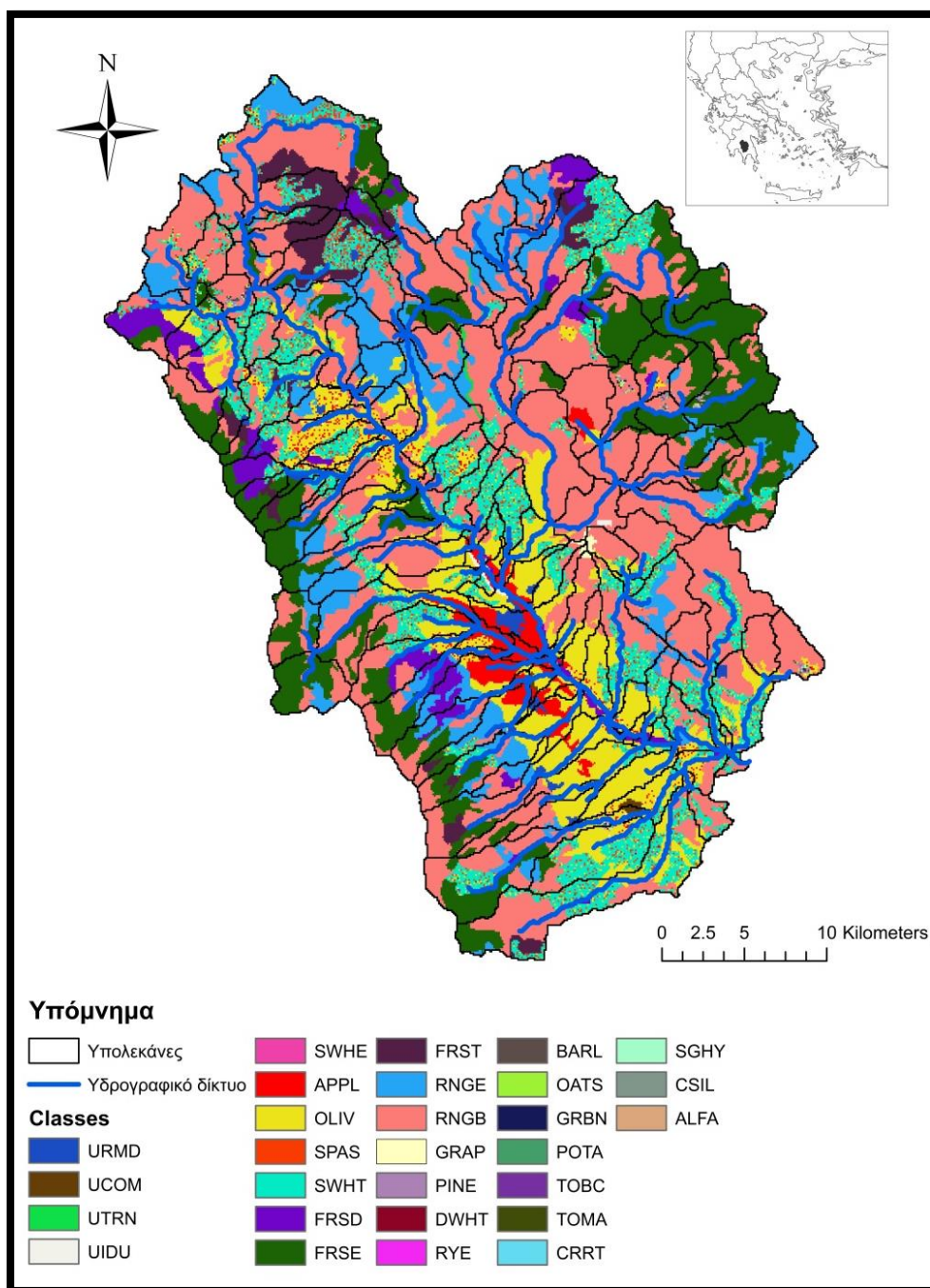
4.1.2 Απεικόνιση χρήσεων γης και εδάφους

Η βάση δεδομένων χρήσεων γης του CORINE LAND COVER (CLC2000), κλίμακας 1:100000 χρησιμοποιήθηκε στο μοντέλο SWAT για την δημιουργία των τύπων κάλυψης γης της περιοχής μελέτης. Ήδη αναφέρθηκαν προηγουμένως η δυσκολία που υπάρχει στην ακριβή απεικόνιση των διαφόρων χρήσεων γης και εδάφους σε μια λεκάνη απορροής στον ελλαδικό χώρο. Επίσης η επαλήθευση του μοντέλου με βάση τις παρατηρούμενες παροχές πριν το 2000 θα μπορούσε να θεωρηθεί μη αντιπροσωπευτική χρησιμοποιώντας δεδομένα χρήσης γης του 2000. Η κατανομή της γεωργικής χρήσης γης στις διάφορες καλλιέργειες και της κτηνοτροφίας δεν έχει μεταβληθεί αισθητά τα τελευταία 40 με 50 χρόνια.

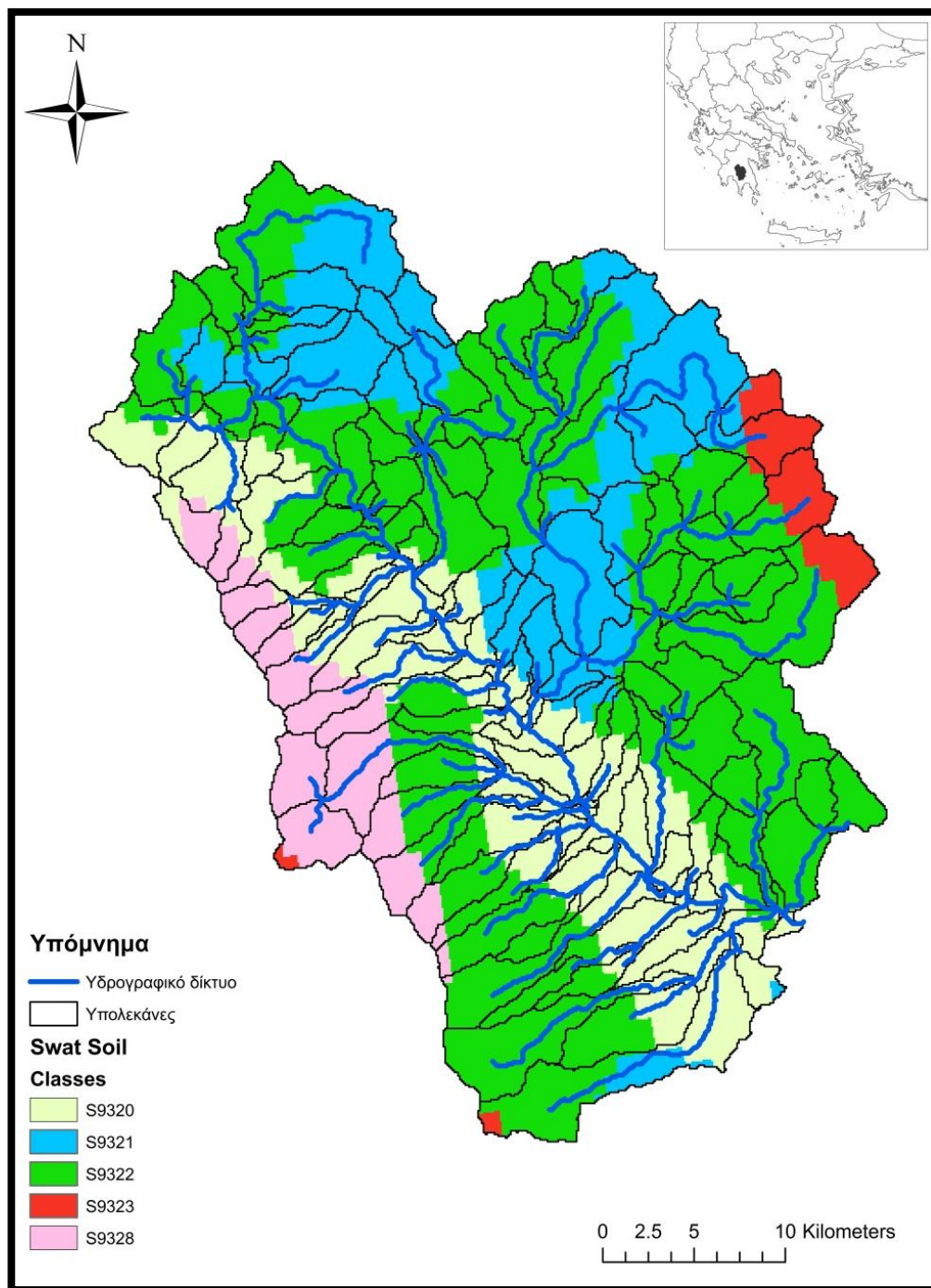
Οι χάρτες που παρέχονται από το CORINE περιγράφουν τα είδη κάλυψης της γης με διαχωρισμό σε 44 υποκατηγορίες, οι οποίες ομαδοποιούνται σε τρία επίπεδα ονοματολογίας (EEA-ETC/TE, 2002). Το SWAT δε μπορεί να λάβει απ' ευθείας υπόψη του την ονοματολογία του CORINE καθότι διαθέτει δικούς του κωδικούς κατηγοριοποίησης των τύπων εδαφοκάλυψης. Οι κατηγορίες του CORINE αντιστοιχήθηκαν σε κατηγορίες της βάσης δεδομένων του μοντέλου και προέκυψαν οι τύποι εδαφοκάλυψης.

Οι βασικοί τύποι εδαφοκάλυψης στη λεκάνη είναι διάφορα είδη θάμνων (RNGB) 36.26%, δάση κωνοφόρων (FRSE) 14.75%, Ελαιώνες (OLIV) 14.46% και εκτάσεις που καλλιεργούνται την άνοιξη (SWHT) 12.53%.

Για τον εδαφολογικό χάρτη χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα της Ευρωπαϊκής Βάσης Δεδομένων Εδάφους και περιέχουν χαρακτηριστικά του εδάφους από την Γεωγραφική Βάση Δεδομένων της Ευρασίας σε κλίμακα 1:1.000.000 (v4.0 beta) και την βάση δεδομένων πρόβλεψης των ιδιοτήτων του εδάφους χρησιμοποιώντας δεδομένα από έρευνες στο πεδίο (PedoTransfer v2.0). Οι τύποι του εδάφους της περιοχής μελέτης της λεκάνης απορροής του ποταμού Ευρώτα προέρχονται από τη βάση δεδομένων SOIL-FAO (FAO, 1995) του Οργανισμού Τροφίμων και Γεωργίας των Ηνωμένων Εθνών. Οι τύποι εδαφοκάλυψης και οι τύποι εδαφών που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο SWAT παρουσιάζονται στην **Εικόνα 4.3** και **Εικόνα 4.4** αντίστοιχα.



Εικόνα 4.3. Τύποι εδαφοκάλυψης της λεκάνης απορροής του ποταμού Ευρώτα σύμφωνα με την ονοματολογία του μοντέλου SWAT



***Εικόνα 4.4.** Τύποι εδαφών της λεκάνης απορροής του ποταμού Ευρώτα σύμφωνα με την ονοματολογία του μοντέλου SWAT*

4.1.3 Σχηματισμός Υδρολογικών Μονάδων Απόκρισης

Οι υδρολογικές μονάδες απόκρισης (Hydrologic Response Units – HRUs) είναι η γεωγραφική διαίρεση της λεκάνης στην οποία το μοντέλο SWAT πραγματοποιεί όλους τους υπολογισμούς του υδρολογικού κύκλου, της διάβρωσης και του κύκλου των θρεπτικών. Η κλίση εδάφους, η βροχόπτωση και κάποια στοιχεία για τις ιδιότητες των υδατορεμάτων ορίζονται ωστόσο σε επίπεδο υπολεκάνης. Όλες οι υδρολογικές μονάδες απόκρισης μιας υπολεκάνης έχουν την ίδια κλίση και δέχονται την ίδια βροχόπτωση. Ο διαχωρισμός σε υδρολογικές μονάδες απόκρισης εξυπηρετεί τα μέγιστα στη διερεύνηση της επίδρασης των διαφόρων διεργασιών στη ρύπανση των υδάτων.

Η υδρολογική μονάδα απόκρισης είναι η έκταση που χαρακτηρίζεται από μοναδικό συνδυασμό τοπογραφικής, εδαφικής και διαχειριστικής πληροφορίας και προσομοιάζει τη χωρική μονάδα αγρού (Muleta and Nicklow, 2005). Ως διαχειριστική πληροφορία εννοείται ο τύπος εδαφοκάλυψης και η διαχείριση που μαζί ορίζουν τη χρήση γης. Επομένως, η επικάλυψη του χάρτη των υπολεκανών, του χάρτη χρήσεων γης και του χάρτη εδάφους δημιουργεί όλους τους συνδυασμούς των ανωτέρω χαρακτηριστικών στη λεκάνη.

Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε κατώφλι για την εν λόγω διαδικασία ίσο με 10% δηλαδή συμπεριελήφθησαν στη δημιουργία των υδρολογικών μονάδων απόκρισης μόνο οι τύποι χρήσης γης και εδάφους με έκταση μεγαλύτερη από 10%. Με αυτή τη διαδικασία η λεκάνη απορροής προσομοιώνεται με αρκετά λεπτομερή τρόπο, καθώς κάθε υπολεκάνη υποδιαιρείται σε μικρότερες HRUs.

4.1.4 Μετεωρολογικά δεδομένα

Το τελευταίο βήμα στην προετοιμασία του μοντέλου SWAT αποτελεί η εισαγωγή σε αυτό των μετεωρολογικών δεδομένων. Η μετεωρολογική πληροφορία στο SWAT αφορά κυρίως την ημερήσια βροχόπτωση και την ημερήσια μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία, ενώ απαιτούνται και στοιχεία για την ταχύτητα του ανέμου, την ηλιακή ακτινοβολία και τη σχετική υγρασία στην περίπτωση υπολογισμού της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής με κάποια απαιτητική σε δεδομένα μέθοδο, όπως η Penman-Monteith. Τα τελευταία δεδομένα συναντώνται πολύ πιο αραιά από τη βροχόπτωση, ενώ το μοντέλο παρέχει τη δυνατότητα της γένεσης χρονοσειρών για τις μετεωρολογικές μεταβλητές με χρήση στατιστικών κατανομών και ιστορικών μέσω ετήσιων τιμών (Neitch et al., 2005a). Η εν λόγω διαδικασία επιτρέπει επίσης τη συμπλήρωση χρονοσειρών. Ωστόσο, στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε η εκ των προτέρων και εκτός του μοντέλου επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων με συμπληρώσεις χρονοσειρών και στατιστικούς ελέγχους.

Η μετεωρολογικοί σταθμοί επιλέχθηκαν ώστε να καλύπτεται όσο το δυνατόν καλύτερα όλη η έκταση της λεκάνης απορροής. Πέντε βροχομετρικοί σταθμοί και 3 σταθμοί μέτρησης της θερμοκρασίας που βρίσκονται εντός της λεκάνης χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση του μοντέλου χρησιμοποιώντας δεδομένα σε ημερήσιο βήμα. Τα μετεωρολογικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από τους σταθμούς του **Πίνακα 4.1** ενώ στον **Πίνακα 4.2** και **Πίνακα 4.3** παρουσιάζονται οι μέσες τιμές βροχόπτωσης και θερμοκρασίας.

Οι σταθμοί αυτοί βρίσκονται σε λειτουργία από το 1970 και είναι οι εξής: Ριβιώτισσα (164 m), Βρονταμάς (140 m, λειτουργεί από το 1953), Περιβόλια (490 m), Σελλασία (610 m) και Βασσαράς (650 m) **Εικόνα 4.1**. Επιπλέον χρησιμοποιήθηκαν μηνιαία δεδομένα βροχόπτωσης από 5 σταθμούς (Άρνα, Καστόρι, Πετρίνα, Σπάρτη και Καρυές). Όλοι οι σταθμοί χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη των βροχοβαθμίδων και θερμοβαθμίδων ενώ ελλιπή δεδομένα συμπληρώθηκαν χρησιμοποιώντας γραμμικές μεθόδους παλινδρόμησης.

Πίνακας 4.1. Μετεωρολογικοί σταθμοί στην ευρύτερη περιοχή της λεκάνης απορροής του ποταμού Ευρώτα.

Σταθμός	Υψόμετρο (m)	Γεωγραφικό πλάτος	Γεωγραφικό μήκος
Περιβόλια	490	37°10'54.88" N	22°18'35.25" E
Βασσαράς	650	37°10'02.69" N	22°30'31.92" E
Σελλασία	610	37°10'06.39" N	22°25'03.10" E
Ριβιώτισσα	164	37°2'56.98" N	22°27'06.56" E
Βρονταμάς	140	36°57'43.37" N	22°39'10.74" E
Έλος	5	36°49'59.32" N	22°41'52.25" E

Πίνακας 4.2. Μέσες μηνιαίες τιμές βροχόπτωσης περιόδου 1990-2010

Μήνας	Περιβόλια	Βασσαράς	Σελλασία	Ριβιώτισσα	Βρονταμάς
Ιανουάριος	145,8	98,0	92,1	127,6	84,4
Φεβρουάριος	156,5	90,9	84,2	127,0	66,4
Μάρτιος	98,8	71,9	62,4	75,1	43,8
Απρίλιος	74,9	52,4	50,5	72,1	34,3
Μάιος	55,8	40,8	39,9	31,7	20,2
Ιούνιος	27,1	18,7	19,4	12,8	10,4
Ιούλιος	30,8	26,2	27,2	6,7	7,8
Αύγουστος	37,2	34,1	30,3	21,1	11,2
Σεπτέμβριος	60,0	40,1	36,2	30,7	22,4
Οκτώβριος	114,9	51,1	49,5	71,7	42,2
Νοέμβριος	229,5	111,7	132,7	150,7	113,6
Δεκέμβριος	211,9	105,1	123,2	175,4	100,4

Πίνακας 4.3. Μέσες μηνιαίες τιμές θερμοκρασίας περιόδου 1990-2010

Μήνας	Σταθμός		
	Σελλασία	Έλος	Ριβιώτισσα
Ιανουάριος	7,5	9,9	8,3
Φεβρουάριος	7,6	10,0	8,6
Μάρτιος	10,0	11,8	11,5
Απρίλιος	13,2	14,8	14,1
Μάιος	18,0	19,1	18,7
Ιούνιος	23,2	23,8	23,1
Ιούλιος	25,6	26,6	25,8
Αύγουστος	25,6	26,3	25,4
Σεπτέμβριος	21,3	22,7	21,6
Οκτώβριος	17,6	19,4	17,9
Νοέμβριος	12,5	15,1	13,3
Δεκέμβριος	8,4	11,5	9,7

4.1.5 Δεδομένα Άρδευσης

Η ποσότητα νερού για άρδευση που χρησιμοποιήθηκε στο SWAT εκτιμήθηκε από την καταναλώμενη ηλεκτρική ενέργεια για γεωργική χρήση καθώς και την άμεση απόληψη νερού απευθείας μέσα από το ποτάμι για αρδευτικούς σκοπούς. Οι ανάγκες σε άρδευση εκτιμήθηκαν σε 77 Mm³ (73 εκ.μ³ από γεωτρήσεις και 4 εκ.μ³ από δέσεις) ποσότητα που εκτιμάται πως είναι διπλάσια της συνιστώμενης επιφέροντας ένα επιπλέον βάρος στους υδάτινους πόρους. Οι ποσότητες άρδευσης συμπεριελήφθησαν στο μοντέλο ως απολείψεις μέσα από το ποτάμι είτε με αυτόματη εφαρμογή της άρδευσης σε κάθε υδρολογική μονάδα απόκρισης ανάλογη του ποσοστού νερού στο έδαφος που απαιτείται για να αναπτυχθούν τα φυτά (Tzoraki et al., 2011). Τα δεδομένα καταναλώμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τις γεωτρήσεις άρδευσης και η υπολογιζόμενη ποσότητα νερού για άρδευση παρουσιάζεται στο **Παράρτημα IV**.

4.1.6 Κωδικοποίηση – Δημιουργία μοντέλου

Οι απαραίτητες διαδικασίες κωδικοποίησης και δημιουργίας του μοντέλου ρυθμίζονται από το γραφικό περιβάλλον του ARCSWAT. Η περίοδος προσομοίωσης ορίστηκε στα 12 χρόνια από τον Ιανουάριο του 2000 έως τον Σεπτέμβριο του 2011. Το μοντέλο μπορεί να προσομοιώσει περιόδους μεγαλύτερες από τις περιόδους για τις οποίες υπάρχουν διαθέσιμα μετεωρολογικά δεδομένα με την παραγωγή μετεωρολογικών δεδομένων μέσω στατιστικής επεξεργασίας των ήδη υπαρχόντων και προβολής τους στον χρόνο. Το μοντέλο SWAT μπορεί να αποθηκεύει τα δεδομένα εξόδου σε ημερήσιο, μηνιαίο, ετήσιο βήμα. Μετά την ρύθμιση των διαδικασιών το μοντέλο είναι έτοιμο για την προσομοίωση. Τα αρχεία εξόδου εμφανίζονται με τη

μορφή αρχείων .txt και αρχείων βάσης δεδομένων .mdb η οποία είναι εύκολα επεξεργάσιμη. Η δυνατότητα αυτή επιτρέπει την γρήγορη ανάλυση των αποτελεσμάτων χωρίς να απαιτείται περαιτέρω επεξεργασία.

4.1.6.1 Ανάλυση ευαισθησίας

Η ανάλυση ευαισθησίας είναι η διαδικασία χαρακτηρισμού των επιδράσεων των αλλαγών στις παραμέτρους ή στις οριακές συνθήκες στη συμπεριφορά του βαθμονομημένου μοντέλου. Όταν συμβαίνει μικρή αλλαγή σε μία παράμετρο να συνεπάγεται μεγάλη αλλαγή στα αποτελέσματα του μοντέλου, τότε το μοντέλο είναι ευαίσθητο σ' αυτή την παράμετρο.

Η ανάλυση ευαισθησίας μπορεί να πραγματοποιηθεί τόσο πριν όσο και μετά την βαθμονόμηση του μοντέλου. Πριν από την βαθμονόμηση, η ανάλυση ευαισθησίας αναγνωρίζει τους σημαντικότερους παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την διάρκεια της βαθμονόμησης ενώ όταν η ανάλυση ευαισθησίας πραγματοποιείται μετά την βαθμονόμηση βοηθάει στον καθορισμό των επιδράσεων των παραμέτρων στα αποτελέσματα του μοντέλου.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας τόσο των υδρολογικών όσο και των παραμέτρων που επηρεάζουν την στερεοπαροχή εντός της λεκάνης απορροής παρουσιάζονται στον **Πίνακα 4.7**. Όσον αφορά τις υδρολογικές παραμέτρους η ανάλυση ευαισθησία υπέδειξε πως η πλέον ευαίσθητη παράμετρος είναι η διαθέσιμη υγρασία του εδάφους (Sol_Awc). Άλλοι σημαντικοί παράμετροι είναι το ελάχιστο βάθος νερού στον αβαθή υδροφορέα για να επιτρέπεται η κατείσδυση (Gwqm), ο συντελεστής επανατροφοδότησης υπογείου νερού (Gw_Revap), η θερμοβαθμίδα (Tlaps), η υδραυλική αγωγιμότητα του καναλιού (Cn_K2) και ο συντελεστής εξάτμισης (Esko).

Οι σημαντικές παράμετροι δείχνουν ότι η ροή του νερού στην περιοχή κυριαρχείται από την διήθηση και την βασική απορροή λόγω του αβαθούς υδροφορέα. Οι πλέον ευαίσθητες παράμετροι που προσδιορίστηκαν στην παρούσα μελέτη είναι παρόμοιες με αυτές που εντοπίζονται στην βιβλιογραφία (**Ndomba et al., 2008; Schmalz and Fohrer, 2009; Spruill et al., 2000; Schuol and Abbaspour, 2006; Mukundan et al., 2010**).

Άλλοι παράμετροι όπως ο συντελεστής βασικής απορροής (Alpha_Bf), το πάχος του εδάφους (Soil_Z), η κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα (Soil_K) και η μέση κλίση (Slope) επηρεάζουν σε περιορισμένο βαθμό την προσομοίωση.

Οι παράμετροι που επηρεάζουν σημαντικά την μεταφορά και απόθεση φερτών υλικών είναι ο συντελεστής της εξίσωσης μεταφοράς ιζημάτων (Spcn), ο συντελεστής βασικής απορροής (Alpha_Bf), η θερμοβαθμίδα (Tlaps), η εκθετική παράμετρος της εξίσωσης μεταφοράς ιζημάτων (Spxp), ο συντελεστής Manning για το κυρίως κανάλι (Ch_N2) και ο συντελεστής διαχειρίσεων των εδαφών (Usle_P).

Άλλοι παράγοντες όπως ο συντελεστής εξάτμισης (Esc_o), η υδραυλική αγωγιμότητα του καναλιού (Cn_K2), το ελάχιστο βάθος νερού στον αβαθή υδροφορέα για να επιτρέπεται η κατείσδυση (Gw_{qmn}) και ο αριθμός καμπύλης CN (Cn2) επηρεάζουν σε περιορισμένο βαθμό.

Μελέτες από τους **Mukundan et al., (2010)**, **Oerng et al., (2011)** και **Betrie et al., (2011)** υπέδειξαν επίσης τους συντελεστές (Sprcon) και (Sprexp) ως τις πιο σημαντικές παραμέτρους βαθμονόμησης για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης των μεταφερόμενων ιζημάτων.

4.1.6.2 Βαθμονόμηση του μοντέλου της λεκάνης απορροής του Ευρώτα

Η βαθμονόμηση ή ρύθμιση (calibration) του μοντέλου επιτυγχάνεται με μεταβολή των τιμών των παραμέτρων του ώστε να υπάρχει ικανοποιητική σύγκλιση μεταξύ των προβλέψεων του μοντέλου και των αντίστοιχων παρατηρήσεων. Συνήθως οι μεταβολές αφορούν στις πιο ευαίσθητες παραμέτρους και σε εκείνες που εμπεριέχουν τη μεγαλύτερη αβεβαιότητα δηλαδή στις παραμέτρους για τις οποίες δεν υφίσταται ικανοποιητική φυσική ερμηνεία ή ικανοποιητική μέτρησή τους στη φύση.

Στην παρούσα εργασία έγινε ρύθμιση του μοντέλου με μεταβολή σε παραμέτρους που παίζουν το σπουδαιότερο ρόλο στην προσομοίωση των υδρολογικών μεγεθών, ενώ ταυτόχρονα δεν υφίσταται συγκεκριμένη γνώση για το μέγεθός τους. Οι εν λόγω παράμετροι είναι άλλωστε γνωστές για την ευαισθησία τους στην επιστημονική κοινότητα υδρολογικής προσομοίωσης με το SWAT, όπως έχει διερευνηθεί και αποδειχτεί σε πλήθος εργασιών πλέον (**Arabi et al., 2008; Lenhart et al., 2002; Santhi et al., 2001; Van Griensven et al., 2006**).

Πρόκειται για χειροκίνητη βαθμονόμηση, όπου μία μεταβολή τη φορά συνοδεύεται από γραφική και στατιστική σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρούμενων αποτελεσμάτων στο ποτάμι (trial and error process). Παρόλο που είναι υποκειμενική και χρονοβόρα, η χειροκίνητη βαθμονόμηση αποτελεί έναν άριστο τρόπο να ελεγχθεί ο τρόπος μεταβολής των πιο ευαίσθητων και αβέβαιων παραμέτρων (**Engel et al., 2007**).

Η βαθμονόμηση του μοντέλου πραγματοποιήθηκε με τη χρήση των δεδομένων πεδίου που αποκτήθηκαν από την παρακολούθηση των επιφανειακών υδάτων όπως παρουσιάστηκε παραπάνω για την περίοδο από 01/01/2000 έως τις 30/09/2011. Για τη βαθμονόμηση χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα πεδίου, τόσο για την παροχή, όσο και για τη στερεοπαροχή, έτσι ώστε το μοντέλο μετά την επιτυχή βαθμονόμηση, να προσομοιώνει τόσο την μεταφορά ύδατος όσο και τη μεταφορά των φερτών υλικών.

Πίνακας 4.7. Αποτελέσματα ανάλυσης ευαίσθητων παραμέτρων υδρολογίας και στερεομεταφοράς

Rank	Name	Description	Mean sensitivity Index[-]	Name	Description	Mean sensitivity Index[-]
1	Sol_Awc	Available water capacity	0.132	Spcon	Coefficient in sediment transport equation	7.480
2	Gwqmn	Threshold water depth in the shallow aquifer for flow	0.091	Alpha_Bf	Baseflow alpha factor	7.300
3	Gw_Revap	Groundwater “revap” coefficient	0.067	Tlaps	Temperature lapse rate	6.500
4	Tlaps	Temperature lapse rate	0.049	Spexp	Exponent in sediment transport equation	4.870
5	Cn_K2	Channel effective hydraulic conductivity	0.042	Ch_N2	Manning’s n value for main channel	4.670
6	Esco	Soil evaporation compensation factor	0.041	Usle_P	USLE support practice factor	2.870
7	Alpha_Bf	Baseflow alpha factor	0.037	Esco	Soil evaporation	2.710
8	Sol_Z	Soil depth	0.028	Ch_K2	Channel effective hydraulic conductivity	2.370
9	Sol_K	Saturated hydraulic conductivity	0.019	Gwqmn	Threshold water depth in the shallow aquifer for “revap”	1.860
10	Cn2	SCS runoff curve number	0.019	Cn2	SCS runoff curve number	1.710
11	Slope	Average slope steepness	0.018	Gw_Revap	Groundwater “revap”	1.690
12	Ch_N2	Manning’s n value for main channel	0.007	Sol_Awc	Available water capacity	1.410
13	Canmx	Maximum canopy storage	0.005	Ch_Cov	Channel cover factor	1.380
14	Revapmn	Threshold water depth in the shallow aquifer for “revap”	0.005	Gw_Delay	Groundwater delay	1.210
15	Epc	Plant uptake compensation factor	0.005	Blai	Maximum potential leaf	0.723
16	Gw_Delay	Groundwater delay	0.004	Slope	Average slope steepness	0.630
17	Blai	Maximum potential leaf area index	0.003	Sol_Z	Soil depth	0.487
18	Biomix	Biological mixing efficiency	0.001	Surlag	Surface runoff lag time	0.425
19	Surlag	Surface runoff lag time	0.000	Sol_K	Saturated hydraulic conductivity of first layer	0.357

Στην παρούσα διατριβή πραγματοποιήθηκαν βαθμονομήσεις σε επιμέρους θέσεις της λεκάνης απορροής. Η βαθμονόμηση της παροχής περιλαμβάνει δεδομένα από τις θέσεις Βιβάρι, Βρονταμάς, Κελεφίνα Βασσαράς, Κελεφίνα Κλαδάς, Μαγουλίτσα Αγ. Ειρήνη, Ρασίνα Κουμουστά, Ρασίνα Αεροδρόμιο ενώ για την βαθμονόμηση της στερεοπαροχής (περίοδος 1/1/2010-30/09/2010) χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τις ίδιες θέσεις και επιπλέον δεδομένα από τη θέση Ψυχικό. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για την βαθμονόμηση του μοντέλου είναι αυτοί που επηρεάζουν περισσότερο τα αποτελέσματα και περιεγράφηκαν στην ενότητα της ανάλυσης ευαισθησίας. Στον **Πίνακα 4.8** παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων βαθμονόμησης για τα δεδομένα παροχής στις διάφορες θέσεις παρατήρησης ενώ στον **Πίνακα 4.9** οι αντίστοιχες τιμές για τα δεδομένα στερεοπαροχής.

Πίνακας 4.8. Παράμετροι βαθμονόμησης παροχής

Rank	Παράμετρος	Τυπικό εύρος μοντέλου	Τελική τιμή
1	SOL_AWC	0.0 - 1.0	0.22 - 0.85
2	GWQMN	0 - 5000	100 - 5000
3	GW_REVAP	0.02 - 0.2	0.02 - 0.2
4	ESCO	0.01 - 1.0	0.6 - 0.8
5	ALPHA_BF	0.0 - 1.0	0.005 - 0.9
6	CN2	35 - 98	35 - 60
7	GW_DELAY	0 - 500	1.0 - 50
8	RCHRG_DP	0.0 - 1.0	0.0 - 1.0

Πίνακας 4.9. Παράμετροι βαθμονόμησης στερεοπαροχής

Rank	Παράμετρος	Τυπικό εύρος μοντέλου	Τελική τιμή
1	Spcon	0.0001 - 0.01	0.00025
2	Spexp	1.0 - 1.5	1.5
3	Ch_N2	-0.01 - 0.3	0.14
4	Usle_P	0.0 - 1.0	0.9
5	Ch_Cov	-0.001 - 1.0	0.0

Το SWAT κατηγοριοποιεί το υπόγειο νερό σε αυτό που κινείται στον επιφανειακό, ελεύθερο υδροφορέα (αβαθή) και επανατροφοδοτεί τα επιφανειακά υδατορέματα και σε εκείνο που εισέρχεται στο βαθύ υδροφορέα και τροφοδοτεί τα επιφανειακά υδατορέματα εκτός λεκάνης απορροής. Στη δεύτερη περίπτωση το νερό προέρχεται από κατείσδυση μέρους του διαθέσιμου νερού του αβαθούς υδροφορέα, που τελικά δεν επιστρέφει στα επιφανειακά νερά της λεκάνης και χάνεται οριστικά από το σύστημα. Η παράμετρος που εκφράζει αυτό το ποσοστό (RCHRG_DP) στα αρχεία υπόγειων νερών του μοντέλου ορίστηκε σε τιμές από 0.3 έως 0.6 υποδηλώνοντας ότι μεγάλο μέρος του νερού που βρίσκεται στον αβαθή υδροφορέα στο εκάστοτε χρονικό βήμα, εισέρχεται στον βαθύ και δεν επιστρέφει στη λεκάνη.

Πάνω από τον επιφανειακό υδροφορέα βρίσκεται η ριζική ζώνη και οι παράμετροι που ενδιαφέρουν είναι κυρίως αυτές που ρυθμίζουν την κίνηση και ποσότητα του νερού από τον υδροφορέα στη ζώνη αυτή καθώς και την γενικότερη συνεισφορά του υπόγειου νερού στην παροχή του ποταμού. Ο παράγοντας (ALPHA_BF) που είναι η σταθερά ύφεσης της παροχής του υπόγειου νερού τέθηκε σε εύρος τιμών από 0.005 έως 0.9. Εκφράζει την ανταπόκριση της υπόγειας ροής σε μεταβολές της επαναπλήρωσης και κυμαίνεται από 0 έως 1 με τις μικρές τιμές να εκφράζουν αργή ανταπόκριση. Η τιμή της παραμέτρου καθορίστηκε μετά από χρήση ενός φίλτρου που διαχωρίζει τη συνολική απορροή του παρατηρούμενου υδρογραφήματος σε βασική και άμεση απορροή και παρέχεται μαζί με το SWAT. Η αυτόματη αυτή μέθοδος διαχωρισμού του

υδρογραφήματος, αναπτύχθηκε από τους **Arnold et al. (1995a)** και τροποποιήθηκε από τους **Arnold and Allen (1999)**, επιτρέποντας τη σύγκριση ανάμεσα στις δύο βασικές συνιστώσες απορροής του υδρογραφήματος, το μέγεθος των οποίων παίζει σημαντικό ρόλο και για τη μετέπειτα προσομοίωση της μεταφοράς φερτών και θρεπτικών. Η εύρεση του συντελεστή μέσω ανάλυσης του παρατηρούμενου υδρογραφήματος είναι σημαντική μιας και καθοδηγεί το μοντέλο στο να προσομοιώσει σωστά το σχήμα του υδρογραφήματος.

Δύο ακόμα παράμετροι για τις οποίες κρίνεται σκόπιμο να γίνει μνεία είναι ο συντελεστής επανατροφοδότησης (GW_REVAP) και το όριο επιστρέφουσας ροής (GWQMN). Η πρώτη είναι ο συντελεστής που ρυθμίζει τη ροή του νερού από τον αβαθή υδροφορέα προς τη ριζική ζώνη λόγω έλλειψης εδαφικής υγρασίας και πρόσληψης νερού από τα φυτά με βαθιές ρίζες. Κυμαίνεται μεταξύ 0.02 και 0.2 και μικρές τιμές περιορίζουν το φαινόμενο. Η δεύτερη εκφράζει το όριο νερού στον αβαθή υδροφορέα (mm) που απαιτείται για ύπαρξη επιστρέφουσας ροής. Όταν το βάθος του νερού στον αβαθή υδροφορέα ξεπερνιέται, επιτρέπεται ροή προς το υδατόρεμα. Η τιμή της παραμέτρου αυτής προσαρμόστηκε κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης μεταξύ των 100 και 5000. Ο συντελεστής τραχύτητας Manning (n) για κάθε υπολεκάνη ρυθμίστηκε με βάση τα χαρακτηριστικά του καναλιού.

Οι παράμετροι SPCON και SPEXP, οι οποίες ρυθμίστηκαν έτσι, ώστε σε κάθε χρονικό βήμα να προσομοιώνεται μία μικρή συνεισφορά ή κατακράτηση φερτών από τα υδατορέματα, που παραπέμπει σε μικρό ρυθμό διάβρωσής τους ή εναπόθεση εδάφους στην κοίτη τους αντίστοιχα. Οι παράμετροι, που είναι φυσικά εμπειρικές, εξυπηρετούν στο να εκφράσει ο ερευνητής τα προαναφερθέντα φαινόμενα σε λεκάνες απορροής. Η παράμετρος SPCON ορίστηκε ίση με 0.00025 ενώ αντίστοιχα η παράμετρος SPEXP ίση με 1.5.

Ο παράγοντας P_{usle} που εκφράζει με τη σειρά του την προστασία που παρέχεται ενάντια στη διάβρωση του εδάφους από ανθρωπογενείς πρακτικές διαχείρισης (**Neitsch et al., 2005a**) ορίστηκε ίσος με 0.9. Η τιμή αυτή σημαίνει ότι οι τρέχουσες πρακτικές παρέχουν σχεδόν πλήρη προστασία κατά της διάβρωσης από τις καταιγίδες χαμηλής έντασης αλλά λίγη προστασία έναντι των σοβαρών πλημμυρών.

4.1.6.3 Αποτελέσματα βαθμονόμησης

Η επιτυχία προσομοίωσης του SWAT ελέγχθηκε με γραφική και στατιστική σύγκριση των διαθέσιμων μετρήσεων παροχής και στερεοπαροχής με τα αντίστοιχα αποτελέσματα του μοντέλου. Η βαθμονόμηση με μεταβολή στις παραμέτρους έγινε πρώτα για τις παροχές και μετέπειτα για τις στερεοπαροχές.

Η διαδικασία ξεκίνησε από τις ανάντη θέσεις με διαθέσιμες μετρήσεις και ολοκληρώθηκε στην έξοδο της λεκάνης. Στην έξοδο της λεκάνης (Βρονταμάς) οι

διαθέσιμες χρονοσειρές με μετρήσεις για τις μεταβλητές ενδιαφέροντος (παροχή, στερεοπαροχή), διαιρέθηκαν σε δύο ίσα μέρη, με το δεύτερο ανεξάρτητο σετ δεδομένων να χρησιμοποιείται για επαλήθευση του μοντέλου.

Μεταξύ διαφόρων στατιστικών δεικτών για την αξιολόγηση της προγνωστικής ικανότητας των μοντέλων είναι ο δείκτης αποδοτικότητας Nash-Sutcliffe (Nash Sutcliffe Efficiency - NSE), ο συντελεστής προσδιορισμού (coefficient of determination - R^2), η ποσοστιαία απόκλιση (Percent BIAS - PBIAS) και ο λόγος του μέσου τετραγωνικού σφάλματος προς την τυπική απόκλιση των μετρήσεων (Root mean square error – Standard deviation of measured data Ratio - RSR). Οι δείκτες αυτοί υπολογίστηκαν κατά τη σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρούμενων χρονοσειρών παροχής και στερεοπαροχής. Παρόλο που οι αποδεκτές τιμές των εν λόγω δεικτών εξαρτώνται πάντα από το εκάστοτε πρόβλημα, οι **Moriasi et al. (2008)** έχουν κάνει μία ενδελεχή επισκόπηση των στατιστικών μέτρων για την αξιολόγηση, μεταξύ άλλων, και του μοντέλου SWAT και συμπέραναν ότι η προγνωστική ικανότητα του μοντέλου σε μηνιαίο βήμα μπορεί να κριθεί επιτυχής όταν ο δείκτης NSE είναι μεγαλύτερος από 0,50, ο RSR <0,70 και όταν ο PBIAS δηλώνει ποσοστιαία απόκλιση μεταξύ αθροίσματος προσομοιωμένων και παρατηρούμενων τιμών, $\pm 25\%$ για την παροχή, $\pm 55\%$ για τη στερεοπαροχή.

Ο συντελεστής προσδιορισμού (R^2) εκφράζει το βαθμό συγγραμικότητας ανάμεσα στην προσομοιωμένη και παρατηρούμενη χρονοσειρά. Ο συντελεστής κυμαίνεται από 0 έως 1, με τις υψηλές τιμές να υποδηλώνουν μικρή απόκλιση σφάλματος, ενώ τυπικές τιμές μεγαλύτερες του 0,5 θεωρούνται αποδεκτές (**Santhi et al., 2001**).

Ο δείκτης NSE είναι μία κανονικοποιημένη στατιστική έκφραση που εκτιμά τη σύγκλιση της προσομοιωμένης με την παρατηρούμενη χρονοσειρά και δίνεται από την εξίσωση (**Nash and Sutcliffe, 1970**):

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (4.1)$$

όπου: Q_{sim} , η προσομοιωμένη χρονοσειρά, Q_{obs} , η παρατηρούμενη χρονοσειρά, \bar{Q}_{obs} , ο αριθμητικός μέσος όρος της παρατηρούμενης χρονοσειράς και n το μήκος τους.

Η βέλτιστη και ταυτόχρονα μέγιστη τιμή του δείκτη είναι η μονάδα και λαμβάνεται όταν οι παρατηρούμενες τιμές ταυτίζονται πλήρως με τις προσομοιωμένες. Ο δείκτης δεν έχει κάτω όριο δηλαδή λαμβάνει και αρνητικές τιμές. Επίσης, εκτός της απόκλισης των δύο χρονοσειρών, λαμβάνει υπόψη του και τη διασπορά του δείγματος με χρήση της απόκλισης των παρατηρούμενων τιμών από το μέσο όρο τους, στον παρονομαστή.

Ο δείκτης PBIAS μετρά τη μέση τάση των προσομοιωμένων τιμών να είναι μεγαλύτερες ή μικρότερες απ' ότι οι αντίστοιχες παρατηρούμενες και έχει τη

δυνατότητα να καταδεικνύει ξεκάθαρα την μικρή αποδοτικότητα ή προγνωστική ικανότητα του μοντέλου (Gupta et al., 1999). Η βέλτιστη τιμή του δείκτη είναι το 0, με κοντινές τιμές σε αυτό να προδίδουν επιτυχή και ακριβή προσομοίωση, ενώ οι θετικές τιμές υποδηλώνουν ότι το μοντέλο έχει την τάση να υποεκτιμά τις πραγματικές τιμές των μεταβλητών και οι αρνητικές το αντίστροφο (Gupta et al., 1999).

Ο δείκτης έχει τη μορφή της εξίσωσης:

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i}) \times 100}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i})} \quad (4.2)$$

όπου: PBIAS είναι η ποσοστιαία απόκλιση μεταξύ των δεδομένων, ενώ Qsim η προσομοιωμένη χρονοσειρά και Qobs η παρατηρούμενη χρονοσειρά.

Το μέσο υπολειμματικό σφάλμα (RMSE) είναι από τους πιο συχνά χρησιμοποιούμενους στατιστικούς δείκτες με τις μικρές τιμές να υποδηλώνουν καλή αποδοτικότητα του μοντέλου (Moriassi et al., 2008). Ωστόσο, οι τιμές που υπολογίζει η στατιστική αυτή φόρμουλα εξαρτώνται από την κλίμακα των μεγεθών στα οποία αναφέρεται. Συνεπώς, η διαίρεση με την τυπική απόκλιση των παρατηρήσεων διαμορφώνει το δείκτη RSR, που είναι πιο κατατοπιστικός μιας και ενσωματώνει μια διαδικασία κανονικοποίησης. Ο δείκτης RSR μεταβάλλεται από την τιμή 0, η οποία αντιστοιχεί σε μηδενική τιμή του RMSE ή μηδενική απόκλιση των σφαλμάτων και επομένως τέλεια προσομοίωση, έως μία μεγάλη θετική τιμή. Όσο μικρότερο είναι το RSR, τόσο μικρότερο το RMSE, και επομένως τόσο καλύτερη η προγνωστική ικανότητα του μοντέλου. Ο δείκτης RSR υπολογίζεται από το λόγο του RMSE και της τυπικής απόκλισης των δεδομένων της παρατηρούμενης χρονοσειράς (STDEVobs), όπως φαίνεται στην παρακάτω εξίσωση:

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2}} \quad (4.3)$$

Οι στατιστικοί δείκτες που υπολογίστηκαν κατά την περίοδο της βαθμονόμησης και επαλήθευσης με σύγκριση των ημερήσιων χρονοσειρών παροχής και στερεοπαροχής συνοψίζονται στον Πίνακα 4.10 και Πίνακα 4.11.

Για τις παροχές ο δείκτης PBIAS καταδεικνύει ότι το μέσο μέγεθος των προσομοιωμένων τιμών είναι πολύ κοντά σε εκείνο των παρατηρούμενων. Η μεγαλύτερη απόκλιση παρατηρείται κατά την περίοδο βαθμονόμησης στη θέση Ρασίνα Αεροδρόμιο όπου το μοντέλο υποεκτίμησε την παρατηρούμενη χρονοσειρά κατά περίπου 24%.

Ο δείκτης NSE υπολογίστηκε πάνω από 0.5 για όλες τις θέσεις ενώ κατά την περίοδο επαλήθευσης παρέμεινε σταθερός. Για τις στερεοπαροχές, ο δείκτης βρίσκεται εντός των καθορισμένων ορίων υποδηλώνοντας ότι τα αποτελέσματα είναι ιδιαίτερα ικανοποιητικά (Moriasi et al., 2008). Λαμβάνοντας υπόψη την ποιότητα των παρατηρούμενων δεδομένων και το μικρό μήκος της διαθέσιμης χρονοσειράς μετρήσεων θεωρούμε τα αποτελέσματα αυτά επιτυχή και αποδεκτά. Άλλωστε, ο δείκτης PBIAS παρέχει την απόδειξη ότι το SWAT μπορεί επιτυχώς να προγνώσει το μέγεθος της στερεοπαροχής σε υπερετήσια βάση. Τέλος, ο δείκτης RSR λαμβάνει τιμές εντός των επιτρεπτών ανώτατων ορίων όπως τέθηκαν από τους Moriasi et al. (2008). Οι τιμές που αντιστοιχούν στην επαλήθευση είναι πάντα συγκρίσιμες με εκείνες της βαθμονόμησης και σε ορισμένες περιπτώσεις καλύτερες. Αυτό επιβεβαιώνει την προγνωστική ικανότητα του μοντέλου σε ανεξάρτητες περιόδους και ενισχύει τις επιλογές ρύθμισης των παραμέτρων του κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης.

Με τη διαμόρφωση των τιμών των παραμέτρων που μέχρι στιγμής παρουσιάστηκαν επιτυγχάνεται ικανοποιητική σύγκλιση μεταξύ προσομοιωμένων και παρατηρούμενων χρονοσειρών παροχής και στερεοπαροχής.

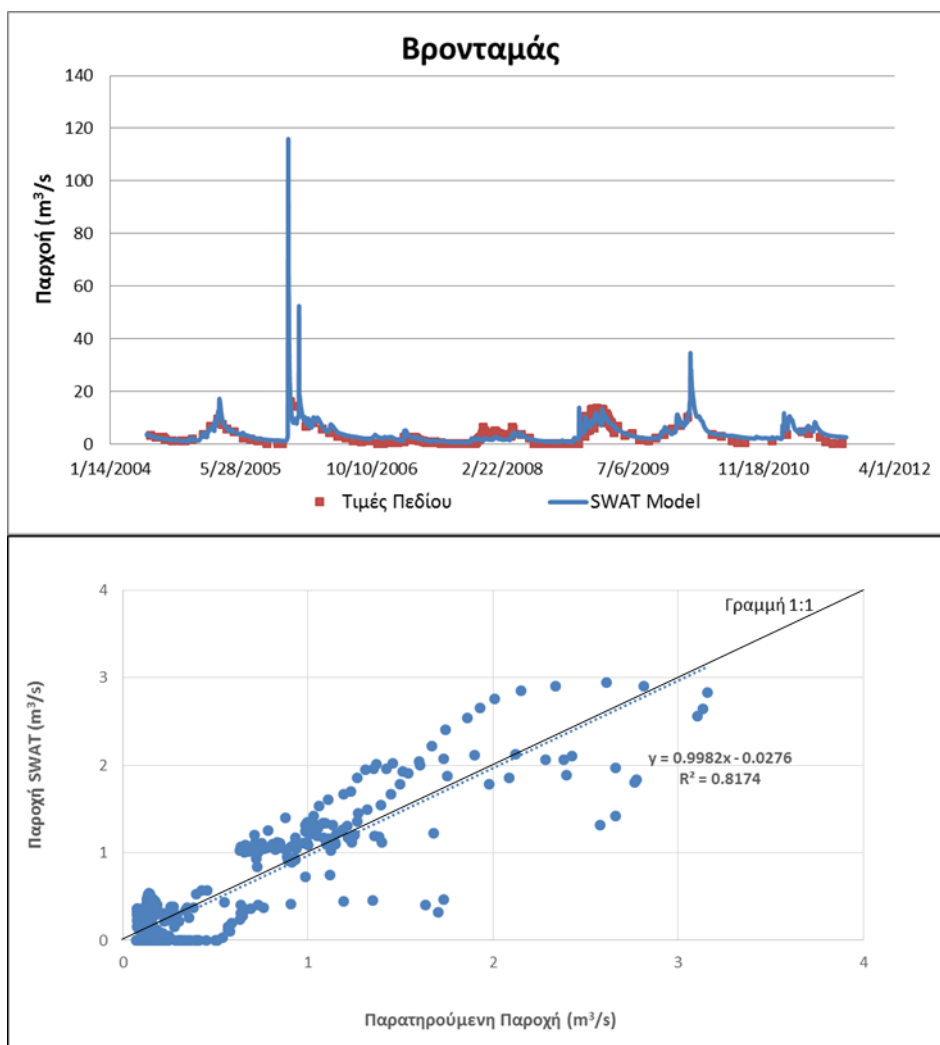
Πίνακας 4.10. Στατιστικά κριτήρια σύγκρισης παρατηρημένων και προσομοιωμένων ημερήσιων χρονοσειρών παροχής για την περίοδο της βαθμονόμησης (1/1/2000-30/9/2011)

Παροχή			
Θέση	NSE	PBIAS	RSR
Γέφυρα Βρονταμά	0.80	-11.4	0.45
Βιβάρι	0.59	17.0	0.64
Κελεφίνα Βασσαράς	0.58	-18.5	0.65
Κελεφίνα Κλαδάς	0.56	-23.8	0.67
Μαγουλίτσα Αγ. Ειρήνη	0.54	-10.5	0.68
Ρασίνα Κουμουστά	0.60	-18.1	0.63
Ρασίνα Αεροδρόμιο	0.73	-24.2	0.52
Goodness of fit criteria	>0.5	±25%	<0.7

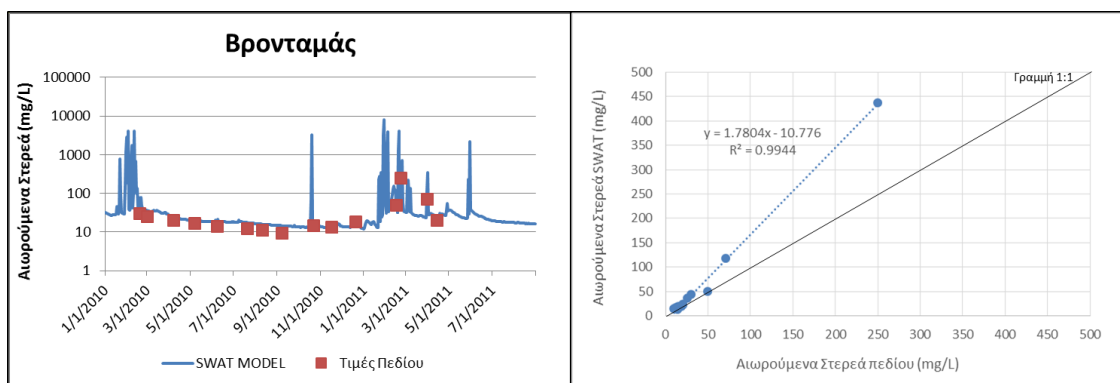
Πίνακας 4.11. Στατιστικά κριτήρια σύγκρισης παρατηρημένων και προσομοιωμένων ημερήσιων χρονοσειρών στερεοπαροχής για την περίοδο της βαθμονόμησης (1/1/2010-30/09/2010) και επαλήθευσης (01/10/2010-30/09/2011)

Στερεοπαροχή						
	Βαθμονόμηση			Επαλήθευση		
Θέση	NSE	PBIAS	RSR	NSE	PBIAS	RSR
Γέφυρα Βρονταμά	0.77	33.4	0.48	0.93	-13.5	0.27
Βιβάρι	0.75	13.4	0.50	0.68	19.6	0.57
Κελεφίνα Βασσαράς	0.58	14.6	0.65	0.71	1.2	0.54
Κελεφίνα Κλαδάς	0.69	26.3	0.56	0.48	13.1	0.72
Μαγουλίτσα Αγ. Ειρήνη	0.58	-3.9	0.65	0.51	8.5	0.70
Ρασίνα Κουμουστά	0.58	17.9	0.65	0.52	-9.5	0.69
Ρασίνα Αεροδρόμιο	0.76	-4.2	0.49	0.97	7.6	0.17
Ψυχικό	0.84	0.9	0.40	0.95	6.1	0.22
Goodness of fit criteria	>0.5	±55%	<0.7	>0.5	±55%	<0.7

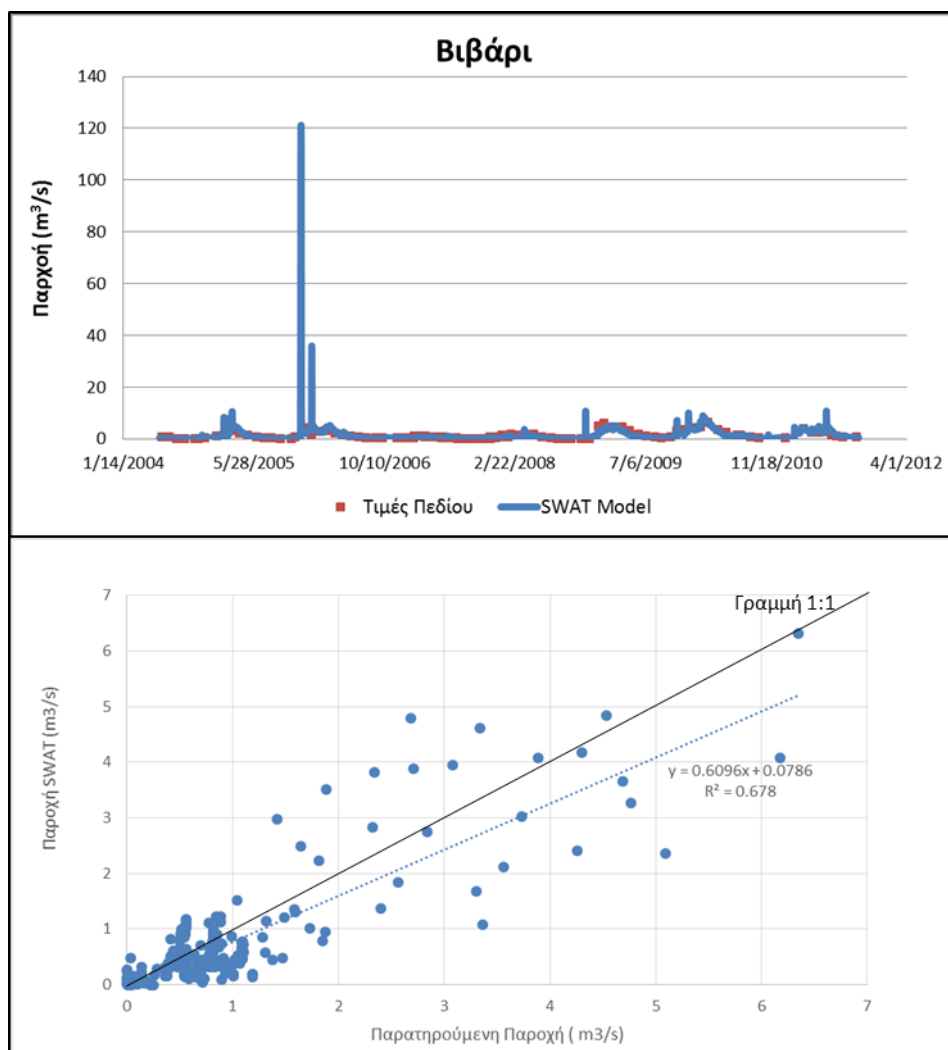
Η γραφική σύγκριση μεταξύ των παρατηρούμενων και υπολογιζόμενων (SWAT) χρονοσειρών (παροχής-στερεοπαροχής) παρουσιάζεται στις **Εικόνες 4.5** έως **4.19** για όλες τις θέσεις παρατήρησης με διαδοχική απεικόνιση παροχής και στερεοπαροχής για ολόκληρο το διάστημα με διαθέσιμα δεδομένα (βαθμονόμηση και επαλήθευση). Η απεικόνιση βοηθά στο να εντοπιστούν πιθανές έντονες αποκλίσεις και διαφορές στις αιχμές και στο γενικότερο σχήμα των κλάδων των παροχογραφημάτων και στερεοπαροχογραφημάτων.



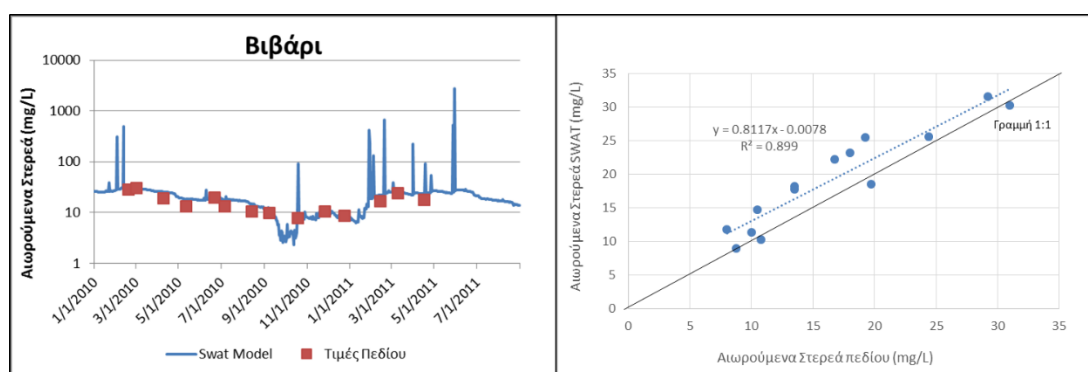
Εικόνα 4.5. Προσομοιωμένες και παρατηρούμενες παροχές στη θέση Βρονταμάς



Εικόνα 4.6. Προσομοιωμένες και παρατηρούμενες στερεοπαροχές στη θέση Βρονταμάς

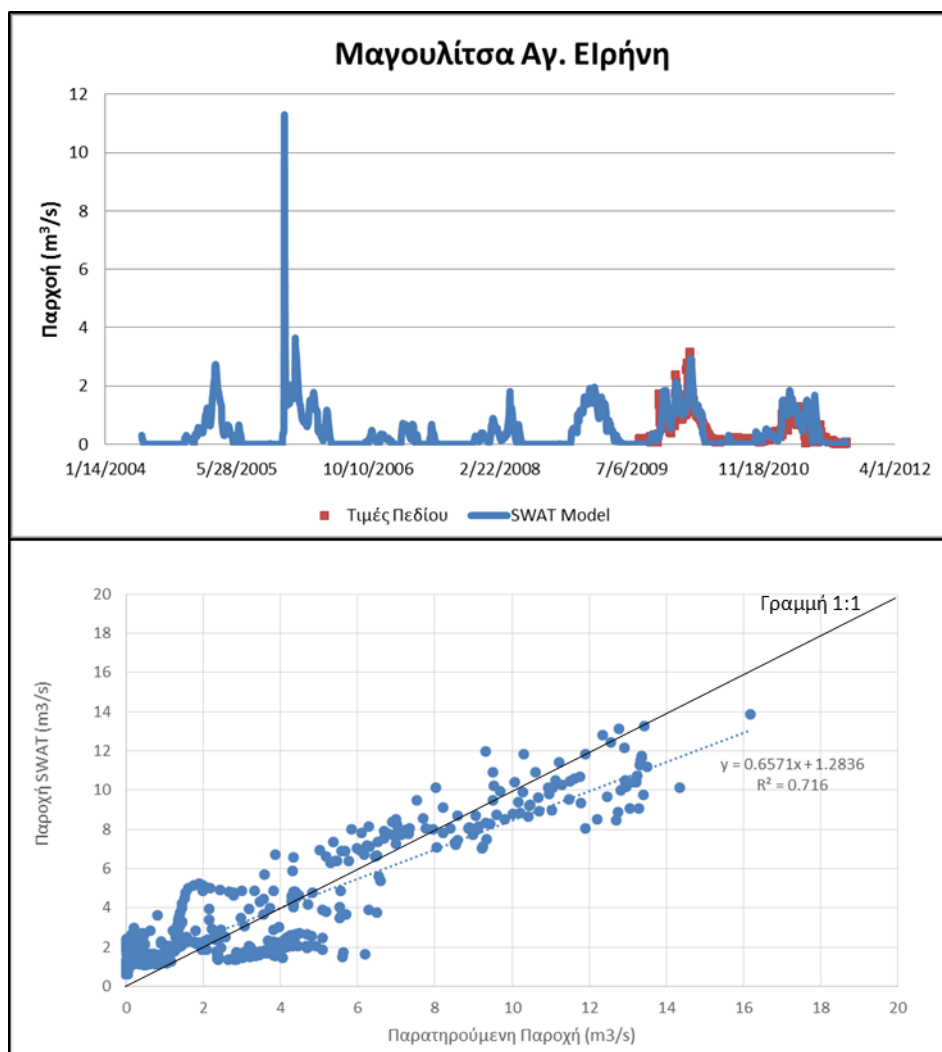


Εικόνα 4.7. Προσομοιωμένες και παρατηρούμενες παροχές στη θέση Βιβάρι

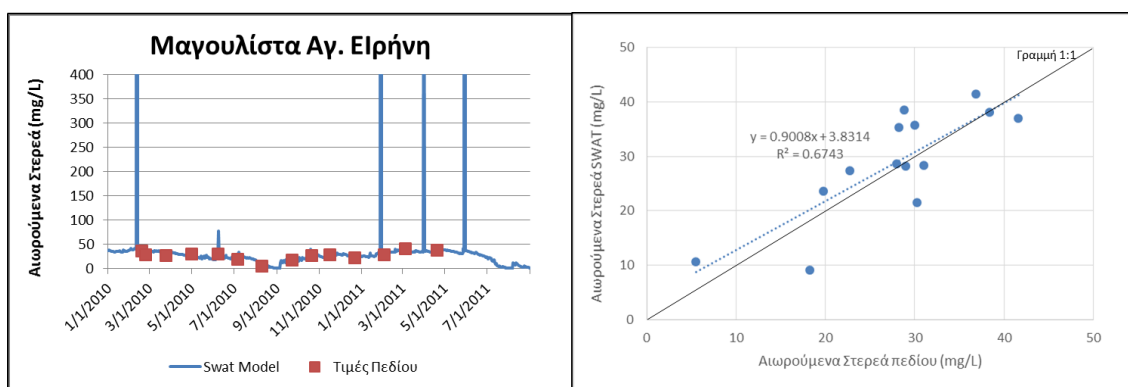


Εικόνα 4.8. Προσομοιωμένες και παρατηρούμενες στερεοπαροχές στη θέση Βιβάρι

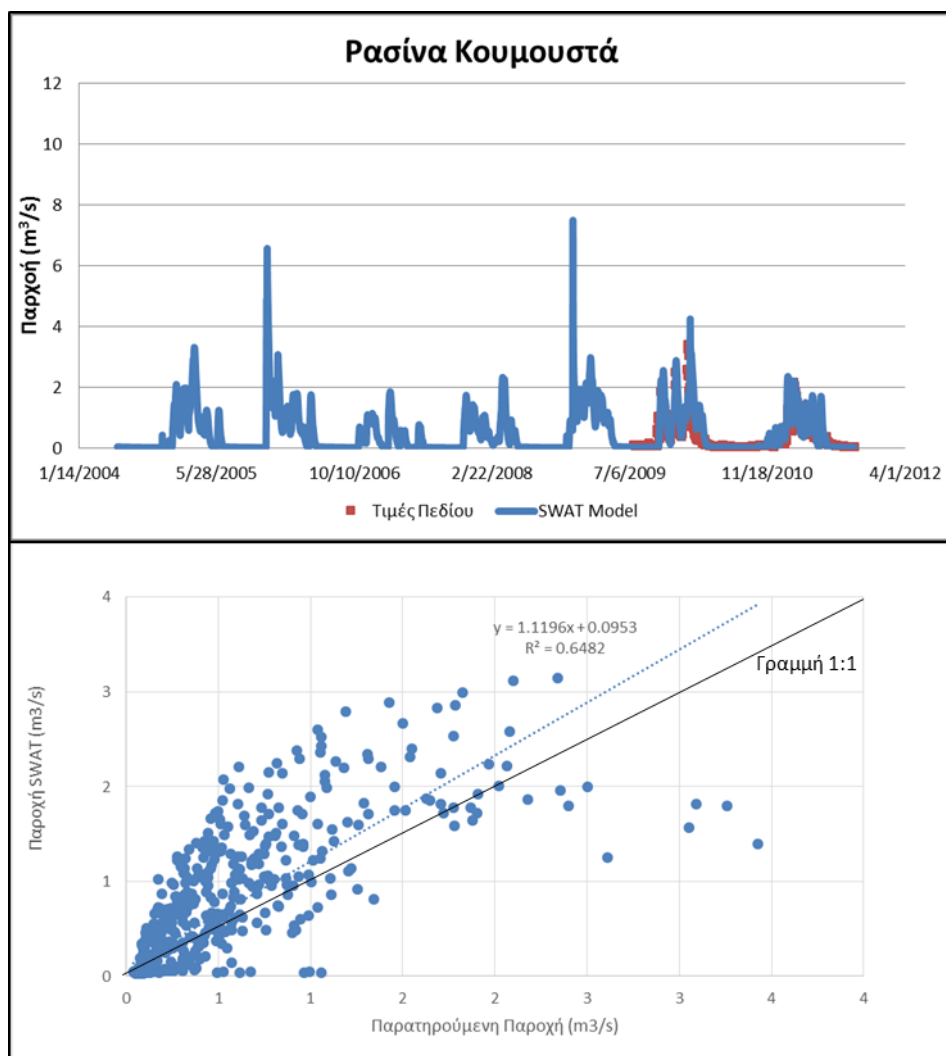
«Ολοκληρωμένο πλαίσιο μοντελοποίησης υδρολογίας, ποιότητας νερών και στερεοπαροχής σε λεκάνες απορροής ποταμών διαλείπουσας ροής»



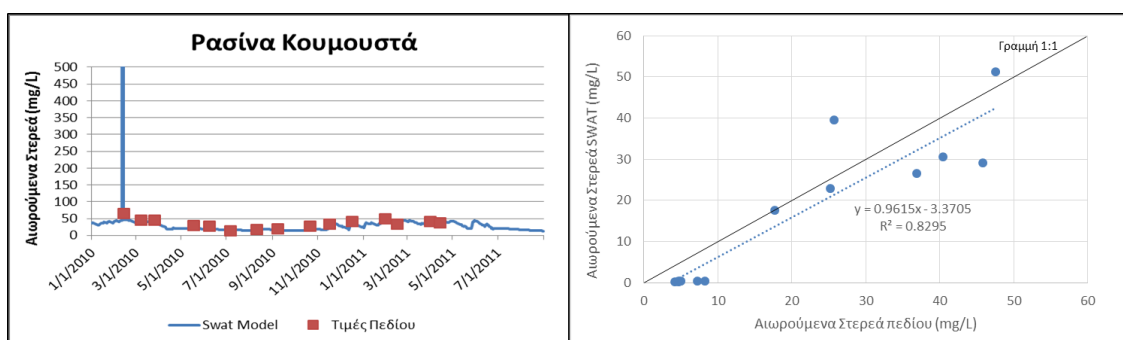
Εικόνα 4.9. Προσομοιωμένες και παρατηρούμενες παροχές στη θέση Μαγουλίτσα Αγ. Ειρήνη



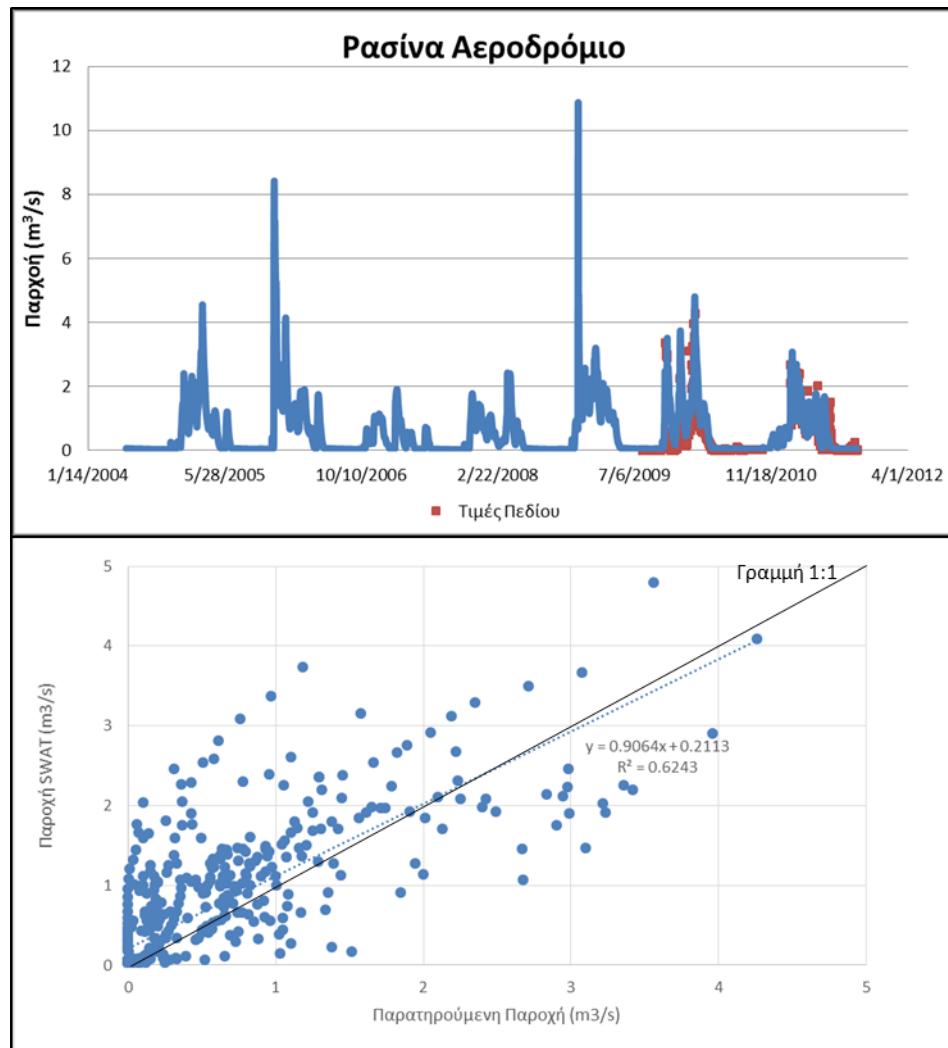
Εικόνα 4.10. Προσομοιωμένες και παρατηρούμενες στερεοπαροχές στη θέση Μαγουλίτσα Αγ. Ειρήνη



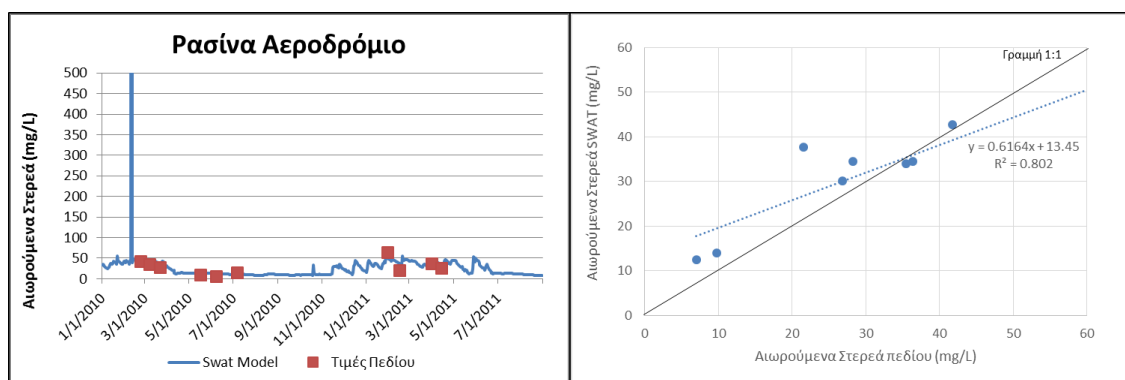
Εικόνα 4.11. Προσομοιωμένες και παρατηρούμενες παροχές στη θέση Ρασίνα Κουμουστά



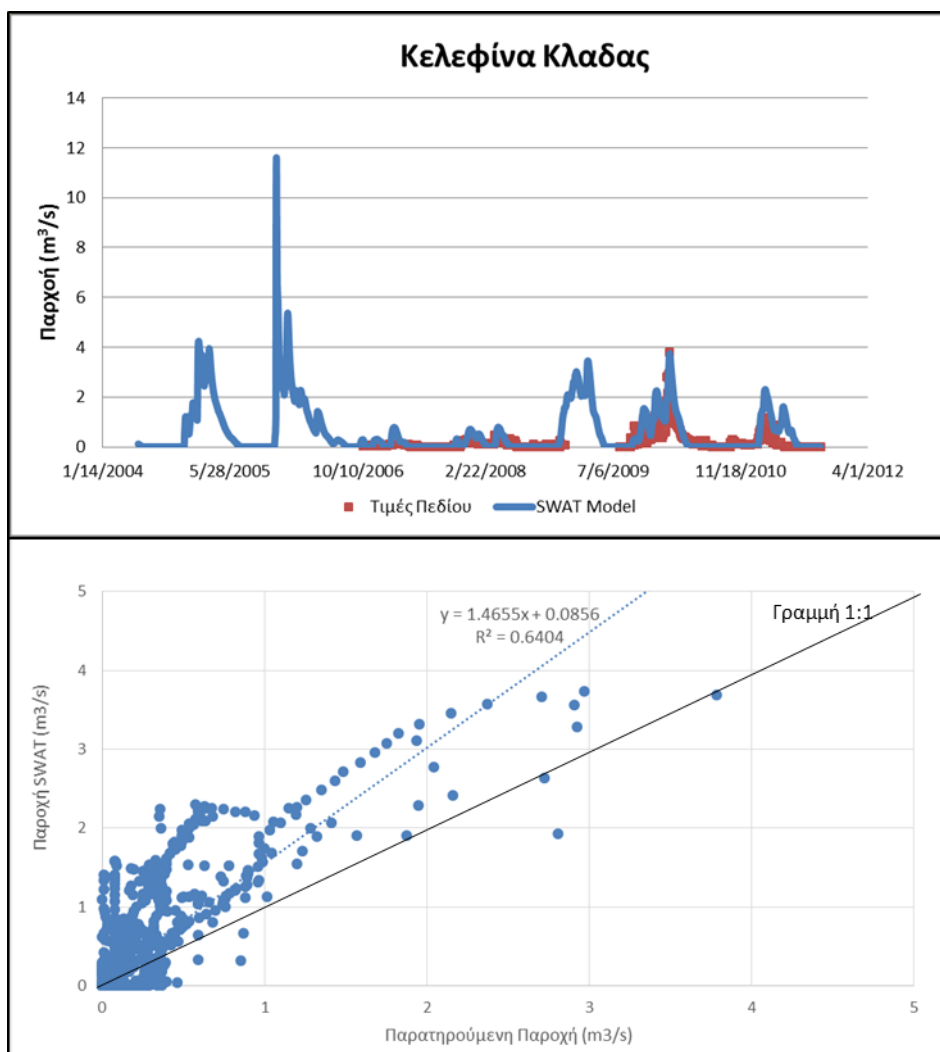
Εικόνα 4.12. Προσομοιωμένες και παρατηρούμενες στερεοπαροχές στη θέση Ρασίνα Κουμουστά



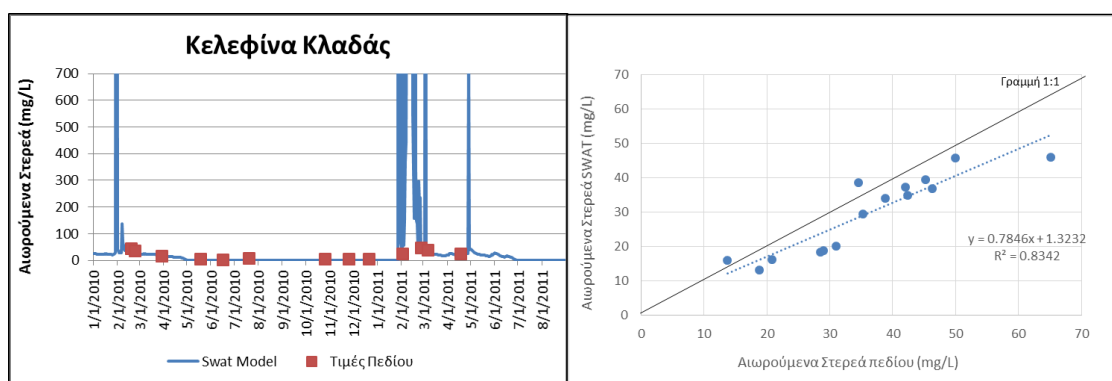
Εικόνα 4.13. Προσομοιωμένες και παρατηρούμενες παροχές στη θέση Ρασίνα Αεροδρόμιο



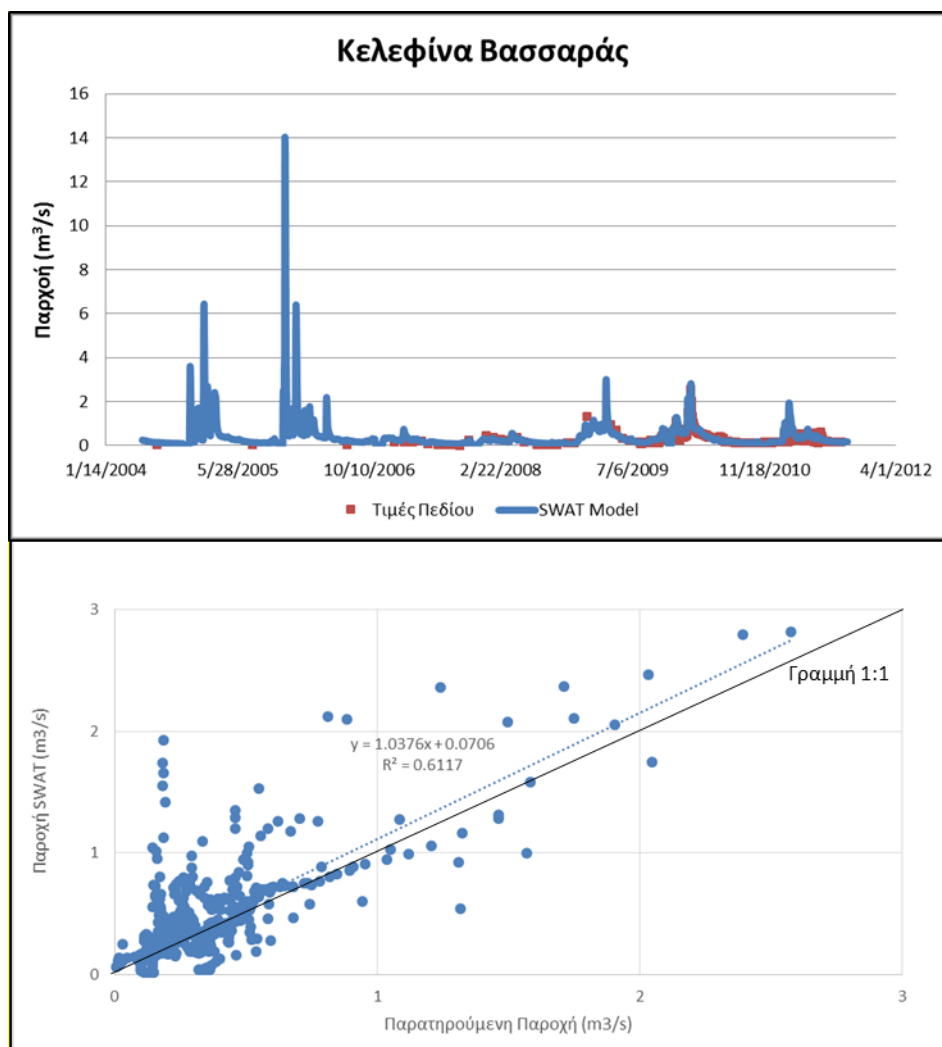
Εικόνα 4.14. Προσομοιωμένες και παρατηρούμενες στερεοπαροχές στη θέση Ρασίνα Αεροδρόμιο



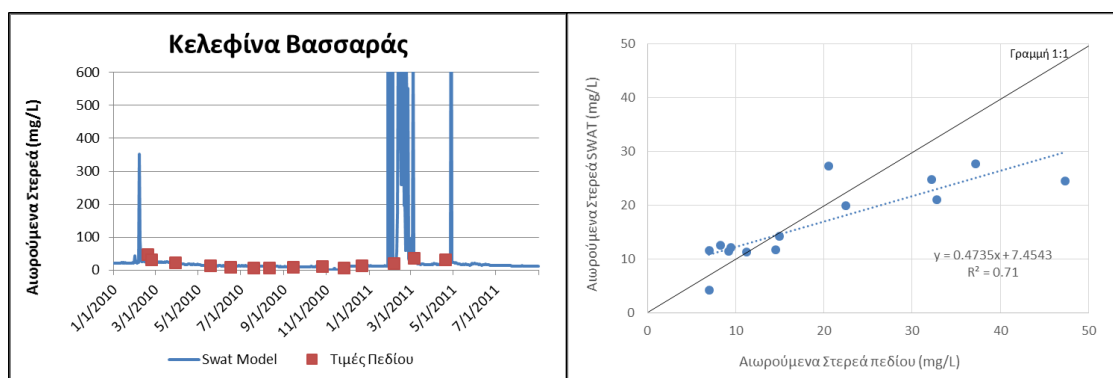
Εικόνα 4.15. Προσομοιωμένες και παρατηρούμενες παροχές στη θέση Κελεφίνα Κλαδάς



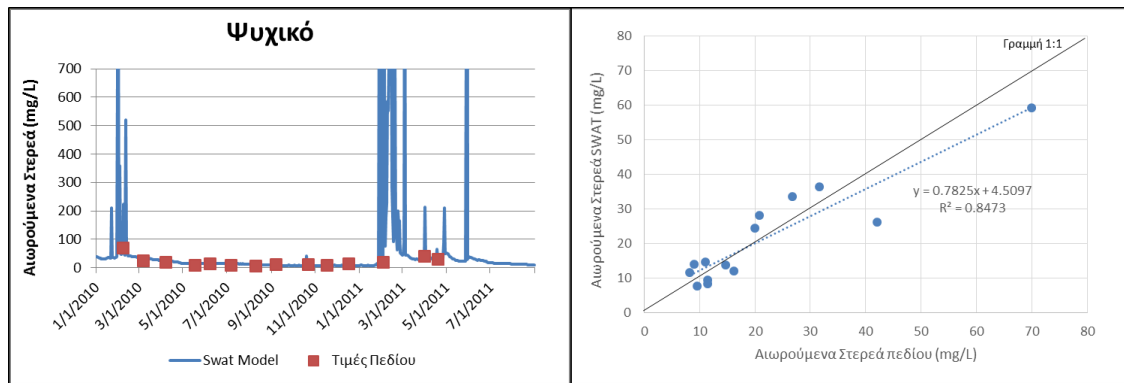
Εικόνα 4.16. Προσομοιωμένες και παρατηρούμενες στερεοπαροχές στη θέση Κελεφίνα Κλαδάς



Εικόνα 4.17. Προσομοιωμένες και παρατηρούμενες παροχές στη θέση Κελεφίνα Βασσαράς



Εικόνα 4.18. Προσομοιωμένες και παρατηρούμενες στερεοπαροχές στη θέση Κελεφίνα Βασσαράς



Εικόνα 4.19. Προσομοιωμένες και παρατηρούμενες στερεοπαροχές στη θέση Ψυχικό

Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα μεταξύ των προσομοιωμένων και παρατηρούμενων παροχών και στερεοπαροχών υπάρχει ικανοποιητική σύγκλιση σε όλες τις θέσεις με διαθέσιμα δεδομένα.

Για τον περαιτέρω έλεγχο για το εάν κλίση της κάθε γραμμής παλινδρόμησης είναι στατιστικά διαφορετική από την κλίση ευθείας απόλυτης συμφωνίας (1:1) σε κάθε θέση παρατήρησης όσο για τις παροχές τόσο και για τις στερεοπαροχές διενεργήθηκε έλεγχος διασποράς t-Student test υπολογίζοντας τις τιμές σημαντικότητας (p-value). Ο έλεγχος έγινε σε διάφορα επίπεδα σημαντικότητας (20%, 5%, 1%) με αρχική υπόθεση H_0 , ότι η κλίση της γραμμής παλινδρόμησης δεν διαφέρει (δεν είναι στατιστικά διαφορετική) από την κλίση της 1:1. Σε περιπτώσεις όπου η αρχική υπόθεση H_0 απορρίπτεται τότε ισχύει η εναλλακτική H_1 , όπου η κλίση της γραμμής παλινδρόμησης διαφέρει και είναι στατιστικά διαφορετική από 1. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.12.

Πίνακας 4.12. Ετήσιες τιμές προσομοίωσης με το μοντέλο SWAT της περιόδου 2000-2011

Παροχή		Στερεοπαροχή		Παροχή		Στερεοπαροχή	
Θέση	p	p	Θέση	p	p		
Γέφυρα Βρονταμά	0.004	0.002	Μαγουλίτσα Αγ. Ειρήνη	0.169		0.42	
Βιβάρι	0.117	0.013	Ρασίνα Κουμουστά	2.76E-16		0.172	
Κελεφίνα Βασσαράς	0.004	0.171	Ρασίνα Αεροδρόμιο	4.62E-11		0.395	
Κελεφίνα Κλαδάς	3.34E-06	0.003	Ψυχικό	-		0.324	

Από τον παραπάνω πίνακα συμπεραίνουμε πως η κλίση της γραμμής παλινδρόμησης δεν είναι στατιστικά διαφορετική της κλίσης 1, μέχρι και επίπεδο σημαντικότητας 1% στις περισσότερες θέσεις παρατήρησης της παροχής υποδηλώνοντας την πολύ καλή συσχέτιση μεταξύ παρατηρούμενων και

προσομοιωμένων τιμών. Αντίθετα στις περιοχές Βιβάρι και Μαγουλίτσα Αγία Ειρήνη υπάρχει σημαντική στατιστική διαφορά ακόμη και σε επίπεδο σημαντικότητας 10%.

Αντίστοιχα για τις υπολογιζόμενες τιμές σημαντικότητας (p-value) της στερεοπαροχής ενώ κάποιες (Βρονταμάς, Βιβάρι, Κελεφίνα Κλαδάς) παρουσιάζουν πολύ καλή συσχέτιση μεταξύ των παρατηρούμενων και προσομοιωμένων τιμών για επίπεδο σημαντικότητας 5% ενώ στις υπόλοιπες παρουσιάζεται σημαντική στατιστική διαφορά ακόμη και σε επίπεδο σημαντικότητας 40%.

4.1.6.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης υφιστάμενης κατάστασης

Υστερα από τη βαθμονόμηση και επαλήθευσή του με βάση μετρήσεις παροχής, στερεοπαροχής και θρεπτικών σε δύο θέσεις ποταμού κάθε φορά, το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εκτιμήσεις σε κάθε άλλη χρονική περίοδο του διαστήματος προσομοίωσης. Στο σημείο αυτό επιλέγεται η δωδεκαετία 2000-2011 ως το πιο πρόσφατο διάστημα της περιόδου προσομοίωσης για να παρουσιαστούν τα μέσα υδρομετεωρολογικά και ποιοτικά μεγέθη που εξήχθησαν από το μοντέλο.

Προσομοιώνοντας την υδρολογία της λεκάνης απορροής καταλήγουμε στο υδατικό ισοζύγιο της λεκάνης απορροής του ποταμού Ευρώτα. Η μέση ετήσια τιμή βροχόπτωσης για την περίοδο προσομοίωσης 2000-2011 υπολογίστηκε ίση με 903 mm, η εξατμισοδιαπνοή 424 mm (46.9%) ενώ το δυναμικό νερού (water yield) ίσο με 121 mm (13.4%). Το 33.4% (302 mm) ισοδυναμεί με ποσότητες νερού που χάνονται εκτός λεκάνης λόγω της έντονης καρστικοποίησης του Ταύγετου και του Πάρνωνα ενώ ένα ποσοστό της τάξεως του 6.3% χρησιμοποιείται για ανάγκες ύδρευσης. Οι **Andreidakis et al. (2008)** συμπέραναν πως το ανατολικό τμήμα της περιοχής (Πάρνωνας) υποφέρει από έλλειψη νερού που προκαλείται από την γεωμορφολογία της περιοχής. Η τεκτονική οδηγεί τα υπόγεια ύδατα σε μεγάλα βάθη (σχεδόν μέχρι το επίπεδο της θάλασσας) και στη συνέχεια ανατολικά στο Μυρτώο Πέλαγος.

Από την άλλη πλευρά, στο Βόρειο και Βορειοδυτικό τμήμα της περιοχής (Ταύγετος) οι υδάτινοι πόροι είναι πιο άφθονοι κυρίως λόγω του μεγάλου αριθμού πηγών που εκφορτίζουν καρστικούς υδροφορείς. Επιπλέον στα προσχωσιγενή πετρώματα υπάρχουν κοκκώδεις υδροφορείς που τροφοδοτούνται από τους γειτονικούς σε αυτά καρστικούς υδροφορείς.

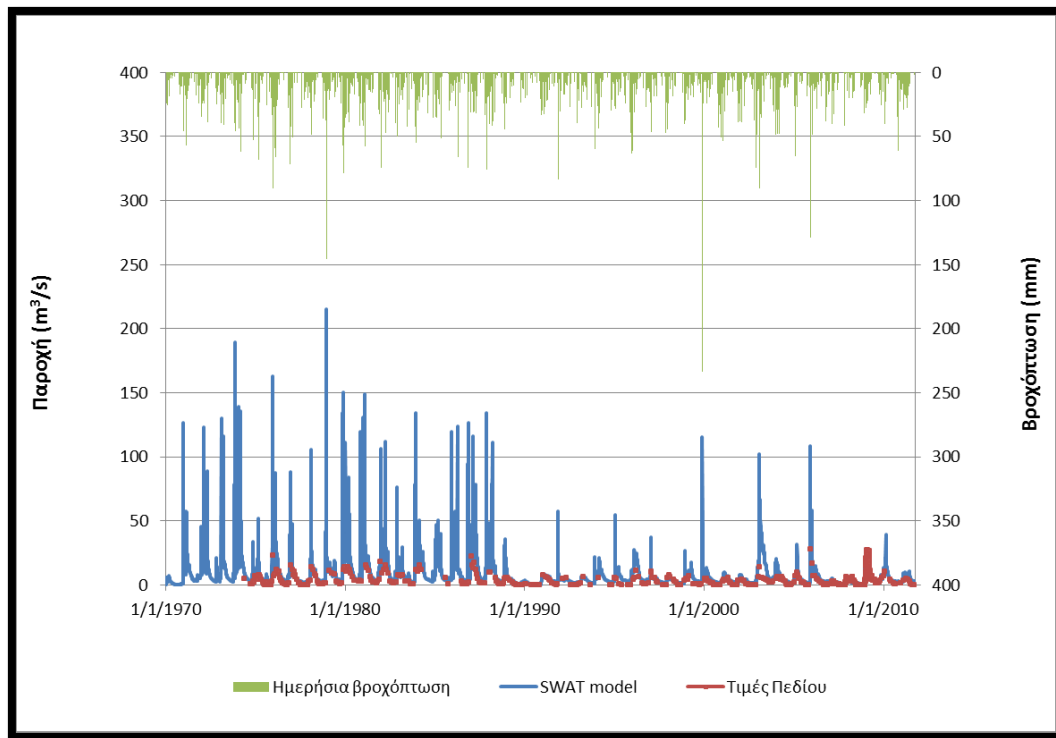
Η μεταβλητότητα των βροχοπτώσεων κατά τη διάρκεια της περιόδου 2000-2011 είναι σημαντική και κυμαίνεται από 1474 mm το 2003 (υγρό έτος) σε 647 mm το 2007 (ξηρό έτος). Σε γενικές γραμμές οι βροχοπτώσεις στην περιοχή εμφανίζεται κυρίως κατά τη διάρκεια του φθινοπώρου-χειμώνα (70%) και μόνο το 30% την άνοιξη. Η υψηλότερη ένταση βροχής σε 24 ώρες συνέβη στις 24/11/2005 και ήταν 129 mm ενώ το 75% των επεισοδίων βροχής είχε ένταση κάτω των 10 mm.

Πίνακας 4.13. Ετήσιες τιμές προσομοίωσης με το μοντέλο SWAT της περιόδου 2000-2011

	Βροχόπτωση (mm)	Εξατμισοδιαπνοή (mm)	Απορροή (mm)	Παραγωγή ιζημάτων (t/ha)
2000	704.0	363.	55.8	0.17
2001	969.5	447.9	111.0	0.99
2002	927.6	465.6	101.9	0.33
2003	1474.9	460.6	261.5	2.40
2004	651.9	367.5	87.5	0.66
2005	1085.2	378.9	175.1	3.03
2006	752.9	423.9	124.5	0.43
2007	647.7	381.7	46.9	0.10
2008	791.5	413.1	68.5	0.39
2009	1155.5	480.5	163.9	0.43
2010	702.5	444.0	118.6	0.42
2011	742.8	358.0	109.4	0.64

Για την περαιτέρω επαλήθευση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης η χρονική διάρκεια της επαλήθευσης διευρύνθηκε έως το 1970. Η **Εικόνα 4.20** παρουσιάζει μια μακροχρόνια υδρολογική προσομοίωση (1970-2010) στην θέση Βρονταμάς υποθέτοντας ότι δεν υπήρχαν αλλαγές στις χρήσεις γης. Στην πραγματικότητα, υπήρξε μια μείωση κατά 8% στη γεωργική γη μεταξύ του 1970 και του 2010, με τη μετάβαση από τις αρότριες καλλιέργειες σε μόνιμη γεωργία (π.χ. ελιές και εσπεριδοειδή).

Δεδομένου ότι η μείωση της καλλιεργήσιμης γης οφείλεται στην εγκατάλειψη των καλλιεργειών σε ορεινές περιοχές και η αλλαγή της χρήσης γης ακολούθησε την εντατικοποίηση της παραγωγής ο αντίκτυπος της αλλαγής των χρήσεων γης στους υδάτινους πόρους δεν θεωρήθηκε σημαντικός αλλά εντός της αβεβαιότητας που οφείλεται σε μετρήσεις. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι υπήρξε μια σημαντική μείωση του δυναμικού νερού μετά την ξηρασία του 1989, γεγονός που υποδηλώνει κλιματολογική μεταβολή του υδρολογικού καθεστώτος της περιοχής.

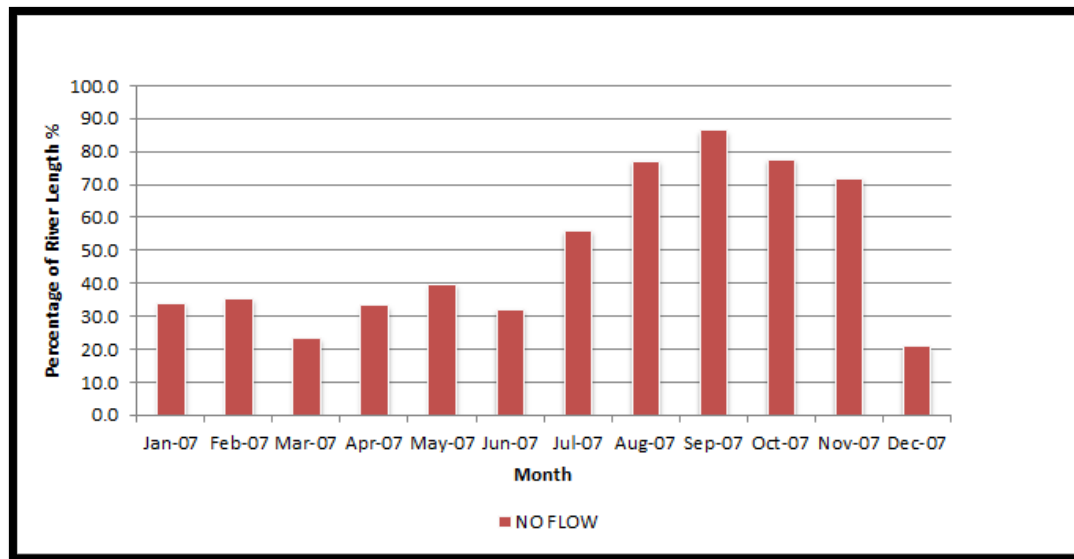


Εικόνα 4.20. Υδρολογική προσομοίωση στην θέση Βρονταμάς για την περίοδο 1970-2010

Η μέση τιμή του δυναμικού σε νερό της περιόδου 1970-1988 έχει μειωθεί από 277.1 mm (21.2% της βροχόπτωσης) σε 134.8 mm (15.2% της βροχόπτωσης) κατά την περίοδο 1989-2011 ως αποτέλεσμα της μείωσης των βροχοπτώσεων από 1304.4 mm σε 884.1 mm στην ίδια περίοδο.

Οι στατιστικοί δείκτες NSE, RSR and PBIAS για την προσομοίωση της παροχής της περιόδου 1974-2011 είναι 0.53, 0.69 και -23.0% αντίστοιχα. Οι δείκτες βρίσκονται εντός των καθορισμένων ορίων υποδηλώνοντας ότι τα αποτελέσματα είναι ιδιαίτερα ικανοποιητικά (Moriassi et al., 2008).

Σύμφωνα με την προσομοίωση σε γενικές γραμμές σχεδόν το 90% του υδρογραφικού δικτύου του Ευρώτα ποταμού αποτελείται από τμήματα διαλείπουσας ροής και μόνο το 10% αποτελείται από τμήματα συνεχούς ροής. Η **Εικόνα 4.21** παρουσιάζει την εξέλιξη της προσομοιωμένης αποξήρανσης του ποταμού (% ξηρό μήκος) κατά τη διάρκεια του 2007.



Εικόνα 4.21. Εξέλιξη της προσομοιωμένης αποξήρανσης του ποταμού κατά τη διάρκεια του ξηρού έτους 2007

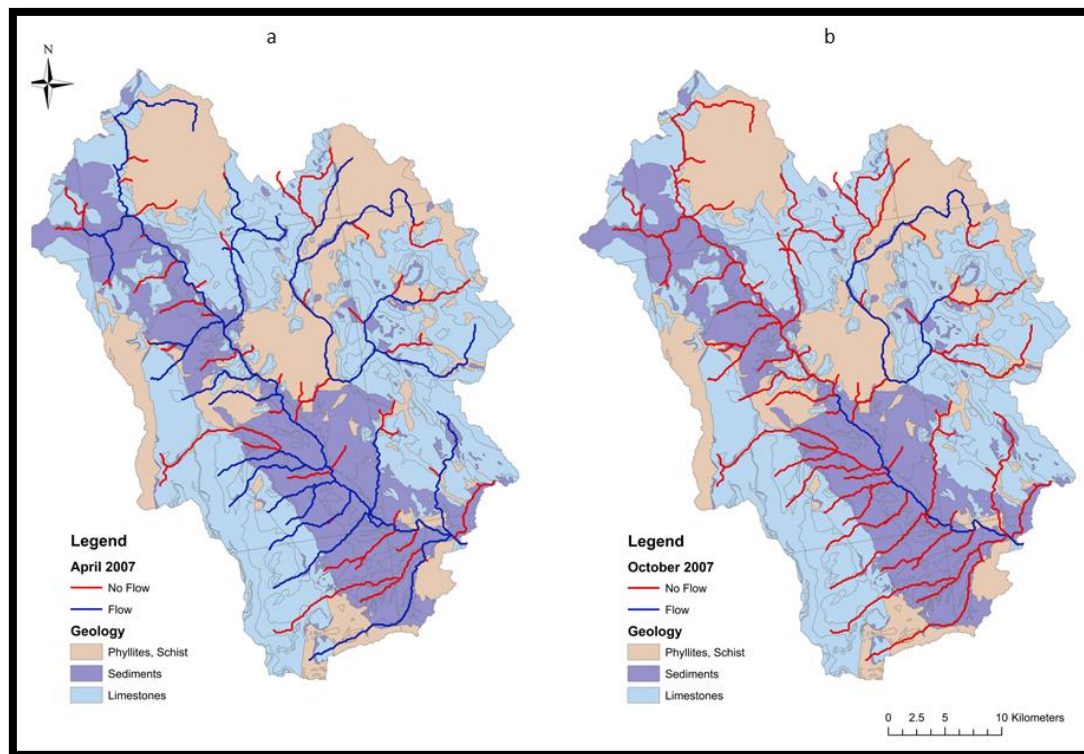
Για την περαιτέρω εξέταση και επαλήθευση της υδρολογικής προσομοίωσης της λεκάνης απορροής του ποταμού Ευρώτα μέσω του μοντέλου SWAT σε ξηρές περιόδους δημιουργήθηκαν χάρτες απορροής προσδιορίζοντας τα τμήματα του ποταμού με επιφανειακή ροή ή όχι, χάρτες οι οποίοι στην συνέχεια συγκρίθηκαν με πραγματικούς χάρτες απορροής (Skoulikidis et al., 2011) της ίδιας περιοχής για το ξηρό έτος 2007. Ο όρος "αποξήρανση του ποταμού- river desiccation" χρησιμοποιείται για να περιγράψει την έκταση του δικτύου του ποταμού που ξεραίνεται κατά τη διάρκεια μιας περιόδου ανομβρίας. Είναι μια σημαντική οικολογική παράμετρος, διότι σχετίζεται με την επιβίωση των ψαριών και την οικολογική ποιότητα του ποταμού (Skoulikidis et al., 2011).

Η Εικόνα 4.22 παρουσιάζει τα αποτελέσματα ροής μέσω του μοντέλου SWAT (Απρίλιος και Οκτώβριος 2007) προκειμένου να απεικονιστεί η εξέλιξη της αποξήρανσης του υδρογραφικού δικτύου κατά τη διάρκεια ενός ξηρού έτους.

Τα αποτελέσματα είναι συγκρίσιμα με τους πραγματικούς χάρτες αποξήρανσης του ποταμού όπως δημιουργήθηκαν από τους Skoulikidis et al. (2011) για το ίδιο χρονικό διάστημα, παρέχοντας πρόσθετη απόδειξη ότι το μοντέλο SWAT μπορεί να προσομοιώσει συνθήκες χαμηλής ή μηδενικής ροής στη λεκάνη.

Εξετάστηκε η κατάσταση του ποταμού όπως προσομοιώθηκε με το μοντέλο SWAT σε επίπεδο υπολεκάνης με τα αντίστοιχα τμήματα του ποταμού που περιγράφηκαν από τους Skoulikidis et al. (2011). Μέσες μηνιαίες τιμές απορροής εκτιμήθηκαν τον Απρίλιο και τον Οκτώβριο του 2007, αντιπροσωπεύοντας την αρχή και το τέλος της ξηρής περιόδου στον Ευρώτα και επιλέχθηκε μια τιμή κατώφλι (0.01

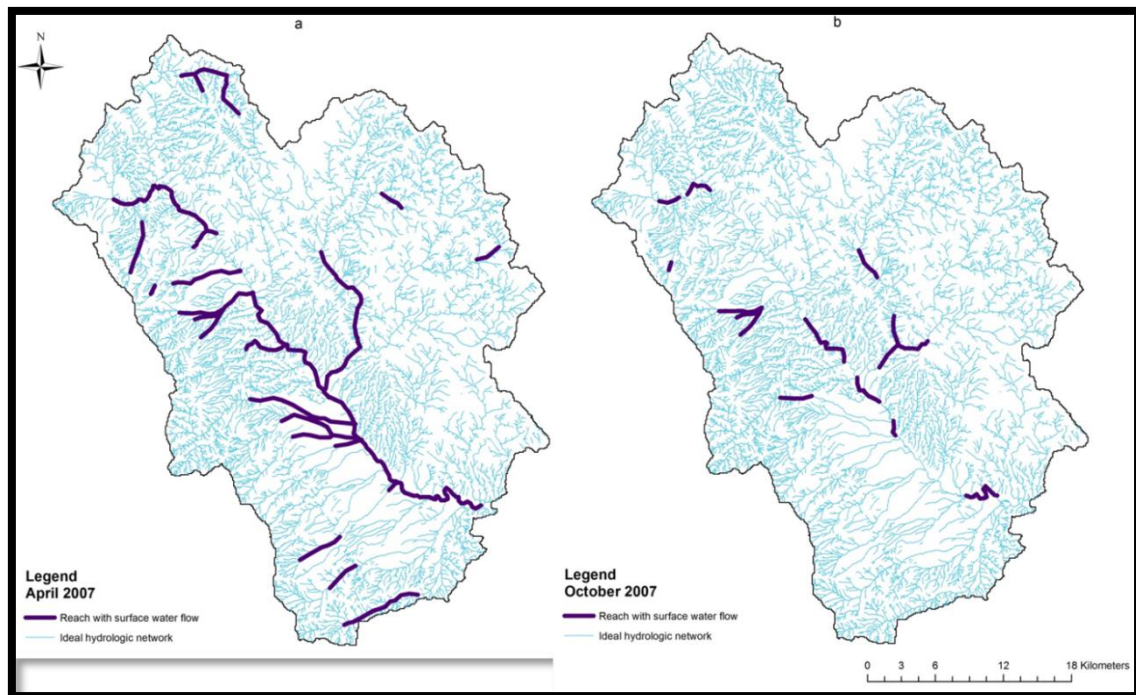
m³/s) υποδεικνύοντας συνθήκες μηδενικής ροής στα αποτελέσματα του μοντέλου SWAT. Με βάση αυτή τη σύγκριση προέκυψε πάνω από το 85% των τμημάτων του ποταμού αντιπροσωπεύουν ίδια χαρακτηριστικά ροής με αυτά των πραγματικών χαρτών αποξήρανσης ποταμού παρέχοντας επιπλέον ενδείξεις ότι το μοντέλο μπορεί να απεικονίσει συστηματικά συνθήκες χαμηλής ή μηδενικής ροής στη λεκάνη.



Εικόνα 4.22. Υδρολογικός χάρτης προσομοιωμένης ροής Ευρώτα ποταμού α) Απρίλιος 2007 και β) Οκτώβριος 2007

Αναδημιουργημένοι χάρτες αποξήρανσης του ποταμού όπως αυτοί που δημιουργήθηκαν από τους **Skoulikidis et al. (2011)** παρουσιάζονται στην **Εικόνα 4.23**. Με σκούρο χρώμα είναι τα τμήματα του ποταμού που παρουσιάζουν επιφανειακή ροή. Οι **Skoulikidis et al. (2011)** διεξήγαγαν έρευνες όπου τα ξηρά και υγρά τμήματα του υδρογραφικού δικτύου καταγράφονταν αρκετές φορές κατά τη διάρκεια του ξηρού έτους (2007). Αυτό έγινε κατά τη διάρκεια επιτόπιων επισκέψεων σε όλο το μήκος του δικτύου του ποταμού και αποτελεί μια στατική κατάσταση αποξήρανσης του ποταμού.

Η χωρική κατανομή του δυναμικού επιφανειακών υδάτων αντανακλά τις υδρομορφολογικές συνθήκες της λεκάνης, όπου το μεγαλύτερο ποσοστό παράγεται από το καρστικό σύστημα του Ταΰγετου.

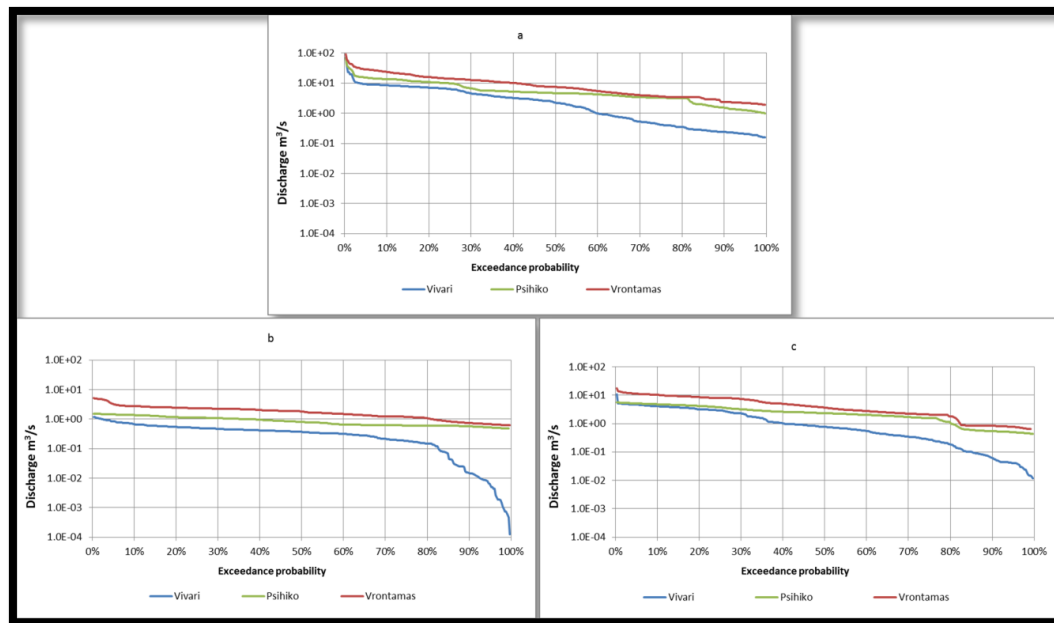


Εικόνα 4.23. Υδρολογικός χάρτης ροής Ευρώτα ποταμού α) Απρίλιος 2007 και β) Οκτώβριος 2007. Οι έντονες γραμμές αντιπροσωπεύουν τμήματα του ποταμού με ροή. (Αναδημιουργημένοι χάρτες από **Skoulikidis et al. (2011)**)

Το δυναμικό επιφανειακών υδάτων για το σύνολο της λεκάνης κυμαίνεται από 272.9 mm (17.0% της βροχόπτωσης) κατά την περίοδο 2002-2003 σε 47.9 mm (7.9% της βροχόπτωσης) κατά την περίοδο 2006-2007 ενώ λαμβάνει ενδιάμεση τιμή ίση με 158.3 mm (16.8% της βροχόπτωσης) την περίοδο 2008-2009. Η μεταβλητότητα του δυναμικού επιφανειακών υδάτων του Ευρώτα ποταμού κατά τη διάρκεια μιας υγρής (2002-2003) και μιας ξηρής (2006-2007) περιόδου είναι συνδυαστικό αποτέλεσμα της μεταβολής των βροχοπτώσεων και της ποσότητας άντλησης νερού αυτά τα χρόνια.

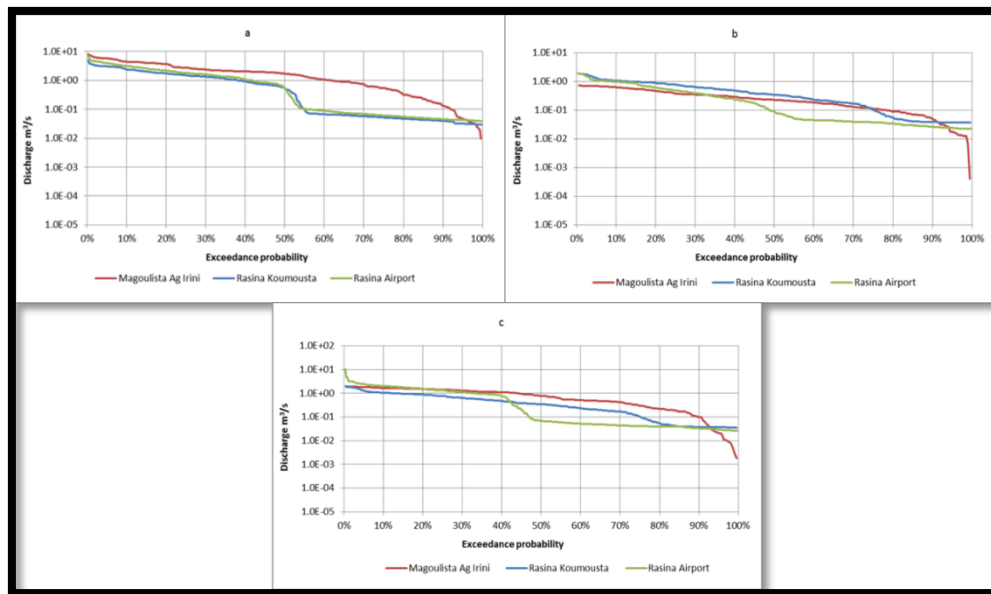
Καμπύλες διάρκειας ροής και ιζημάτων δημιουργήθηκαν σε κάθε θέση παρατήρησης από δεδομένα εξόδου του μοντέλου SWAT (**Gamvroudis et al., 2011**). Η **Εικόνα 4.24** παρουσιάζει τις καμπύλες διάρκειας ροής (flow duration curve) σε ένα υγρό (2002-2003), ξηρό (2006-2007) και τυπικό (2008-2009) έτος σε τρεις θέσεις παρατήρησης (Βιβάρι, Ψυχικό και Βρονταμάς) στον κύριο ρου του ποταμού Ευρώτα.

Ο **Kirkby et al. (2011)** πρότειναν ότι οι διαφορές στις μηνιαίες καμπύλες διάρκειας ροής μπορεί να χρησιμοποιηθούν στην ταξινόμηση των χαρακτηριστικών υπογραφών του κλίματος και των υδρολογικών συνθηκών που επηρεάζονται από τις κλιματικές αλλαγές.

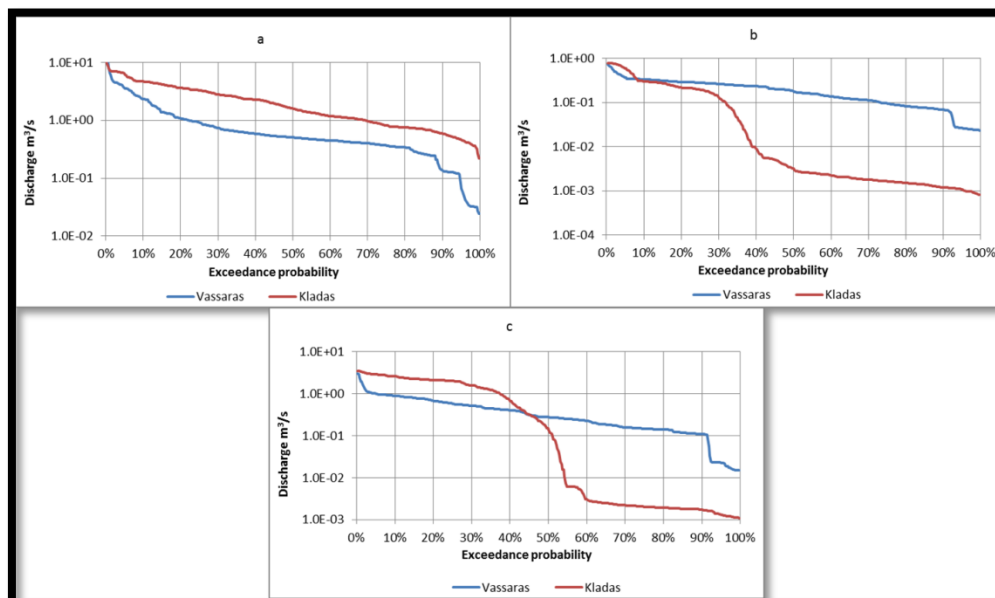


Εικόνα 4.24. Καμπύλες διάρκειας ροής στον κύριο ρου του Ευρώτα α) 2002-2003 β) 2006-2007 και γ) 2008-2009

Οι τρεις θέσεις παρατήρησης διατηρούν την ίδια χαρακτηριστική κατανομή της ροής (λιγότερο απότομη από τον Βορρά προς τον Νότο). Το σχήμα των καμπυλών διάρκειας ροής του κύριου ρου μπορεί να διαχωρίσει τόσο ακραίες ροές όσο και την μετάβαση από την συνεχή σε μια εφήμερη κατάσταση. Το ποσοστό ίσο με 3% μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα κατώτατο όριο για συνθήκες πλημμύρας με βάση την καμπύλη διάρκειας ροής για την υγρή περίοδο 2002-2003. Το σημείο που ορίζει την ξηρή κατάσταση μπορεί να οριστεί μόνο για την θέση Βιβάρι και αντιστοιχεί σε ποσοστό υπέρβασης ίσο με 80%. Αυτό σημαίνει πως το Βιβάρι μπορεί να ξεραίνεται μέχρι και 20% του χρόνου ανάλογα με τις κλιματολογικές συνθήκες. Η **Tzoraki et al., (2013)** συμπέρανε ότι η εποχικότητα των πλημμυρών στον Ευρώτα είναι σε συμφωνία με άλλες μελέτες στην Ελλάδα και διαφέρει σημαντικά από άλλες πλημμύρες στην Ευρώπη. Η συχνότητα των πλημμυρών στον κεντρικό ρου του ποταμού εκτιμάται ότι είναι μεταξύ 5% και 7%. Οι καμπύλες διάρκειας ροής στους παραποτάμους της Δυτικής πλευράς (**Εικόνα 4.25**) παρουσιάζουν χαρακτηριστικά διαλείπουσας ροής ενώ οι καμπύλες διάρκειας ροής της Ανατολικής πλευράς (**Εικόνα 4.26**) χαρακτηριστικά χειμάρρων.

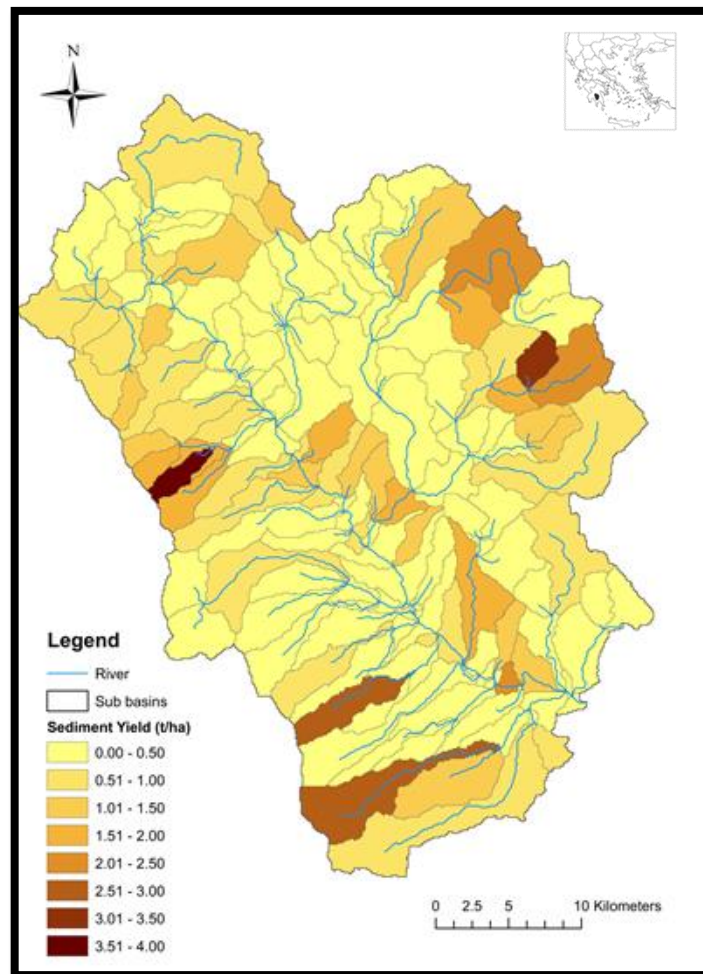


Εικόνα 4.25. Καμπύλες διάρκειας ροής στην Δυτική πλευρά του Ευρώτα α) 2002-2003 β) 2006-2007 και γ) 2008-2009



Εικόνα 4.26. Καμπύλες διάρκειας ροής στην Ανατολική πλευρά του Ευρώτα α) 2002-2003 β) 2006-2007 και γ) 2008-2009

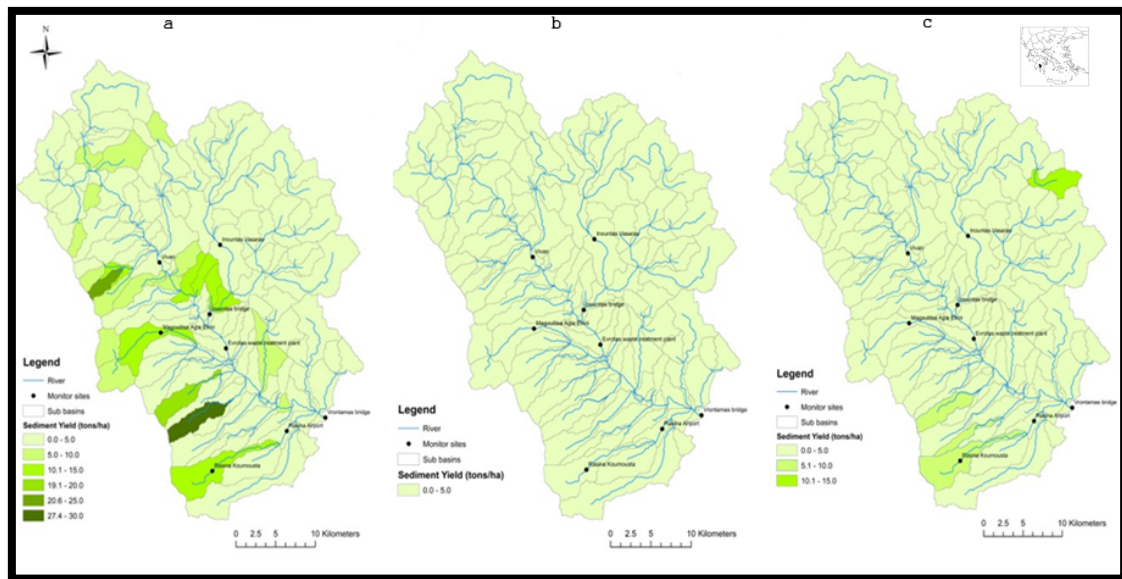
Η Εικόνα 4.27 παρουσιάζει το μέσο ετήσιο δυναμικό ιζημάτων για κάθε υπολεκάνη για την περίοδο 2000-2011. Η μέση ετήσια τιμή του δυναμικού ιζημάτων για το σύνολο της λεκάνης είναι ίση με 0.85 t/ha. Η υψηλότερη ετήσια τιμή του δυναμικού ιζημάτων δημιουργείται στο δυτικό τμήμα της λεκάνης απορροής (3,5 t/ha) και δεν υπερβαίνει τα εκτιμώμενα όρια ανοχής (2 και 12 t ha⁻¹ yr⁻¹) για τις χώρες της μεσογείου όπως προτάθηκαν από τον López -Bermúdez et al. (1998).



Εικόνα 4.27. Μέσο ετήσιο δυναμικό ιζημάτων (sediment yield) για κάθε υπολεκάνη του Ευρώτα για την περίοδο 2000-2011.

Υπάρχει μεγάλη διακύμανση στις τιμές στερεομεταφοράς εντός της λεκάνης. Η χρονική και χωρική κατανομή της προσομοιωμένης στερεοπαροχής του Ευρώτα για ένα υγρό (2003-2004), ξηρό (2006-2007) και τυπικό (2008-2009) έτος παρουσιάζονται στην **Εικόνα 4.28**.

Η πλειονότητα της προσομοιωμένης στερεομεταφοράς δημιουργήθηκε κατά την διάρκεια δύο καταιγίδων τον Ιανουάριο του 2003 και τον Νοέμβριο του 2005. Συγκεκριμένα, το προσομοιωμένο δυναμικό στερεομεταφοράς τον Ιανουάριο του 2003 εκτιμήθηκε ίσο με 92750 τόνους στην περιοχή Βρονταμάς. Οι μέγιστες τιμές της συγκέντρωσης ιζημάτων εμφανίστηκαν το 2003 (6356 mg/L) και το 2008 (3021 mg/L) ενώ οι μικρότερες το 2007 (περίοδος ξηρασίας).



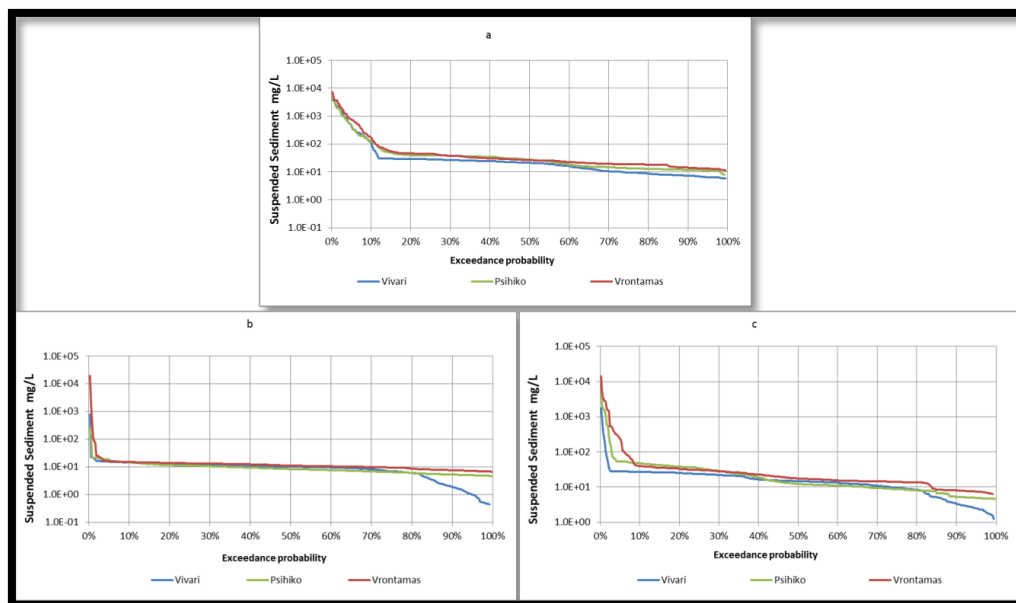
Εικόνα 4.28. Η κατανομή της προσομοιωμένης στερεοπαροχής του Ευρώτα για ένα α) υγρό (2003-2004), b) ξηρό (2006-2007) και c) τυπικό (2008-2009) έτος

Μειώσεις στο προσομοιωμένο δυναμικό ιζημάτων σημειώθηκαν επίσης ως αποτέλεσμα της μείωσης της απορροής του ποταμού λόγω απολήψεων νερού μέσα από την κοίτη. Τα εδάφη στην Ευρώτα παρουσιάζουν υψηλή ευαισθησία στη διάβρωση λόγω της μέσης σύστασης τους. Οι υπολεκάνες με υψηλά ποσοστά προσομοιωμένης στερεομεταφοράς έχουν απότομες πλαγιές και βρίσκονται κυρίως στις ορεινές περιοχές του Ταυγέτου και του Πάρωνα.

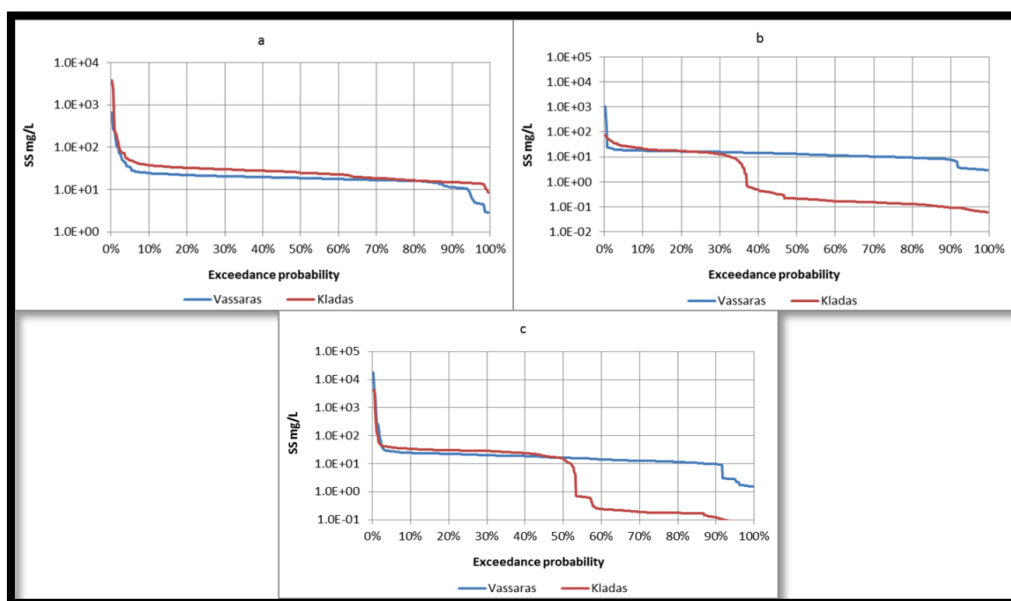
Οι καμπύλες διάρκειας στερεομεταφοράς για τον κύριο ρου του ποταμού Ευρώτα παρουσιάζονται στην **Εικόνα 4.29**. Η μορφή και το σχήμα των καμπυλών είναι διαφορετική μεταξύ του κύριου ρου και των παραποτάμων αντικατοπτρίζοντας τις γεωμορφολογικές διαφοροποιήσεις διάβρωσης.

Χαρακτηριστικό είναι το σημείο της καμπύλης που χωρίζει την υψηλή συγκέντρωση ιζημάτων στην κανονική ροή. Οι υψηλές συγκεντρώσεις ιζημάτων εμφανίζονται έως 15% του χρόνου κατά τη διάρκεια ενός υγρού έτους, έως 10% του χρόνου κατά τη διάρκεια ενός τυπικού έτους και έως 5% του χρόνου κατά τη διάρκεια ενός ξηρού έτους. Οι καμπύλες διάρκειας στερεομεταφοράς στους παραποτάμους της Δυτικής πλευράς παρουσιάζονται στην **Εικόνα 4.30** ενώ της Ανατολικής πλευράς στην **Εικόνα 4.31**.

«Ολοκληρωμένο πλαίσιο μοντελοποίησης υδρολογίας, ποιότητας νερών και στερεοπαροχής σε λεκάνες απορροής ποταμών διαλείπουσας ροής»

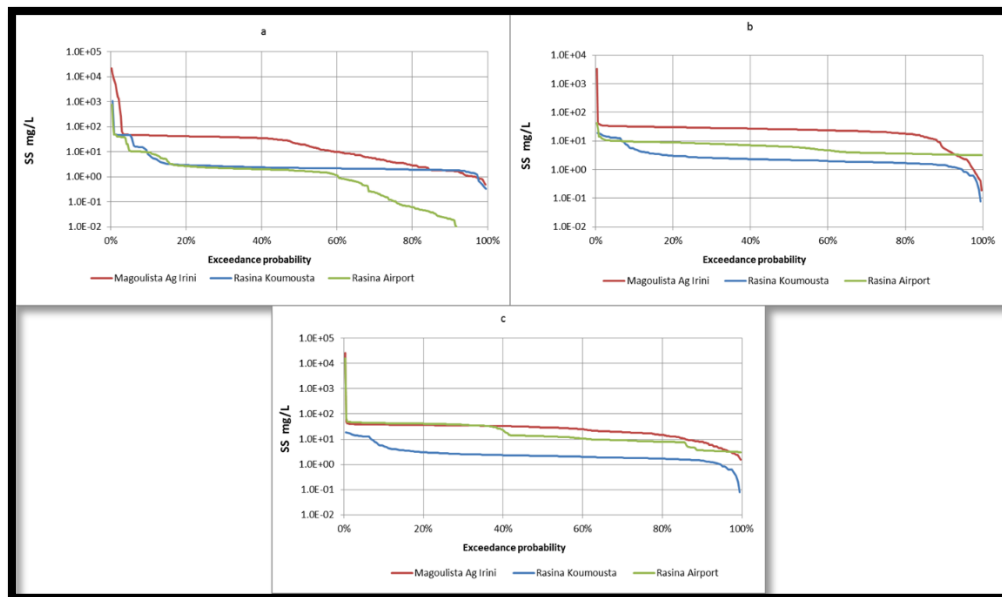


Εικόνα 4.29. Καμπύλες διάρκειας στερεοπαροχής στον κύριο ρου του Ευρώτα α) 2002-2003 β) 2006-2007 και γ) 2008-2009



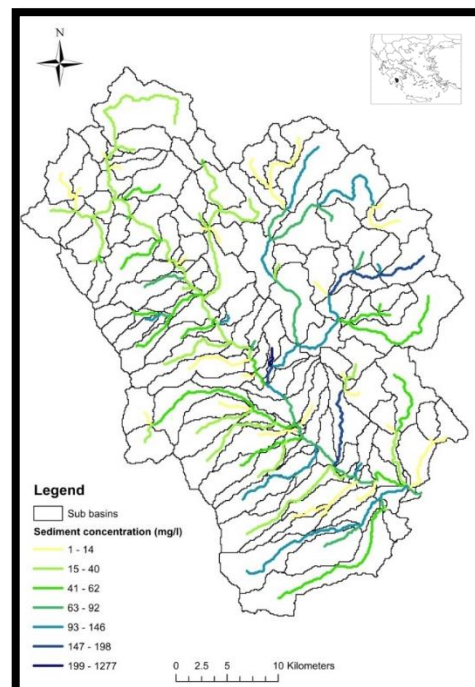
Εικόνα 4.30. Καμπύλες διάρκειας στερεοπαροχής στην Δυτική πλευρά του Ευρώτα α) 2002-2003 β) 2006-2007 και γ) 2008-2009

«Ολοκληρωμένο πλαίσιο μοντελοποίησης υδρολογίας, ποιότητας νερών και στερεοπαροχής σε λεκάνες απορροής ποταμών διαλείπουσας ροής»



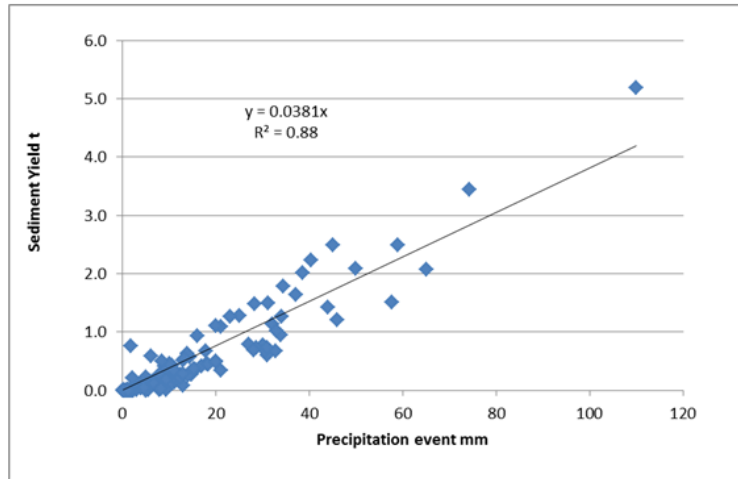
Εικόνα 4.31. Καμπύλες διάρκειας στερεοπαροχής στην Ανατολική πλευρά του Ευρώτα α) 2002-2003 β) 2006-2007 και γ) 2008-2009

Η **Εικόνα 4.32** παρουσιάζει την προσομοίωση της μέσης ετήσιας συγκέντρωσης των ιζημάτων (2000-2011) για κάθε τμήμα της λεκάνης απεικονίζοντας με αυτό τον τρόπο την χωρική μεταβλητότητα της διάβρωσης.



Εικόνα 4.32. Προσομοίωση της μέσης ετήσιας συγκέντρωσης των ιζημάτων (2000-2011) για κάθε τμήμα της λεκάνης απορροής

Για την περίοδο 2000-2011 δημιουργήθηκε μια χαρακτηριστική σχέση μεταξύ των γεγονότων βροχόπτωσης και του δυναμικού ιζημάτων η οποία είναι γραμμική ($R^2=0.88$) και παρουσιάζεται στην **Εικόνα 4.33**.



Εικόνα 4.33. Χαρακτηριστική συσχέτιση μεταξύ των γεγονότων βροχόπτωσης και του παραγόμενου δυναμικού ιζημάτων

Οι περισσότερες βροχοπτώσεις ήταν της τάξης των 10-40 mm και δημιούργησαν αντίστοιχα 1-2 tn δυναμικού ιζημάτων.

Η εξίσωση που προέκυψε είναι :

$$S_{\text{yield}} = 0.0381 \times \text{PREC}_{\text{ev}} \quad (4.4)$$

Όπου S_{yield} είναι το παραγόμενο δυναμικό ιζημάτων (tn) και PREC_{ev} η βροχόπτωση την συγκεκριμένη στιγμή (mm).

Συγκεντρώσεις ιζημάτων κατά τη διάρκεια πλημμυρών μετρήθηκαν από τους **Skoulikidis et al. (2013)** χρησιμοποιώντας ένα αυτοματοποιημένο δειγματολήπτη ISCO εγκατεστημένο στη θέση Σεντενίκος στο βόρειο-δυτικό τμήμα της λεκάνης. Ο αυτόματος δειγματολήπτης νερού ISCO (διασυνδεδεμένος με ένα καταγραφικό / ελεγκτή CR205) λάμβανε δείγματα σε μικρά χρονικά διαστήματα (κάθε 10-15 λεπτά) προκειμένου να εξεταστεί η μεταβολή της ποιότητας του νερού κατά τη διάρκεια των πρώτων πλημμυρών. Ο αυτόματος δειγματολήπτης ήταν εξοπλισμένος με 24 φιάλες των 500ml. Η μέγιστη συγκέντρωση των αιωρούμενων στερεών που μετρήθηκε στο ποτάμι κατά τη διάρκεια της εκδήλωσης πλημμυρών στις 25/01/2011 ήταν 81 mg/L και 2400 mg/L για την πλημμύρα στις 28/01/2011. Μέσω του μοντέλου SWAT υπολογίστηκε η συγκέντρωση των αιωρούμενων στερεών ίση με 5683 mg/L για την πρώτη πλημμύρα (25/01/2011) και 1841 mg/L για την δεύτερη (28/01/2011).

Τα αποτελέσματα των προσομοιωμένων και μετρούμενων τιμών διάβρωσης/εναπόθεσης ιζημάτων με βάση την τοπογραφική αποτύπωση διατομών ποταμού (**Ενότητα 3.2.3**) παρουσιάζονται στον **Πίνακα 4.14**.

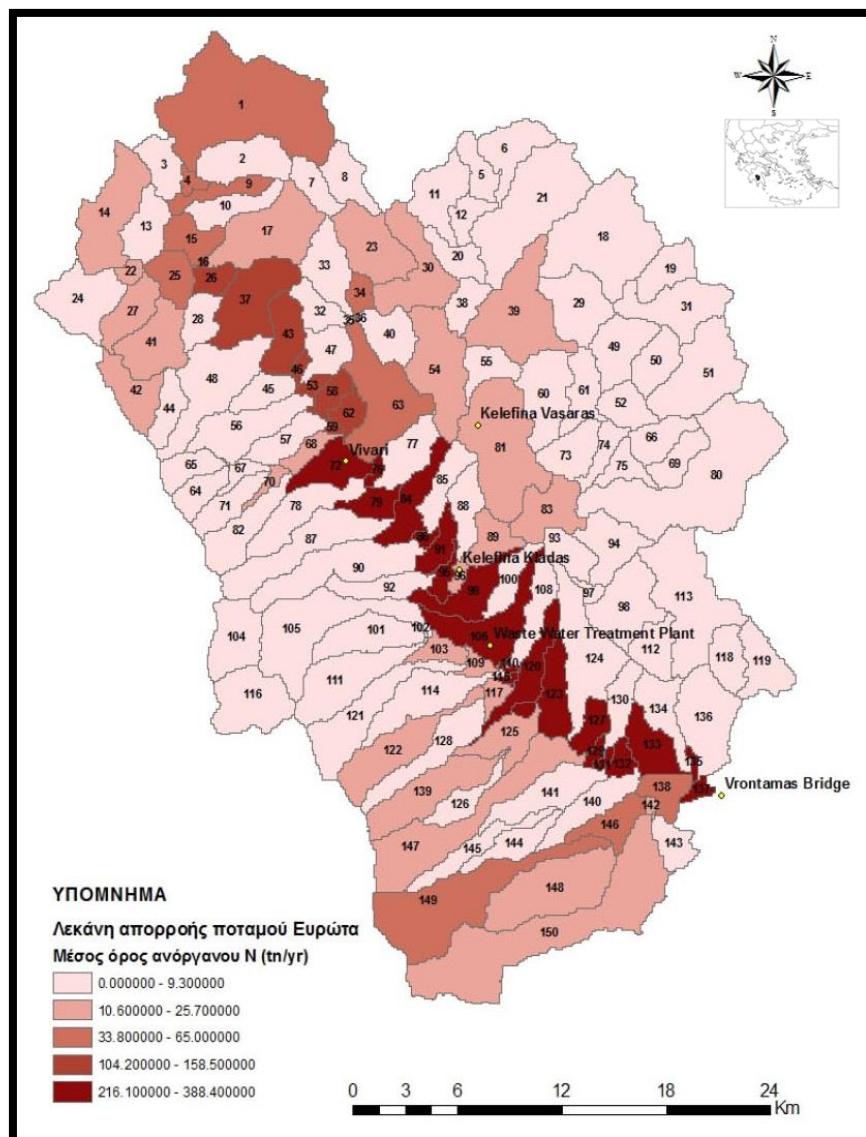
Πίνακας 4.14. Αποτελέσματα προσομοιωμένων και μετρούμενων τιμών διάβρωσης/εναπόθεσης ιζημάτων

		Ποσότητες διάβρωσης/Εναπόθεσης (tons)		
Περιοχή	Περίοδος	Cross Sections	SWAT	Σφάλμα %
Ρασίνα	Μάρτιος 2009-Μάρτιος 2010	80.7	60.6	-24.9
	Μάρτιος 2010-Ιούλιος 2011	72.4	73.3	1.2
Μαγουλίτσα	Μάρτιος 2009-Μάρτιος 2010	7.8	4.1	-47.4
	Μάρτιος 2010-Ιούλιος 2011	23.1	27.6	19.4

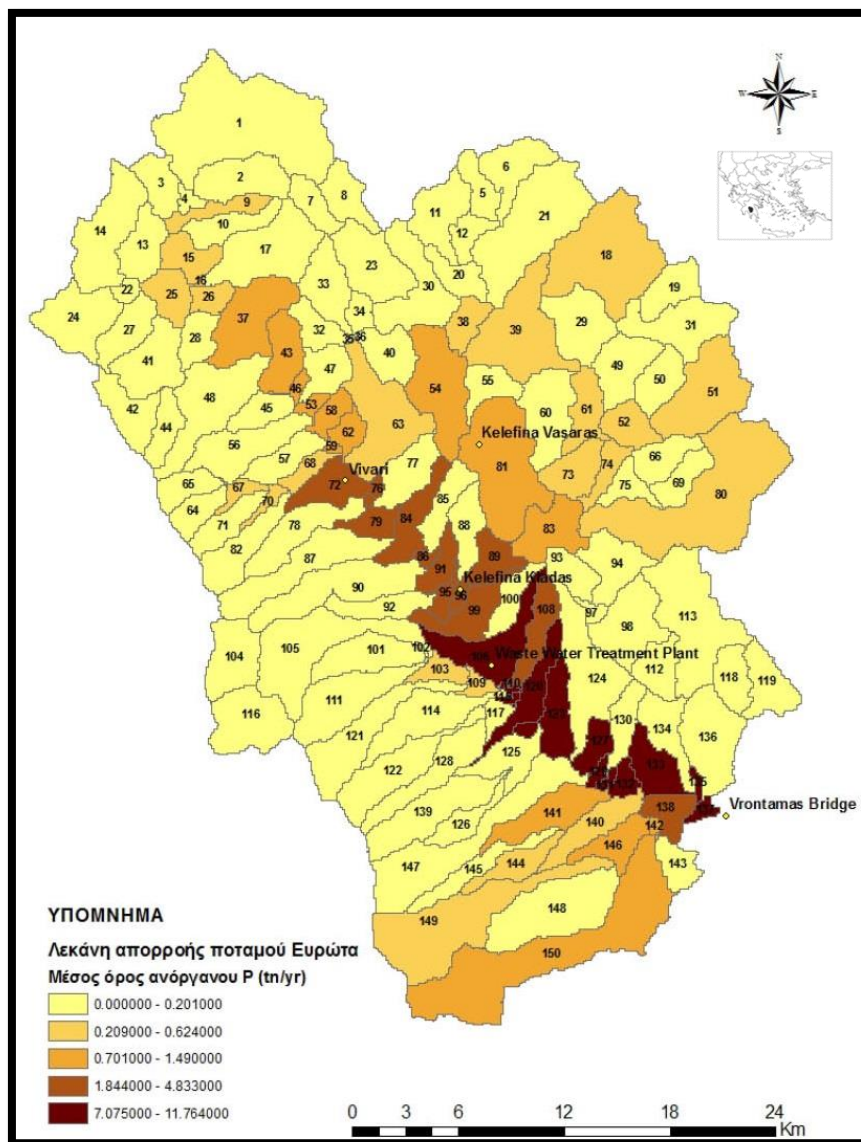
Η συσσώρευση ιζημάτων εντός της κοίτης της Ρασίνας υπολογίστηκε ίση με 153.1 tn ενώ για την Μαγουλίτσα Αγ. Ειρήνη ίση με 30.9 tn για μια περίοδο δύο ετών. Το μοντέλο SWAT εκτίμησε την συνολική συσσώρευση ιζημάτων ίση με 133.9 tn στην Ρασίνα και 31.7 tn στην Μαγουλίτσα Αγ. Ειρήνη τιμές που αντιστοιχούν σε σφάλμα 12.5% και 2.6% αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το μοντέλο παρέχει ικανοποιητική προσομοίωση της διάβρωσης/εναπόθεσης ιζημάτων εντός της κοίτης.

Για τη βαθμονόμηση των παραμέτρων της χημείας με βάση τα αποτελέσματα των φυσικοχημικών αναλύσεων (**Παράρτημα Ι**), εξετάστηκε ένα μεγάλο πλήθος παραμέτρων τόσο γενικών (σε επίπεδο λεκάνης απορροής), όσο και ειδικών (σε επίπεδο υπολεκάνης), προκειμένου να βρεθούν εκείνες που παίζουν τον καθοριστικότερο ρόλο στην προσομοίωση των χημικών παραμέτρων. Οι παράμετροι βαθμονόμησης και τα αποτελέσματα περιγράφονται αναλυτικά από τους **Tzoraki et al., 2013** και **Κασσωτάκη., 2011**.

Οι **Εικόνες 4.34** και **4.35** παρουσιάζουν το μέσο όρο φορτίων ανόργανου αζώτου και φωσφόρου που εκφορτίζονται από την κάθε υπολεκάνη ετησίως. Η έξοδος της κάθε υπολεκάνης αποτελεί είσοδο της επόμενης. Από τις εικόνες προκύπτει το συμπέρασμα ότι μεγαλύτερη φόρτιση παρουσιάζεται στις υπολεκάνες που βρίσκονται στον κύριο ρου του ποταμού Ευρώτα. Τα αποτελέσματα ήταν αναμενόμενα από τη στιγμή που οι ποσότητες αζώτου και φωσφόρου που παράγονται στην ευρύτερη περιοχή της λεκάνης απορροής του ποταμού, καταλήγουν τελικά στον κύριο ρου μέσω των παραποτάμων του.



Εικόνα 4.34. Κατανομή των φορτίων ανόργανου αζώτου που εκφορτίζονται από κάθε υπολεκάνη (tn/yr)



Εικόνα 4.35. Κατανομή των φορτίων ανόργανου φωσφόρου που εκφορτίζονται από κάθε υπολεκάνη (tn/yr)

5 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΑΙ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ ΚΑΙ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΟΥΣ ΣΕ ΣΕΝΑΡΙΑ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ

Η αλλαγή του κλίματος έχει ήδη ισχυρές επιδράσεις στα οικοσυστήματα, στους υδάτινους πόρους και στις παράκτιες περιοχές της κεντρικής και νότιας Ευρώπης ενώ στο μέλλον θα αυξήσει τους κινδύνους ξηρασίας και πλημμυρών σε πολλές περιοχές, θα μειώσει τους υδάτινους πόρους των άνυδρων και ημιάνυδρων περιοχών, θα απειλήσει τη βιωσιμότητα πολλών παράκτιων οικιστικών περιοχών ανά την υφήλιο θα προκαλέσει εκτεταμένη εξαφάνιση βιολογικών ειδών, μείωση της παραγωγικότητας της γεωργίας και θα αυξήσει τον κίνδυνο λιμών και θα δημιουργήσει προκλήσεις και σε άλλους πολλούς τομείς της ευρωπαϊκής οικονομίας όπως η δασοκομία, ο τουρισμός και η παραγωγή ενέργειας (IPCC, 2007a,b).

Η Νότια Ευρώπη, καθώς και η ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου, έχουν αναγνωριστεί ως ευάλωτες περιοχές σε ότι αφορά στις επιπτώσεις της ανθρωπογενούς συνιστώσας της κλιματικής αλλαγής (Hulme et al., 1999; Giorgi, 2006; IPCC, 2014). Πιο συγκεκριμένα, όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα μιας σειράς κλιματικών προσομοιώσεων που διεξήχθησαν υπό διάφορα σενάρια εκπομπών για την περιοχή της Μεσογείου, προβλέπεται ότι μέχρι τα τέλη του 21ου αιώνα η θερμοκρασία θα σημειώσει σημαντική άνοδο, ενώ παράλληλα το ύψος του νετού που αναμένεται στην περιοχή θα μειωθεί (Gibelin and Déqué, 2003; Pal et al., 2004; Giorgi and Bi, 2005; Giorgi and Lionello, 2008; Zanis et al. 2009; Κασσωμενάκης, 2009; Δουβής, 2009).

Οι μελέτες των Hertig and Jacobeit (2008), Zerefos et al. (2010), χρησιμοποιώντας μεθόδους στατιστικής υποκλιμάκωσης, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το ύψος του νετού θα μειωθεί σημαντικά στα ανατολικά και στα νότια τμήματα της Μεσογείου, κυρίως από τον Οκτώβριο μέχρι και το Μάιο. Άλλες εργασίες, που επικεντρώνονται στη μεταβολή των ακραίων τιμών της θερμοκρασίας και της βροχόπτωσης, έδειξαν ότι στο μέλλον, στην περιοχή της Μεσογείου, θα αυξηθούν δραστικά η ένταση των θερμών εισβολών (Diffenbaugh et al., 2007, Kuglitsch et al., 2010) και η διάρκεια των περιόδων ξηρασίας (Goubanova and Li, 2007), με συνέπεια, μεταξύ άλλων, τη σημαντική αύξηση του κινδύνου εκδήλωσης πλημμυρών και δασικών πυρκαγιών (Giannakopoulos, 2009).

Τα επιφανειακά και τα υπόγεια νερά συχνά αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους μέσω της κοινής τους διεπιφάνειας με αποτέλεσμα να επηρεάζεται τόσο η ποσότητα όσο και η ποιότητα τους. Ανάλογα με τη σχετική στάθμη των επιφανειακών νερών ως προς τη στάθμη των υπόγειων νερών, νερό και ρύποι διηθούνται από τα επιφανειακά υδάτινα σώματα προς τα υπόγεια νερά ή αντιστρόφως τα υπόγεια νερά τροφοδοτούν τα επιφανειακά. Η αλληλεπίδραση μεταξύ επιφανειακών και υπόγειων υδάτων καθορίζεται, εκτός από τη χωρική και χρονική κατανομή τους, από τα χαρακτηριστικά του πορώδους μέσου, από τις υδραυλικές ιδιότητες του πυθμένα των επιφανειακών

υδάτινων σωμάτων και από την θέση των επιφανειακών υδάτινων σωμάτων στο πορώδες μέσο. Συνεπώς η κατανόηση της επίδρασης των παραγόντων αυτών στη ροή των επιφανειακών και των υπόγειων νερών είναι απαραίτητη για την κατανόηση της μεταξύ τους αλληλεπίδρασης ενώ η μη θεώρηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ της κατά μήκος ροής υδατορεμάτων και της υπόγειας ροής οδηγεί σε υπερεκτίμηση ή υποεκτίμηση του πραγματικού υδατικού δυναμικού.

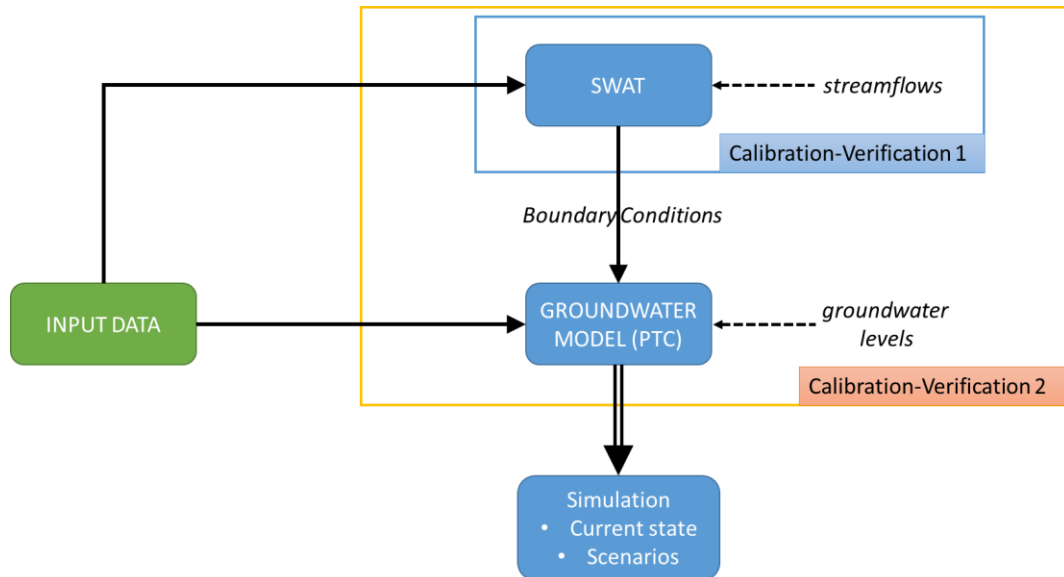
Η κατανόηση της σύνθετης συμπεριφοράς του συστήματος αλληλεπίδρασης επιφανειακών και υπόγειων υδάτων είναι πολύ σημαντική για τη διαχείριση των υδάτινων πόρων και απαιτεί μια ολοκληρωμένη προσέγγιση μοντελοποίησης. Διάφορες προσεγγίσεις μοντελοποίησης έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως για την ολοκληρωμένη διερεύνηση των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων. Οι πρώτες προσπάθειες έγιναν στη δεκαετία του 1980 ενώ από τη δεκαετία του 1990 οι έρευνες και τα μοντέλα έχουν αυξηθεί (**Krause et al., 2009**). Υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός μοντέλων αλληλεπίδρασης επιφανειακών και υπόγειων υδάτων (SW-GW) στην επιστημονική βιβλιογραφία, όπως το SWATMOD (**Sophocleous et al., 1999**), MIKE SHE (**Graham and Butts, 2005**), HydroGeoSphere (**Brunner and Simmons, 2012**), Swatmf (**Guzman et al., 2015**) and GSFLOW (**Tian et al., 2015**). Τα μοντέλα αυτά έχουν εφαρμοστεί για την αντιμετώπιση διαφόρων θεμάτων, όπως η διαχείριση της άρδευσης, οι αλληλεπιδράσεις SW-GW, η χρήση γης και η αλλαγή του κλίματος, η οικολογία και η ποιότητα του νερού. Τα περισσότερα μοντέλα έχουν σχεδιαστεί για την προσομοίωση της μέσης και υψηλής ροής και έχει αποδειχθεί ότι δίνουν καλά αποτελέσματα. Δυστυχώς, σε περιπτώσεις χαμηλών ροών συχνά τα αποτελέσματα δεν είναι ικανοποιητικά και δεν αντικατοπτρίζουν τις πραγματικές συνθήκες.

Σκοπός του παρόντος κεφαλαίου είναι η δημιουργία ενός ολοκληρωμένου πλαισίου μοντελοποίησης των υδατικών πόρων της περιοχής μελέτης συνδυάζοντας το υδρολογικό μοντέλο SWAT με το μοντέλο υπόγειων υδάτων PTC με στόχο την κατανόηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ των επιφανειακών και υπογείων υδάτων της περιοχής μελέτης και την βελτίωση της προγνωστικής ικανότητας του συνδυαστικού μοντέλου σε σενάρια κλιματικής αλλαγής έως το 2060.

5.1 Προσομοίωση της αλληλεπίδρασης επιφανειακών και υπόγειων νερών του ποταμού Ευρώτα

Το υδρολογικό μοντέλο SWAT και ο κώδικας μοντελοποίησης υπογείων υδάτων PTC αναπαριστούν τις φυσικές διεργασίες με διαφορετικό τρόπο περιορισμένα μέσα στα όρια προσομοίωσης τους έχοντας το καθένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Για τον λόγο αυτό κρίθηκε απαραίτητη μια ολοκληρωμένη προσέγγιση συνδυασμού των δύο μοντέλων (**Εικόνα 5.1**). Τα αποτελέσματα του μοντέλου SWAT σε συνδυασμό με την εφαρμογή του κώδικα υπογείων υδάτων PTC θα βοηθήσουν στην καλύτερη

προσομοίωση και κατανόηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ των επιφανειακών και υπογείων υδάτων της περιοχής μελέτης. Η μεθοδολογία προσέγγισης συνδυασμού των δύο μοντέλων περιγράφεται αναλυτικά στις επόμενες ενότητες.

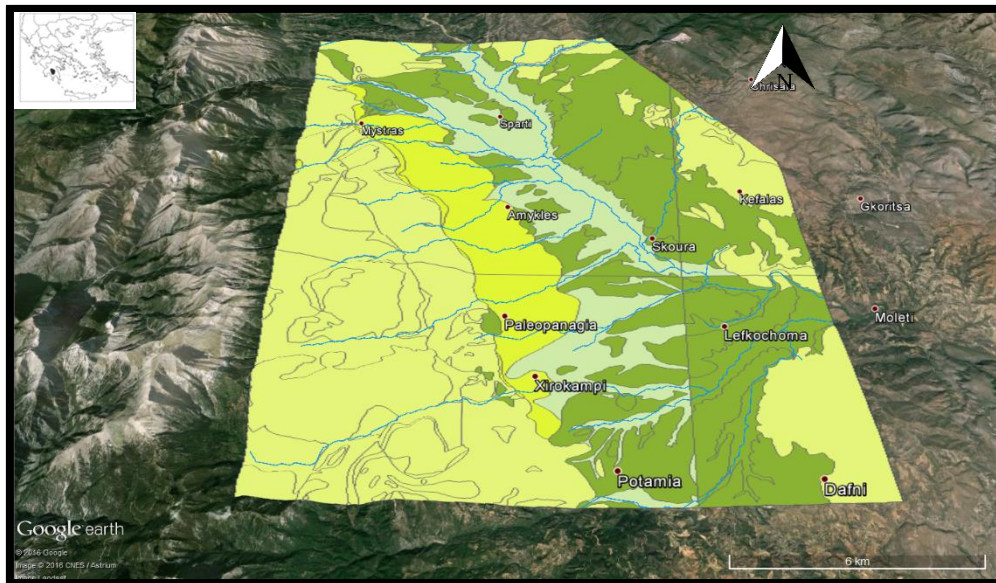


Εικόνα 5.1. Σχηματική μεθοδολογία συνδυασμού των μοντέλων SWAT και PTC

5.1.1 Σχηματοποίηση της περιοχής μελέτης, καθορισμός παραμέτρων και εισαγωγή δεδομένων στο PTC

Η προσομοίωση της κατάστασης των υπογείων υδάτων στην περιοχή μελέτης με χρήση του μοντέλου PTC απαιτεί την εισαγωγή μίας σειράς στοιχείων, που αφορούν στις ιδιαίτερες συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή μελέτης. Τα στοιχεία αυτά αφορούν τις υδραυλικές αγωγιμότητες, τα υψόμετρα της περιοχής, τις αρχικές και τις οριακές συνθήκες, τα δεδομένα βροχόπτωσης, τις θέσεις των πηγαδιών άντλησης και τους ρυθμούς άντλησης, τη χρονική διάρκεια της προσομοίωσης κ.ά.

Αρχικά ως περιοχή μελέτης είχε επιλεγεί η ευρύτερη περιοχή του ποταμού Ευρώτα. Λόγω όμως της έντονης καρστικοποίησης στη περιοχή κρίθηκε σκόπιμο να μελετηθεί μόνο η περιοχή της κοιλάδας της Σπάρτης (**Εικόνα 5.2**) η οποία χαρακτηρίζεται από μια σειρά επάλληλων, ελεύθερων-ημιαρτεσιανών και αρτεσιανών υδροφορέων στις αποθέσεις του ολοκαίνου και πλειστοκαίνου με τον ελεύθερο υδροφορέα να παρουσιάζεται ενιαίος.



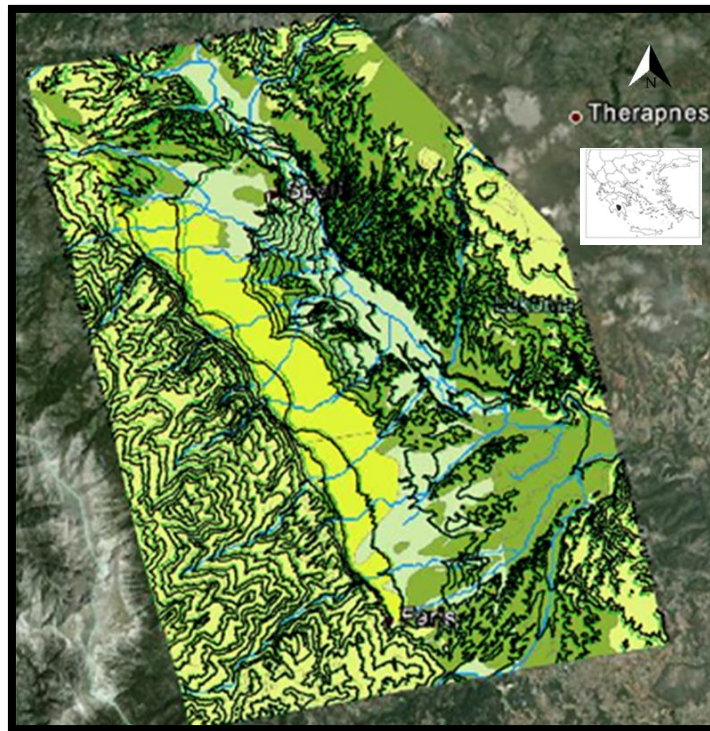
Εικόνα 5.2. Περιοχή μελέτης συνδυαστικού μοντέλου SWAT-PTC (Κοιλάδα της Σπάρτης)

Η προσομοίωση του μοντέλου των υπογείων υδάτων του Ευρώτα ποταμού γίνεται για την χρονική περίοδο Οκτώβριος 2007 - Σεπτέμβριος 2011 με μηνιαίο βήμα (48 stresses), ενώ η υπό μελέτη περιοχή (κοιλάδα της Σπάρτης) διαχωρίζεται σε δύο στρώματα. Η επιλογή της συγκεκριμένης στρωματοποίησης προέκυψε από τα δεδομένα των γεωτρήσεων που αφορούσαν στο βάθος που έφταναν. Εισάγεται το πάχος του κάθε στρώματος, το οποίο για το στρώμα 1 είναι σταθερό (50m), ενώ για το στρώμα 2 αναπαριστά το ανάγλυφο της περιοχής. Επίσης ορίστηκε κριτήριο (0.2 m) σύμφωνα με το οποίο θα προσεγγίζεται η σταθερή κατάσταση καθώς και ο αριθμός των βημάτων που θα εκτελεί το πρόγραμμα σε κάθε περίοδο (Gamvroudis et al., 2016).

Για τον καθορισμό της περιοχής μελέτης έγινε αρχικά εισαγωγή του γεωλογικού χάρτη της περιοχής ενώ στην συνέχεια έγινε εισαγωγή άλλων απαραίτητων δεδομένων όπως των ισοϋψών, των γεωτρήσεων κι των πηγών.

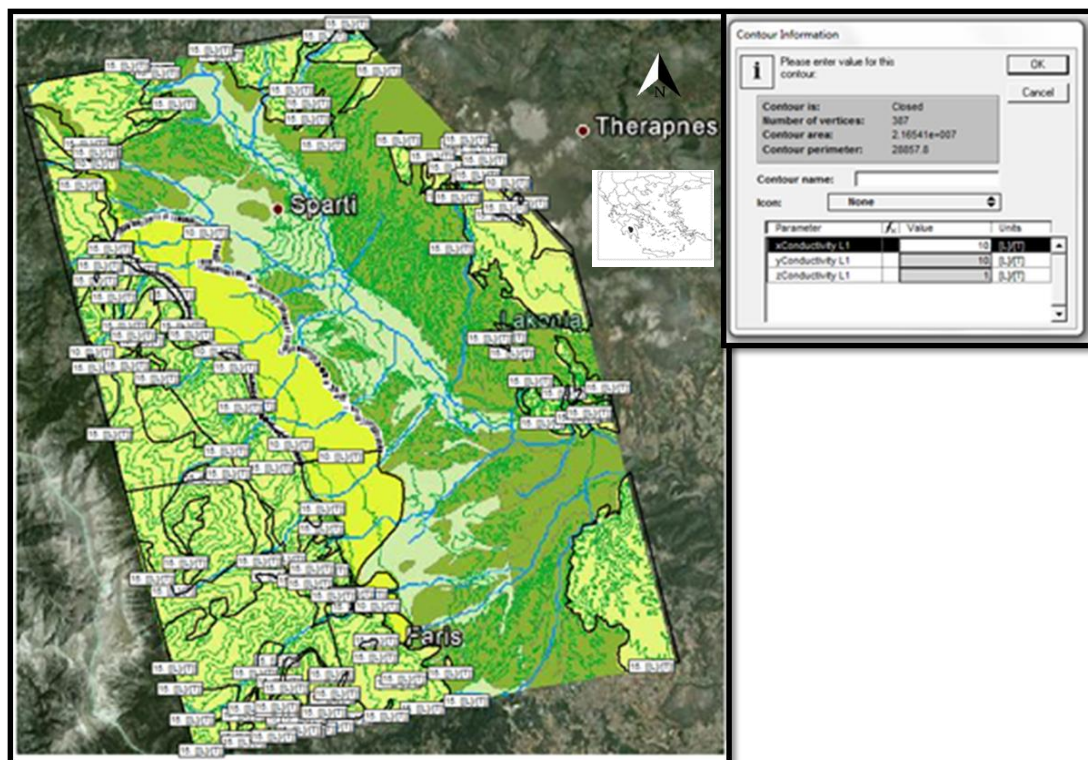
Η κατασκευή του πλέγματος στον κώδικα PTC βασίζεται στη θεωρία των πεπερασμένων στοιχείων. Αφού έχει σχεδιαστεί το περίγραμμα της περιοχής και ό,τι άλλο σχεδιαστικό δεδομένο κρίνεται απαραίτητο, κατασκευάζεται το πλέγμα του συστήματος στο Layer PTC Mesh. Το πλέγμα που θα δημιουργηθεί θα είναι πιο πυκνό στα σημεία όπου έχει δοθεί σχεδιαστική έμφαση τοποθετώντας, για παράδειγμα, πηγάδια άντλησης. Τα υψόμετρα της περιοχής μελέτης περάστηκαν ψηφιοποιημένα από ένα αρχείο GIS ισοϋψών καμπύλων (Εικόνα 5.3). Για την προσομοίωση της περιοχής χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος “Interpolation” η οποία επιτρέπει τη γραμμική παρεμβολή μεταξύ των σημείων, ώστε να προσδιοριστούν οι τιμές των υψομέτρων σε όλους τους κόμβους του πλέγματος.

«Ολοκληρωμένο πλαίσιο μοντελοποίησης υδρολογίας, ποιότητας νερών και στερεοπαροχής σε λεκάνες απορροής ποταμών διαλείπουσας ροής»



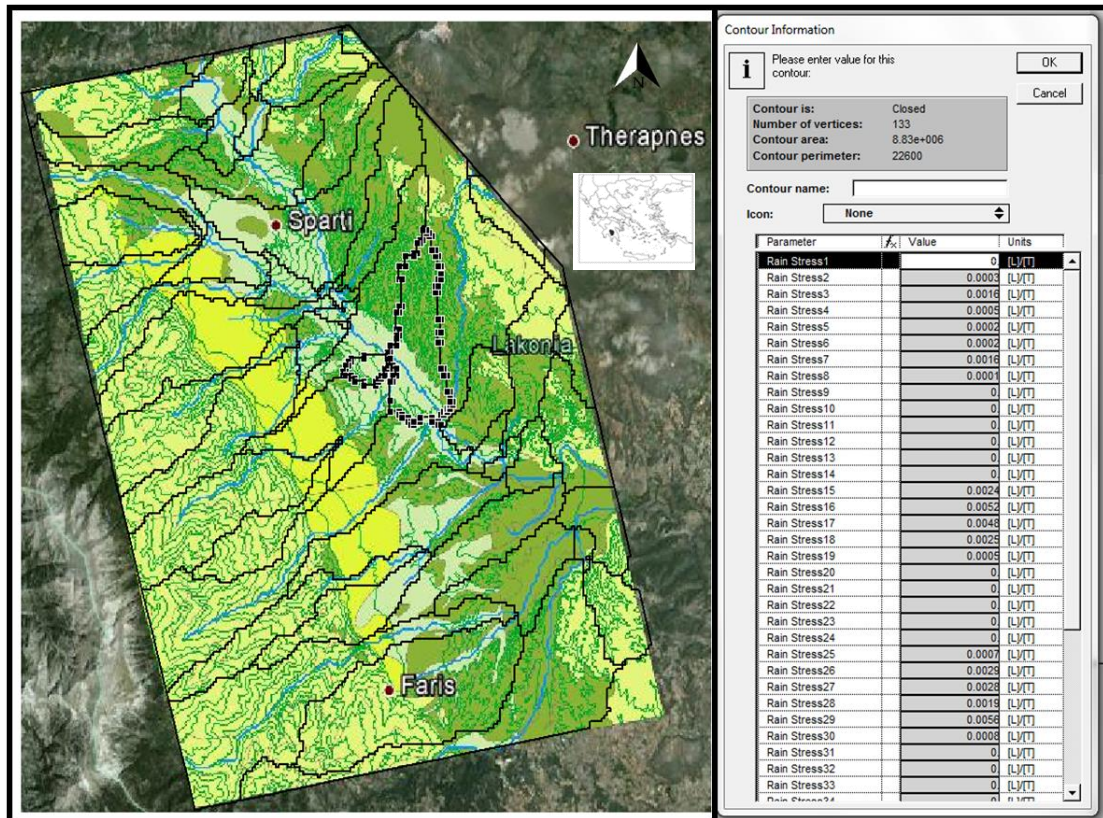
Εικόνα 5.3. Ισοϋψείς καμπύλες περιοχής μελέτης (Κοιλάδα Σπάρτης)

Για κάθε στρώμα ορίζεται η υδραυλική αγωγιμότητα στις τρεις διευθύνσεις (Εικόνα 5.4).



Εικόνα 5.4. Υδραυλική αγωγιμότητα περιοχής μελέτης (Κοιλάδα Σπάρτης)

Τα δεδομένα βροχόπτωσης (διήθησης) αποτελούν δεδομένα αλληλεπίδρασης των επιφανειακών υδατικών πόρων με τον υπόγειο υδροφορέα. Οι ποσότητες ύδατος που διηθούνται στον υπόγειο υδροφορέα (παράμετρος GW_RCHG) ανά υπολεκάνη οι οποίες υπολογίστηκαν στο στάδιο της προσομοίωσης του υδρολογικού κύκλου μέσω του μοντέλου SWAT, χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου (διήθησης) στο μοντέλο των υπογείων υδάτων PTC (**Εικόνα 5.5**) για την περίοδο Οκτώβριος 2007 - Σεπτέμβριος 2011.



Εικόνα 5.5. Δεδομένα διήθησης περιοχής μελέτης (Κοιλάδα Σπάρτης) επιφανειακού μοντέλου SWAT

Η σωστή επιλογή των οριακών συνθηκών είναι καθοριστική για το σχεδιασμό του μοντέλου. Τα όρια (φυσικά, υδραυλικά ή υδρογεωλογικά) πρέπει να επιλεγθούν ώστε η προσομοιωμένη επίδραση να είναι ρεαλιστική. Οι οριακές συνθήκες εισάγονται στο μοντέλο και αποτελούνται από στοιχεία που καθορίζονται από τα φυσικά όρια της περιοχής μελέτης (θάλασσα, ορεινοί όγκοι) ή έχουν γνωστά χαρακτηριστικά υδραυλικά μεγέθη (ποτάμι, πηγάδια άντλησης). Οι οριακές συνθήκες πρώτου είδους απαιτούν την ύπαρξη απεριόριστων ποσοτήτων νερού (θάλασσα, ποτάμι). Η προσομοίωση για τις οριακές συνθήκες 1ου είδους γίνεται θέτοντας το υδραυλικό ύψος στους κόμβους των ορίων ίσο με τις τιμές που έχουν μετρηθεί. Όταν το όριο είναι ποτάμι, τότε το υδραυλικό ύψος κατά μήκος του ορίου μεταβάλλεται χωρικά, ενώ όταν είναι λίμνη ή

πηγή, το όριο χαρακτηρίζεται από σταθερό υδραυλικό ύψος. Η προσομοίωση για τις οριακές συνθήκες 2ου είδους περιγράφουν την ροή σε μάζες επιφανειακού νερού, τη ροή από πηγές, την υπόγεια ροή και τη διαρροή από και προς τα υπόγεια πετρώματα, η οποία θεωρείται σταθερή. Τις περισσότερες φορές είναι προτιμότερες οι συνθήκες σταθερού υδραυλικού ύψους για το λόγο ότι είναι πιο εύκολες στον υπολογισμό αλλά και στη βαθμονόμηση. Οι συνθήκες δευτέρου είδους πλεονεκτούν επειδή δεν προκαλούν αλλοιώσεις στο σύστημα υπόγειας ροής.

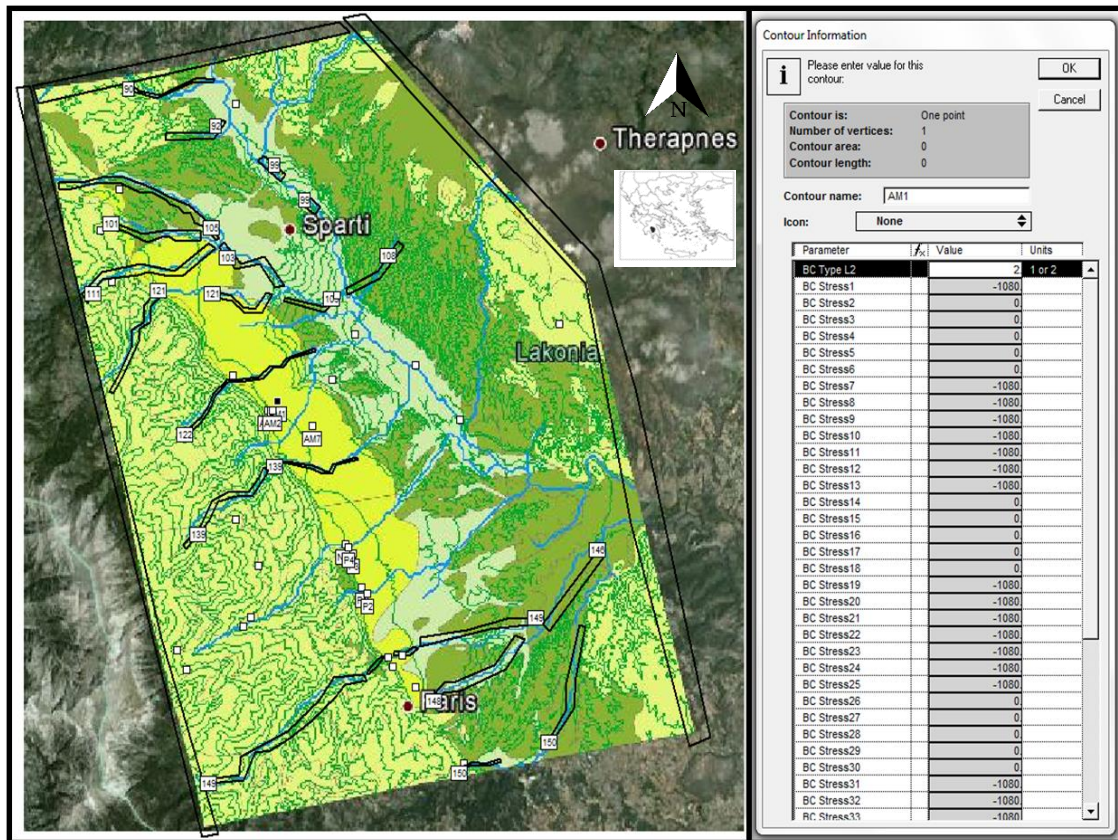
Εισάγονται πάνω στο χάρτη οι γεωτρήσεις που αντιστοιχούν σε κάθε στρώμα, ανάλογα με το βάθος και προσδιορίζονται ως οριακές συνθήκες δευτέρου είδους (σταθερή παροχή άντλησης). Η περιοχή της κοιλάδας της Σπάρτης διαθέτει στην έκτασή της πολυάριθμες γεωτρήσεις, κάποιες από τις οποίες ομαδοποιήθηκαν ως προς την παροχή. Αξίζει να σημειωθεί ότι για την μοντελοποίηση του υπόγειου υδροφορέα χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία και δεδομένα γεωτρήσεων (θέση, βάθος άντλησης, παροχές) της περιοχής μελέτης τα οποία ελήφθησαν από το Τμήμα Περιβάλλοντος και Υδροοικονομίας της Περιφέρειας Πελοποννήσου, της Περιφερειακής Ενότητας Λακωνίας ενώ μέρος δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν από την **Πολυχρονάκη, 2011** τα οποία για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας επικαιροποιήθηκαν και τροποποιήθηκαν αναλόγως. Σε περιοχές όπου απαιτήθηκε πραγματοποιήθηκε ομαδοποίηση-συγχώνευση των παροχών των γεωτρήσεων για την καλύτερη διακριτοποίηση της περιοχής μελέτης.

Ως οριακές συνθήκες δευτέρου είδους χρησιμοποιήθηκαν επίσης οι ποσότητες ύδατος που μέσω των ρεμάτων τροφοδοτούνται (GW_Q-Groundwater contribution to streamflow) ή τροφοδοτούν (TLOSS-Transmission losses) τους υπόγειους υδροφορείς και υπολογίστηκαν μέσω του μοντέλου SWAT. Οι οριακές συνθήκες της περιοχής μελέτης εμφανίζονται στην **Εικόνα 5.6**.

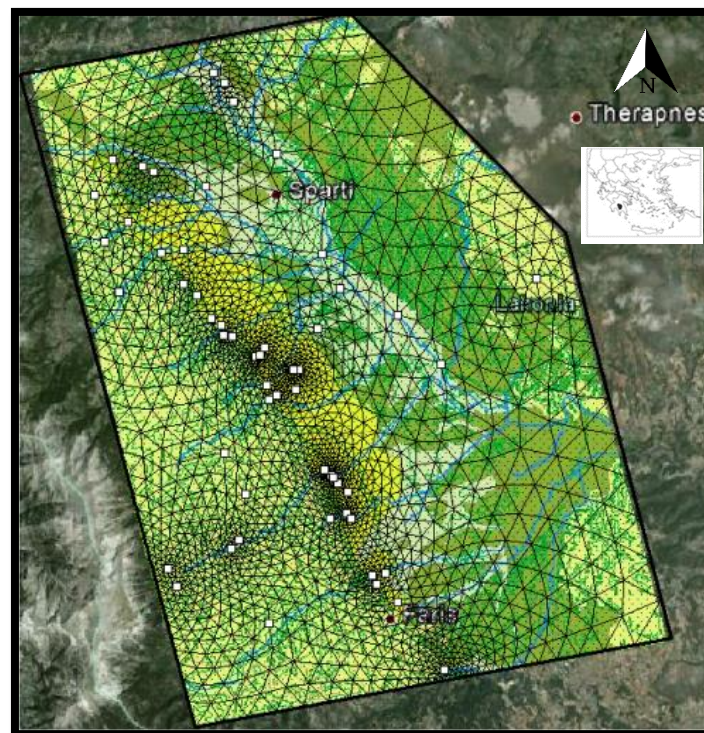
Σε όλη την περιοχή μελέτης θεωρήθηκαν ενιαίες οι τιμές της αποθηκευτικότητας και του πορώδους. Η αποθηκευτικότητα θεωρήθηκε ίση με 0.2 και το πορώδες ίσο με 0.3. Όσον αφορά τη διασπορά (Dispersivity), την απορρόφηση (Absorption), τις αρχικές συγκεντρώσεις (Initial Concentrations), τη μεταφορά ρύπου (BC Transport) και τη διαρροή (BC Leakage) δεν ορίστηκαν εφόσον δεν επήλθε εκτέλεση του προγράμματος για μεταφορά μάζας.

Στην **Εικόνα 5.7** παρουσιάζεται η περιοχή μελέτης, οι θέσεις των γεωτρήσεων καθώς και τα τριγωνικά πλέγματα διακριτοποίησης της περιοχής μελέτης (Κοιλάδα Σπάρτης).

«Ολοκληρωμένο πλαίσιο μοντελοποίησης υδρολογίας, ποιότητας νερών και στερεοπαροχής σε λεκάνες απορροής ποταμών διαλείπουσας ροής»



Εικόνα 5.6. Ορισμός και απεικόνιση οριακών συνθηκών περιοχής μελέτης (Κοιλάδα Σπάρτης)



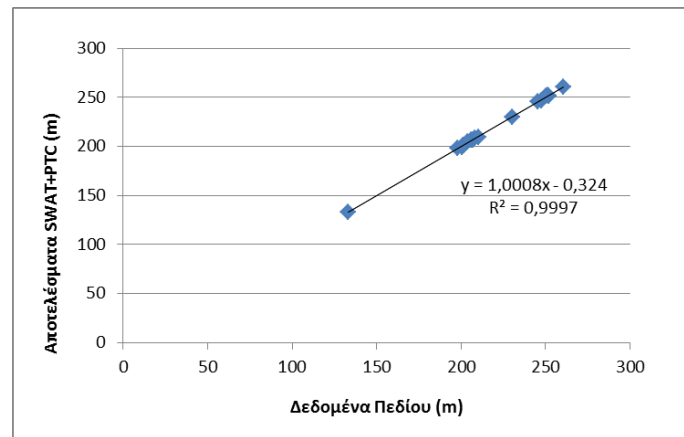
Εικόνα 5.7. Θέσεις γεωτρήσεων και τριγωνικά πλέγματα διακριτοποίησης περιοχής μελέτης (Κοιλάδα Σπάρτης)

5.1.2 Βαθμονόμηση μοντέλου SWAT-PTC

Η βαθμονόμηση του μοντέλου πραγματοποιήθηκε δίνοντας τιμές παροχής (συνθήκη δεύτερου είδους) στους ορεινούς όγκους που σχεδιάστηκαν περικλείοντας τους οριακούς κόμβους του πλέγματος της περιοχής μελέτης. Κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης συγκρίνονται οι τιμές των υδραυλικών υψών που εξάγει το μοντέλο, κατά την εκτέλεση του PTC, στους κόμβους όπου υπάρχουν δεδομένα πεδίου για τη βελτιστοποίηση του συστήματος πετυχαίνοντας όσο το δυνατόν μικρότερη απόκλιση ανάμεσα σε αυτές τις τιμές. Στην παρούσα εργασία γνωστοί κόμβοι είναι οι γεωτρήσεις για τις οποίες υπάρχουν οι μετρήσεις των σταθμών. Οι τιμές του μοντέλου έχουν συγκριθεί με τις τιμές του Σεπτεμβρίου του 2011. Οι τιμές των δεδομένων και του μοντέλου παρουσιάζονται στον **Πίνακα 5.1** ενώ η συσχέτιση των τιμών τους (R^2) απεικονίζονται στην **Εικόνα 5.8**.

Πίνακας 5.1. Τιμές υδραυλικών υψών δεδομένων πεδίου και μοντέλου.

	Θέση Παρατήρησης	Παροχή m^3/h	Υδραυλικό ύψος (m)	Υδραυλικό ύψος (m) Οκτ 2007	Υδραυλικό ύψος (m) Σεπ 2011 Πεδίο	Υδραυλικό ύψος (m) Σεπ 2011 SWAT-PTC
1	N1	70	282	185.0	198.1	197.9
2	AM3	50	264	198.4	201.1	200.7
3	AM5	50	246	198.5	201.5	201.0
4	P1	50	276	226.6	247.5	246.7
5	P2	45	270	222.8	245.3	245.6
6	P3	50	266	246.0	251.4	252.1
7	P4	90	269	245.8	252.1	251.5
8	AM1	40	215	202.6	208.0	208.1
9	AM2	100	228	201.7	206.1	206.7
10	AM6	50	227	201.5	207.0	206.9
11	AM7	50	222	203.6	204.0	204.3
12	NG2	100	274	243.9	250.4	250.9
13	Pigadi1	-	270	-	260.8	260.3
14	Pigadi2	-	215	-	210.3	209.6
15	Pigadi3	-	206	-	200.5	199.4
16	Pigadi4	-	244	-	230.3	230.1
17	Pigadi5	-	138	-	133.4	133.4



Εικόνα 5.8. Απόκλιση τιμών υδραυλικών υψών δεδομένων και μοντέλου.

Παρατηρούμε ότι υπάρχει πολύ καλή συσχέτιση μεταξύ των παρατηρούμενων υδραυλικών υψών τον Σεπτέμβριο του 2011 με τα αντίστοιχα υδραυλικά ύψη που προσομοιώθηκαν από τον συνδυασμό των μοντέλων SWAT και PTC.

Οι στατιστικοί δείκτες NSE, RSR και PBIAS μεταξύ των παρατηρούμενων υδραυλικών υψών τον Σεπτέμβριο του 2011 με τα υδραυλικά ύψη που προσομοιώθηκαν από τον συνδυασμό των μοντέλων SWAT και PTC είναι 1.0, 0.02 και -0.1 αντίστοιχα.

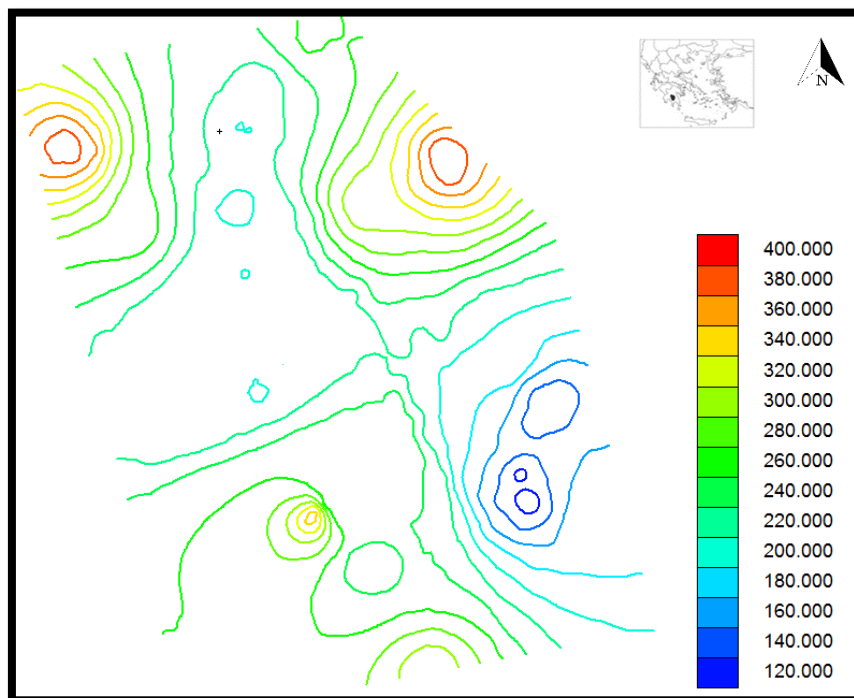
5.1.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης μοντέλου SWAT-PTC

Από τα αποτελέσματα της εφαρμογής του συνδυαστικού μοντέλου στη λεκάνη απορροής της περιοχής μελέτης, γίνεται αντιληπτό ότι κατά τη διάρκεια των τεσσάρων ετών, για τα οποία εκτελέστηκε το συνδυαστικό μοντέλο, το βορειοδυτικό τμήμα της λεκάνης δεν παρουσιάζει αισθητή διαφοροποίηση στις τιμές των υδραυλικών υψών (Εικόνα 5.9). Αυτό ίσως να οφείλεται στη μείωση των βροχοπτώσεων και στην αύξηση της θερμοκρασίας των τελευταίων χρόνων, σε συνδυασμό με την αύξηση των υδατικών και αρδευτικών αναγκών, καθώς πρόκειται για πεδινή αγροτική περιοχή. Το βορειοδυτικό τμήμα της λεκάνης απορροής αποτελείται από ορεινές περιοχές του Ταΰγετου παρουσιάζοντας υψηλές βροχοπτώσεις κατά τη διάρκεια όλου του έτους και σημαντικές χιονοπτώσεις, οι οποίες επιτρέπουν τη συνεχή τροφοδότηση των παρακείμενων υπόγειων υδροφορέων. Επίσης, οι γεωτρήσεις της περιοχής είναι πολύ κοντά σε αυτά τα ορεινά τμήματα, γεγονός που διευκολύνει την τροφοδότησή τους και την καθιστά συνεχή και άμεση. Οι χαμηλότερες τιμές υδραυλικών υψών (περίπου 160 m) παρουσιάζονται στο Νότιο-ανατολικό τμήμα της κοιλάδας της Σπάρτης (Gamvroudis et al., 2016).

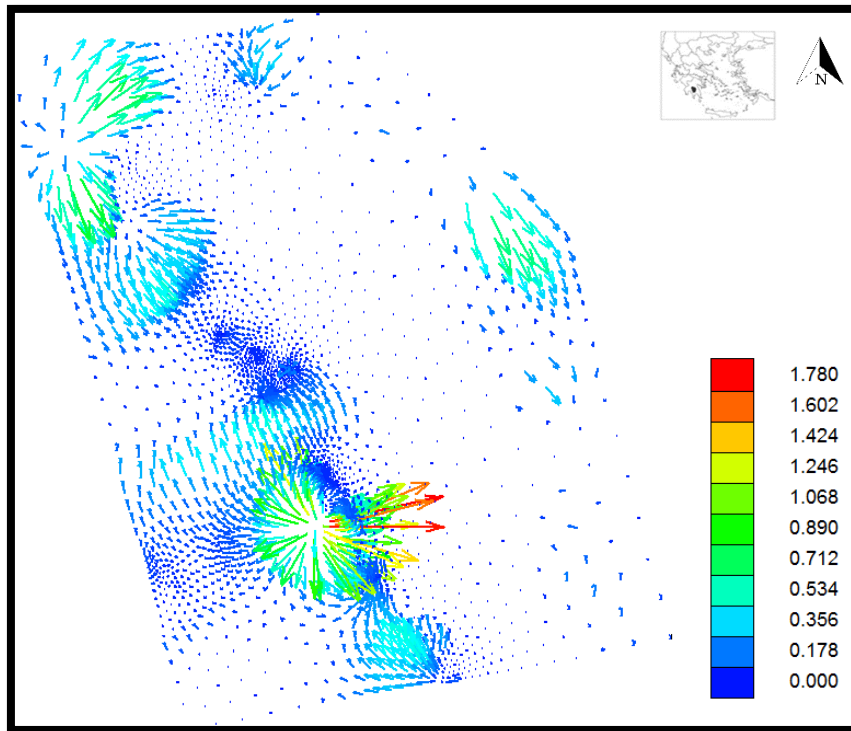
Οι περιοχές γύρω από τα πηγάδια άντλησης, φαίνεται ότι δεν παρουσιάζουν μεγάλες τοπικές διακυμάνσεις στις τιμές των υδραυλικών υψών, γεγονός που παρατηρήθηκε και κατά τη βαθμονόμηση του μοντέλου. Προφανώς από κανένα πηγάδι,

από αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο, δεν αντλείται τόσο μεγάλη ποσότητα ύδατος ώστε να επηρεάζει άμεσα το τοπικό σύστημα αλλά υπάρχει ήπια και ομαλή άντληση σε συνδυασμό με αρκετές ποσότητες υδατικών αποθεμάτων. Όσον αφορά στις εποχικές διακυμάνσεις των υδραυλικών υψών, δεν παρατηρούνται σημαντικές αυξομειώσεις στις τιμές τους.

Το διάγραμμα των ταχυτήτων ροής της περιοχής μελέτης φαίνεται στην **Εικόνα 5.10**. Η ταχύτητα είναι ανάλογη της υδραυλικής αγωγιμότητας και επηρεάζεται άμεσα από αυτήν. Παρατηρούμε ότι στα τμήματα της περιοχής όπου οι γεωολογικοί σχηματισμοί έχουν μικρή διαπερατότητα, (μάρμαρα, φλύσχης, φυλλίτες) που βρίσκονται κυρίως βορειοδυτικά οι ταχύτητες είναι πολύ μικρές, ενώ κατά μήκος του ποταμού Ευρώτα όπου υπάρχουν κυρίως σχηματισμοί παράκτιων αποθέσεων και πλευρικών κορημάτων, οι ταχύτητες μεγαλώνουν. Στο μεγαλύτερο μέρος της περιοχής μελέτης οι τιμές των ταχυτήτων ροής, είναι σχετικά χαμηλές, δεν παρουσιάζουν εμφανείς εποχικές διακυμάνσεις και δεν ξεπερνούν τα 0.5 m/d. Όπως αναμενόταν εμφανίζουν αύξηση κοντά από τα πηγάδια άντλησης με τις μεγαλύτερες τιμές να εμφανίζονται στην περιοχή του Ξηροκαμπίου (1.78 m/d).



Εικόνα 5.9. Υδραυλικά ύψη Σεπτεμβρίου 2011 (SWAT-PTC)



Εικόνα 5.10. Ταχύτητες ροής Σεπτεμβρίου 2011 (SWAT-PTC)

5.1.3.1 Σενάριο μηδενικών συνθηκών άντλησης

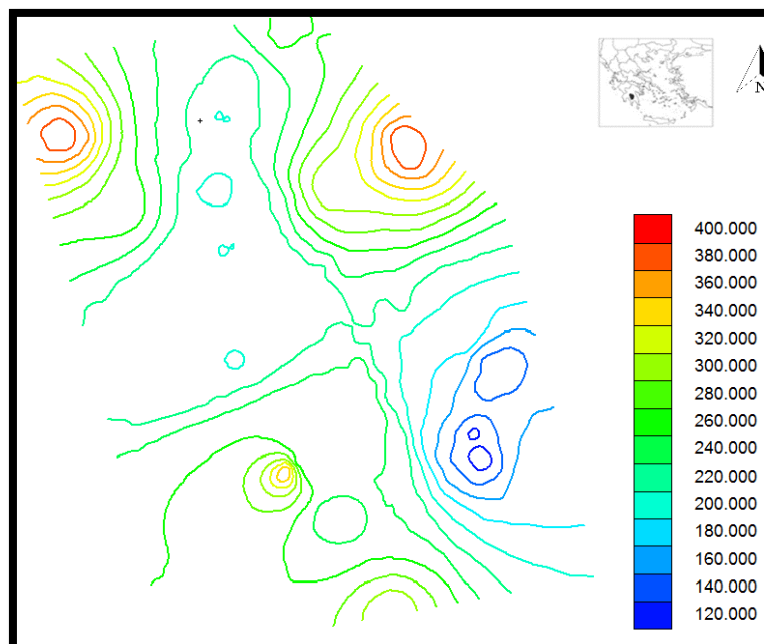
Οι υδατικοί πόροι επηρεάζονται από πολλούς παράγοντες όπως είναι οι κλιματικές αλλαγές και οι ανθρωπογενείς παρεμβάσεις όπως οι αλλαγές στο είδος φυτοκάλυψης και η αλλαγή στις πρακτικές διαχείρισης της γης. Για τον σκοπό αυτό κρίθηκε αναγκαία η δημιουργία σεναρίου που να οφείλεται στις ανθρωπογενείς παρεμβάσεις στους υδατικούς πόρους μέσω της υπεράντλησης. Η προσφορά νερού στη λεκάνη συνίσταται στο μέρος των κατακρημνισμάτων που κατεισδύει και ενισχύει τους υπόγειους υδροφόρους. Η κατανάλωση συνίσταται στο σύνολο των απωλειών νερού από τους υπόγειους υδροφόρους είτε μέσω των αντλήσεων με τα έργα υδρομάστευσης, είτε μέσω διαφυγών νερού σε άλλους υπόγειους υδροφόρους εκτός των ορίων της λεκάνης. Συνεπώς οι αντλήσεις εντός της λεκάνης θεωρούνται η κύρια μορφή κατανάλωσης των υπόγειων αποθεμάτων. Η γεωργία συνεχίζει να καταναλώνει τη μεγαλύτερη ποσότητα των υδατικών πόρων της λεκάνης καταναλώνοντας υπερδιπλάσιες ποσότητες από αυτές που ανανεώνουν τα υδατικά αποθέματα στη λεκάνη.

Κατά το σενάριο Green εξετάζεται η κατάσταση του υδροφορέα εάν στην διάρκεια 2007-2011 στην περιοχή μελέτης, όπου το πρόβλημα μείωσης του υδροφόρου ορίζοντα λόγω υπεράντλησης είναι ιδιαίτερα έντονο, μηδενίζαμε τελείως τις αντλήσεις. Ποια θα ήταν δηλαδή η κατάσταση του υδροφόρου ορίζοντα εάν δεν αντλούσαμε καθόλου. Οι αντλήσεις για ύδρευση και άρδευση τόσο στο μοντέλο SWAT όσο και στο

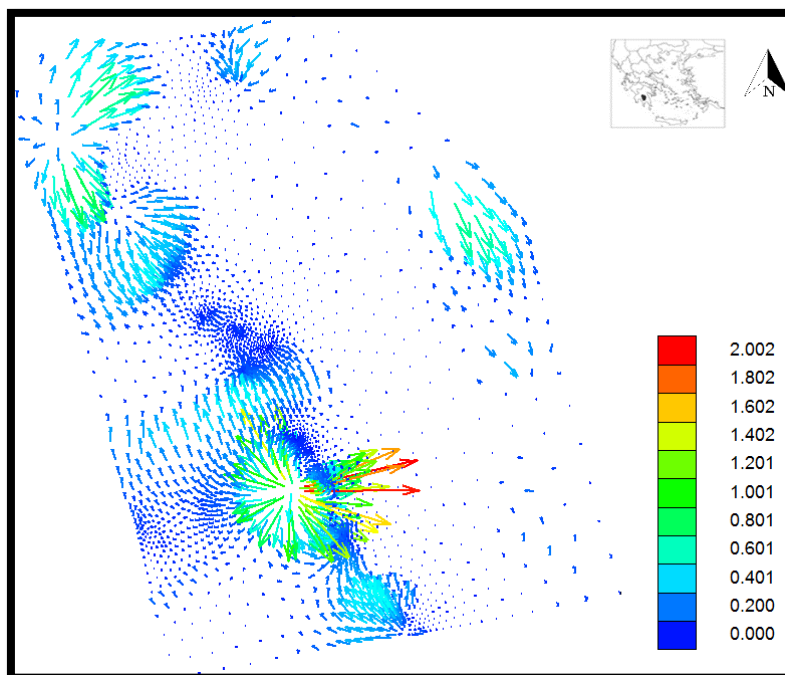
μοντέλο PTC μηδενίστηκαν και τα νέα αποτελέσματα προσομοίωσης του υδρολογικού κύκλου μέσω του μοντέλου SWAT χρησιμοποιήθηκαν στη νέα προσομοίωση των υδραυλικών υψών. Τα αποτελέσματα από τα υδραυλικά ύψη σε συνθήκες μηδενικής άντλησης καθώς και αυτά των ταχυτήτων ροής για την περίοδο 2007-2011 παρουσιάζονται στις **Εικόνες 5.11** και **5.12**.

Το συνολικό σύστημα υπογείων υδάτων της υπό εξέτασης λεκάνης απορροής δεν επηρεάζεται σημαντικά πολύ από τις συνθήκες μηδενικής άντλησης όπως διακρίνεται και από τα διαγράμματα των σχημάτων. Σε σχέση με την κατάσταση του υδροφόρου το 2011 όπου οι ποσότητες άντλησης ξεπερνούν το 150% των αναγκών παρατηρούμε ότι χωρίς αντλήσεις υπάρχει μια αύξηση των υδραυλικών υψών στους αντίστοιχους κόμβους όπου ανήκαν τα πηγάδια άντλησης κατά 1 m (**Πίνακας 5.2**) ενώ για όλη την περιοχή μελέτης η μέση τιμή αύξησης του υδροφορέα πλησιάζει τα 0.5 m το οποίο αντιστοιχεί σε περίπου επιπλέον 44 εκ m³ νερού.

Στο δυτικό τμήμα της λεκάνης απορροής διαμορφώνονται διαφορετικά οι ισοπιεζομετρικές γραμμές κατά τις συνθήκες μηδενικής άντλησης γιατί ο αριθμός των πηγαδιών άντλησης είναι σε θέση να επηρεάσει τη γύρω περιοχή, παρόλο που τα μεμονωμένα πηγάδια εμφανίζουν μικρή αύξηση υδραυλικού ύψους επειδή υπάρχει συνεχής τροφοδότηση των υδροφορέων τους. Όσον αφορά στην εποχική διακύμανση που αφορά στα δύο παραπάνω σενάρια, υπάρχει μικρή αύξηση στις τιμές των υδραυλικών υψών του χειμώνα, η οποία οφείλεται αποκλειστικά στη βροχόπτωση.



Εικόνα 5.11. Υδραυλικά ύψη Σεπτεμβρίου 2011 με μηδενικές αντλήσεις (SWAT-PTC)



Εικόνα 5.12. Ταχύτητες ροής Σεπτεμβρίου 2011 με μηδενικές αντλήσεις (SWAT-PTC)

Πίνακας 5.2. Υδραυλικά ύψη (m) Σεπτέμβριος 2011 με μείωση των αντλήσεων (Green Scenario SWAT-PTC)

	Θέση Παρατήρησης	Υδραυλικό ύψος (m)	Υδραυλικό ύψος (m) Green Scenario
1	N1	197.9	197.9
2	AM3	200.7	201.1
3	AM5	201.0	201.5
4	P1	246.7	247.0
5	P2	245.6	245.9
6	P3	252.1	252.7
7	P4	251.5	252.2
8	AM1	208.1	208.8
9	AM2	206.7	207.5
10	AM6	206.9	207.6
11	AM7	204.3	204.7
12	NG2	250.9	251.8

5.2 Απόκριση των επιφανειακών και υπόγειων υδατικών αποθεμάτων σε σενάρια κλιματικής αλλαγής

Ένα από τα βασικότερα προβλήματα σήμερα αποτελεί και η μεταβολή των κλιματικών συνθηκών και οι επιπτώσεις τους στο περιβάλλον. Στην παρούσα εργασία ελέγχθηκαν τρία σενάρια που αντικατοπτρίζουν τις μεταβολές στο κλίμα και συγκεκριμένα στη βροχόπτωση και στην θερμοκρασία (**Πίνακας 5.3**). Οι εκτιμήσεις κλιματικών αλλαγών μπορούν να γίνουν απευθείας μέσω του μοντέλου SWAT είτε αλλάζοντας τα κλιματικά δεδομένα εισόδου στο μοντέλο είτε μέσω των επιδράσεων των ατμοσφαιρικών συγκεντρώσεων CO₂ στην ανάπτυξη των φυτών. Όλα τα κλιματικά σενάρια βασίζονται σε συγκεκριμένα σενάρια τα οποία υοθέτουν το πώς θα είναι ο κόσμος στην εκάστοτε μελλοντική περίοδο. Αυτά τα σενάρια περιλαμβάνουν πληροφορίες σχετικά με τον παγκόσμιο πληθυσμό, τη χρήση πηγών ενέργειας, την τεχνολογική ανάπτυξη, την οικονομία, αλλά κυρίως σχετικά με τις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου.

Το IPCC δημιούργησε το 2000 (**IPCC SRES, 2000**) τέσσερις οικογένειες σεναρίων εκπομπής (SRES) A1, A2, B1 και B2. Τα σενάρια A είναι περισσότερο προσανατολισμένα προς την οικονομία, ενώ τα B προς το περιβάλλον και ταυτόχρονα τα σενάρια 1 (A1, B1) αφορούν σε έναν πιο ομοιογενή κόσμο ενώ τα 2 (A2, B2) σε πιο ετερογενή κόσμο. Από τα σενάρια αυτά τα A1B, A2 και B1 χρησιμοποιούνται πιο συχνά και το πρώτο θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως «μετριοπαθές», το δεύτερο «απαισιόδοξο» και το τρίτο «αισιόδοξο». Το 2013 εκδόθηκε η πιο πρόσφατη αναφορά του IPCC (**IPCC5, 2013**) όπου παρουσιάζονται νέα σενάρια εκπομπών τα οποία καλούνται Αντιπροσωπευτικές Διαδρομές Συγκέντρωσης (Representative Concentration Pathways - RPCs).

Το ECHAM είναι ένα παγκόσμιο κλιματικό μοντέλο (Global Climate Model - GCM) που αναπτύχθηκε από το Ινστιτούτο Μετεωρολογίας Max Planck (Max Planck Institute – MPI) που είναι ένας ερευνητικός οργανισμός της κοινότητας του Max Planck (**Roeckner et al., 2003**). Το ECHAM μπορεί να λειτουργήσει επιλύοντας το ατμοσφαιρικό μοντέλο μέχρι τα 10 hPa για τροποσφαιρικές μελέτες ή μέχρι τα 0.01 hPa για μέσης ατμόσφαιρας μελέτες. Η πρόβλεψη των κλιματικών αλλαγών γίνεται με τη χρήση διαφόρων σεναρίων. Διαφορετικοί τύποι κλιματικών σεναρίων έχουν προσομοιαστεί με το μοντέλο ECHAM5.

Οι τεχνικές με τις οποίες εισάγεται η περιοχική πληροφορία στις κλιματικές προσομοιώσεις ονομάζονται τεχνικές υποβιβασμού κλίμακας (υποκλιμάκωσης) και χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: 1) Τα υψηλής ή μεταβλητής ανάλυσης παγκόσμια ατμοσφαιρικά μοντέλα γενικής κυκλοφορίας, 2) τις στατιστικές ή εμπειρικές μεθόδους υποκλιμάκωσης (Statistical/Empirical Downscaling) και 3) τη δυναμική υποκλιμάκωση. Η δυναμική υποκλιμάκωση βασίζεται στη χρήση των περιοχικών κλιματικών μοντέλων (Regional Climate Models, RCMs). Η υποβίβαση της κλίμακας

πραγματοποιείται ενσωματώνοντας ένα RCM μέσα σε ένα GCM, με το πρώτο να λαμβάνει οριακές συνθήκες από το δεύτερο. Μερικά RCM είναι τα ARPEGE (**Gibelin and Déqué, 2003**), CHRM (**Vidale et al., 2003**), CLM (**Steppeler et al., 2003**), HIRHAM (**Christensen et al., 1996**), RACMO (**Lenderink et al., 2003**), RCA (**Rummukainen et al., 1998**), RegCM (**Giorgi et al., 1994**), PROMES (**Castro et al., 1993**) και REMO (**Jacob, 2001**).

Τα τρία RCMs που επιλέχθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής λαμβάνουν οριακές συνθήκες από το ίδιο Μοντέλο Γενικής Κυκλοφορίας ECHAM5, λήφθησαν από το Ευρωπαϊκό πρόγραμμα ENSEMBLES (<http://ensemblesrt3.dmi.dk/>) και χρησιμοποιούν το ίδιο σενάριο εκπομπών A1B (**IPCC SRES, 2000**) το οποίο περιγράφει ένα κόσμο με 1) ραγδαία οικονομική ανάπτυξη, 2) ιδιαίτερα έντονη κατανάλωση ενέργειας αλλά παράλληλα διάδοση νέων και αποδοτικών τεχνολογιών, 3) χρήση τόσο ορυκτών καυσίμων όσο και εναλλακτικών πηγών ενέργειας, 4) μικρές αλλαγές στη χρήση γης, 5) ραγδαία αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού μέχρι το έτος 2050 και σταδιακή μείωσή του στη συνέχεια, 6) έντονη αύξηση της συγκέντρωσης του CO₂ στην ατμόσφαιρα η οποία θα φτάσει τα 720 ppm το 2100.

Τα RCMs αυτά αντιστοιχούν στο σενάριο RCP8.5 (**IPCC5, 2013**), σύμφωνα με το οποίο στο μέλλον θα υπάρξει μεταβολή στο κλιματικό εξαναγκασμό (Radiative Forcing) ίση με 8.5 W/m². Η μεταβολή στην οποία αναφέρεται δεν φαίνεται με τα σημερινά στοιχεία ανάπτυξης να αποτελεί σενάριο που θα απέχει από την επικρατούσα κατάσταση στη μελλοντική μεταβολή του κλιματικού εξαναγκασμού (forcing).

Η μεγάλη χωρική ανάλυση που προσφέρουν είναι ιδιαίτερα χρήσιμη, ειδικά για περιοχές με πολύπλοκη τοπογραφία όπως η Μεσόγειος. Τα RCMs περιγράφουν με μεγαλύτερη ακρίβεια τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας της γης όπως την ορογραφία, την κατανομή ξηράς και θάλασσας και τις χρήσεις γης με μειονέκτημα το ότι απαιτούν μεγάλο υπολογιστικό χρόνο συγκριτικά με τις στατιστικές μεθόδους και δε μπορούν να αφαιρέσουν επιτυχώς τις συστηματικές διαφορές (biases) ανάμεσα στο παγκόσμιο μοντέλο και τις παρατηρήσεις. Επομένως, σε κάποιες εφαρμογές, χρειάζεται να εφαρμοστούν κάποιες διορθώσεις συστηματικού σφάλματος (bias correction), ώστε να απομακρυνθούν τα συνδυαστικά σφάλματα του παγκόσμιου και του περιοχικού μοντέλου.

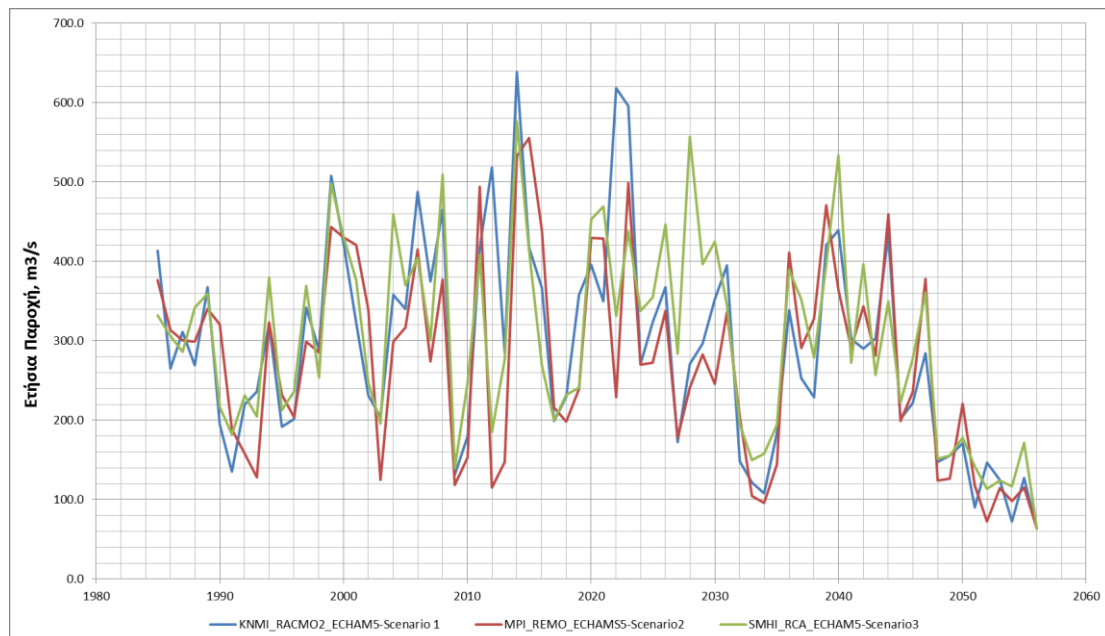
Για τα τρία RCMs έγινε διόρθωση μεροληπτικών σφαλμάτων (bias correction) για την βροχόπτωση και την θερμοκρασία ως προς την θέση κάθε μετεωρολογικού σταθμού όπως περιγράφεται αναλυτικά από τους **Rojas et al., 2011** και έχει εφαρμοστεί στην λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη από τους **Nikolaidis et al., 2013**.

Πίνακας 5.3. Σενάρια κλιματικής αλλαγής

Σενάριο	Ονομασία	Ίδρυμα	Χωρική Ανάλυση	Κατακόρυφα Επίπεδα
1	KNMI-RACMO2	Royal Netherlands Meteorological Institute	0.22° x 0.22°	40
2	MPI-M-REMO	Max Planck Institute for Meteorology	0.22° x 0.22°	27
3	SMHI-RCA	Swedish Meteorological and Hydrological Institute	0.22° x 0.22°	31

Για τον έλεγχο της κλιματικής αλλαγής στην περιοχή μελέτης μελετήθηκαν τα τρία κλιματικά σενάρια που αναφέρθηκαν προηγουμένως μέσω του δείκτη βροχόπτωσης (SPI) εξετάζοντας τον υδρολογικό χαρακτήρα κάθε υδατορέματος καθώς και τη διακύμανση της στάθμης του υπόγειου υδροφορέα σε διάφορες περιόδους (Εικόνα 5.13).

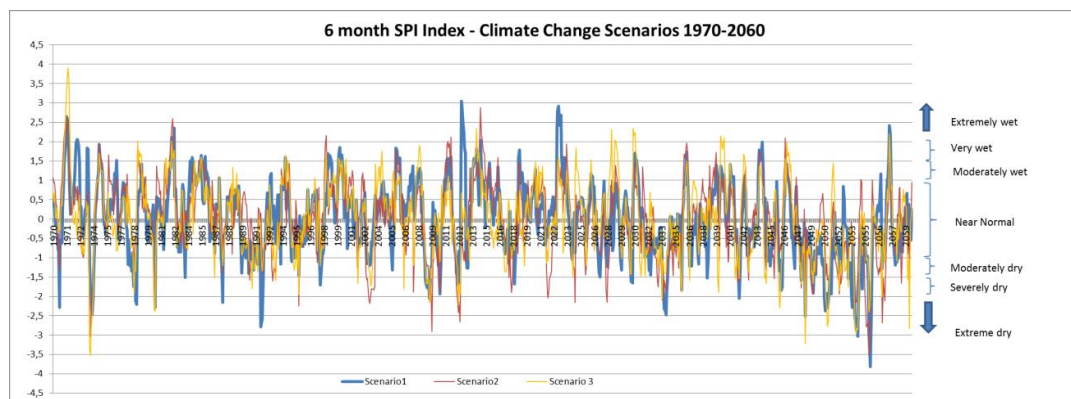
Μεταξύ του 1970 και του 2010 στον Ευρώτα υπήρξε μια μείωση κατά 8% στη γεωργική γη, με τη μετάβαση από αρότριες καλλιέργειες σε μόνιμη γεωργία όπως ελιές και εσπεριδοειδή. Δεδομένου ότι η μείωση της καλλιεργήσιμης γης οφείλεται στην εγκατάλειψη των καλλιεργειών σε ορεινές περιοχές και η αλλαγή της χρήσης γης ακολούθησε την εντατικοποίηση της παραγωγής ο αντίκτυπος της αλλαγής των χρήσεων γης στους υδάτινους πόρους δεν θεωρήθηκε σημαντικός αλλά εντός της αβεβαιότητας που οφείλεται σε μετρήσεις.



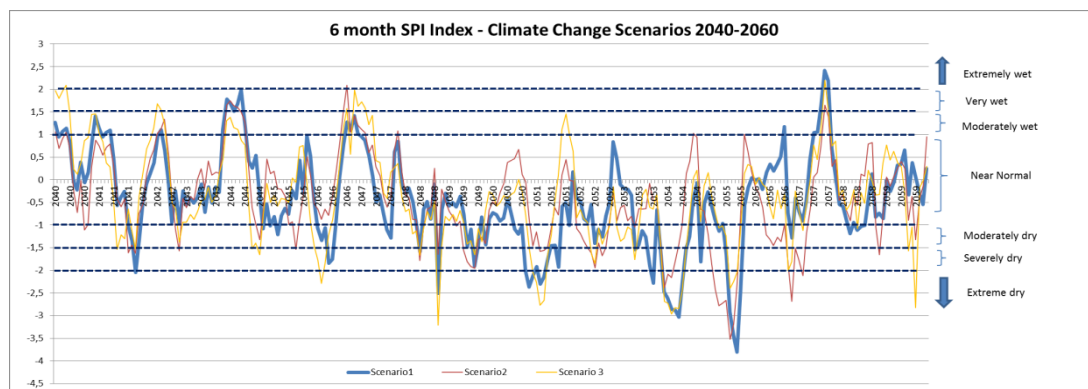
Εικόνα 5.13 Υπολογιζόμενη ετήσια παροχή (m^3/s) στην έξοδο της λεκάνης (Βρονταμάς) για τα τρία κλιματικά σενάρια

5.2.1 Εκτίμηση του δείκτη SPI στην υπό μελέτη περιοχή

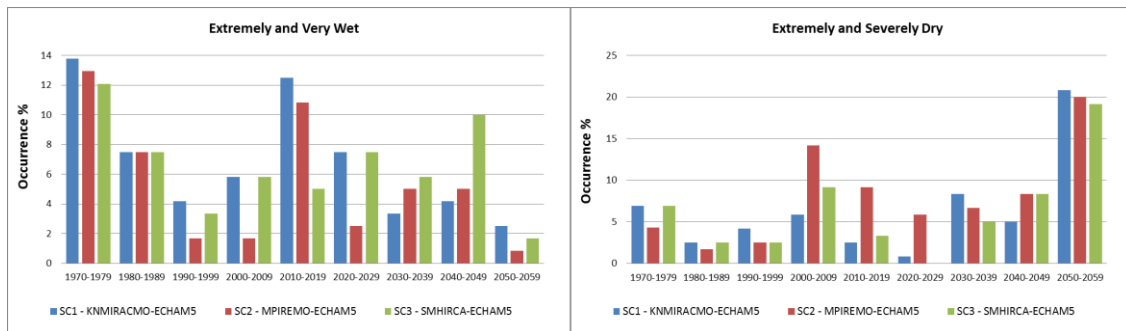
Ο δείκτης SPI υπολογίζεται κυλιόμενα σε μηνιαία βάση. Όμως λόγω της ιδιαιτερότητας του κλίματος στην περιοχή μελέτης με τις σπάνιες βροχοπτώσεις κατά τους καλοκαιρινούς μήνες και τη διασπορά τους σε επιμέρους ημέρες κατά τους υγρούς θεωρήθηκε ως χρονική περίοδος αναφοράς του δείκτη οι 6 μήνες. Στις **Εικόνες 5.14 και 5.15** παρουσιάζεται ο δείκτης SPI 6 μηνών για την λεκάνη απορροής του ποταμού Ευρώτα και για την περίοδο 1970-2060 και 2040-2060 αντίστοιχα σύμφωνα με τα τρία κλιματικά σενάρια που αναλύθηκαν προηγουμένως. Όσο ο δείκτης παραμένει μικρότερος του 0 συνεχίζεται η ξηρασία ενώ σε τιμές μεγαλύτερες του 0 περνάμε σε υγρές περιόδους. Στην **Εικόνα 5.16** παρουσιάζεται η εμφάνιση (%) Υγρών και Ξηρών περιόδων (SPI περιόδου 6 μηνών) ανά δεκαετία για την περίοδο 1970-2060.



Εικόνα 5.14. Χρονοσειρά του δείκτη SPI περιόδου 6 μηνών για τα τρία κλιματικά σενάρια για τη λεκάνη του Ευρώτα για την περίοδο 1970-2060



Εικόνα 5.15. Χρονοσειρά του δείκτη SPI περιόδου 6 μηνών για τα τρία κλιματικά σενάρια για τη λεκάνη του Ευρώτα για την περίοδο 2040-2060



Εικόνα 5.16. Εμφάνιση (%) Υγρών και Ξηρών περιόδων (SPI περιόδου 6 μηνών) ανά δεκαετία

Με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης των τριών κλιματικών σεναρίων διαπιστώνεται ότι το σενάριο KNMI-RACMO2 παρουσιάζει το μεγαλύτερο ποσοστό εμφάνισης συνθηκών ξηρασίας (13.3%) κατά την περίοδο της δεκαετίας 2050-2060 ενώ αντίστοιχα για το σενάριο SMHI-RCA το ποσοστό είναι ίσο με 12.5% (Gamvroudis et al., 2016).

5.2.2 Επίδραση της κλιματικής αλλαγής στα επιφανειακά ύδατα και στην οικολογία

Τα δεδομένα παροχής μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον στατιστικό υπολογισμό εμφάνισης των χαρακτηριστικών υδρόβιων οικοτόπων (Εικόνα 5.17) εάν πρώτα οριστούν οι τιμές ροής που αντιπροσωπεύουν τα κατώτατα όρια που χωρίζουν την εμφάνιση των διαφόρων υδρόβιων καταστάσεων. Η μηνιαία χρονική κλίμακα είναι η καταλληλότερη και οι μετρούμενες τιμές παροχής είναι απαραίτητες για την ανάλυση αυτή. Η μορφή της καμπύλης διάρκειας ροής (Flow Duration Curve) βοηθεία στο έργο αυτό. Η υδάτινη κατάσταση της μηδενικής παροχής εξαρτάται από το σχεδιασμό του σταθμού μέτρησης και τα χαρακτηριστικά της κοίτης.



Εικόνα 5.17. Κατηγορίες χαρακτηρισμού υδάτινων οικοτόπων

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα προσομοίωσης των επιφανειακών υδάτων μέσω του μοντέλου SWAT σχεδιάστηκαν οι καμπύλες διάρκειας ροής των υπό εξέταση περιοχών και υπολογίστηκαν τα οι τιμές παροχής που ορίζουν τις κατηγορίες χαρακτηρισμού των υδάτινων οικοτόπων. Οι καμπύλες διάρκειας ροής παρουσιάζονται στο Παράρτημα II ενώ στον **Πίνακα 5.4** παρουσιάζονται οι υπολογιζόμενες τιμές ορίων χαρακτηρισμού των υδάτινων οικοτόπων.

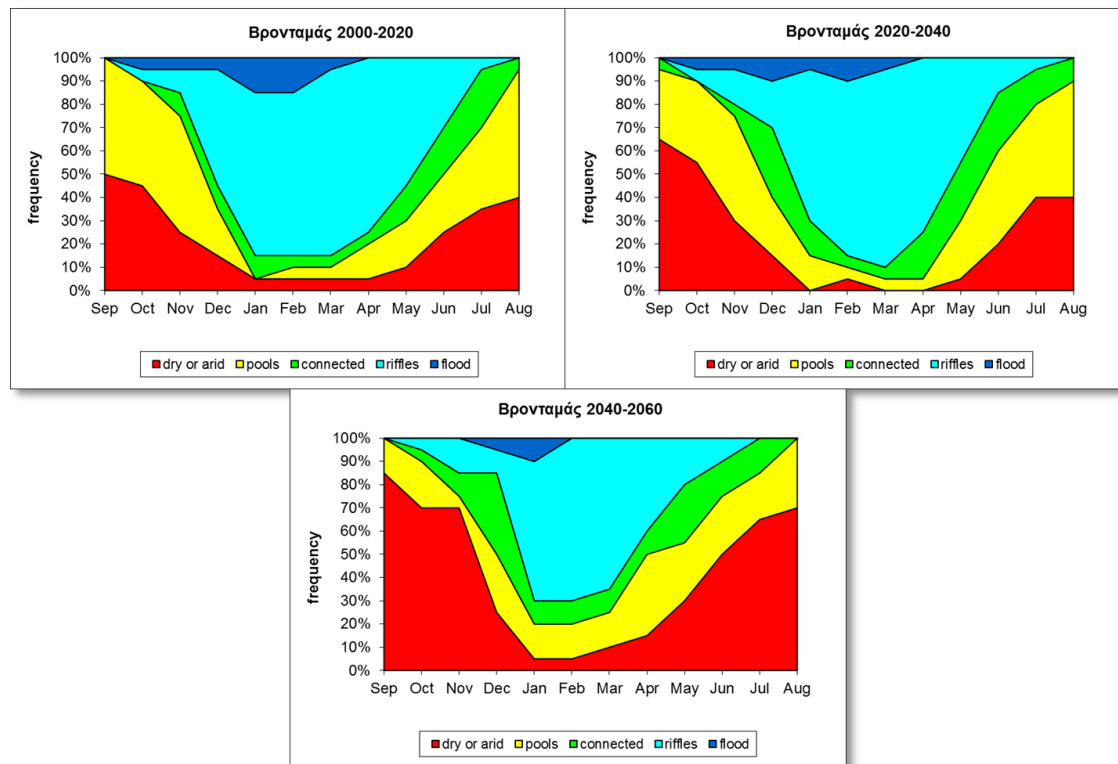
Πίνακας 5.4. Εκτιμώμενα όρια παροχών εμφάνισης των καθεστώτων ροής περιόδου 1970-2011

	Όριο εμφάνισης κατηγορίας (m ³ /s)			
	Pools	Connected	Riffles	Flood
Βρονταμάς	1.300	2.800	3.90	18.15
Βιβάρι	0.030	0.400	0.85	6.00
Μαγουλίτσα Αγ. Ειρήνη	0.004	0.100	0.30	3.40
Κελεφίνα Κλαδάς	0.001	0.004	0.06	3.30
Κελεφίνα Βασσαράς	0.040	0.150	0.22	1.55
Ρασίνα Αεροδρόμιο	0.035	0.080	0.35	3.55
Ρασίνα Κουμουστά	0.032	0.075	0.32	2.90

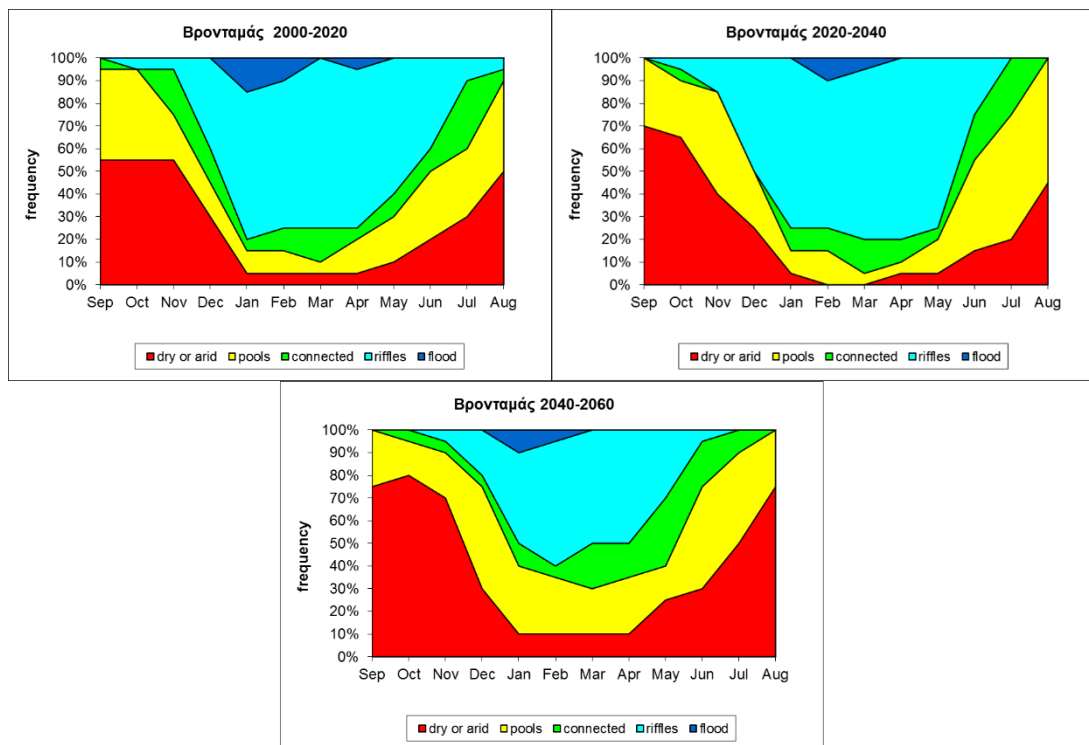
Προκειμένου να καταστεί ορατή η εποχιακή εμφάνιση των υδρόβιων συνθηκών σε ένα υδατόρεμα δημιουργήθηκε το διάγραμμα συχνότητας της υδρόβιας κατάστασης ASGF (Aquatic States Frequency Graph). Το γράφημα δείχνει την παρατηρούμενη μηνιαία συχνότητα εμφάνισης των διαφόρων καταστάσεων με βάση την ανάλυση της καμπύλης διάρκειας ροής. Επίσης προσπαθεί να δώσει μια πρώτη εκτίμηση της κατάστασης του καθεστώτος ροής που σχετίζεται με την ανάπτυξη της υδρόβιας πανίδας και να διευκολύνει τον σχεδιασμό των δειγματοληψιών.

Αφού υπολογίστηκαν οι τιμές ορίων εμφάνισης των καθεστώτων ροής της περιόδου 1970-2011 στην συνέχεια προσομοιώθηκαν στο μοντέλο SWAT τα τρία σενάρια κλιματικής αλλαγής έως το 2060 και σχεδιάστηκαν τα διαγράμματα ASGF ανά 20ετία για όλες τις υπό εξέταση περιοχές. Τα διαγράμματα της υδρόβιας κατάστασης ASGF στην έξοδο της λεκάνης (Βρονταμάς) του Σεναρίου 1 (KNMI-RACMO2) παρουσιάζεται στην **Εικόνα 5.18** ενώ αντίστοιχα του Σεναρίου 2 (MPI-M-REMO) και Σεναρίου 3 (SMHI-RCA) στην ίδια περιοχή στις **Εικόνες 5.19** και **5.20**.

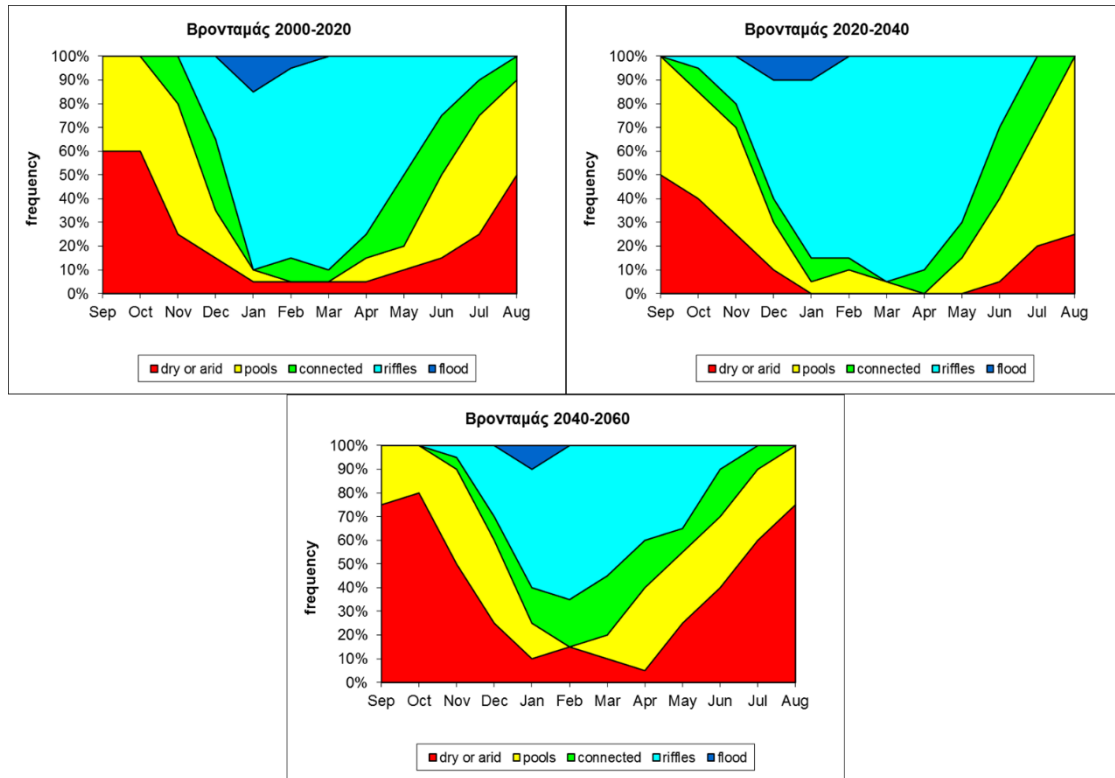
Τα διαγράμματα της υδρόβιας κατάστασης ASGF των υπόλοιπων περιοχών μελέτης παρουσιάζονται στο Παράρτημα III.



Εικόνα 5.18. Βρονταμός - Aquatic States Frequency Graph (2000-2060) – KNMI-RACMO2



Εικόνα 5.19. Βρονταμός - Aquatic States Frequency Graph (2000-2060) – MPI-M-REMO



Εικόνα 5.20. Βρονταμάς - Aquatic States Frequency Graph (2000-2060) – SMHI-RCA

Στην συνέχεια υπολογίστηκαν ανά 20ετία οι δείκτες M_f και Sd_6 (Πίνακες 5.5 έως 5.7). Ο δείκτης M_f είναι ο μακροχρόνιος ετήσιος σχετικός αριθμός μηνών με ροή και παίρνει τιμές μεταξύ 0 και 1. Η εποχικότητα της ξήρανσης των υδατορεμάτων υπολογίζεται μέσω του δείκτη Sd_6 (Gallart et al., 2012).

$$Sd_6 = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^6 Fd_i}{\sum_{j=1}^6 Fd_j} \right) \quad (6.1)$$

Όπου FD_i είναι η υπερετήσια συχνότητα των μηνών με μηδενική ροή στους 6 γειτονικούς πιο υγρούς μήνες του έτους και FD_j η υπερετήσια συχνότητα των μηνών με μηδενική ροή στους υπόλοιπους 6 γειτονικούς ξηρούς μήνες. Όσο μικρότερες είναι οι τιμές των δεικτών τόσο πιο κοντά βρισκόμαστε σε συνθήκες μηδενικής ροής και ξήρανσης της κοίτης των υδατορεμάτων. Σύμφωνα με τους παρακάτω Πίνακες παραπάνω το μεγαλύτερο πρόβλημα επάρκειας επιφανειακών υδάτων και ξηρασίας της κοίτης προβλέπεται ότι θα υπάρξει την περίοδο 2040-2060 και ιδιαίτερα στο υδατόρεμα της Μαγουλίτσας στην περιοχή Αγ. Ειρήνη, όπου οι δείκτες M_f και Sd_6 έχουν τις χαμηλότερες τιμές και για τα τρία σενάρια κλιματικής αλλαγής ενώ αντίθετα πιο Νότια περιοχές όπως η Ρασίνα (Κουμουστά και Αεροδρόμιο) δεν θα κινδυνεύσουν ιδιαίτερα (Gamvroudis et al., 2016).

Πίνακας 5.5. Δείκτες M_f και Sd_6 χαρακτηρισμού των υδρόβιων συνθηκών – Σενάριο 1

	2000-2020		2020-2040		2040-2060	
Θέση Παρατήρησης	M_f	Sd_6	M_f	Sd_6	M_f	Sd_6
Βρονταμάς	0.78	0.80	0.77	0.90	0.58	0.78
Βιβάρι	0.77	0.92	0.75	0.97	0.64	0.87
Μαγουλίτσα Αγ. Ειρήνη	0.53	0.86	0.49	0.81	0.41	0.72
Κελεφίνα Κλαδάς	0.77	0.90	0.70	0.96	0.62	0.86
Κελεφίνα Βασσαράς	0.87	0.93	0.92	1.00	0.83	0.98
Ρασίνα Αεροδρόμιο	0.89	0.92	0.90	1.00	0.80	0.91
Ρασίνα Κουμουστά	0.91	0.90	0.92	1.00	0.81	0.93

Πίνακας 5.6. Δείκτες M_f και Sd_6 χαρακτηρισμού των υδρόβιων συνθηκών – Σενάριο 2

	2000-2020		2020-2040		2040-2060	
Θέση Παρατήρησης	M_f	Sd_6	M_f	Sd_6	M_f	Sd_6
Βρονταμάς	0.73	0.82	0.75	0.89	0.60	0.75
Βιβάρι	0.77	0.92	0.75	0.96	0.68	0.90
Μαγουλίτσα Αγ. Ειρήνη	0.54	0.85	0.50	0.81	0.43	0.77
Κελεφίνα Κλαδάς	0.77	0.90	0.75	0.97	0.65	0.87
Κελεφίνα Βασσαράς	0.88	0.93	0.93	1.00	0.86	0.90
Ρασίνα Αεροδρόμιο	0.85	0.91	0.87	0.97	0.76	0.88
Ρασίνα Κουμουστά	0.85	0.91	0.88	0.97	0.75	0.87

Πίνακας 5.7. Δείκτες M_f και Sd_6 χαρακτηρισμού των υδρόβιων συνθηκών – Σενάριο 3

	2000-2020		2020-2040		2040-2060	
Θέση Παρατήρησης	M_f	Sd_6	M_f	Sd_6	M_f	Sd_6
Βρονταμάς	0.77	0.81	0.85	0.97	0.61	0.76
Βιβάρι	0.78	0.94	0.82	0.98	0.67	0.90
Μαγουλίτσα Αγ. Ειρήνη	0.55	0.89	0.56	0.91	0.44	0.75
Κελεφίνα Κλαδάς	0.75	0.91	0.75	0.96	0.63	0.85
Κελεφίνα Βασσαράς	0.87	0.93	0.93	1.00	0.86	1.00
Ρασίνα Αεροδρόμιο	0.92	0.88	0.95	1.00	0.88	1.00
Ρασίνα Κουμουστά	0.93	0.88	0.94	1.00	0.89	1.00

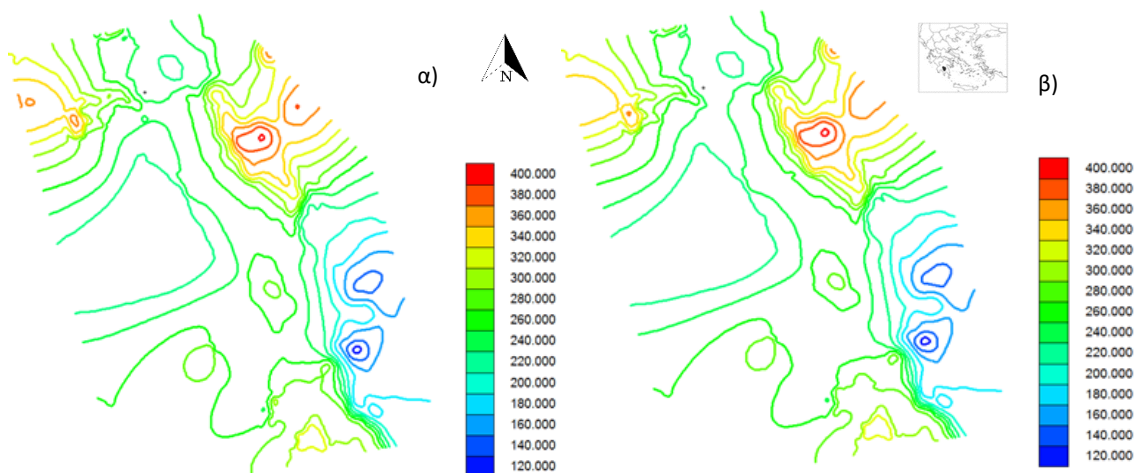
5.2.3 Επίδραση της κλιματικής αλλαγής στα υπόγεια ύδατα

Στο τμήμα αυτό της εργασίας παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τις επίδρασης των τριών κλιματικού σεναρίων τα οποία περιγράφηκαν προηγουμένως στα υδραυλικά ύψη και στις ταχύτητες ροής του υπόγειου υδροφορέα στην κοιλάδα της Σπάρτης.

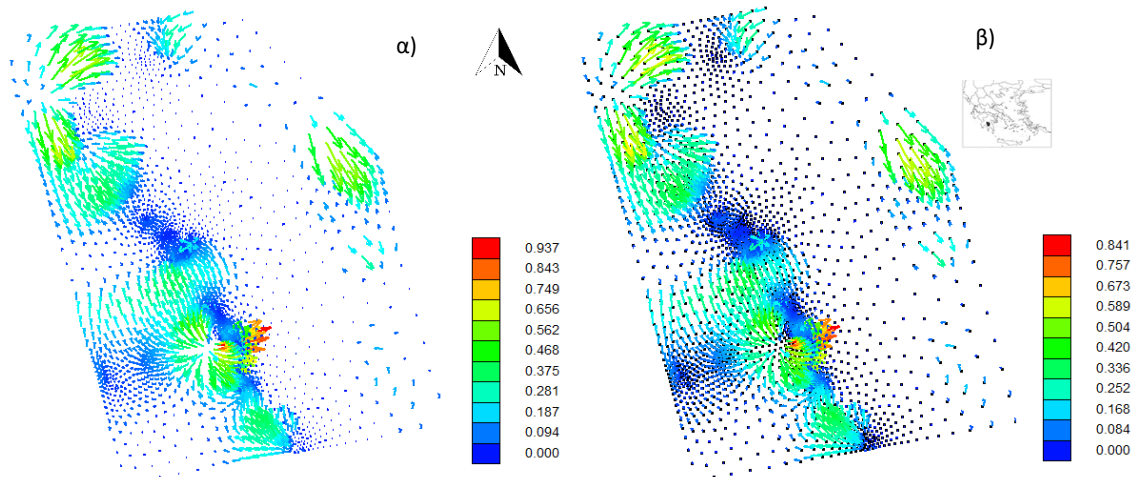
Δημιουργήθηκε ένα νέο project του συνδυαστικού μοντέλου SWAT-PTC για το κάθε κλιματικό σενάριο με περίοδο προσομοίωσης την περίοδο 2011-2058. Λόγω της μεγάλης χρονικής περιόδου για διευκόλυνση στην εισαγωγή δεδομένων η περίοδος προσομοίωσης ορίστηκε σε 96 εξάμηνα (stresses) με κάθε stress να αποτελείται από 180 μέρες. Ως αρχικές τιμές δεδομένων υδραυλικών υψών χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές υδραυλικών υψών την περίοδο του Σεπτεμβρίου 2011 που υπολογίστηκαν κατά την βαθμονόμηση και προσομοίωση του μοντέλου SWAT-PTC την περίοδο 2007-2011.

Ως δεδομένα βροχόπτωσης, διήθησης και οριακών συνθηκών στο ποτάμι χρησιμοποιήθηκαν τα νέα δεδομένα διήθησης και οριακών συνθηκών που προέκυψαν από την προσομοίωση του υδρολογικού κύκλου μέσω του μοντέλου SWAT για κάθε ένα σενάριο όπως περιγράφηκε στην ενότητα 5.3. Επιπλέον για την προσομοίωση της περιόδου 2010-2060 θεωρήθηκε μια προοδευτική μείωση ίση με 10 % στις οριακές συνθήκες, λόγω της αναμενόμενης μείωσης των βροχοπτώσεων έως το 2050 και επίσης μια προοδευτική αύξηση ίση με 20 % στις τιμές των παροχών άντλησης σε όλες τις γεωτρήσεις (FAO, 2011a).

Τα υδραυλικά ύψη της περιοχής μελέτης στο τέλος της καλοκαιρινής περιόδου του 2043 και του 2055 για το κλιματικό σενάριο 1 παρουσιάζονται στην **Εικόνα 5.21**. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα των ταχυτήτων ροής παρουσιάζονται στην **Εικόνα 5.22**.

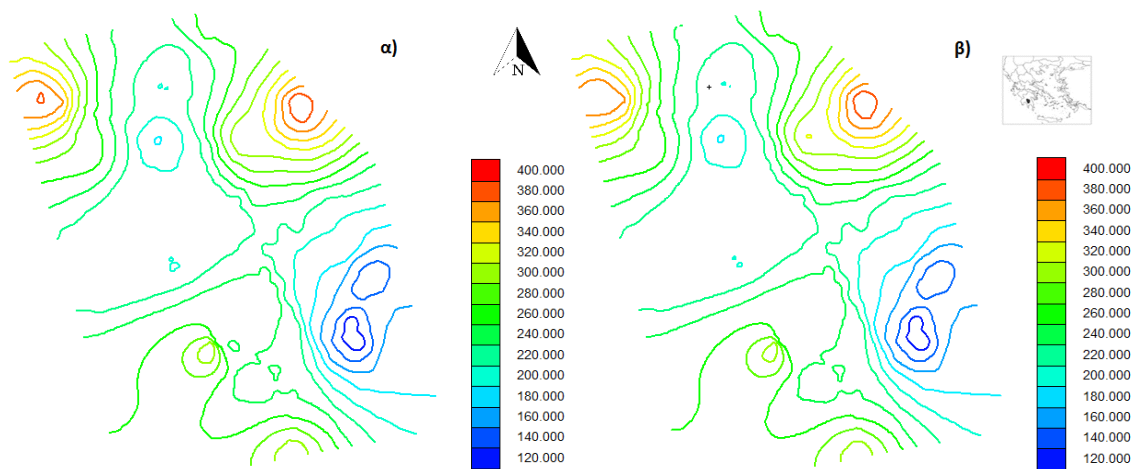


Εικόνα 5.21. Υδραυλικά ύψη (m) α) 2043 και β) 2055 (KNMI-RACMO2)

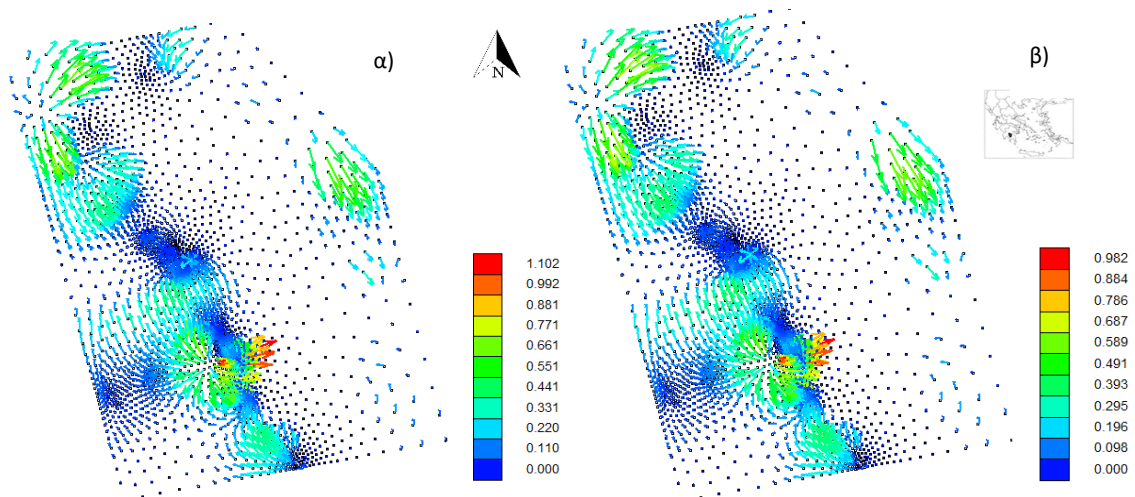


Εικόνα 5.22. Ταχύτητες ροής (m) α) 2043 και β) 2055 (KNMI-RACMO2)

Τα υδραυλικά ύψη της περιοχής μελέτης στο τέλος της καλοκαιρινής περιόδου του 2043 και του 2055 για το κλιματικό σενάριο 2 παρουσιάζονται στην **Εικόνα 5.23**. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα των ταχυτήτων ροής παρουσιάζονται στην **Εικόνα 5.24**.

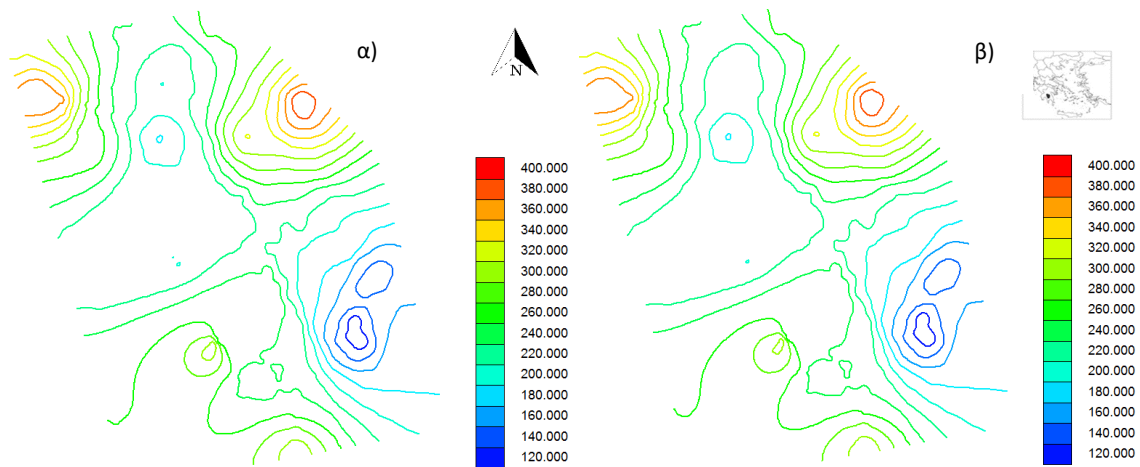


Εικόνα 5.23. Υδραυλικά ύψη (m) α) 2043 και β) 2055 (MPI-M-REMO)

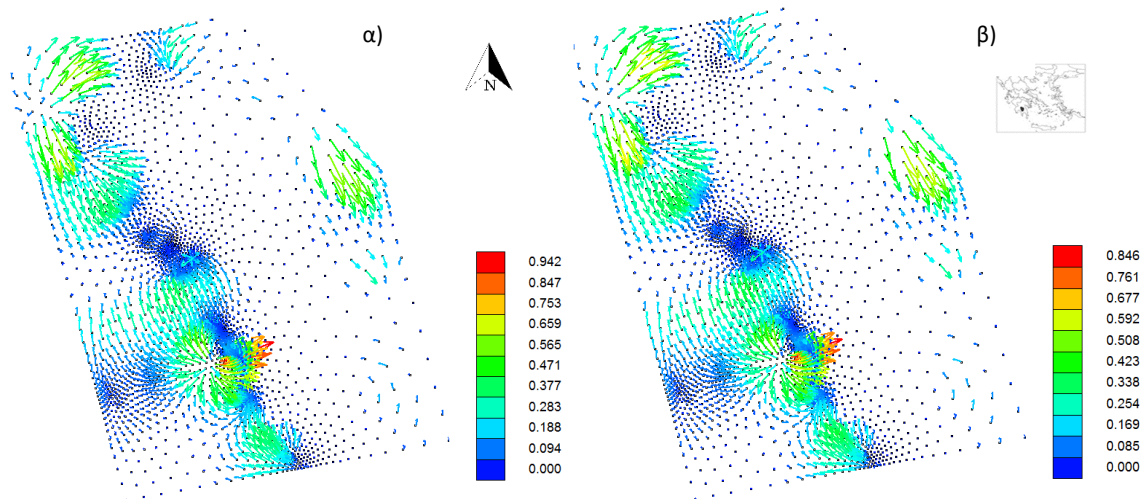


Εικόνα 5.24. Ταχύτητες ροής (m) α) 2043 και β) 2055 (MPI-M-REMO)

Τα υδραυλικά ύψη της περιοχής μελέτης στο τέλος της καλοκαιρινής περιόδου του 2043 και του 2055 για το κλιματικό σενάριο 3 παρουσιάζονται στην **Εικόνα 5.25**. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα των ταχυτήτων ροής παρουσιάζονται στην **Εικόνα 5.26**.



Εικόνα 5.25. Υδραυλικά ύψη (m) α) 2043 και β) 2055 (SMHI-RCA)



Εικόνα 5.26. Ταχύτητες ροής (m) α) 2043 και β) 2055 (SMHI-RCA)

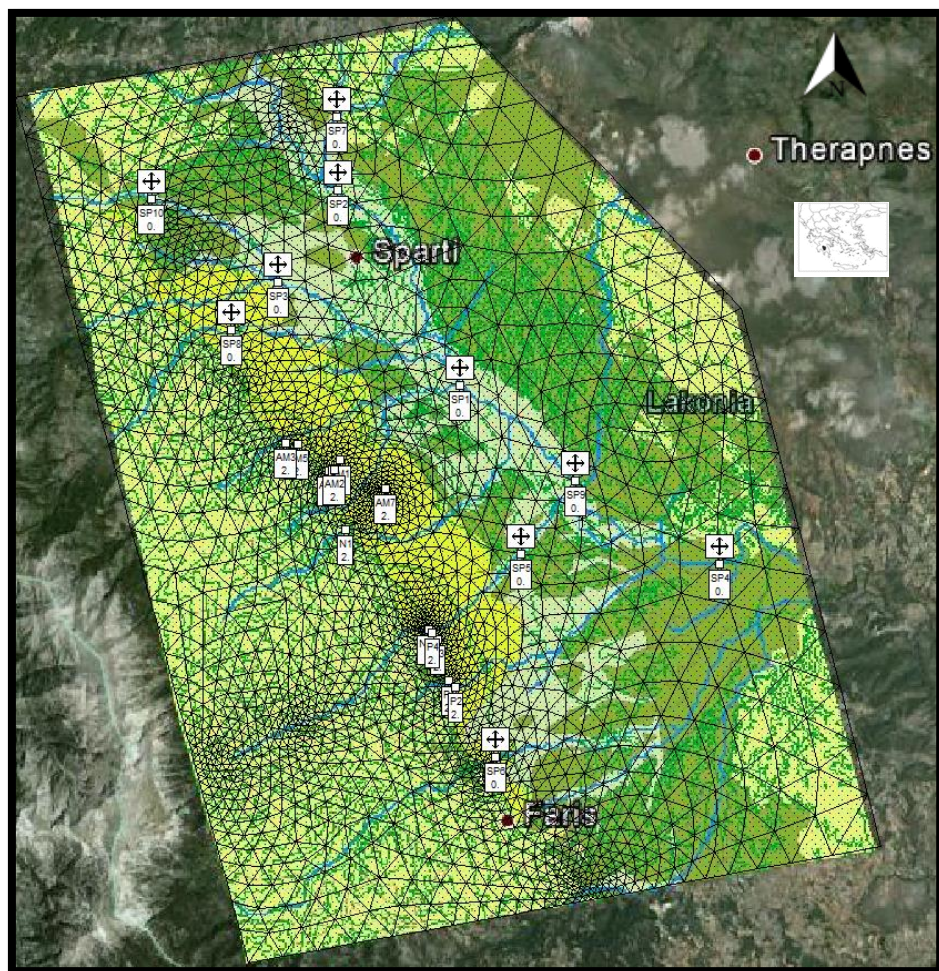
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα συμπεραίνουμε ότι κατά την περίοδο 2043-2055, όπου ο δείκτης SPI παρουσιάζει μια τάση μεταβολής από υγρές περιόδους σε ξηρές σύμφωνα με το κλιματικό σενάριο 1 (KNMI-RACMO2), ο υδροφορέας παρουσιάζει μια μείωση των υδραυλικών υψών στην κοιλάδα της Σπάρτης ίση κατά μέσο όρο με 0.82 m. Η μείωση αυτή αντιστοιχεί σε απώλεια ίση με 72 εκ. m³ νερού κατά την διάρκεια των 12 αυτών χρόνων καθιστώντας σημαντική την ανάγκη για την εφαρμογή στρατηγικής διαχείρισης των υδατικών πόρων για να αποφευχθεί οποιαδήποτε περίπτωση λειψυδρίας στο μέλλον. Αντίστοιχα κατά την περίοδο 2055-2057 όπου έχουμε τάση μεταβολής από ξηρές σε υγρές περιόδους ο υδροφορέας παρουσιάζει αύξηση των υδραυλικών υψών κατά 0.16 m.

Κατά το κλιματικό σενάριο 2 (MPI-M-REMO) ο υδροφορέας κατά την περίοδο 2043-2055 παρουσιάζει μια μείωση των υδραυλικών υψών στην κοιλάδα της Σπάρτης ίση κατά μέσο όρο με 0.47 m η οποία αντιστοιχεί σε απώλεια ίση με 42.3 εκ. m³ νερού. Ο υδροφορέας παρουσιάζει αύξηση των υδραυλικών υψών κατά 0.05 m κατά την περίοδο 2055-2057.

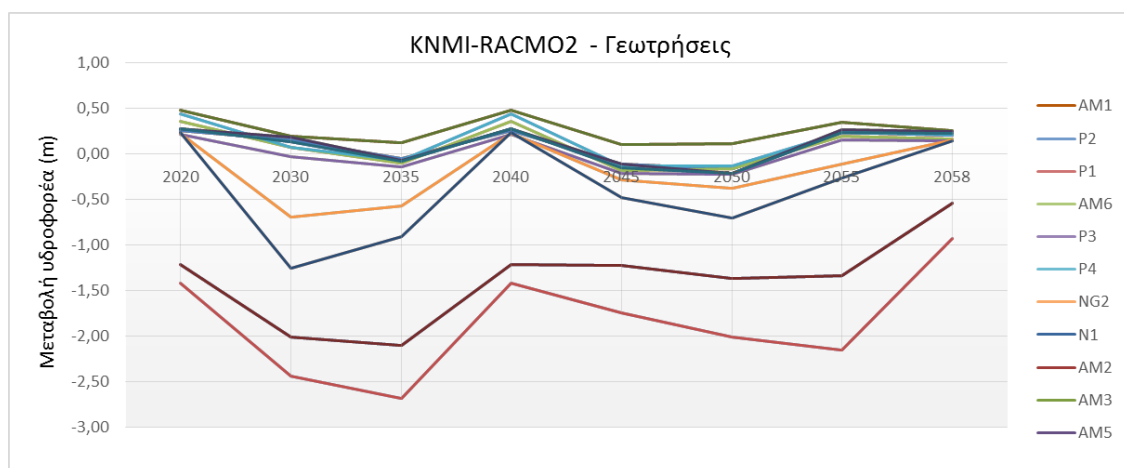
Κατά το κλιματικό σενάριο 3 (SMHI-RCA) ο υδροφορέας κατά την περίοδο 2043-2055 παρουσιάζει μια μείωση των υδραυλικών υψών στην κοιλάδα της Σπάρτης ίση κατά μέσο όρο με 0.87 m η οποία αντιστοιχεί σε απώλεια ίση με 78.3 εκ. m³ νερού. Ο υδροφορέας παρουσιάζει αύξηση των υδραυλικών υψών κατά 0.16 m κατά την περίοδο 2055-2057 (Gamvroudis et al., 2016).

Στην **Εικόνα 5.27** παρουσιάζονται οι έντεκα (11) γεωτρήσεις και τα δέκα (10) σημεία παρατήρησης (κατά μήκος της κοίτης του Ευρώτα) στα οποίες μελετήθηκε η απόκριση και μεταβολή των υδραυλικών υψών (m) του υδροφορέα για τα τρία κλιματικά σενάρια έως το 2058 ενώ στις **Εικόνες 5.28** έως **5.33** παρουσιάζεται η σχετική μεταβολή (αύξηση ή μείωση) των υδραυλικών υψών (m) του υδροφόρου ορίζοντα ανά πενταετία για τα τρία κλιματικά σενάρια.

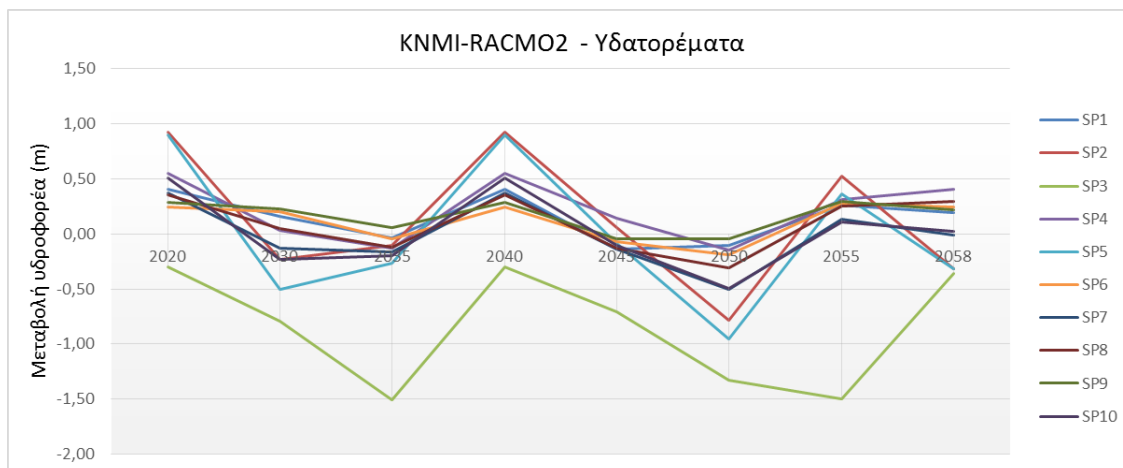
«Ολοκληρωμένο πλαίσιο μοντελοποίησης υδρολογίας, ποιότητας νερών και στερεοπαροχής σε λεκάνες απορροής ποταμών διαλείπουσας ροής»



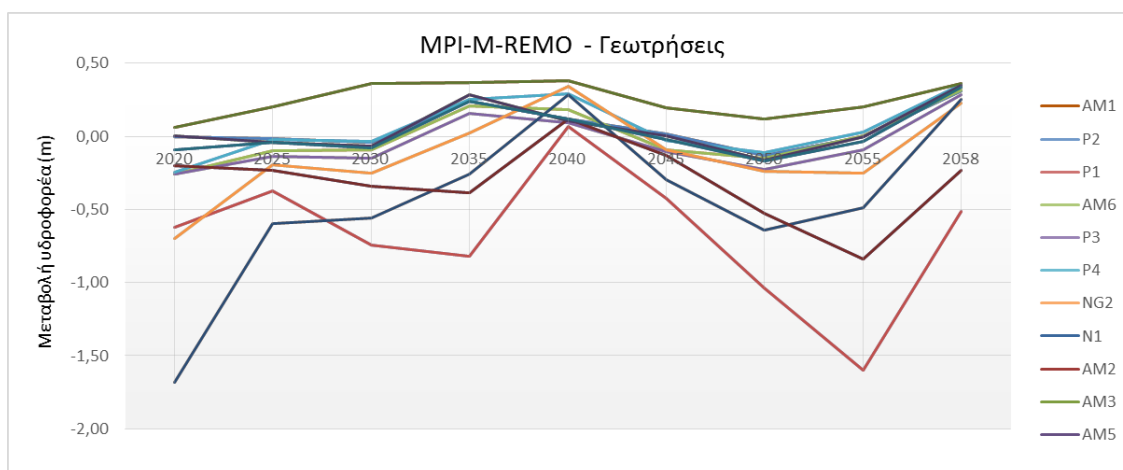
Εικόνα 5.27. Γεωτρήσεις και υδατορέματα παρατήρησης των κλιματικών σεναρίων έως το 2058



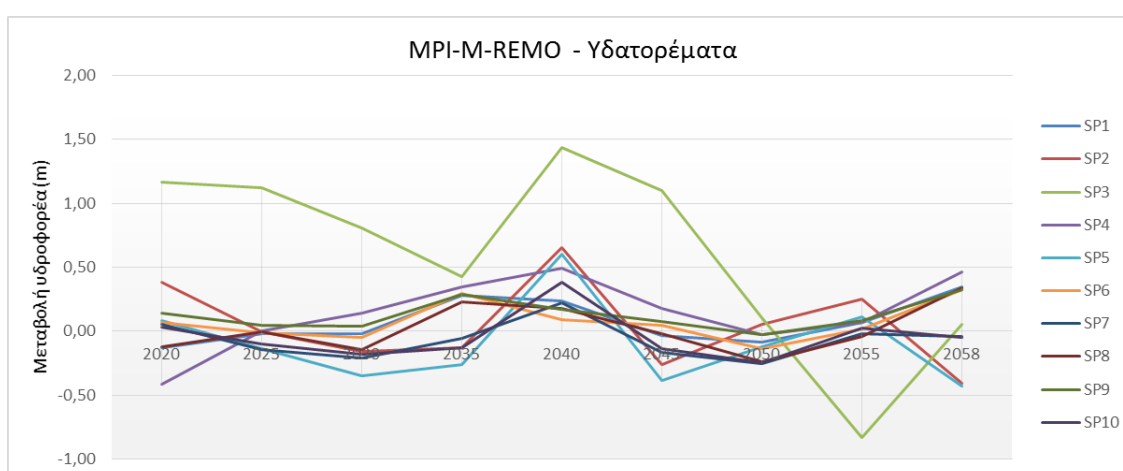
Εικόνα 5.28. Σχετική μεταβολή του υδροφόρου ορίζοντα (m) στις γεωτρήσεις – KNMI-RAMCO2



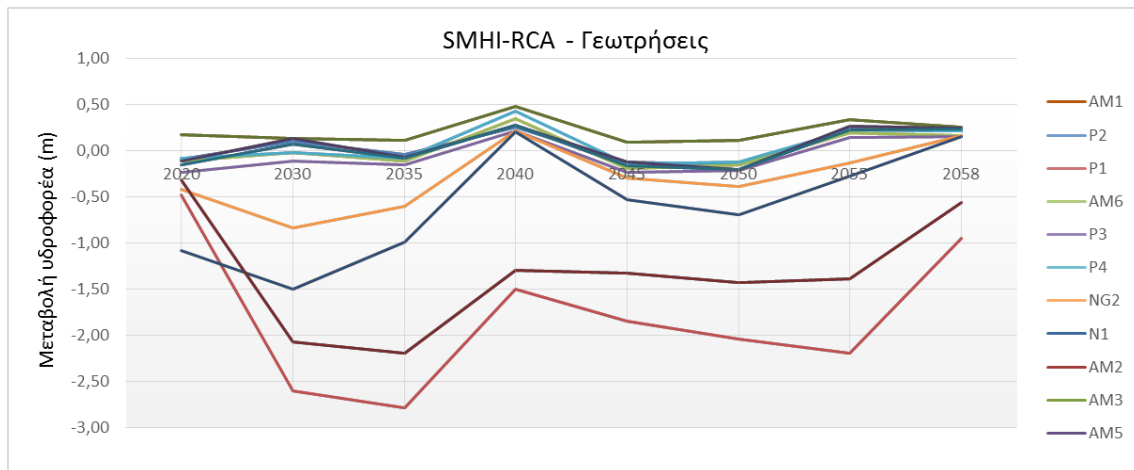
Εικόνα 5.29 Σχετική μεταβολή του υδροφόρου ορίζοντα (m) στα υδατορέματα – KNMI-RAMCO2



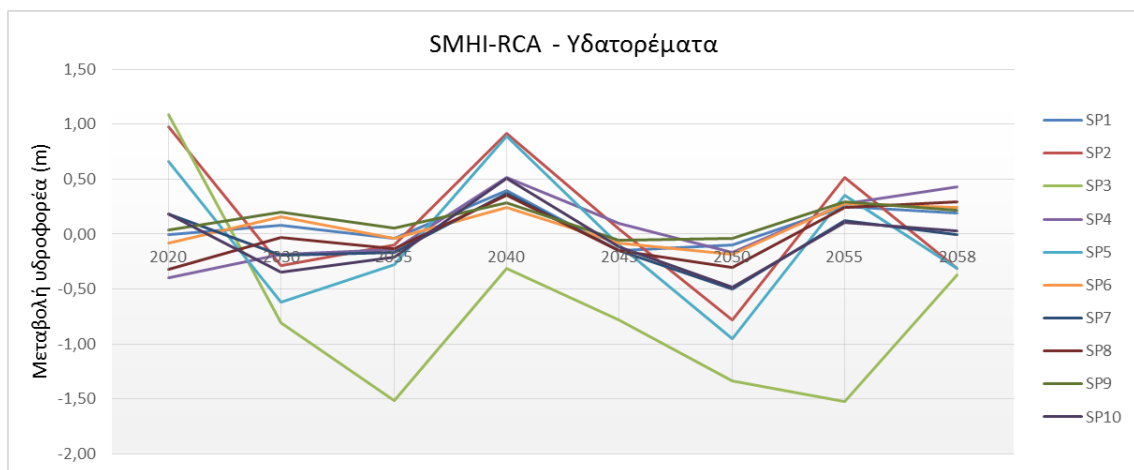
Εικόνα 5.30. Σχετική μεταβολή του υδροφόρου ορίζοντα (m) στις γεωτρήσεις – MPI-M-REMO



Εικόνα 5.31. Σχετική μεταβολή του υδροφόρου ορίζοντα (m) στα υδατορέματα – MPI-M-REMO



Εικόνα 5.32. Σχετική μεταβολή του υδροφόρου ορίζοντα (m) στις γεωτρήσεις – SMHI-RCA



Εικόνα 5.33. Σχετική μεταβολή του υδροφόρου ορίζοντα (m) στα υδατορέματα – SMHI-RCA

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι όσον αφορά τις γεωτρήσεις και για τα τρία κλιματικά σενάρια παρά τις κατά περιόδους αυξομειώσεις των υδραυλικών υψών τους, ο υδροφόρος ορίζοντας καταφέρνει και επανέρχεται στα αρχικά επίπεδα με εξαίρεση τις γεωτρήσεις P2 και N1 στις οποίες εμφανίζεται μειωμένος κατά 0,5 και 1 m αντίστοιχα στο τέλος του 2058.

Αντίστοιχα όσον αφορά τα υδατορέματα το υδατόρεμα το οποίο παρουσιάζει τις μεγαλύτερες διακυμάνσεις (φθάνουν και το 1.5 m μείωση της στάθμης σε πολλές περιόδους) είναι αυτό τις Μαγουλίτσας σε όλο το μήκος της (SP3 και SP10) και για τα σενάρια KNMI-RAMCO2 και SMHI-RCA. Το συμπέρασμα αυτό συνάδει με τα αποτελέσματα της επίδρασης των σεναρίων κλιματικής αλλαγής στα επιφανειακά ύδατα (**Ενότητα 5.3**) σύμφωνα με τα οποία το μεγαλύτερο πρόβλημα επάρκειας επιφανειακών υδάτων και ξηρασίας της κοίτης προβλέπεται να έχει το υδατόρεμα της Μαγουλίτσας. Στα υπόλοιπα σημεία παρατήρησης σε γενικές γραμμές τα υδατορέματα ακολουθούν τις διακυμάνσεις των υδραυλικών υψών που παρατηρήθηκαν στις γεωτρήσεις (**Gamvroudis et al., 2016**).

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ- ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή με τίτλο «Ολοκληρωμένο πλαίσιο μοντελοποίησης υδρολογίας, ποιότητας νερών και στερεοπαροχής σε λεκάνες απορροής ποταμών διαλείπουσας ροής» προτείνεται μια νέα μεθοδολογία συλλογής δεδομένων και μοντελοποίησης της υδρολογίας, της ποιότητας νερών και της στερεοπαροχής σε λεκάνες απορροής ποταμών διαλείπουσας ροής στη Μεσόγειο μεθοδολογία η οποία θα καλύψει τα κενά εφαρμογής υπαρχόντων μοντέλων σε σύνθετα υδρολογικά και υδρογεωλογικά συστήματα.

Βασική καινοτομία θεωρείται η μεθοδολογία στο σύνολό της που παρουσιάζει ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο προσομοίωσης των φυσικών διεργασιών και αντιμετώπιση των δυσκολιών παραμετροποίησης και βαθμονόμησης μιας σύνθετης υδρολογικής και υδρογεωλογικής λεκάνης στη Μεσόγειο λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαιτερότητες της περιοχής και εστιάζοντας στη συλλογή δεδομένων σε διάφορες κλίμακες για την ελαχιστοποίηση της αβεβαιότητας που προκύπτει από υφιστάμενους περιορισμούς.

Η περιοχή μελέτης της παρούσας διατριβής είναι η ευρύτερη περιοχή της λεκάνης απορροής του ποταμού Ευρώτα, ο οποίος αποτελεί ένα σύνθετο υδρολογικό και υδρογεωλογικό σύστημα αποτελούμενο κυρίως από ποταμούς διαλείπουσας ροής σε καρστικούς σχηματισμούς και πηγές. Τα επιφανειακά νερά που διαρρέουν τα υδατορέματα του ποταμού παρουσιάζουν έντονη εποχικότητα ενώ ταυτόχρονα υπάρχει μια έντονη ζήτηση του νερού την ίδια περίοδο. Παράγοντες όπως η γεωμορφολογία (κλίση, υψόμετρο, γεωλογικοί σχηματισμοί), οι κλιματολογικές συνθήκες (ξηρές ή ημίξηρες περιοχές) και οι ανθρωπογενείς πιέσεις (αντλήσεις νερού, υδρολογικές μεταβολές, πρακτικές χρήσης της γης) επηρεάζουν την φύση της ροής του ποταμού Ευρώτα.

Στόχος της παρούσας διατριβής αποτέλεσε η μελέτη της χωρικής και χρονικής κατανομής των επιφανειακών υδάτων και της στερεομεταφοράς στην ευρύτερη περιοχή της λεκάνης απορροής του ποταμού Ευρώτα εστιάζοντας στη συλλογή δεδομένων σε διάφορες κλίμακες για την ελαχιστοποίηση της αβεβαιότητας που προκύπτει από υφιστάμενους περιορισμούς και την μεγάλη έκταση της λεκάνης καθώς και η κατανόηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ των επιφανειακών και υπόγειων νερών της περιοχής μελέτης και η απόκριση τους σε σενάρια κλιματικής αλλαγής.

Ο σχεδιασμός της δειγματοληψίας της υδρολογίας και της μεταφοράς ιζημάτων της λεκάνης απορροής επικεντρώθηκε στη συλλογή δεδομένων σε διάφορες κλίμακες για την ελαχιστοποίηση της αβεβαιότητας που προκύπτει από υφιστάμενους περιορισμούς. Τα δεδομένα αυτά σε συνδυασμό με τα δεδομένα του υφιστάμενου δικτύου παρακολούθησης της ποσότητας και ποιότητας των υδάτων από το Τμήμα Περιβάλλοντος και Υδρολογίας της Περιφέρειας Πελοποννήσου, της Περιφερειακής Ενότητας Λακωνίας καθώς και δεδομένα από το δίκτυο δειγματοληψίας επιφανειακών και υπογείων υδάτων για τη μελέτη βιοτικών και αβιοτικών παραμέτρων και την

παρακολούθηση τεχνολογιών του Πολυτεχνείου Κρήτης και του Ελληνικού Κέντρου Θαλάσσιων Ερευνών (ΕΛΚΕΘΕ), συνέβαλλαν στην βελτίωση της προγνωστικής ικανότητας του μοντέλου και την ελαχιστοποίηση της αβεβαιότητας που προκύπτει από υφιστάμενους περιορισμούς και την μεγάλη έκταση της λεκάνης απορροής

Με το μοντέλο SWAT μελετήθηκε η ποσότητα, η ποιότητα και η στερεοπαροχή των επιφανειακών υδάτων της λεκάνης απορροής του ποταμού καθώς και οι επιπτώσεις των υδρολογικών διεργασιών στην οικολογία της λεκάνης για την περίοδο 2000-2011. Μηνιαία και ημερήσια δεδομένα παροχής καθώς και μηνιαία δεδομένα συγκεντρώσεων στερεοπαροχής από ένα εκτεταμένο δίκτυο συλλογής και παρακολούθησης χρησιμοποιήθηκαν για την βαθμονόμηση και επαλήθευση του υδρολογικού μοντέλου SWAT. Η προσομοίωση της υδρολογίας και της μεταφοράς ιζημάτων κρίθηκε ικανοποιητική μέσω στατιστικών δεικτών με όλους τους δείκτες να βρίσκονται εντός των επιτρεπτών ορίων. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν πως η λεκάνη έχει σε ετήσια βάση αρκετές ποσότητες για να καλυφτούν οι ανάγκες εντούτοις μεγάλα προβλήματα παρουσιάζονται κυρίως κατά τις ξηρές περιόδους όπου η πλειονότητα των υδατορεμάτων ξεραίνεται τελείως. Με βάση τη σύγκριση της προσομοίωσης με το μοντέλο SWAT με πραγματικούς χάρτες στο πεδίο προέκυψε πάνω από το 85% των τμημάτων του ποταμού αντιπροσωπεύουν ίδια χαρακτηριστικά ροής με αυτά των πραγματικών χαρτών αποξήρανσης ποταμού παρέχοντας επιπλέον ενδείξεις ότι το μοντέλο μπορεί να απεικονίσει συστηματικά συνθήκες χαμηλής ή μηδενικής ροής στη λεκάνη. Η συχνότητα των πλημμυρών στον κεντρικό ρου του ποταμού εκτιμάται ότι είναι μεταξύ 5% και 7%. Η μέση ετήσια μεταφορά ιζημάτων για την περίοδο 2000-2011 υπολογίστηκε σε επιτρεπτά όρια ($0.85 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$) με τις μεγαλύτερες ποσότητες διάβρωσης να εμφανίζονται στην περιοχή του Ταυγέτου ($3.5 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$). Προκειμένου να περιοριστεί περαιτέρω η προσομοίωση της στερεομεταφοράς μελετήθηκαν και αποτυπώθηκαν τοπογραφικά σε ετήσια βάση κατά τη διάρκεια της περιόδου 2009-2011 δύο τμήματα του ποταμού. Οι υπό εξέταση περιοχές χωρίστηκαν σε διατομές προκειμένου να μετρηθούν οι διαφοροποιήσεις του όγκου λόγω μεταφοράς ιζημάτων ή της διάβρωσης της κοίτης. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το μοντέλο παρέχει ικανοποιητική προσομοίωση της διάβρωσης/εναπόθεσης ιζημάτων εντός της κοίτης. Όπως συμβαίνει με το σύνολο των εκτιμήσεων του μοντέλου, οι χάρτες απεικονίζουν την δυναμική του νερού και στερεοπαροχής στις διάφορες περιοχές της λεκάνης βοηθώντας στον εντοπισμό των ευαίσθητων περιοχών όπου η λήψη και εφαρμογή διαχειριστικών μέτρων ενδείκνυται περισσότερο. Η μεγαλύτερη φόρτιση φορτίων ανόργανου αζώτου και φωσφόρου παρουσιάζεται στις υπολεκάνες που βρίσκονται στον κύριο ρου του ποταμού Ευρώτα.

Για την μελέτη των διεργασιών που αφορούν τις ροές των υπογείων υδάτων και την αλληλεπίδραση τους με τα επιφανειακά ύδατα στην περιοχή μελέτης κρίθηκε απαραίτητη η δημιουργία ενός ολοκληρωμένου πλαισίου μοντελοποίησης των υδατικών πόρων της περιοχής μελέτης συνδυάζοντας το υδρολογικό μοντέλο SWAT με το μοντέλο υπόγειων υδάτων PTC με στόχο την κατανόηση της αλληλεπίδρασης

μεταξύ των επιφανειακών και υπογείων υδάτων της περιοχής μελέτης και την βελτίωση της προγνωστικής ικανότητας του συνδυαστικού μοντέλου σε σενάρια κλιματικής αλλαγής έως το 2060. Έπειτα από την επιτυχημένη βαθμονόμηση και επαλήθευση του μοντέλου SWAT, σύμφωνα με τα κριτήρια που επιλέχθηκαν, προσομοιώθηκαν οι διεργασίες που αφορούν τις ροές των υπογείων υδάτων στην περιοχή μελέτης με τη χρήση του κώδικα PTC. Τα δεδομένα ροής των επιφανειακών υδάτων από το μοντέλο SWAT χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισαγωγής και οριακών συνθηκών στο μοντέλο των υπογείων υδάτων το οποίο βαθμονομήθηκε και επαληθεύτηκε επιτυχώς για την περίοδο 2007-2011. Από τα αποτελέσματα της εφαρμογής του συνδυαστικού μοντέλου γίνεται αντιληπτό ότι κατά τη διάρκεια των τεσσάρων ετών, για τα οποία εκτελέστηκε το συνδυαστικό μοντέλο, το βορειοδυτικό τμήμα της λεκάνης δεν παρουσιάζει αισθητή διαφοροποίηση στις τιμές των υδραυλικών υψών. Παρατηρούμε ότι στα τμήματα της περιοχής όπου οι γεωλογικοί σχηματισμοί έχουν μικρή διαπερατότητα, (μάρμαρα, φλύσχης, φυλλίτες) που βρίσκονται κυρίως βορειοδυτικά οι ταχύτητες είναι πολύ μικρές, ενώ κατά μήκος του ποταμού Ευρώτα όπου υπάρχουν κυρίως σχηματισμοί παράκτιων αποθέσεων και πλευρικών κορημάτων, οι ταχύτητες μεγαλώνουν. Οι ταχύτητες ροής δεν παρουσιάζουν εμφανείς εποχικές διακυμάνσεις ενώ όπως αναμενόταν, εμφανίζουν αύξηση κοντά από τα πηγάδια άντλησης με τις μεγαλύτερες τιμές να εμφανίζονται στην περιοχή του Ξηροκαμπίου.

Για τον έλεγχο της επίδρασης της κλιματικής αλλαγής στην περιοχή μελέτης μελετήθηκαν τρία σενάρια κλιματικής αλλαγής (KNMI-RACMO2, MPI-M-REMO, SMHI-RCA) εξετάζοντας τον υδρολογικό χαρακτήρα κάθε υδατορέματος καθώς και τη διακύμανση της στάθμης του υπόγειου υδροφορέα σε διάφορες θέσεις και περιόδους μέχρι το 2060.

Όσον αφορά την επίδραση των τριών σεναρίων της κλιματικής αλλαγής στα επιφανειακά ύδατα προκειμένου να καταστεί ορατή η εποχιακή εμφάνιση των υδρόβιων συνθηκών σε ένα υδατόρεμα δημιουργήθηκαν τα διαγράμματα συχνότητας της υδρόβιας κατάστασης ASGF (Aquatic States Frequency Graph). Σύμφωνα με τους υπολογιζόμενους δείκτες (δείκτες M_f και S_d6) το μεγαλύτερο πρόβλημα επάρκειας επιφανειακών υδάτων και ξηρασίας της κοίτης προβλέπεται ότι θα υπάρξει την περίοδο 2040-2060 και ιδιαίτερα στο υδατόρεμα της Μαγουλίτσας στην περιοχή Αγ. Ειρήνη, όπου οι δείκτες M_f και S_d6 έχουν τις χαμηλότερες τιμές και για τα τρία σενάρια κλιματικής αλλαγής ενώ αντίθετα πιο Νότια περιοχές όπως η Ρασίνα (Κουμουστά και Αεροδρόμιο) δεν θα επηρεαστούν ιδιαίτερα.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της επίδρασης της κλιματικής αλλαγής στον υπόγειο υδροφορέα παρατηρείται ότι σε περιόδους όπου παρουσιάζει μια τάση μεταβολής από υγρές περιόδους σε ξηρές ο υδροφορέας παρουσιάζει μια μείωση των υδραυλικών υψών και κατά συνέπεια των υδατικών αποθεμάτων στην κοιλάδα της Σπάρτης ίση με 72 εκ. m^3 νερού κατά την διάρκεια των 12 αυτών χρόνων καθιστώντας σημαντική την ανάγκη για την εφαρμογή στρατηγικής διαχείρισης των υδατικών πόρων για να αποφευχθεί οποιαδήποτε περίπτωση λειψυδρίας στο μέλλον. Αντίστοιχα σε

περιόδους όπου έχουμε τάση μεταβολής από ξηρές σε υγρές περιόδους ο υδροφορέας παρουσιάζει μικρή αύξηση των υδραυλικών υψών. Αντίστοιχα όσον αφορά τα υδατορέματα το υδατόρεμα το οποίο παρουσιάζει τις μεγαλύτερες διακυμάνσεις είναι αυτό τις Μαγουλίτσας σε όλο το μήκος της. Τα αποτελέσματα αυτά συνάδουν με τα αποτελέσματα της επίδρασης της κλιματικής αλλαγής στα επιφανειακά ύδατα μέσω των Aquatic States Frequency Graphs σύμφωνα με τα οποία το μεγαλύτερο πρόβλημα επάρκειας επιφανειακών υδάτων και ξηρασίας της κοίτης προβλέπεται να έχει το υδατόρεμα της Μαγουλίτσας. Στα υπόλοιπα σημεία παρατήρησης σε γενικές γραμμές τα υδατορέματα ακολουθούν τις διακυμάνσεις των υδραυλικών υψών που παρατηρήθηκαν στις γεωτρήσεις.

Ο ποταμός Ευρώτας αποτελεί ένα ζωντανό οργανισμό ο οποίος διαρκώς εξελίσσεται. Λαμβάνοντας υπόψη τις παραδοχές που έγιναν, η μεθοδολογική προσέγγιση μοντελοποίησης του υδρολογικού και υδατικού ισοζυγίου στην εξεταζόμενη λεκάνη αποτελεί την πιο συστηματική προσπάθεια που έχει γίνει για τη συγκεκριμένη λεκάνη και δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα όσον αφορά στην εκτίμηση της υδατικής κατάστασης με στόχο την ανάπτυξη ολοκληρωμένης πολιτικής διαχείρισης των υδάτινων πόρων της από την τοπική κοινωνία.

Προτάσεις για Μελλοντική έρευνα

Οι προτάσεις για μελλοντική έρευνα συνοψίζονται ως εξής :

- Ανάλυση των επιπτώσεων των επερχόμενων κλιματικών αλλαγών στη βιοποικιλότητα και την λειτουργία των οικοσυστημάτων.
- Λεπτομερέστερη χωρική αποτύπωση της διάβρωσης/εναπόθεσης ιζημάτων σε περισσότερα σημεία για τις ανάγκες του μοντέλου
- Εξέταση της προγνωστικής ικανότητας της στερεομεταφοράς του μοντέλου σε υψηλές παροχές.
- Επέκταση της μοντελοποίησης στην ευρύτερη λεκάνη της Σκάλας που εκβάλλει στην στον Λακωνικό Κόλπο.
- Μοντελοποίηση των καρστικών πηγών του Ευρώτα με την χρήση του τροποποιημένου μοντέλου SWAT όπως αυτό περιγράφεται από τους Nikolaidis et al., 2013.
- Ανάπτυξη προγράμματος μέτρων για τη διαχείριση της ξηρασίας και προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή στις περιοχές στις οποίες παρατηρείται το μεγαλύτερο πρόβλημα επάρκειας επιφανειακών υδάτων και ξηρασίας (π.χ Μαγουλίτσα).
- Προσομοίωση του μοντέλου με την χρήση σεναρίων έως το τέλος του αιώνα.
- Δημιουργία ενός αυτοματοποιημένου γραφικού περιβάλλοντος χρήστη (GUI) σύνδεσης των δεδομένων των μοντέλων SWAT και ARGUS ONE (κώδικας PTC).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ξενόγλωση

- Ahl, R., Woods, S., and Zuuring, H., 2008. Hydrologic Calibration and Validation of SWAT in a Snow-Dominated Rocky Mountain Watershed, Montana, U.S.A. Journal of the American Water Resources Association (JAWRA) 44(6):1411-1430.
- Andreadakis, E., Fountoulis, I., Mariolakis, I., Kapourani, E., 2008. Hydrometeorological Natural Disasters and Water Resources Management in Evrotas River Basin (Peloponnesus, Greece). 3rd International Conference “AQUA 2008” on Water Science and Technology, 16-19 October 2008, Athens, Greece.
- Arabi, M., Frankenberger, JR, Engel, B and Arnold JG., 2008. Representation of agricultural conservation practices with SWAT. Hydrological Process 22, 3042-3055.
- Arnold, J.G., and Allen, P.M., 1999. Validation of Automated Methods for Estimating Baseflow and Groundwater Recharge From Stream Flow Records. Journal of American Water Resources Association 35(2):411-424.
- Arnold, J. G., and Fohrer, N., 2005. SWAT2000: Current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling. Hydrol. Process. 19(3): 563-572.
- Arnold, J.G., Allen, P.M., Muttiah, R.S., and Bernhardt, G., 1995a. Automated base flow separation and recession analysis techniques. Ground water 33(6): 1010-1018.
- Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S., Williams, J.R., 1998. Large area hydrologic modelling and assessment part I: model development. Journal of American Water Resources Association. 34 (1), 73-89.
- Arnold, J.G. and Allen, P.M., 1996. “Estimating Hydrologic Budgets For Three Illinois Watersheds.” Journal of Hydrology 176(1-4): 57-77.
- Babu, D. K., Pinder, G.F., Niemi, A., Ahlfeld D.P., and Stothoff, S.A., 1997. Chemical transport by three-dimensional groundwater flows, Princeton University.
- Bae, D.H, Jung, I.W, Lettenmaier, D.P., 2011. Hydrologic uncertainties in climate change from IPCC AR4 GCM simulations of the Chungju Basin, Korea. J Hydrol 401:90–105
- Baffaut, C., Benson, V.W., 2009. Modeling flow and pollutant transport in a karst watershed with SWAT. American Society of Agricultural and Biological Engineers. 52 (2), 469-479.

- Bartsch, K.P., Van Miegroet, H., Boettinger, J., Dobrwolski, J.P., 2002. Using empirical erosion models and GIS to determine erosion risk at Camp Williams. *Journal of Soil and Water Conservation* 2002; 57(1):29–37
- Bathurst, J.C., Kilsby, C., and White, S. 1996. Modelling the impacts of climate and land-use change on basin hydrology and soil erosion in Mediterranean Europe. In *Mediterranean Desertification and Land Use*, C. J. Brandt and J. B. Thornes (eds.), John Wiley and Sons Ltd., Chichester, UK, 355-387.
- Bathurst, J.C., Sheffield, J., Vicente, C., White, S.M., and Romano, N. 2002. Modelling large basin hydrology and sediment yield with sparse data: the Agri basin, southern Italy. In *Mediterranean Desertification : A Mosaic of Processes and Responses*, Geeson, N.A., Brandt, C.J., and Thornes, J.B. (eds.), Wiley, Chichester, UK, 397-415.
- Bathurst, J.C., Burton, A., Clarke, B.G., and Gallart, F. 2006. Application of the SHETRAN basin-scale, landslide sediment yield model to the Llobregat basin, Spanish Pyrenees. *Hydrol. Process*, 20, 3119-3138.
- Betrie, G.D., Mohamed, Y.A., Van Griensven, A., Srinivasan, R., 2011. Sediment management modelling in the Blue Nile Basin using SWAT model. *Hydrology and Earth Sciences*. 15, 807-818.
- Beasley, D.B., Huggins, L.F. dan Monke, E.J., 1980. ANSWERS: A model for watershed planning. *Transaction of the American Society of Agricultural Engineers*, 23, 938-944
- Beven, K., 1997. TOPMODEL: A critique. *Hydrol. Process.*, 11: 1069–1085.
- Bicknell, B.R., Imhoff, J.C., Kittle, J.L., Donigian, A.S., and Johanson, R.C., 1997. Hydrological Simulation Program - FORTRAN, User's Manual for Release 11: EPA/600/R-97/080. U.S. Environmental Protection Agency, National Exposure Research Laboratory, Athens, GA.
- Borah, D.K. and Bera, M., 2003. Watershed-scale hydrologic and non-point source pollution models: review of mathematical bases. *Transactions of the ASAE*, 46 (6), 1553–1566.
- Borah, D.K., and Bera, M. 2004. Watershed-scale hydrologic and nonpoint-source pollution models: Review of applications. *Trans. ASAE* 47(3): 789–803
- Bougeard, S., Qannari, E. M., and Rose, N., 2011. Multiblock Redundancy Analysis: interpretation tools and application in epidemiology. *Journal of chemometrics*, 25, 467-475
- Bouraoui, R., Lahmar, M., Majdoub, A., Djemali, M., Beleyea, R., 2002. The relationship of temperature-humidity index with milk production of dairy cows in a Mediterranean climate. *Anim. Res.* 2002;51:479–491.

- Brooks, R., 1991. Intelligence Without Reason AI memo nr 1293 MIT 1991.
- Brown, L.C. and Barnwell, T.O., 1987. The enhanced stream water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: Documentation and User Manual. Tufts University and US EPA, Athens, Georgia.
- Bull, L.J., and Kirkby, M.J., 2002. Dryland river characteristics and concepts. In Dryland Rivers: Hydrology and Geomorphology of Semi-Arid Channels. L.J. Bull and M.J. Kirkby, eds. John Wiley and Sons Ltd. Chichester, England.
- Castro, M., Fernandez, C., Gaertner, M.A., 1993. Description of a mesoscale atmospheric numerical model. In D'iaz J.I., J.L. Lions (Eds). Mathematics, climate and environment. Rech. Math. Appl. Ser. Mason, pp: 230-253, 1993.
- Chen, L., Wei, G., and Shen, Z., 2016. Incorporating water quality responses into the framework of best management practices optimization. Journal of Hydrology. Available online 23 August 2016 In Press
- Chourre, M., and Wright, S., 1997. Population Growth of the Southwest United States, 1900–1990. Maintained by Peter Schweitzer and Randy Schumann, U.S. Geological Survey. Accessed 2002.
- Christensen, J.H., Bøssing Christensen, O., Lopez, P., van Meijgaard, E., and Botzet, M., 1996. The HIRHAM4 Regional Atmospheric Climate Model. Scientific Report 96-4, Danish Meteorological Institute.
- Cronshey, R.G., and Theurer, F.D., 1998. AnnAGNPS-non point pollutant loading model. Proc.First Fed. Interagency Hydrol.Model, Conf. 1:9-16.
- Dabral, S., Cohen, M., 2001. ANSWERS-2000 Areal Non-point Source Watershed Environment Response Simulation with Questions Graphical User Interface. ABE6254 – Simulation of Small Agricultural Watersheds
- De Roo A., and Jetten V., 1999. Calibrating and validating the LISEM model for two data sets from the Netherlands and South Africa. Catena 37 1999 477–493
- De Roo, A.P.J., 1996. The LISEM project: an introduction. Hydrological Processes 10 8,1021–1025.
- DHI., 2004. Mike-Basin Scription. Danish Hydraulics Institute (DHI), <http://www.dhisoftware.com/Download/MIKEByDHI2014.aspx>
- Di Luzio, M., Srinivasan, R., Arnold, J.G., 2004. A GIS-coupled hydrological model system for the watershed assessment of agricultural nonpoint and point sources of pollution. Trans GIS 8(1):113–136

- Diffenbaugh, N.S., Pal, J.S., Giorgi, F., and Gao, X., 2007. Heat stress intensification in the Mediterranean climate change hotspot, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L11706.
- Dingman, L., 2002. *Physical Hydrology*. 2nd Ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 646 pp
- Du, B., Ji, X., Harmel, R.D., and Hauck, L.M., 2009. Evaluation of a watershed model for estimating daily flow using limited flow measurements. *J Am Water Resour Assoc* 45(2):475–484
- Edwards, D.C., McKee, T.B., 1997. Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple scales. *Atmospheric Science Paper No. 634*, May; 1–30
- EEA-ETC/TE, 2002. Corine land cover update, Image 2000 and CLC2000 project, Technical guidelines, <http://terrestrial.eionet.eu.int>
- Engel, B., Storm, D., White, M., Arnold, J., and Arabi, M., 2007. A hydrologic/water quality model application protocol. *J. American Water Resour. Assoc.* 43(5): 1223-1236
- Engelen, G.B., and Kloosterman, F.H., 1996. *Hydrological system analysis: methods and application*. Water Science and Technology Library, vol. 20, Kluwer Academic Publishers (1996) p. 149
- EPA., 1979. US EPA Manual entitled "Methods for Chemical Analysis of Water and Wastes," EPA-600/4-79-020 Revised (3/83) Method 160.2, (p. 160.2-1).
- FAO., 2013. Hot issues: Water scarcity. Fao.org. Retrieved on 27 August 2013.
- FAO., 1995. *Digital Soil Map of the World and Derived Soil Properties*, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Flanagan, D.C., Ascough, J.C., Nearing, M.A and Laflen, J.M., 2001. Chapter 7: The Water Erosion Prediction Project (WEPP) model. In *Landscape Erosion and Evolution Modeling*, 145-199. R. S. Harmon and W. W. Doe III, eds. New York, N. Y.: Kluwer Academic / Plenum Publishers
- Foster, G.R. and Meyer, L.D., 1977. Soil erosion and sedimentation by water- an overview. *Procs. National Symposium on Soil Erosion and Sedimentation by Water*, Am. Soc. Of. Agr. Eng., St. Joseph, Michigan, 1-13.
- Gallart, F., Amaxidis, Y., Botti, P., Cane, G., Castillo, V., Chapman, P., Froebrich, J., Garcia Pintado, J., Latron, J., and Llorens, P., 2008. Investigating hydrological regimes and processes in a set of catchments with temporary waters in Mediterranean Europe/Étude des régimes et processus hydrologiques dans un

ensemble de bassins versants aux eaux temporaires dans l'Europe Méditerranéenne.
Hydrological Sciences Journal, 53, 618-628

- Gallart, F., Prat, N., Garca-Roger, E.M., Latron, J., Rieradevall, M., Llorens, P., Barbera, G.G., Brito, D., De Girolamo, A.M., Lo Porto, A., Buffagni, A., Erba, S., Neves, R., Nikolaidis, N.P., Perrin, J.L., Querner, E.P., Quinonero, J.M., Tournoud, M.G., Tzoraki, O., Skoulikidis, N., Gamez, R., Gomez, R., Froebrich, J., 2012. A novel approach to analysing the regimes of temporary streams in relation to their controls on the composition and structure of aquatic biota. *Hydrology and Earth System Sciences* 16, 3165-3182
- Gallart, F., Prat, N., García-Roger, E. M., Latron, J., Rieradevall, M., Llorens, P., Barberá, G. G., Brito, D., De Girolamo, A. M., Lo Porto, A., Neves, R., Nikolaidis, N. P., Perrin, J. L., Querner, E. P., Quiñonero, J. M., Tournoud, M. G., Tzoraki, O., and Froebrich, J. 2011. Developing a novel approach to analyse the regimes of temporary streams and their controls on aquatic biota, *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 8, 9637-9673.
- Gallart F., Llorens P, Latron J., Cid N., Rieradevall M, and Prat N., 2016. Validating alternative methodologies to estimate the regime of temporary rivers when flow data are unavailable. *Science of The Total Environment* Volume 565, 15 September 2016, Pages 1001–1010
- Gamvroudis, C., Karalemas, N., Papadoulakis, V., Tzoraki, O. and Nikolaidis, N.P., 2011. Hydrograph analysis of Inountas River Basin (Lakonia, Greece). In: *Advances in the Research of Aquatic Environment*, Eds: Lambrakis, N., Stournaras, G., Katsanou, K., Springer Berlin Heidelberg, pp. 171-178.
- Gamvroudis, C., Nikolaidis, N. P., Tzoraki, O., Papadoulakis, V., & Karalemas, N. (2015). Water and sediment transport modeling of a large temporary river basin in Greece. *Science of the Total Environment*, 508, 354–365.
- Gamvroudis C, Dokou Z, Nikolaidis N.P, and Karatzas G.P, 2016. Impacts of surface and groundwater variability response to future climate change scenarios in a large Mediterranean watershed. *Environmental Earth Sciences* (In Review).
- Gasith, A. and Resh H. 1999. Streams in Mediterranean climate regions: abiotic influences and biotic responses to predictable seasonal events. *Ann. Rev. Ecol. Syst.*, 30, 51-81.
- Gassman, P.W., Reyes, M., Green, C.H., and Arnold, J.G., 2007. The Soil and Water Assessment Tool: Historical development, applications, and future directions. *Trans. ASABE* 50(4): 1211-1250
- Ghaffari, G., Keesstra, S., Ghodousi, J., and Ahmadi, H., 2010. SWAT-simulated hydrological impact of land-use change in the Zanjaanrood basin, northwest Iran. *Hydrol. Proc.* 24(7):892-903.

- Giannakopoulos, C., Le Sager, P., and Bindi, M. et al., 2009. Climatic changes and associated impacts in the Mediterranean resulting from a 2 °C global warming, *Global and Planetary Change*, 68 (3), 209-224.
- Gibbs, W.J., Maher, J.V., 1967. Rainfall Deciles as Drought Indicators. Bureau of Meteorology Bulletin, No. 48, Commonwealth of Australia, Melbourne
- Gibelin, A.L. and Déqué, M., 2003. Anthropogenic climate change over the Mediterranean region simulated by a global variable resolution model. *Climate Dynamics* 20:327-339
- Giorgi, F., and Bi, X., 2005b. Regional changes in surface climate interannual variability for the 21st century from ensembles of global model simulations, *Geophys. Res. Lett.*, 32.
- Giorgi, F., and Lionello, P., 2008. Climate change projections for the Mediterranean region. *Global and Planetary Change*, 63, 90-104.
- Giorgi F, Shields-Brodeur, C., Bates, G.T., 1994. Regional climate change scenarios over the United States produced with a nested regional climate model. *J Clim* 7: 375–399
- Giorgi, F., 2006. Climate change hot-spots, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L08707.
- Gomi, T., Sidle, R.C., and Richardson, J.S., 2002. Headwater and channel network: understanding processes and downstream linkages of headwater systems. *BioScience* 52:905–916.
- Goubanova, K. and Li, L., 2007. Extremes in temperature and precipitation around the mediterranean basin in an ensemble of future climate scenario simulations, *Glob. Planet. Change*, 57, 27–42.
- Graf, W.L., 1988. Fluvial processes in Dryland rivers, Springer Series in Physical Environment, 346 pp.
- Groeneveld, D.P., and Griepentrog, T.E., 1985. Interdependence of groundwater, riparian vegetation, and streambank stability: a case study. USDA Forest Service, General Technical Report RM-120:44–48.
- Gupta, H., Sorooshian, S., Yapo, P., 1999. Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. *Journal of Hydrology Engineering*. 4, 135–143.
- Harbaugh, A.W., 2005. MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey modular groundwater model—the Ground-Water Flow Process. USGS Techniques and Methods 6- A16. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey.

- Harbaugh, A.W., Banta, E.R., Hill, M.C., and McDonald, M.G., 2000. MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey modular ground-water model - User guide to modularization concepts and the Ground-Water Flow Process. USGS Open-File Report 00-92. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey.
- Hayes, M., 1996. Drought indexes. National Drought Mitigation Center, University of Nebraska–Lincoln, 7 pp.
- Hertig, E. and Jacobeit, J., 2008. Downscaling Future Climate Change: Temperature Scenarios for the Mediterranean area. Special Issue of Global and Planetary Change: 127-131.
- Hilty, J., Lidicker Jr, W.Z., and Merenlender, A.M., 2006. Corridor Ecology. Island Press, Washington D.C.
- Hrissanthou, V., Delimani, P., Xeidakis, G., 2010. Estimate of sediment inflow into Vistonis Lake Greece. International Journal of Sediment Research. 25 (2), 161-174.
- Hulme, M., 2009. The true meaning of climate change. New Scientist, 203(2724), 28–29.
- Hunter, H.M. and Walton, R.S. 2008. Land-use effects on fluxes of suspended sediment, nitrogen and phosphorus from a river catchment of the Great Barrier Reef, Australia. Journal of Hydrology, 356: 131–146.
- IPCC, 2007. Climate Change 2007: Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC, Cambridge, United Kingdom/New York, NY, USA (2007)
- IPCC, 2007a. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2007a) Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group (WG) 1 to the Fourth Assessment Report of the IPCC (New York: Cambridge University Press). Available at <http://www.ipcc.ch/press/index.htm>
- IPCC, 2007b. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2007b) Climate Change 2007: Climate Change Impacts, Adaptation, and Vulnerability, Contribution of Working Group (WG) 2 to the Fourth Assessment Report of the IPCC (New York: Cambridge University Press), available at <http://www.ipcc.ch/press/index.html>
- IPCC, 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp

- IPCC., 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- IPCC SRES., 2000. In : Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., Grübler, A. et al., 2000: Special Report on Emissions Scenarios, Working Group III, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Cambridge University Press, Cambridge, 595 pp.
- IPCC5., 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- Jacob, D., 2001, A note to the simulation of the annual and inter-annual variability of the water budget over the Baltic Sea drainage basin, Meteorol. Atmos. Phys. 77, 61-73.
- Jacobson, P.J., Jacobson, K.M., Angermeier, P.L. and Cherry, D.S., 2000. Variation in material transport and water chemistry along a large ephemeral river in the Namib Desert. Freshwater Biology, 44: 481–491.
- Jetten, V., Govers, G. and Hessel, R., 2003. Erosion models: quality and spatial predictions. Hydrological Processes, 17: 887-900.
- Johnson, B.E., Julien, P.Y., Molnar, D.K., and Watson, C.C., 2000. The twodimensional-upland erosion model CASC2D-SED. J. of the AWRA, 36(1), 31-42.
- Julien, P.Y., and Saghafian, B., 1991. CASC2D user's manual - A two dimensional Watershed rainfall-runoff model. Civil Eng. Report, CER90-91PYJ-BS-12, Colorado State University, Fort Collins, Fort Collins, CO.
- Julien, P.Y., Saghafian, B., and Ogden, F.L., 1995. "Raster-Based hydrologic modeling of spatially-varied surface runoff". Water Resources Bulletin, 31(3), 523-536.
- Kandel, D.D., Western, A., Grayson, R. and Turrall, H., 2004. Process parameterization and temporal scaling in surface runoff and erosion modelling. Special Issue: Scale and Scaling in Hydrology, Hydrological Processes, 18(8), 1423-1446.
- Karavoltzos, S., Sakellari, A., Mihopoulos, N., Dassenakis, M., Scoullou, M., 2008. Evaluation of the quality of drinking water in regions of Greece, Desalination, 224, 317-329.

- Kepner, W., Semmens, D., Bassett, S., Mouat, D., and Goodrich, D., 2004. Scenario Analysis for the San Pedro River, Analyzing Hydrological Consequences of a Future Environment, Environmental Monitoring and Assessment, vol. 94, no. 1-3, pp. 115-127
- Kirkby, M.J., Gallart, F., Kjeldsen, T.R., Irvine, B.J., Froebrich, J., Lo Porto, A., De Girolamo, A., and the MIRAGE team., 2011. Classifying low flow hydrological regimes at a regional scale. Hydrology and Earth System Sciences. 15, 3741–3750.
- Kirkby, M.J., Jones, R.J.A., Irvine, B., Gobin A., 2003. Pan-European Soil Erosion Risk Assessment. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
- Kirkby, M.J., 2005. Organisation and process. In Anderson, M.G. (ed.), Encyclopedia of Hydrological Sciences, Vol. 1. John Wiley, Chichester, UK: 41–58.
- Knisel, W.G., ed. 1980. CREAMS: A Field-Scale Model for Chemical, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems. Conservation Research Report 26, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C.
- Kosmas, C., Dalanatos, N.G., Gerontidis, S.T., 2003. The effect of land parameters on vegetation performance and degree of erosion under Mediterranean conditions. Catena. 40, 3-17.
- Kourgialas, N.N., Karatzas, G.P., and Nikolaidis, N.P., 2010. An integrated framework for the hydrologic simulation of a complex geomorphological river basin, J. Hydrol., 381, 308–321.
- Krueper, D.J. 1995. Effects of Livestock Management on Southwestern riparian ecosystems. In: Desired future conditions for Southwestern riparian ecosystems: Bringing interests and concerns together. D.W. Shaw, and D.M. Finch, tech cords. Sept. 18-22, 1995; Albuquerque, NM. General Technical Report RM-GTR-272. Fort Collins, CO: U.S.Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, 359 p.
- Kuglitsch, F/G., Toreti, A., Xoplaki, E., Della-Marta, P.M., Zerefos, X.A., Turkes, M., Luterbacher, J., 2010. Heat wave changes in the eastern Mediterranean since 1960. Geophys Res Lett 37:L04802.
- Langevin, C.D. and Guo, W., 2006. MODFLOW/MT3DMS-based simulation of variable density ground water flow and transport. Ground Water 44(3), 339–351.
- Larned, S.T., Darty, T., Arscott, D.B., Tockner, T., 2010. Emerging concepts in temporary-river ecology. Freshwater Biology 55: 717-738.

- Leenhouts, J.M., Stromberg, J.C., and Scott, R.L., 2006. Hydrologic requirements of and consumptive groundwater use by riparian vegetation along the San Pedro River, Arizona, U. S. Geol. Surv. Sci. Invest. Rep., 2005– 516, 154 pp.
- Lenderink, G., B. Van den Hurk, E. Van Meijgaard, V. U.A.P., and C.J., 2003. Simulation of present-day climate in RACMO2: First results and model developments. Tech. Rep. TR-252, Royal Netherlands Meteorological Institute.
- Lenhart, T., Eckhardt, K., Fohrer, N. and Frede, H.G., 2002. Comparison of two different approaches of sensitivity analysis. *Physics and Chemistry of the Earth* 27(9-10), 645-654.
- Leonard, R.A., Knisel, W.G., and Still, D.A., 1987. GLEAMS: Groundwater loading effects of agricultural management systems. *Trans. ASAE* 30(5): 1403-1417.
- Leopold, L.B., Wolman, M.G., and Miller, J.B., 1964. *Fluvial Processes in Geomorphology*, W. H. Freeman, San Francisco.
- Franck Lespinas, F., Ludwig, W., and Heussner, S., 2014. Hydrological and climatic uncertainties associated with modeling the impact of climate change on water resources of small Mediterranean coastal rivers. *Journal of Hydrology* Volume 511, 16 April 2014, Pages 403–422
- Horne, R., Strengers, Y., Stempel, A., 2016. Policing and polluting: The role of practices in contemporary urban environmental pollution governance. *Environmental Science & Policy*, Volume 66, December 2016, Pages 112–118
- Li, M., Ma, Z., Du, J., 2010. Regional soil moisture simulation for Shaanxi Province using SWAT model validation and trend analysis. *Sci China Earth Sci* 53:575–590
- Li, L., Shuhan, D., Wu, L., Liu, G., 2009. An overview of soil loss tolerance. *Catena* 78, 93–99
- López-Bermúdez, F., Romero-Díaz, A., Martínez-Fernandez, J., Martínez-Fernandez, J., 1998. Vegetation and soil erosion under a semi-arid Mediterranean climate: a case study from Murcia (Spain). *Geomorphology*. 24, 51-58.
- López-Tarazón, J.A., Batalla, R.J., Vericat, D., Francke, T., 2009. Suspended sediment transport in a highly erodible catchment: The River Isábena (Southern Pyrenees). *Geomorphology*. 109, 210-221.
- Martin-Vide, J.P., Ninerola, D., Bateman, A., Navarro, A., and Velasco, E., 1999. Runoff and sediment transport in a torrential ephemeral stream of the Mediterranean coast, *J. Hydrol.*, 225, 118 – 129.

- McKee, T.B., Doesken, N.J., and Kleist, J., 1993. The relationship of drought frequency and duration of time scales. Eighth Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society, Jan17-23, 1993, Anaheim CA, pp.179-186.
- MEDSPA, 1993. Environmental Protection and Development Programme of the Evrotas River Basin and the Northern Coast of Laconian Bay, Final Report, Oct-1993.
- Mehta, V.K., Walter, M.T., Brooks, E.S., Steenhuis, T.S., Walter, M.F., Johnson, M., Boll, J., and Thongs, D., 2004. Application of SMR to modeling watersheds in the Catskill Mountains, Environ. Model. Assess., 9, 77 – 89.
- Mellerowicz, K.T., Rees, H.W., Chow, T.L., and Ghanem, I., 1994. Soil conservation planning at the watershed level using the USLE with GIS & microcomputer technologies: a case study. J. of Soil & Water Conserv. 49(2):194-200.
- Merritt, W.S., Letcher, R.A., and Jakeman, A.J., 2003. A review of erosion and sediment transport models. Environmental Modelling & Software, 18, 761–799.
- Meyer, J.L, Wallace, J.B., 2001. Lost linkages and lotic ecology: Rediscovering small streams. Pages. 295-317. in Press MC, Huntly NJ, Levin S, eds. Ecology: Achievement and Challenge. Oxford (United Kingdom): Blackwell Scientific.
- Migliaccio, K.W., and Srivastava, P., 2007. Modeling hydrology at the watershed scale. Trans. ASABE 50(5): 1695-1703.
- Mitsova, H., Hofierka, J., Zlocha, M., Iverson, L.R., 1996. Modeling topographic potential for erosion and deposition using GIS. Int. Journal of Geographical Information Science, 10(5), 629-641. (reply to a comment to this paper appears in 1997 in Int. Journal of Geographical Information Science, Vol. 11, No. 6
- Mitsova, H., 2000. Terrain Modelling and Soil Erosion Simulation. Final Report, Geographic Modelling and Systems Laboratory, University of Illinois, Illinois.
- Morgan, R.P.C., Quinton, J.N., Smith, R.E., et al. 1998. The European Soil Erosion Model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. Earth Surface Processes and Landforms 23: 527–44
- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., Veith, T. L., 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations, T. Asabe. 50, 885–900.
- Moriasi, D. N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Binger, R.L., Harmel, R.D., and Veith, T., 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Trans. ASABE 50(3): 885-900.

- Mukundan, R., Radcliffe, D.E., Risse, L.M., 2010. Spatial resolution of soil data and channel erosion effects on SWAT model predictions of flow and sediment. *Journal of Soil and Water Conservation*. 65(2), 92-104.
- Muleta, M.K. and Nicklow, J.W., 2005. Decision support for watershed management using evolutionary algorithms. *Journal of Water Res. Planning and Mgmt.*, ASCE, 131(1): 35-44.
- Myers, N, Mittermeier, R.A, Mittermeier, C.G, da Fonseca, G.A.B, Kent, J., 2000. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature* 403: 853–858
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I-A discussion of principles. *Journal of Hydrology* . 10, 282–290.
- Ndomba, P.M., Mtalo, F.W., Killingtveit, A., 2008. A guided Swat model application on sediment yield modelling in Pangani river basin: Lessons learnt. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, 2 (2), 53-62.
- Nearing, M.A., Foster, G.R., Lane, L.J. and Finkner, S.C., 1989. A process-based soil erosion model for USDA Water Erosion Prediction Project technology. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 32: 1587–93.
- Nearing, M.A., Govers, G. and Norton, L.D., 1999. Variability in soil erosion data from replicated plots. *Soil Science Society of America Journal* 63: 1829–35
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Williams, J.R., 2005a. SWAT theoretical documentation version 2005. Temple, Texas: Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Williams, J.R., 2005b. SWAT input/output file documentation version 2005. Temple, Texas: Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service.
- Nerantzaki, S.D., Giannakis, G.V., Efstathiou, D., Nikolaidis, N.P., Sibetheros, I.A., and Karatzas, G.P., 2015. Modeling suspended sediment transport and assessing the impacts of climate change in a karstic Mediterranean watershed. *Science of the Total Environment*. Volume 538, 15 December 2015, Pages 288–297
- Nerantzaki, S.D., Giannakis, G.V., Nikolaidis, N.P., Zacharias, I., Karatzas, G.P., and Sibetheros, I.A., 2016. Assessing the impact of climate change on sediment loads in a large Mediterranean watershed. *Soil Science Journal*, Vol. 181(7), 306-314, 2016.
- Nichols, M.H., 2006. Measured sediment yield rates from semiarid rangeland watersheds, *Rangeland Ecol. Manage.*, 59, 55–62.

- Nicks, A.D., 1974. Stochastic generation of the occurrence, pattern, and location of maximum amount of daily rainfall Proc. Symp. Statistical Hydrology, Tucson, AZ, August–September, 1971, USDA Misc. Publ/U.S. Gov. Print Office, Washington, DC (1974), pp. 154–171 1275 pp.
- Nikolaidis, N.P., Bouraoui, F., Bidoglio, G., 2013. Hydrologic and geochemical modeling of a karstic Mediterranean watershed. *Journal of Hydrology*. 477, 129-138.
- Nikolaidis, N.P., Bidoglio, G., Bouraoui, F., and Cristina Cardoso, A., 2014. Water Quality of the Mediterranean. In: Ahuja S. (ed.) *Comprehensive Water Quality and Purification*, vol. 4, pp. 230-250. United States of America: Elsevier.
- Nunes, J.P., Seixas, J., Keizer, J.J., 2011. Modeling the response of within-storm runoff and erosion dynamics to climate change in two Mediterranean watersheds: A multi-model, multi-scale approach to scenario design and analysis. *Catena*. 102, 27-39.
- Oeurng, C., Sauvage, S., Sánchez-Pérez, J.M., 2011. Assessment of hydrology and particulate organic carbon yield in a large a large agricultural catchment using the SWAT model. *Journal of Hydrology*. 401, 145-153.
- Ohmart, R.D., 1995. Historical and present impacts of livestock grazing on fish and wildlife resources in western riparian habitats. Pp 245-279, In: P.R. Krausman (ed.). *Rangeland wildlife*. The Society for Range Management, Denver, CO. 440 p.
- Pal, J.S., Giorgi, F., and Bi, X.Q., 2004. Consistency of recent European summer precipitation trends and extremes with future regional climate projections. *Geophys. Res. Lett.*, 31, L13202.
- Palmer, W.C., 1965. Meteorological drought. US Department of Commerce Weather Bureau Research Paper No. 45
- Palmer, W.C., 1968. Keeping track of crop moisture conditions, nationwide: the Crop Moisture Index. *Weatherwise*, 21: 156–161.
- Panagopoulos, Y., Georgiou, E., Grammatikogiannis, A., Polizoi, E., Mimikou, M., 2008. Impacts of human interaction on the sediment transport processes in the Arachtos river basin, Western Greece. *European Water* 21/22, 3-15.
- Pilesjo, P., 1992. GIS and Remote Sensing for Soil Erosion Studies in Semi-Arid Environments, Ph.D. Thesis, University of Lund, Lund, 1992.
- Pisinaras, V., Tsihrintzis, V., Petalas, C., Ouzounis, K., 2010. Soil salinization in the agricultural lands of Rhodope District, northeastern Greece. *Environ. Monit Assess* 166.79-94.

- Prosser, I., and Rustomji, P., 2000. Sediment transport capacity relations for overland flow: Physical Geography, v. 24, p. 179–193
- Pullar, D., Springer, D., 2000. Towards integration GIS and catchment models. Environ Model Softw, 15:451–459
- Quinton, J.N., 1997. Reducing predictive uncertainty in model simulations: a comparison of two methods using the European Soil Erosion Model (EUROSEM). Catena 30 : 101–117.
- Radcliffe, D.E, Freer, J., Schoumans, O., 2009. Diffuse phosphorus models in the United States and Europe: their usages, scales, and uncertainties. J Environ Qual 38:1956–1967.
- Rebetez, M., Mayer, H., Dupont, O., Schindler, D., Gartner, K., Kropp, J., Menzel, A., 2006. Heat and drought 2003 in Europe: a climate synthesis. Ann For Sc 63: 569–577
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K., Yoder D.C., 1997. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). USDA Agr. Handb. No 703, 1997.
- Renard, K.G, Laursen, E.M., 1975. Dynamic behavior model of ephemeral streams. J Hydraul Div ASCE 101(5):511–526
- Rodríguez-Blanco, M.L., Taboada-Castro, M.M., Taboada-Castro, M.T., 2010. Linking the field to the stream: Soil erosion and sediment yield in a rural catchment, NW Spain. Catena. 102, 74-81.
- Roeckner, E., Bäuml, G., Bonaventura, L., Brokopf, R., Esch, M., Giorgetta, M., Hagemann, S., Kirchner, Kornblueh, L., Manzini, E., Rhodin, A., Schlese, U., Schulzweida, U., and Tompkins, A., 2003. The atmospheric general circulation model ECHAM5. Part I: Model description. Max Planck Institute for Meteorology Rep. 349, 127 pp.
- Rojas, R., Feyen, L., Dosio, A., Bavera, D., 2011. Improving pan-European hydrological simulation of extreme events through statistical bias correction of RCM-driven climate simulations. Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss. 8, 3883–3936.
- Rovira, A., Batalla, R.J., 2006. Temporal distribution of suspended sediment transport in a Mediterranean basin: The Lower Tordera (NE SPAIN). Geomorphology. 79, 58-71

- Rummukainen, M., Räisänen, J., Ullerstig, A., Bringfelt, B., Hansson, U., Graham, P. and Willén, U., 1998. RCA-Rossby Centre regional atmospheric climate model: model description and results from the first multi-year simulation. Reports Meteorology and Climatology 83, Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Norrköping, Sweden, p. 76.
- Santhi, C, Arnold, J.G., Williams, J.R., Dugas, W.A., Srinivasan, R. and Hauck, L.M., 2001. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. Journal of the American Water Resources Association 37(5), 1169-1188.
- Schmalz, B., Fohrer, N., 2009. Comparing model sensitivities of different landscapes using the ecohydrological SWAT model. Advances in Geosciences 21, 91-98.
- Schmidt, J., Von Werner M., and Michael, A., 1999. Application of the EROSION 3D model to the CATSOP watershed, The Netherlands. Catena, 37(3-4) : 449-456.
- Schnoor, 1997. Environmental Modeling: Fate and Transport of Pollutants in Water, Air, and Soil. Wiley, John & Sons, Incorporated.
- Schuol, J., and Abbaspour, K.C., 2006. Hydrological model (SWAT) applied to West Africa. Adv. Geosci., 9, 137–143, 2006
- Serpa, D., Nunes, J., Santos, J., Sampaio, E., Jacinto, R., Veiga, S., Lima, J., Moreira, M., Corte-Real, J., Keizer, J., and Abrantes, N., 2015. Impacts of climate and land use changes on the hydrological and erosion processes of two contrasting Mediterranean catchments Science of The Total Environment, Volume 538, 15 December 2015, Pages 64–77
- Setegn, S.G., Darfahi, B., Srinivasan, R., and Melesse, A.M., 2010. Modeling of sediment yield from Anjeni-gauged watershed, Ethiopia using SWAT model, J. Am. Water Resour. Assoc., 46, 514–526.
- Shafer, B.A. and Dezman, L.E., 1982. Development of a surface water supply index (SWSI) to assess the severity of drought conditions in snowpack runoff areas. Proceedings of the Western Snow Conference, 164-175.
- Sharpley, A.N., and Williams, J.R., 1990. EPIC-erosion/productivity Impact Calculator: Z 1.Model Documentation. US dept. Agric.Tech Bull. No 1768.
- Sivapalan, M., Jothityangkoon, C., and Menabde, M., 2012. Linearity and Nonlinearity of Basin Response as a Function of Scale: Discussion of Alternative Definitions. Water Resource Research, Vol. 38, No. 2.

- Skoulidakis, N., Vardakas, L., Karaouzas, I., Economou, A., Dimitriou, E., Zogaris, S., 2011. Assessing water stress in Mediterranean lotic systems: insights from an artificially intermittent river in Greece. *Aquatic Sciences - Research Across Boundaries*. 73, 581-597.
- Skoulidakis, N., Economou, A., Karaouzas, I., Vardakas, L., Gritzalis, K., Zogaris, S., Dimitriou, E., Tachos, V., 2009. Hydrological and Biogeochemical Monitoring in Evrotas Basin. Final Technical Report 1, H.C.M.R. LIFE-ENVIRONMENT: LIFE05 ENV/GR/000245 “ENVIRONMENTAL FRIENDLY TECHNOLOGIES FOR RURAL DEVELOPMENT”, 229 pp
- Smith, R.E., Goodrich, D.C., and Quinton, J.N., 1995. Dynamic, distributed simulation of watershed erosion: The KINEROS2 and EUROSEM models, *Journal of Soil and Water Conservation*, 50(5):517-520.
- Soulis, K.X., Valiantzas, J.D., Dercas, N., and Londra P.A., 2009. Analysis of the runoff generation mechanism for the investigation of the SCS-CN method applicability to a partial area experimental watershed, *Hydrol. Earth Syst. Sc.* 13, 605–615.
- Spruill, C.A., Workman, S.R., and Taraba, J.L., 2000. Simulation of daily and monthly stream discharge from small watersheds using the SWAT model. *Trans. ASAE* 43(6): 1431-1439.
- Srinivasan, M.S., Gerald-Marchant, P., Veith, T.L., Gburek, W.J., Steenhuis, T.S., 2005. Watershed-scale modeling of a critical source areas of runoff generation and phosphorus transport. *Journal of the American Water Resources Association* 41, 361-375.
- Srivastava, A., Hamre, K., Stoss, J., Chakrabarti, R., and Tonheim, S., 2006. Protein content and amino acid composition of the live feed rotifer (*Brachionus plicatilis*): with emphasis on the water soluble fraction. *Aquaculture*, 254, pp. 534–543
- Steppeler, J., Doms, G., Schattler, U., Bitzer, H.W., Gassmann, A., Damrath, U., and Gregoric, G., 2003. Meso gamma scale forecasts by nonhydrostatic model LM, *Meteorol. Atmos. Phys.*, 82, 75–96.
- Sun, R.J and Johnston, 1994. Regional Aquifer-System Analysis Program of the U.S Geological Survey, 1978-1992. U.S Geological Survey Circular 1099.
- Syvitski, J., Peckham, S., Hilberman, R., Mulder, T., 2003. Predicting the terrestrial flux to the global ocean: a planetary perspective. *Sedimentary Geology*. 162, 5-24.
- Kahil, T., Connor, J., Albiac, J., 2015. Efficient water management policies for irrigation adaptation to climate change in Southern Europe. *Ecological Economics*. Volume 120, December 2015, Pages 226–233

- Takeuchi, K., 2004. Importance of sediment research in global water system science. In: Ninth International Symposium on River Sedimentation, Yichang, China (Proceedings).
- Terranova, O., Antronico, L., Coscarelli, R., and Iaquina, P., 2009. Soil erosion risk scenarios in the Mediterranean environment using RUSLE and GIS: An application model for Calabria (southern Italy) Geomorphology, Volume 112, Issues 3–4, 15 November 2009, Pages 228–245
- Tzoraki, O., Nikolaidis, N.P., 2007. A generalized framework for modeling the hydrologic and biogeochemical response of a Mediterranean temporary river basin. Journal of Hydrology. 346, 112-121.
- Tzoraki, O., Papadoulakis, V., Christodoulou, A., Vozinaki, E., Karalemas, N., Gamvroudis, C., and Nikolaidis, N.P., 2011. Hydrologic modelling of a complex hydrogeologic basin: Evrotas River Basin, In: Advances in the Research of Aquatic Environment, Eds: Lambrakis, N., Stournaras, G., Katsanou, K., Springer Berlin Heidelberg, pp. 179-186.
- Tzoraki, O., Cooper, D., Kjeldsen, T., Nikolaidis, N.P., Gamvroudis, C., Froebrich, J., Querner, E., Gallart, F., Karalemas, N. 2013. Flood generation and classification of a semi-arid intermittent flow watershed: Evrotas river. Intl. J. River Basin Management. 11, No. 1, 77–92.
- Tzoraki, O., Nikolaidis, N.P., Cooper, D., Kassotaki, E., 2013. Nutrient mitigation in a temporary river basin. Environ Monit Assess (2014) 186: 2243.
- United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), 1979. Map of the world distribution of arid regions: Map at scale 1:25,000,000 with explanatory note. MAB Technical Notes 7, UNESCO, Paris.
- USDA SCS (Soil Conservation Service), 1972. SCS National Engineering Handbook. Section 4, Hydrology. Washington, DC: USDA.
- Valmis, S., Dimoyiannis, D., Dalanatos, N.G., 2005. Assessing interill erosion rate from soil aggregate instability index, rainfall intensity and slope angle on cultivated soils in central Greece. Soil & Tillage Research. 80, 139-147.
- Van der Perk, M. and Slavik, O., 2003. Simulation of event-based and long-term spatial redistribution of Chernobyl-derived radiocaesium within catchments using geographical information system embedded models. Hydrological Processes 17 (5): 943-957.
- Van Griensven, A., Meixner, T., Grunwald, S., Bishop, T., Diluzio, M. and Srinivasan, R., 2006. A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. Journal of Hydrology 324(1-4), 10-23

- Van Liew, M.W., and Garbrecht, J., 2003. Hydrologic simulation of the Little Washita River experimental watershed using SWAT. J. American Water Resources Assoc. 39(2): 413-426
- Vericat, D., Batalla, R.J., 2010. Sediment transport from continuous monitoring in a perennial Mediterranean stream. Catena. 82, 77-86.
- Vidale, P.L., Luthi, D., Frei, C., Seneviratne, I., Schär, C., 2003. Predictability and uncertainty in a regional climate model. J Geophys Res, Atmos 108, Art. No.–4586
- Viney, N., and Sivapalan, M., 1999. A conceptual model of sediment transport: Application to the Avon River Basin in Western Australia. Hydrological Processes 13(5):727 - 743 · April 1999
- Viney, N., and Sivapalan, M., 2001. Modelling catchment processes in the Swan–Avon river basin, Hydrol. Process, 15, 2671–2685.
- Walker, J., Grimm, N., Briggs, J., Gries, C., and Dugan, L., 2009. Effects of urbanization on plant species diversity in central Arizona. Frontiers in Ecology and the Environment 7: 465–470.
- White, K.L., Chaubey, I., 2005. Sensitivity analysis, calibration and validation for a multisite and multivariable SWAT model. Journal of the American Water Resources Association 41, 1077-1089.
- White, P.J., Hammond, J.P., 2009. The sources of phosphorus in the waters of Great Britain. Journal of Environmental Quality, 38:13-26.
- White, E.D., Feyereisen, G.W., Veith, T.L., and Bosch, D.D., 2009. Improving daily water yield estimates in the Little River watershed: SWAT adjustments. Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers. 52(1), 69-79.
- Whitford, W.G., 2002. Ecology of Desert Systems. Academic Press, San Diego
- Wilkinson, S., Henderson, A., Chen, Y. & Sherman, B. (2004) SedNet User Guide, Version 2. Client Report, CSIRO Land and Water, Canberra, Australia.
- Williams, J., 1975. Sediment Yield Prediction with Universal Equation using Runoff Energy Factor. Agricultural Research Service Report ARS-S-40, U.S. Department of Agriculture
- Winston, R.B. and Voss, C.I., 2003, SutraGUI, a graphical-user interface for SUTRA, a model for groundwater flow with solute or energy transport: U.S. Geological Survey Open-File Report 03-285, 114 p.

- Wischmeier, H., Smith, D., 1965. Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains, Agric. Handbook U.S. Dept. Agric. 282, IV-47.
- Wischmeier, W.H., Smith, D.D., 1978. Predicting rainfall erosion losses – A guide for conservation planning. U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook 537.
- Yachtao, G.A., 2009. Modification of the SWAT model to simulate hydrologic processes in a karst influenced watershed. MS thesis. Blacksburg, Va.: Virginia Tech, Department of Biosystems Engineering.
- Young, R.A., Onstad, C.A., Bosch, D.D., and Anderson, W.P., 1995. AGNPS: An agricultural nonpoint source model. In Computer Models of Watershed Hydrology. Singh, V.P. (ed.). Water Resources Publications. Highlands Ranch, CO. pp. 1011-1020.
- Zanis, P., Kapsomenakis, I., Philandras, C., Douvis, K., Nikolakis, D., Kanellopoulou, E., Zerefos, C., and Repapis, C., 2009. Analysis of an ensemble of present day and future regional climate simulations for Greece. International Journal of Climatology, 29, 1614-33.
- Zarris, D., Lykoudi, E., Panagoulia, D., 2007. Sediment yield estimates in North-Western Greece and analyses with hydrologic and geomorphologic factors. Bulletin of the Geological Society of Greece vol. XXXVII. Proceedings of the 11th International Congress, Athens, May 2007.
- Zerefos, C., Philandras, K., Douvis, C., Kapsomenakis, I., Tselioudis, G., and Eleftheratos, K., 2010. Long term changes of precipitation in Greece. 12th Plinius Conference on Mediterranean Storms, MedCLIVAR session, Corfu, September 3.
- Zhang, R., Moreira, M., and Corte-Real, J., 2015. Multi-objective calibration of the physically based, spatially distributed SHETRAN hydrological model. Journal of Hydroinformatics.
- Zheng, C., 2010. MT3DMS v5.3, a modular three-dimensional multispecies transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in groundwater systems, Supplemental User's Guide. Technical Report prepared for US Army Corps of Engineers, 51 p.

Ελληνική

- Ανδριανάκη Μ., 2007. Ελεγχόμενη Φυσική Αποκατάσταση Ρύπων στη Λεκάνη Απορροής του Ποταμού Ευρώτα. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Χανιά.

- Αντωνάκος Α., 1997. Ρύπανση και μόλυνση του υπόγειου υδροφόρου της ευρύτερης περιοχής Σπάρτης από ανθρωπογενείς δραστηριότητες, Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών Τμήμα Γεωλογίας, ΜΔΕ 'Γεωεπιστήμες & Περιβάλλον', Πάτρα 1997.
- Δουβής Κ., 2009. Μελέτη των ακραίων κλιματικών φαινομένων στην Ελλάδα με μεθόδους υποκλιμάκωσης. Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα.
- Ειδική Γραμματεία Υδάτων., 2013. Σχέδιο Διαχείρισης των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Ανατολικής Πελοποννήσου (ΥΔ 03), Υπουργείο Περιβάλλοντος Ενέργειας & Κλιματικής Αλλαγής.
- Καραλέμας Ν., 2006. Μηχανισμοί λειτουργίας των πηγών του ανατολικού Ταΰγετου, Διατριβή Μεταπτυχιακής Ειδίκευσης, Εθνικό Καποδιστριακό Αθηνών, Σχολή Θετικών Επιστημών.
- Καρατζάς Γ., Αλεξοπούλου Β., και Νικολός Ν., 2009. Διαχείριση Υπογείων Υδάτων με Συνδυασμό Προσομοίωσης και Μεθόδων Βελτιστοποίησης, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Κασσωτάκη Ε., 2011. Ανάπτυξη μεθοδολογίας υπολογισμού ολικών μέγιστων ημερήσιων φορτίων με τη χρήση στατιστικής υδρολογίας και σύνθετων υδρολογικών μοντέλων προσομοίωσης λεκάνης απορροής. Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος.
- Κατσικάκος Γ., 1992. Γεωλογία της Ελλάδας, Αθήνα Χ.Ε.
- Καψωμενάκης Ι., 2009. Εκτίμηση των προβλεπομένων από τα πρότυπα προσομοίωσης κλιματικών αλλαγών στην Ελλάδα με μεθόδους υποκλιμάκωσης. Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα.
- Μαριολάκος Η., Φουντούλης Ι., Ανδρεαδάκης Ε., Σαμπαζιώτης Ε. και Μαυρούλης Σ. 2007. Σχέδιο ολοκληρωμένης διαχείρισης γεωπεριβαλλοντικών επιπτώσεων στις πυρόπληκτες περιοχές του Νομού Λακωνίας. Νομαρχιακή Αυτοδιοίκηση Λακωνίας
- Μαρκαντωνάτος Π., Μπακάλης Ν., Αγγελίδης Μ., 1993. Βιομηχανική Ρύπανση, Πρακτικά συνεδρίου MEDSPA, 6-7 Νοεμβρίου 1993, Σπάρτη.
- Μαυρομιχάλης Α., 1993: Ο ποταμός Ευρώτας και οι επιπτώσεις του στους υδατικούς πόρους, Πρακτικά συνεδρίου MEDSPA, 6-7 Νοεμβρίου 1993, Σπάρτη.

- Νικολαΐδης Ν., Σκουλικίδης Ν., Τσακίρης Κ., και Καλογεράκης Ν., 2006. Προκαταρτικό Σχέδιο Διαχείρισης της Λεκάνης Απορροής του Ποταμού Ευρώτα και της Παράκτιας Ζώνης, Τεχνική έκθεση 242σ. + Παράρτημα 79σ. Στην Έκδοση: Νικολαΐδης Ν., Ν. Καλογεράκης, Ν. Σκουλικίδης, Κ. Τσακίρης, 2005-2009. Τεχνολογίες φιλικές προς το περιβάλλον για αγροτική ανάπτυξη. Πρόγραμμα Life-περιβάλλον, LIFE05ENV/Gr/000245 EE (EnviFriendly).
- Νικολαΐδης Ν., Τζωράκη Ο., Τυροβολά Κ., Σταμάτη Φ., Περουλάκη Ε., Βαλτά Κ., Cassentini B., και Παπαδουλάκης Β., 2007. Τεχνική Έκθεση του Πολυτεχνείου Κρήτης προς τη Ν.Α. Λακωνίας με Αποτελέσματα του Προγράμματος: «Έρευνα, Μετρήσεις και Παροχή Τεχνικών Κατευθύνσεων για την Υλοποίηση Αντιπλημμυρικών Έργων στις Πυρόπληκτες Περιοχές του Νομού Λακωνίας», Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Χανιά.
- Νικολαΐδης Ν., Σκουλικίδης Ν., Παπαδουλάκης Β., Τσακίρης Κ., και Καλογεράκης Ν., 2009. Διαχειριστικά Σχέδια Πιλοτικής Αγροτικής Λεκάνης Ευρώτα Ποταμού. Τεχνική έκθεση 134σ. Στην Έκδοση: Νικολαΐδης Ν., Καλογεράκης Ν., Σκουλικίδης Ν., Τσακίρης Κ., 2005-2009.
- Τεχνολογίες φιλικές προς το περιβάλλον για αγροτική ανάπτυξη. Πρόγραμμα Life-περιβάλλον, LIFE05ENV/Gr/000245 EE (EnviFriendly).
- Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και Συμβούλιο, 2000: Οδηγία 2000/60/ΕΚ για τη θέσπιση πλαισίου κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων, Επίσημη Εφημερίδα των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων.
- Οικονομόπουλος Α., 2001. Ρύπανση και Έλεγχος Ρύπανσης Νερών, Πανεπιστημιακές σημειώσεις μαθήματος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος.
- Πολυχρονάκη Μ., 2011. Μοντελοποίηση της Υπόγειας Ροής της Λεκάνης Απορροής του Ποταμού Ευρώτα. Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος.
- Ρόζος Ε., 2010. Υδρολογική προσομοίωση της ροής σε υδροφορείς υψηλής αβεβαιότητας, Διδακτορική διατριβή, Ε.Μ.Π., Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

**(Αποτελέσματα εργαστηριακών αναλύσεων επιφανειακών και
υπόγειων δειγμάτων)**

«Ολοκληρωμένο πλαίσιο μοντελοποίησης υδρολογίας, ποιότητας νερών και στερεοπαροχής σε λεκάνες απορροής ποταμών διαλείπουσας ροής»

ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ: Πηγή Σκορτσινού											
Μήνας	pH	Conductivity	DO	COD	N-NO ₂ ⁻	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₃	TKN	TN	P-PO ₄	Tphenols
	Τιμή	μS	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Φεβ-09	7,06	564,00	6,30	4,80	0,001	1,529	0,065	0,600	2,130	0,053	-
Μαρ-09	7,30	661,00	7,15	0,00	0,002	1,529	0,020	0,600	2,132	0,034	0,326
Απρ-09	7,37	588,00	6,87	14,06	0,009	1,059	0,012	0,938	2,006	0,051	0,330
Μαϊ-09	7,96	627,00	6,57	0,00	0,004	2,176	0,039	7,333	9,514	0,042	0,330
Ιουν-09	7,94	255,00	6,42	0,00	0,003	1,059	0,010	1,104	2,166	0,032	0,330
Ιουλ-09	7,63	489,00	5,35	4,80	0,003	2,353	0,010	2,833	5,189	0,052	0,330
Αυγ-09	7,13	626,00	7,65	0,00	0,001	0,370	0,189	2,146	2,517	0,007	0,349
Σεπ-09	7,22	587,00	7,76	10,29	0,001	0,412	0,045	0,688	1,100	0,046	0,330
Οκτ-09	7,21	588,00	6,77	0,00	0,001	0,370	0,010	0,600	0,971	0,115	0,965
Νοε-09	7,35	596,00	7,67	9,94	0,001	1,059	0,026	2,875	3,934	0,031	0,330
Δεκ-09	7,58	614,00	11,63	0,00	0,002	1,824	0,006	1,542	3,367	0,047	0,330
Ιαν-10	7,11	607,00	10,98	0,00	0,001	1,059	0,006	1,583	2,643	0,013	0,330
Φεβ-10	7,37	609,00	9,39	0,00	0,001	0,588	0,010	1,271	1,860	0,007	0,093
Μαρ-10	7,69	477,00	9,22	-	0,003	2,706	0,008	1,771	4,480	0,037	0,330
Απρ-10	7,71	615,00	6,08	-	0,003	2,059	0,010	2,521	4,583	0,029	0,330
Μαϊ-10	7,22	620,00	7,45	-	0,001	0,882	0,012	3,875	4,758	0,053	-
Ιουν-10	7,09	448,00	6,66	-	0,015	0,882	0,012	2,083	2,981	0,139	0,330
Ιουλ-10	7,28	619,00	6,37	-	0,013	0,370	0,010	1,583	1,966	0,751	0,330
Αυγ-10	7,28	624,00	7,16	5,62	0,015	0,471	0,010	1,292	1,777	0,007	1,419
Σεπ-10	7,28	890,00	6,79	0,00	0,001	0,647	0,026	-	-	0,059	0,330
Οκτ-10	7,19	676,00	7,46	10,00	0,001	0,370	0,012	-	-	0,007	0,330
Νοε-10	7,19	616,00	7,42	16,00	0,001	0,529	0,010	-	-	0,040	0,330
Δεκ-10	7,43	660,00	10,48	14,04	0,009	1,647	0,248	-	-	0,065	1,349
Φεβ-11	7,26	609,00	8,41	0,00	0,007	2,824	0,047	2,160	4,990	0,092	0,384
Μαρ-11	7,35	619,00	7,88	0,00	0,001	0,824	0,037	2,110	2,935	0,070	0,360
Απρ-11	7,45	613,00	9,22	0,00	0,001	0,706	0,067	1,680	2,387	0,083	1,081
AVERAGE	7,32	596,04	7,74	4,26	0,004	1,166	0,037	1,963	3,199	0,075	0,470
MAX	7,96	890,00	11,63	16,00	0,015	2,824	0,248	7,333	9,514	0,751	1,419
STD	0,24	104,36	1,56	5,71	0,004	0,759	0,057	1,464	1,885	0,142	0,348

«Ολοκληρωμένο πλαίσιο μοντελοποίησης υδρολογίας, ποιότητας νερών και στερεοπαροχής σε λεκάνες απορροής ποταμών διαλείπουσας ροής»

<i>ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ: Βιβάρι Σελλασίας</i>											
Μήνας	pH	Conductivity	DO	COD	N-NO ₂ ⁻	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₃	TKN	TN	P-PO ₄	Tphenols
	<i>Τιμή</i>	<i>μS</i>	<i>mg/L</i>	<i>mg/L</i>	<i>mg/L</i>	<i>mg/L</i>	<i>mg/L</i>	<i>mg/L</i>	<i>mg/L</i>	<i>mg/L</i>	<i>mg/L</i>
Φεβ-09	7,44	517,00	6,56	7,89	0,001	1,412	0,024	0,600	2,013	0,045	-
Μαρ-09	8,01	560,00	6,70	0,00	0,003	1,765	0,014	0,600	2,368	0,039	0,442
Απρ-09	7,76	518,00	7,18	16,46	0,011	2,176	0,045	0,896	3,083	0,029	0,395
Μαϊ-09	8,09	549,00	6,07	15,09	0,003	2,000	0,045	1,979	3,982	0,037	0,407
Ιουν-09	8,20	261,00	6,65	0,00	0,003	0,824	0,020	0,958	1,784	0,035	0,330
Ιουλ-09	7,84	213,00	5,64	11,32	0,002	2,412	0,155	0,896	3,310	0,127	0,330
Αυγ-09	7,34	571,00	7,66	13,03	0,001	0,370	0,033	0,600	0,971	0,007	0,337
Σεπ-09	7,43	511,00	7,62	17,14	0,001	0,647	0,043	0,896	1,544	0,020	0,547
Οκτ-09	7,51	539,00	6,23	0,00	0,003	0,370	0,010	0,600	0,973	0,007	0,767
Νοε-09	7,73	551,00	7,94	5,49	0,001	0,706	0,059	3,542	4,248	0,010	0,330
Δεκ-09	7,25	1180,00	9,39	0,00	0,001	0,412	0,024	1,563	1,975	0,016	0,330
Ιαν-10	7,56	538,00	10,98	5,83	0,001	1,353	0,029	1,979	3,333	0,010	0,330
Φεβ-10	7,61	533,00	9,03	0,00	0,001	0,941	0,022	2,688	3,630	0,007	0,330
Μαρ-10	7,59	549,00	10,01	-	0,003	2,529	0,018	1,875	4,407	0,030	0,372
Απρ-10	7,41	548,00	6,23	-	0,003	2,412	0,045	2,125	4,540	0,041	0,330
Μαϊ-10	7,55	569,00	7,19	-	0,001	1,294	0,033	2,104	3,399	0,028	-
Ιουν-10	7,45	473,00	6,17	-	0,016	0,412	0,094	2,313	2,740	0,340	0,581
Ιουλ-10	7,65	562,00	6,65	-	0,011	0,370	0,026	1,958	2,340	0,264	0,442
Αυγ-10	7,64	566,00	6,87	5,62	0,010	0,370	0,049	1,500	1,880	0,203	0,512
Σεπ-10	7,49	567,00	7,49	7,20	0,001	1,000	0,031	-	-	0,076	1,105
Οκτ-10	7,35	560,00	7,86	0,00	0,001	0,824	0,010	-	-	0,119	0,330
Νοε-10	7,37	569,00	7,93	23,00	0,001	0,824	0,010	-	-	0,027	0,330
Δεκ-10	7,69	563,00	10,31	31,08	0,019	1,824	1,489	4,583	6,426	0,041	0,512
Φεβ-11	7,68	564,00	8,99	0,00	0,006	1,529	0,037	1,220	2,755	0,053	0,628
Μαρ-11	7,75	559,00	8,55	0,00	0,001	1,118	0,155	1,910	3,029	0,034	0,535
Απρ-11	7,73	540,00	8,82	3,77	0,001	0,882	0,059	1,600	2,483	0,046	0,628
AVERAGE	7,57	547,31	7,72	7,76	0,004	1,184	0,099	1,695	2,922	0,065	0,466
MAX	8,20	1180,00	10,98	31,08	0,019	2,529	1,489	4,583	6,426	0,340	1,105
STD	0,23	155,76	1,42	8,79	0,005	0,703	0,286	0,985	1,272	0,083	0,184

«Ολοκληρωμένο πλαίσιο μοντελοποίησης υδρολογίας, ποιότητας νερών και στερεοπαροχής σε λεκάνες απορροής ποταμών διαλείπουσας ροής»

ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ: Στενό Βορδόνιας											
Μήνας	pH	Conductivity	DO	COD	N-NO ₂ ⁻	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₃	TKN	TN	P-PO ₄	Tphenols
	<i>Τιμή</i>	<i>μS</i>	<i>mg/L</i>	<i>mg/L</i>	<i>mg/L</i>	<i>mg/L</i>	<i>mg/L</i>	<i>mg/L</i>	<i>mg/L</i>	<i>mg/L</i>	<i>mg/L</i>
Φεβ-09	7,87	255,00	6,35	41,15	0,003	1,706	0,051	0,600	2,309	0,057	-
Μαρ-09	7,99	542,00	7,72	0,00	0,004	1,294	0,012	0,600	1,898	0,038	0,337
Απρ-09	8,02	482,00	6,99	4,46	0,008	1,765	0,035	0,600	2,373	0,027	0,330
Μαϊ-09	8,08	428,00	6,12	0,00	0,005	1,941	0,094	1,521	3,467	0,038	0,360
Ιουν-09	8,28	552,00	6,47	11,32	0,005	1,706	0,031	1,396	3,107	0,032	0,330
Ιουλ-09	8,20	463,00	4,60	14,06	0,003	2,647	0,010	0,854	3,504	0,046	0,512
Αυγ-09	7,62	583,00	7,73	20,57	0,001	0,370	0,010	1,750	2,121	0,017	0,384
Σεπ-09	7,10	990,00	8,82	5,14	0,001	0,370	0,010	0,917	1,288	0,009	0,330
Οκτ-09	7,78	538,00	6,25	17,49	0,002	0,370	0,010	0,542	0,914	0,010	1,035
Νοε-09	8,04	590,00	7,55	11,66	0,001	1,118	0,028	3,708	4,827	0,012	0,330
Δεκ-09	7,72	1179,00	8,56	6,51	0,001	1,000	0,031	2,750	3,751	0,014	0,330
Ιαν-10	7,69	539,00	10,66	0,00	0,001	0,882	0,035	3,396	4,279	0,019	0,330
Φεβ-10	8,60	438,00	9,51	12,69	0,013	1,294	0,167	3,021	4,328	0,273	0,330
Μαρ-10	8,01	521,00	10,20	-	0,004	2,235	0,024	1,688	3,927	0,027	0,330
Απρ-10	7,88	546,00	6,32	-	0,003	2,235	0,045	2,563	4,801	0,029	0,330
Μαϊ-10	7,87	569,00	7,32	-	0,001	1,765	0,029	3,104	4,869	0,038	-
Ιουν-10	7,41	467,00	6,76	-	0,014	0,370	0,077	2,104	2,488	0,007	0,330
Ιουλ-10	7,84	559,00	5,79	-	0,012	0,370	0,010	1,688	2,069	0,103	0,744
Αυγ-10	7,81	555,00	6,74	5,62	0,012	0,370	0,029	2,688	3,069	0,034	0,384
Σεπ-10	7,61	554,00	7,16	4,11	0,001	0,824	0,053	-	-	0,029	1,081
Οκτ-10	7,45	555,00	7,93	0,00	0,001	1,176	0,010	-	-	0,137	0,330
Νοε-10	7,56	568,00	7,89	0,00	0,001	0,370	0,010	-	-	0,007	0,330
Δεκ-10	7,76	718,00	10,90	19,05	0,026	1,000	0,147	-	-	0,023	0,330
Φεβ-11	8,10	556,00	8,98	0,00	0,013	1,353	0,043	1,160	2,525	0,039	0,395
Μαρ-11	8,04	566,00	8,32	0,00	0,001	0,370	0,031	1,140	1,511	0,038	0,500
Απρ-11	7,82	545,00	9,11	0,00	0,008	0,882	0,045	1,610	2,501	0,009	0,605
AVERAGE	7,75	571,46	7,72	8,28	0,006	1,146	0,042	1,791	2,997	0,043	0,443
MAX	8,60	1179,00	10,90	41,15	0,026	2,647	0,167	3,708	4,869	0,273	1,081
STD	0,30	172,52	1,56	10,26	0,006	0,688	0,040	0,987	1,182	0,055	0,216

«Ολοκληρωμένο πλαίσιο μοντελοποίησης υδρολογίας, ποιότητας νερών και στερεοπαροχής σε λεκάνες απορροής ποταμών διαλείπουσας ροής»

ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ: Κελεφίνα - Βασαράς											
Μήνας	pH	Conductivity	DO	COD	N-NO ₂ ⁻	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₃	TKN	TN	P-PO ₄	Tphenols
	Τμμή	μS	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Φεβ-09	8,09	304,00	5,78	9,94	0,001	0,706	0,028	0,600	1,307	0,019	-
Μαρ-09	8,06	603,00	7,30	0,00	0,002	0,824	0,010	0,600	1,425	0,041	0,419
Απρ-09	8,05	551,00	7,65	15,09	0,008	1,118	0,086	1,125	2,251	0,027	0,330
Μαϊ-09	8,17	613,00	6,13	0,00	0,002	1,176	0,075	1,583	2,762	0,043	0,330
Ιουν-09	8,00	489,00	6,10	0,00	0,003	0,647	0,047	1,083	1,733	0,045	0,360
Ιουλ-09	8,18	530,00	4,90	1,03	0,002	1,353	0,010	1,417	2,772	0,031	0,330
Αυγ-09	7,64	701,00	7,81	0,00	0,001	0,370	0,010	0,600	0,971	0,011	0,326
Σεπ-09	7,61	757,00	8,61	7,89	0,001	0,370	0,024	1,083	1,454	0,014	0,330
Οκτ-09	7,84	669,00	6,70	0,00	0,001	0,370	0,010	0,625	0,996	0,065	0,849
Νοε-09	7,98	539,00	7,70	12,69	0,002	0,412	0,069	3,125	3,539	0,046	0,330
Δεκ-09	8,18	654,00	10,56	2,74	0,001	0,370	0,028	2,167	2,538	0,013	0,330
Ιαν-10	7,90	653,00	10,00	0,00	0,001	0,529	0,026	2,500	3,030	0,014	0,330
Φεβ-10	7,98	633,00	9,27	7,20	0,001	0,471	0,016	2,708	3,180	0,007	0,330
Μαρ-10	7,91	584,00	9,73	-	0,003	2,118	0,018	1,813	3,933	0,040	0,330
Απρ-10	7,90	629,00	6,01	-	0,004	1,000	0,028	-	-	0,023	0,330
Μαϊ-10	7,81	674,00	7,30	-	0,001	1,059	0,053	2,250	3,310	0,053	-
Ιουν-10	7,39	532,00	6,49	-	0,013	0,941	0,049	2,104	3,058	0,007	0,330
Ιουλ-10	7,78	687,00	5,30	-	0,011	0,370	0,010	2,000	2,381	0,007	0,488
Αυγ-10	7,84	693,00	6,68	0,00	0,012	0,412	0,014	1,438	1,861	0,007	0,442
Σεπ-10	7,59	682,00	7,26	0,00	0,001	0,370	0,059	-	-	0,066	0,640
Οκτ-10	7,36	695,00	7,78	0,00	0,001	1,059	0,010	-	-	0,008	0,330
Νοε-10	7,55	709,00	7,28	26,00	0,001	0,370	0,010	-	-	0,017	0,330
Δεκ-10	7,80	696,00	10,50	17,04	0,011	1,118	0,134	0,600	1,729	0,107	0,326
Φεβ-11	7,89	724,00	8,77	0,00	0,017	0,370	0,071	0,600	0,987	0,011	0,860
Μαρ-11	7,96	709,00	8,32	0,00	0,001	0,370	0,033	1,640	2,011	0,048	0,430
Απρ-11	7,75	686,00	8,71	1,03	0,004	1,176	0,059	0,598	1,779	0,023	0,756
AVERAGE	7,79	630,62	7,64	4,79	0,004	0,748	0,038	1,466	2,228	0,030	0,424
MAX	8,18	757,00	10,56	26,00	0,017	2,118	0,134	3,125	3,933	0,107	0,860
STD	0,23	96,35	1,56	7,40	0,005	0,440	0,031	0,785	0,882	0,024	0,171

«Ολοκληρωμένο πλαίσιο μοντελοποίησης υδρολογίας, ποιότητας νερών και στερεοπαροχής σε λεκάνες απορροής ποταμών διαλείπουσας ροής»

ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ: Κελεφίνα - Κλαδάς											
Μήνας	pH	Conductivity	DO	COD	N-NO ₂ ⁻	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₃	TKN	TN	P-PO ₄	Tphenols
	Τιμή	μS	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Φεβ-09	8,28	491,00	6,60	3,43	0,001	0,941	0,022	0,750	1,692	0,042	-
Μαρ-09	7,89	475,00	4,06	0,00	0,002	0,882	0,051	0,600	1,485	0,028	0,330
Απρ-09	8,01	503,00	6,90	17,14	0,007	1,235	0,069	0,875	2,118	0,032	0,330
Μαϊ-09	8,23	566,00	6,30	15,09	0,006	0,370	0,067	1,417	1,793	0,037	0,330
Ιουν-09	8,25	569,00	6,55	0,00	0,003	0,529	0,112	0,896	1,429	0,028	1,070
Ιουλ-09	8,25	482,00	4,50	14,06	0,004	1,706	0,010	1,083	2,793	0,039	0,330
Αυγ-09	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Σεπ-09	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Οκτ-09	7,80	588,00	5,92	0,00	0,001	0,370	0,010	0,729	1,101	0,039	0,802
Νοε-09	7,22	200,40	7,14	13,37	0,001	0,370	0,069	1,854	2,225	0,071	0,453
Δεκ-09	8,01	563,00	11,22	0,00	0,001	0,370	0,037	1,792	2,163	0,014	0,330
Ιαν-10	7,97	552,00	10,35	7,89	0,001	0,370	0,035	2,292	2,663	0,012	0,330
Φεβ-10	8,08	557,00	9,65	1,37	0,001	0,412	0,120	2,396	2,809	0,007	0,349
Μαρ-10	8,02	492,00	10,06	-	0,003	1,176	0,057	1,917	3,096	0,020	0,330
Απρ-10	7,92	520,00	6,61	-	0,003	1,000	0,055	-	-	0,040	0,330
Μαϊ-10	7,86	563,00	7,18	-	0,001	1,353	0,041	2,000	3,354	0,046	-
Ιουν-10	7,49	505,00	6,31	-	0,012	0,370	0,016	1,583	1,965	0,688	0,330
Ιουλ-10	7,90	590,00	6,39	-	0,012	0,370	0,022	2,208	2,590	0,486	0,640
Αυγ-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Σεπ-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Οκτ-10	7,73	723,00	7,84	14,00	0,001	0,370	0,010	-	-	0,085	0,330
Νοε-10	7,52	623,00	7,18	12,00	0,001	0,370	0,010	-	-	0,007	0,330
Δεκ-10	7,91	630,00	10,50	3,01	0,027	1,000	0,106	0,750	1,777	0,019	0,330
Φεβ-11	8,21	634,00	8,47	0,00	0,007	1,294	0,037	0,600	1,901	0,043	0,372
Μαρ-11	8,03	562,00	8,27	0,00	0,001	0,370	0,026	0,600	0,971	0,034	0,477
Απρ-11	7,73	549,00	8,78	15,77	0,001	0,824	0,057	0,634	1,459	0,043	0,419
AVERAGE	7,83	542,61	7,58	6,89	0,005	0,730	0,047	1,315	2,073	0,085	0,427
MAX	8,28	723,00	11,22	17,14	0,027	1,706	0,120	2,396	3,354	0,688	1,070
STD	0,27	96,65	1,90	6,91	0,006	0,424	0,033	0,656	0,669	0,167	0,195

«Ολοκληρωμένο πλαίσιο μοντελοποίησης υδρολογίας, ποιότητας νερών και στερεοπαροχής σε λεκάνες απορροής ποταμών διαλείπουσας ροής»

ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ: Ανάντη της Γέφυράς Σπάρτης											
Μήνας	pH	Conductivity	DO	COD	N-NO ₂ ⁻	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₃	TKN	TN	P-PO ₄	Tphenols
	Τιμή	μS	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Φεβ-09	8,21	516,00	5,67	26,74	0,001	1,176	0,088	0,625	1,802	0,051	-
Μαρ-09	8,03	568,00	6,11	0,00	0,003	1,176	0,014	0,600	1,780	0,036	0,512
Απρ-09	8,07	551,00	7,01	13,72	0,008	1,588	0,045	0,600	2,197	0,028	0,330
Μαϊ-09	8,20	559,00	6,20	0,00	0,004	1,412	0,047	3,438	4,853	0,033	0,330
Ιουν-09	8,29	576,00	6,72	0,00	0,002	1,706	0,047	1,188	2,895	0,034	0,330
Ιουλ-09	8,18	463,00	4,30	21,60	0,003	2,412	0,010	0,792	3,207	0,060	0,330
Αυγ-09	7,76	608,00	7,01	0,69	0,002	0,765	0,020	0,600	1,367	0,007	0,330
Σεπ-09	7,61	580,00	7,63	0,00	0,001	0,824	0,031	0,854	1,679	0,012	0,330
Οκτ-09	7,67	577,00	5,91	0,00	0,005	0,370	0,208	0,792	1,167	0,098	1,023
Νοε-09	8,02	505,00	6,85	9,94	0,018	0,706	0,045	1,813	2,537	0,037	0,330
Δεκ-09	7,94	555,00	10,91	2,06	0,003	0,824	0,155	3,313	4,139	0,028	0,330
Ιαν-10	8,00	539,00	10,31	0,00	0,001	0,882	0,028	1,521	2,404	0,015	0,330
Φεβ-10	7,99	545,00	9,35	6,17	0,006	1,118	0,088	18,125	19,249	0,020	0,419
Μαρ-10	7,99	487,00	10,07	-	0,006	1,824	0,012	1,729	3,558	0,018	0,330
Απρ-10	7,96	535,00	7,05	-	0,003	2,647	0,022	-	-	0,045	0,330
Μαϊ-10	7,83	582,00	6,93	-	0,002	1,647	0,130	1,188	2,836	0,048	-
Ιουν-10	7,23	458,00	6,56	-	0,013	0,824	0,039	1,854	2,691	0,007	0,330
Ιουλ-10	7,90	583,00	6,37	-	0,011	0,370	0,024	1,479	1,861	0,646	0,330
Αυγ-10	7,93	594,00	6,49	0,00	0,014	0,706	0,018	2,063	2,782	0,335	1,558
Σεπ-10	7,72	584,00	6,77	0,00	0,001	0,529	0,045	-	-	0,031	0,593
Οκτ-10	7,66	594,00	7,69	0,00	0,001	1,235	0,010	-	-	0,147	0,330
Νοε-10	7,82	706,00	7,68	143,00	0,001	0,370	0,006	-	-	0,007	0,330
Δεκ-10	7,70	595,00	10,02	0,00	0,013	1,353	0,807	3,083	4,449	0,044	0,395
Φεβ-11	8,01	619,00	8,15	0,00	0,017	0,370	0,045	0,624	1,011	0,062	0,465
Μαρ-11	8,04	558,00	6,72	0,00	0,001	0,370	0,043	1,000	1,371	0,039	0,733
Απρ-11	7,64	550,00	9,01	10,97	0,007	0,941	0,028	1,850	2,798	0,059	0,330
AVERAGE	7,83	561,04	7,44	11,19	0,006	1,082	0,079	2,233	3,301	0,075	0,457
MAX	8,29	706,00	10,91	143,00	0,018	2,647	0,807	18,125	19,249	0,646	1,558
STD	0,23	50,92	1,61	31,19	0,005	0,615	0,156	3,656	3,711	0,133	0,287

«Ολοκληρωμένο πλαίσιο μοντελοποίησης υδρολογίας, ποιότητας νερών και στερεοπαροχής σε λεκάνες απορροής ποταμών διαλείπουσας ροής»

ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ: Ψυχικό Σπάρτης - Ευρώτας											
Μήνας	pH	Conductivity	DO	COD	N-NO ₂ ⁻	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₃	TKN	TN	P-PO ₄	Tphenols
	Τμμή	μS	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Φεβ-09	7,82	254,00	6,45	0,69	0,001	1,882	0,077	0,833	2,717	0,043	-
Μαρ-09	7,16	273,00	7,47	0,00	0,004	1,882	0,008	0,600	2,486	0,064	0,330
Απρ-09	8,17	518,00	6,68	15,43	0,024	2,706	0,063	0,600	3,330	0,060	0,330
Μαϊ-09	8,15	597,00	6,17	0,00	0,208	2,471	0,033	1,417	4,096	0,063	0,330
Ιουν-09	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ιουλ-09	8,06	476,00	4,80	1,71	0,174	3,765	0,242	0,938	4,877	0,184	0,384
Αυγ-09	7,55	638,00	7,70	5,49	0,004	0,370	0,055	0,600	0,974	0,133	0,349
Σεπ-09	7,28	564,00	6,60	0,00	0,001	2,882	0,033	0,917	3,800	0,199	0,430
Οκτ-09	7,66	571,00	5,43	0,00	0,001	0,941	0,086	0,896	1,838	0,104	0,953
Νοε-09	8,07	354,00	4,76	17,83	0,007	1,706	0,717	2,208	3,922	0,075	0,221
Δεκ-09	8,05	950,00	13,41	12,34	0,001	1,000	0,029	1,833	2,835	0,048	0,453
Ιαν-10	8,01	555,00	11,34	0,00	0,007	1,059	0,259	1,896	2,962	0,031	0,256
Φεβ-10	7,97	536,00	9,61	17,14	0,001	2,412	0,012	1,813	4,225	0,082	0,523
Μαρ-10	8,10	545,00	9,92	-	0,067	2,824	0,020	1,396	4,287	0,020	0,330
Απρ-10	7,86	565,00	6,03	-	0,373	0,370	0,092	2,688	3,430	0,037	0,330
Μαϊ-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ιουν-10	7,47	495,00	6,18	-	0,021	1,059	0,024	2,542	3,622	0,139	0,326
Ιουλ-10	7,85	977,00	6,28	-	0,017	0,370	0,028	2,167	2,554	0,292	0,535
Αυγ-10	7,91	769,00	6,20	0,00	0,107	0,370	0,026	-	-	0,112	0,512
Σεπ-10	7,70	607,00	7,15	7,20	0,001	1,588	0,049	-	-	0,127	0,535
Οκτ-10	7,37	602,00	6,94	0,00	0,001	0,647	0,018	-	-	0,435	0,330
Νοε-10	7,58	605,00	6,74	100,00	0,002	0,529	0,026	-	-	0,049	0,330
Δεκ-10	7,92	603,00	10,16	0,00	0,074	1,706	0,143	10,000	11,780	0,057	0,453
Φεβ-11	8,06	578,00	7,59	0,00	0,110	2,412	0,033	1,780	4,302	0,064	0,372
Μαρ-11	8,05	506,00	7,24	0,00	0,007	0,370	0,049	1,060	1,437	0,030	0,616
Απρ-11	7,90	511,00	8,89	0,00	0,001	0,824	0,047	0,717	1,542	0,062	0,442
AVERAGE	7,72	568,71	7,49	8,89	0,051	1,506	0,090	1,845	3,551	0,105	0,420
MAX	8,17	977,00	13,41	100,00	0,373	3,765	0,717	10,000	11,780	0,435	0,953
STD	0,29	164,35	2,09	22,37	0,090	0,993	0,149	2,032	2,217	0,095	0,153

«Ολοκληρωμένο πλαίσιο μοντελοποίησης υδρολογίας, ποιότητας νερών και στερεοπαροχής σε λεκάνες απορροής ποταμών διαλείπουσας ροής»

<i>ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ: Μαγουλίτσα - Αγία Ειρήνη</i>											
Μήνας	pH	Conductivity	DO	COD	N-NO ₂ ⁻	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₃	TKN	TN	P-PO ₄	Tphenols
	<i>Τιμή</i>	<i>μS</i>	<i>mg/L</i>	<i>mg/L</i>	<i>mg/L</i>	<i>mg/L</i>	<i>mg/L</i>	<i>mg/L</i>	<i>mg/L</i>	<i>mg/L</i>	<i>mg/L</i>
Φεβ-09	8,21	315,00	6,44	0,00	0,001	0,882	0,012	0,600	1,483	0,055	-
Μαρ-09	8,06	306,00	7,30	0,00	0,002	1,000	0,047	0,600	1,602	0,024	0,105
Απρ-09	8,33	303,00	7,44	17,14	0,010	1,706	0,028	0,600	2,315	0,030	0,140
Μαϊ-09	8,28	335,00	6,34	13,37	0,004	1,588	0,096	1,021	2,613	0,039	0,070
Ιουν-09	8,25	176,40	6,20	0,00	0,003	2,529	0,014	1,063	3,595	0,038	0,256
Ιουλ-09	8,21	193,00	4,75	18,86	0,003	2,353	0,010	0,833	3,189	0,033	0,733
Αυγ-09	7,72	385,00	7,79	0,00	0,001	0,370	0,010	0,600	0,971	0,019	0,884
Σεπ-09	7,77	370,00	6,98	0,00	0,001	0,765	0,031	1,000	1,766	0,017	0,221
Οκτ-09	7,96	381,00	6,31	0,00	0,001	0,370	0,081	1,104	1,475	0,021	0,628
Νοε-09	8,03	335,00	7,58	12,00	0,001	0,370	0,083	1,750	2,121	0,030	BDL
Δεκ-09	8,07	319,00	10,00	0,00	0,001	0,765	0,014	2,625	3,391	0,019	0,151
Ιαν-10	8,07	332,00	11,06	0,00	0,001	0,370	0,028	2,167	2,538	0,012	0,314
Φεβ-10	8,07	354,00	9,71	10,63	0,004	0,824	0,010	2,021	2,848	BDL	0,209
Μαρ-10	8,01	330,00	10,26	-	0,004	2,000	0,010	2,021	4,025	0,025	BDL
Απρ-10	8,03	344,00	6,37	-	0,004	1,824	0,016	2,604	4,431	0,026	BDL
Μαϊ-10	8,05	396,00	6,92	-	0,001	1,529	0,055	1,688	3,217	0,041	-
Ιουν-10	7,31	277,00	6,13	-	0,012	0,412	0,020	1,854	2,278	BDL	0,407
Ιουλ-10	7,93	382,00	6,28	-	0,011	0,370	0,010	1,708	2,089	BDL	0,605
Αυγ-10	7,94	390,00	6,39	0,00	0,016	0,370	0,043	-	-	BDL	0,558
Σεπ-10	7,82	408,00	7,26	0,00	0,001	0,370	0,065	-	-	0,028	0,605
Οκτ-10	7,69	406,00	7,60	0,00	0,001	0,370	0,006	-	-	BDL	0,093
Νοε-10	7,81	421,00	7,13	34,00	0,001	0,370	0,012	-	-	BDL	0,140
Δεκ-10	8,19	391,00	11,16	66,17	0,025	3,118	0,067	2,396	5,539	0,034	0,640
Φεβ-11	8,18	344,00	8,37	0,00	0,002	1,059	0,008	0,600	1,661	0,458	0,814
Μαρ-11	8,10	330,00	7,92	0,00	0,003	0,370	0,010	0,600	0,973	0,047	0,942
Απρ-11	8,23	321,00	9,17	0,00	0,002	0,765	0,077	0,600	1,367	0,004	1,616
AVERAGE	7,94	340,17	7,65	8,20	0,004	1,031	0,033	1,366	2,522	0,050	0,482
MAX	8,33	421,00	11,16	66,17	0,025	3,118	0,096	2,625	5,539	0,458	1,616
STD	0,23	58,99	1,65	16,14	0,006	0,799	0,028	0,727	1,173	0,097	0,384

«Ολοκληρωμένο πλαίσιο μοντελοποίησης υδρολογίας, ποιότητας νερών και στερεοπαροχής σε λεκάνες απορροής ποταμών διαλείπουσας ροής»

<i>ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ: Μαγουλίτσα πρίν τη συμβολή με τον Ευρώτα</i>											
Μήνας	pH	Conductivity	DO	COD	N-NO ₂ ⁻	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₃	TKN	TN	P-PO ₄	Tphenols
	<i>Τμή</i>	<i>μS</i>	<i>mg/L</i>	<i>mg/L</i>	<i>mg/L</i>	<i>mg/L</i>	<i>mg/L</i>	<i>mg/L</i>	<i>mg/L</i>	<i>mg/L</i>	<i>mg/L</i>
Φεβ-09	8,12	239,00	6,45	29,83	0,001	1,824	0,055	0,600	2,425	0,057	-
Μαρ-09	8,21	356,00	6,68	0,00	0,003	1,529	0,151	0,600	2,133	0,050	0,372
Απρ-09	8,36	326,00	7,21	17,14	0,008	1,824	0,012	0,604	2,436	0,033	0,330
Μαϊ-09	8,29	366,00	6,35	0,00	0,003	1,471	0,041	1,063	2,536	0,039	0,330
Ιουν-09	8,31	343,00	6,74	0,00	0,005	1,471	0,014	1,896	3,371	0,030	0,791
Ιουλ-09	7,84	491,00	4,35	18,86	0,003	2,176	0,010	0,625	2,804	0,058	0,330
Αυγ-09	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Σεπ-09	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Οκτ-09	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Νοε-09	8,18	306,00	7,36	10,63	0,001	0,471	0,049	1,479	1,951	0,283	0,442
Δεκ-09	8,07	341,00	10,78	0,69	0,001	0,412	0,016	2,646	3,058	0,102	0,330
Ιαν-10	8,01	346,00	10,34	0,00	0,001	1,059	0,022	2,771	3,831	0,010	0,442
Φεβ-10	8,06	369,00	9,76	12,69	0,001	1,000	0,008	1,604	2,605	0,007	0,330
Μαρ-10	7,92	281,00	6,46	-	0,004	2,000	0,028	1,875	3,879	0,020	0,330
Απρ-10	8,05	374,00	6,49	-	0,006	1,647	0,059	2,563	4,215	0,024	0,330
Μαϊ-10	8,00	418,00	6,74	-	0,031	1,588	0,063	3,417	5,036	0,041	-
Ιουν-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ιουλ-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Αυγ-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Σεπ-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Οκτ-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Νοε-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Δεκ-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Φεβ-11	8,10	372,00	7,87	0,00	0,011	1,353	0,033	0,854	2,218	0,013	0,663
Μαρ-11	8,28	358,00	8,15	0,00	0,001	0,370	0,045	0,868	1,239	0,056	0,558
Απρ-11	8,00	215,00	9,23	2,06	0,001	1,000	0,077	0,600	1,601	0,007	0,330
AVERAGE	8,09	343,81	7,56	7,07	0,005	1,325	0,043	1,504	2,834	0,052	0,422
MAX	8,36	491,00	10,78	29,83	0,031	2,176	0,151	3,417	5,036	0,283	0,791
STD	0,15	65,13	1,71	9,87	0,007	0,559	0,036	0,933	1,012	0,066	0,148

«Ολοκληρωμένο πλαίσιο μοντελοποίησης υδρολογίας, ποιότητας νερών και στερεοπαροχής σε λεκάνες απορροής ποταμών διαλείπουσας ροής»

ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ: Κουμουτσά - Ρασίνα											
Μήνας	pH	Conductivity	DO	COD	N-NO ₂ ⁻	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₃	TKN	TN	P-PO ₄	Tphenols
	Τιμή	μS	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Φεβ-09	8,29	179,00	7,11	31,54	0,001	0,765	0,073	0,600	1,366	0,050	-
Μαρ-09	8,06	236,00	8,13	0,00	0,002	0,588	0,035	0,600	1,190	0,033	0,330
Απρ-09	8,20	207,40	7,32	15,77	0,008	1,000	0,039	0,600	1,608	0,035	0,330
Μαϊ-09	8,37	253,00	6,38	0,00	0,002	1,176	0,063	1,125	2,304	0,039	0,330
Ιουν-09	8,29	236,00	6,29	0,00	0,002	0,370	0,045	1,750	2,122	0,030	0,330
Ιουλ-09	8,17	152,90	4,60	5,83	0,002	1,647	0,010	0,600	2,249	0,023	0,330
Αυγ-09	7,92	292,00	7,73	0,00	0,001	0,370	0,014	0,600	0,971	0,007	0,330
Σεπ-09	7,27	549,00	7,37	1,71	0,001	0,370	0,010	1,063	1,434	0,017	0,330
Οκτ-09	8,04	234,00	5,58	11,32	0,006	0,647	0,130	0,792	1,444	0,012	0,500
Νοε-09	8,22	289,00	7,68	6,17	0,001	0,370	0,026	1,438	1,809	0,297	0,570
Δεκ-09	7,96	258,00	11,15	2,74	0,001	0,370	0,016	1,479	1,850	0,015	0,581
Ιαν-10	8,05	262,00	10,14	0,00	0,001	0,412	0,012	3,750	4,163	0,009	0,330
Φεβ-10	7,89	244,00	8,96	7,89	0,001	0,370	0,031	1,417	1,788	0,007	0,330
Μαρ-10	7,96	260,00	10,37	-	0,003	1,118	0,061	2,625	3,746	0,024	0,330
Απρ-10	8,11	247,00	6,61	-	0,003	1,176	0,026	-	-	0,018	0,330
Μαϊ-10	8,04	272,00	6,95	-	0,004	1,059	0,029	1,875	2,938	0,025	-
Ιουν-10	7,81	218,00	6,44	-	0,010	0,370	0,020	1,854	2,235	0,007	0,384
Ιουλ-10	8,10	291,00	6,49	-	0,012	0,370	0,012	2,146	2,528	0,513	3,581
Αυγ-10	8,15	302,00	6,55	0,00	0,012	0,370	0,024	-	-	0,134	0,430
Σεπ-10	8,09	302,00	7,35	6,86	0,001	0,706	0,039	-	-	0,037	0,330
Οκτ-10	7,87	290,00	7,79	50,00	0,001	0,370	0,010	-	-	0,344	0,330
Νοε-10	7,83	385,00	7,18	18,00	0,001	0,370	0,010	-	-	0,012	0,330
Δεκ-10	8,26	313,00	10,88	95,24	0,014	0,370	0,096	1,292	1,676	0,018	0,330
Φεβ-11	8,24	256,00	8,42	0,00	0,008	0,765	0,035	0,600	1,372	0,076	0,523
Μαρ-11	8,25	257,00	8,15	0,00	0,001	0,370	0,029	0,861	1,232	0,029	0,721
Απρ-11	8,19	250,00	9,42	0,00	0,001	0,370	0,102	0,600	0,971	0,009	0,651
AVERAGE	7,99	270,59	7,73	12,05	0,004	0,625	0,038	1,317	1,952	0,070	0,537
MAX	8,37	549,00	11,15	95,24	0,014	1,647	0,130	3,750	4,163	0,513	3,581
STD	0,22	72,51	1,62	22,81	0,004	0,359	0,032	0,817	0,843	0,123	0,659

«Ολοκληρωμένο πλαίσιο μοντελοποίησης υδρολογίας, ποιότητας νερών και στερεοπαροχής σε λεκάνες απορροής ποταμών διαλείπουσας ροής»

ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ: Αεροδρόμιο - Ρασίνα											
Μήνας	pH	Conductivity	DO	COD	N-NO ₂ ⁻	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₃	TKN	TN	P-PO ₄	Tphenols
	Τιμή	μS	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Φεβ-09	7,81	363,00	4,83	0,00	0,001	2,059	0,039	0,600	2,660	0,038	-
Μαρ-09	7,94	428,00	4,75	0,00	0,033	2,471	0,043	0,625	3,129	0,031	0,698
Απρ-09	8,22	347,00	7,35	16,80	0,011	1,706	0,029	0,600	2,317	0,027	0,570
Μαϊ-09	8,32	423,00	6,04	0,69	0,003	1,647	0,110	1,875	3,525	0,036	0,330
Ιουν-09	8,01	314,00	6,73	12,69	0,011	0,882	0,033	1,146	2,039	0,037	0,330
Ιουλ-09	8,14	565,00	4,55	45,26	0,005	2,294	0,523	0,600	2,899	0,051	0,430
Αυγ-09	7,82	907,00	7,23	56,23	0,001	0,370	0,411	0,600	0,971	0,582	1,058
Σεπ-09	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Οκτ-09	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Νοε-09	8,17	423,00	7,29	11,66	0,004	0,370	0,057	1,333	1,708	0,240	0,330
Δεκ-09	7,98	441,00	11,12	1,37	0,037	1,235	0,090	1,792	3,064	0,017	0,488
Ιαν-10	7,90	367,00	10,17	0,00	0,002	1,118	0,083	4,146	5,266	0,107	0,349
Φεβ-10	8,07	394,00	9,04	10,97	0,016	0,370	0,022	1,521	1,906	0,007	0,779
Μαρ-10	8,07	377,00	10,46	-	0,005	2,235	0,020	1,646	3,886	0,025	1,105
Απρ-10	8,05	419,00	6,78	-	0,016	1,529	0,112	1,854	3,400	0,018	0,330
Μαϊ-10	7,79	651,00	6,81	-	0,036	1,471	0,238	2,063	3,569	0,050	-
Ιουν-10	7,64	546,00	7,11	-	0,048	0,529	0,153	2,458	3,036	0,007	0,500
Ιουλ-10	7,91	866,00	6,35	-	0,044	0,370	0,006	2,458	2,873	0,446	0,605
Αυγ-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Σεπ-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Οκτ-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Νοε-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Δεκ-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Φεβ-11	8,02	396,00	7,04	0,00	0,017	1,412	0,049	1,390	2,819	0,120	0,872
Μαρ-11	8,20	455,00	8,06	0,00	0,001	0,370	0,039	1,060	1,431	0,059	0,326
Απρ-11	8,07	381,00	8,74	6,17	0,002	1,294	0,108	1,120	2,416	0,007	0,953
AVERAGE	7,97	477,00	7,39	11,56	0,015	1,249	0,114	1,520	2,785	0,100	0,591
MAX	8,32	907,00	11,12	56,23	0,048	2,471	0,523	4,146	5,266	0,582	1,105
STD	0,17	165,60	1,85	17,71	0,016	0,718	0,137	0,883	0,977	0,157	0,272

«Ολοκληρωμένο πλαίσιο μοντελοποίησης υδρολογίας, ποιότητας νερών και στερεοπαροχής σε λεκάνες απορροής ποταμών διαλείπουσας ροής»

ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ: Γέφυρα Βρονταμά											
Μήνας	pH	Conductivity	DO	COD	N-NO ₂ ⁻	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₃	TKN	TN	P-PO ₄	Tphenols
	Τμμή	μS	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Φεβ-09	7,88	428,00	5,49	0,00	0,001	1,529	0,031	0,600	2,130	0,076	-
Μαρ-09	7,97	534,00	7,39	0,00	0,002	1,294	0,028	0,688	1,984	0,047	0,330
Απρ-09	8,06	509,00	6,49	10,97	0,019	2,882	0,047	0,604	3,505	0,028	0,384
Μαϊ-09	8,20	570,00	5,87	0,00	0,003	2,941	0,114	1,167	4,110	0,038	0,330
Ιουν-09	8,25	560,00	6,52	3,77	0,014	2,294	0,088	1,583	3,891	0,034	0,337
Ιουλ-09	8,15	441,00	4,80	2,06	0,111	3,647	0,043	0,600	4,358	0,049	0,330
Αυγ-09	7,70	607,00	7,40	0,34	0,005	0,706	0,071	0,600	1,311	0,070	0,330
Σεπ-09	7,76	598,00	7,06	0,00	0,001	1,294	0,049	1,333	2,629	0,029	0,330
Οκτ-09	7,89	578,00	6,48	0,00	0,002	0,471	0,055	1,188	1,660	0,108	1,151
Νοε-09	8,09	557,00	7,35	7,89	0,059	1,412	0,057	1,667	3,138	0,118	0,616
Δεκ-09	7,99	579,00	11,84	0,00	0,004	1,471	0,037	2,083	3,558	0,025	0,407
Ιαν-10	7,93	531,00	10,99	0,00	0,006	1,941	0,045	2,438	4,385	0,014	0,453
Φεβ-10	7,59	669,00	9,49	8,57	0,156	3,294	0,041	1,667	5,117	0,007	0,330
Μαρ-10	8,12	546,00	10,14	-	0,047	3,176	0,028	1,354	4,577	0,024	0,330
Απρ-10	8,05	578,00	6,88	-	0,104	1,706	0,035	-	-	0,042	0,330
Μαϊ-10	7,92	633,00	6,82	-	0,188	3,412	0,037	3,229	6,829	0,158	-
Ιουν-10	7,41	460,00	6,38	-	0,028	1,353	0,033	3,958	5,339	0,254	0,442
Ιουλ-10	8,00	614,00	5,94	-	0,013	0,412	0,035	2,292	2,716	0,007	0,767
Αυγ-10	7,95	601,00	6,41	0,00	0,016	0,370	0,033	-	-	0,007	0,360
Σεπ-10	7,92	596,00	7,16	13,03	0,006	0,370	0,047	-	-	0,056	0,349
Οκτ-10	7,79	628,00	7,58	0,00	0,005	0,882	0,010	-	-	0,265	0,330
Νοε-10	7,72	606,00	7,82	23,00	0,001	0,370	0,010	-	-	0,016	0,330
Δεκ-10	7,96	632,00	10,22	0,00	0,004	1,118	0,110	6,250	7,372	0,017	0,547
Φεβ-11	7,84	622,00	6,39	0,00	0,060	2,176	0,051	1,250	3,487	0,034	0,756
Μαρ-11	8,07	552,00	7,72	0,00	0,012	0,370	0,047	1,300	1,682	0,062	0,419
Απρ-11	8,03	580,00	8,88	0,00	0,009	1,706	0,053	1,620	3,335	0,061	1,186
AVERAGE	7,89	569,58	7,52	3,32	0,034	1,638	0,048	1,784	3,672	0,063	0,478
MAX	8,25	669,00	11,84	23,00	0,188	3,647	0,114	6,250	7,372	0,265	1,186
STD	0,19	59,20	1,74	6,09	0,051	1,054	0,025	1,343	1,610	0,068	0,249

«Ολοκληρωμένο πλαίσιο μοντελοποίησης υδρολογίας, ποιότητας νερών και στερεοπαροχής σε λεκάνες απορροής ποταμών διαλείπουσας ροής»

<i>ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ: Ανάντη της Κελεφίνας-Πηγάδι (Π1)</i>											
Μήνας	pH	Conductivity	DO	COD	N-NO ₂ ⁻	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₃	TKN	TN	P-PO ₄	Tphenols
	<i>Τμή</i>	μS	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Νοε-09	7,74	596,00	7,25	12,34	0,006	0,370	0,051	1,063	1,438	0,028	0,330
Δεκ-09	7,57	602,00	9,65	1,03	0,001	1,471	0,035	1,750	3,222	0,024	0,330
Ιαν-10	8,15	539,00	9,84	-	0,003	1,353	0,024	1,854	3,210	0,042	0,330
Μαρ-10	7,75	522,00	9,71	-	0,005	1,765	0,012	2,979	4,748	0,031	0,330
Απρ-10	7,64	553,00	6,91	-	0,002	1,588	0,031	2,021	3,611	0,020	0,826
Μαϊ-10	7,50	519,00	6,00	-	0,010	0,370	0,010	1,979	2,360	0,007	0,523
Ιουν-10	7,41	690,00	6,03	0,00	0,012	0,412	0,039	4,542	4,965	0,020	0,330
Ιουλ-10	7,63	611,00	5,78	0,00	0,012	0,370	0,668	2,271	2,653	0,767	2,267
Αυγ-10	7,80	628,00	6,49	1,37	0,011	0,370	0,010	-	-	0,007	1,512
Σεπ-10	7,41	1043,00	7,02	0,00	0,001	1,000	0,037	-	-	0,118	0,330
Οκτ-10	6,99	696,00	6,61	0,00	0,001	0,412	0,010	-	-	0,652	0,330
Νοε-10	7,35	646,00	6,50	11,00	0,001	1,000	0,010	-	-	0,060	0,330
Δεκ-10	7,68	638,00	9,96	64,16	0,016	1,118	0,077	1,938	3,071	0,064	0,419
Φεβ-11	7,78	686,00	8,10	0,00	0,028	1,294	0,041	0,600	1,922	0,053	0,419
Μαρ-11	7,77	615,00	7,85	0,00	0,001	0,370	0,041	0,605	0,976	0,090	0,453
Απρ-11	7,83	657,00	9,31	0,34	0,001	0,370	0,071	0,600	0,971	0,068	0,267
AVERAGE	7,54	640,06	7,69	7,52	0,007	0,852	0,073	1,850	2,762	0,128	0,583
MAX	8,15	1043,00	9,96	64,16	0,028	1,765	0,668	4,542	4,965	0,767	2,267
STD	0,26	121,60	1,53	18,38	0,008	0,523	0,160	1,130	1,316	0,230	0,544

«Ολοκληρωμένο πλαίσιο μοντελοποίησης υδρολογίας, ποιότητας νερών και στερεοπαροχής σε λεκάνες απορροής ποταμών διαλείπουσας ροής»

ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ: Κελεφίνα Γ. Κλαδά - Πηγάδι (Π2)											
Μήνας	pH	Conductivity	DO	COD	N-NO ₂ ⁻	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₃	TKN	TN	P-PO ₄	Tphenols
	Τιμή	μS	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Δεκ-09	7,76	581,00	7,06	3,77	0,001	0,824	0,824	2,125	2,950	0,012	0,756
Ιαν-10	7,67	558,00	10,39	0,00	0,001	1,765	0,031	1,458	3,224	0,015	0,330
Φεβ-10	7,85	518,00	9,16	1,03	0,001	1,706	0,053	1,917	3,624	0,008	0,349
Μαρ-10	8,08	544,00	10,50	-	0,004	1,294	0,010	2,396	3,694	0,027	0,330
Απρ-10	7,70	545,00	6,90	-	0,003	1,471	0,018	2,292	3,765	0,014	1,291
Μαϊ-10	7,72	594,00	7,04	-	0,001	1,176	0,031	2,125	3,303	0,051	0,872
Ιουν-10	7,52	519,00	6,76	0,00	0,013	0,370	0,010	1,625	2,008	1,300	0,330
Ιουλ-10	7,67	621,00	6,87	0,00	0,010	0,370	0,049	2,000	2,380	0,119	0,651
Αυγ-10	7,71	654,00	6,43	0,00	0,010	0,370	0,016	-	-	0,007	1,802
Σεπ-10	7,44	669,00	6,58	0,00	0,001	0,370	0,045	-	-	0,075	0,330
Οκτ-10	7,61	649,00	5,97	0,00	0,001	0,370	0,014	-	-	0,079	0,330
Νοε-10	7,31	635,00	6,85	14,00	0,018	0,370	0,010	-	-	0,007	0,330
Δεκ-10	7,78	627,00	9,98	79,20	0,001	0,765	0,255	4,021	4,787	0,067	0,360
Φεβ-11	7,81	660,00	8,35	0,00	0,007	1,235	0,059	1,080	2,323	0,007	0,330
Μαρ-11	7,83	607,00	7,87	0,00	0,001	0,370	0,047	0,600	0,971	0,058	0,826
Απρ-11	7,82	570,00	9,11	0,00	0,001	0,370	0,057	0,600	0,971	0,028	0,360
AVERAGE	7,67	596,94	7,86	7,54	0,005	0,825	0,096	1,853	2,833	0,117	0,599
MAX	8,08	669,00	10,50	79,20	0,018	1,765	0,824	4,021	4,787	1,300	1,802
STD	0,18	50,65	1,51	21,88	0,005	0,532	0,203	0,920	1,149	0,317	0,429

«Ολοκληρωμένο πλαίσιο μοντελοποίησης υδρολογίας, ποιότητας νερών και στερεοπαροχής σε λεκάνες απορροής ποταμών διαλείπουσας ροής»

ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ: Μαγουλίτσα Σπάρτη - Πηγάδι (Π3)											
Μήνας	pH	Conductivity	DO	COD	N-NO ₂ ⁻	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₃	TKN	TN	P-PO ₄	Phenols
	Τμμή	μS	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Δεκ-09	7,82	614,00	7,49	6,86	0,003	3,588	0,059	1,958	5,550	0,052	0,330
Ιαν-10	7,33	613,00	10,47	0,00	0,001	6,176	0,026	1,167	7,344	0,034	0,330
Φεβ-10	7,57	625,00	9,19	0,00	0,004	8,176	0,065	1,708	9,888	0,045	0,330
Μαρ-10	7,78	501,00	9,93	-	0,008	9,294	0,010	2,271	11,573	0,033	0,330
Απρ-10	7,47	627,00	7,12	-	0,003	5,471	0,016	2,250	7,724	0,042	0,919
Μαϊ-10	7,77	672,00	6,91	-	0,002	5,059	0,039	2,083	7,144	0,074	0,465
Ιουν-10	7,30	492,00	6,49	0,00	0,012	0,370	0,018	1,646	2,028	0,007	0,330
Ιουλ-10	7,43	659,00	6,40	0,00	0,013	0,370	0,028	3,583	3,966	1,140	8,570
Αυγ-10	7,33	724,00	5,79	0,00	0,022	0,370	0,010	-	-	0,007	0,860
Σεπ-10	7,40	642,00	6,64	12,69	0,001	0,370	0,063	-	-	0,033	0,430
Οκτ-10	7,23	794,00	6,83	0,00	0,001	5,000	0,010	-	-	0,032	0,330
Νοε-10	7,01	664,00	7,06	22,01	0,001	0,647	0,010	-	-	0,007	0,330
Δεκ-10	7,55	592,00	9,79	100,26	0,026	4,176	0,139	0,600	4,802	0,046	0,744
Φεβ-11	7,48	572,00	7,83	0,00	0,007	4,765	0,029	4,290	9,061	0,013	0,330
Μαρ-11	7,54	603,00	8,21	0,00	0,001	0,588	0,047	6,370	6,959	0,079	0,488
Απρ-11	7,60	589,00	9,51	2,74	0,003	0,529	0,043	2,600	3,133	0,034	0,488
AVERAGE	7,42	623,94	7,85	11,12	0,007	3,434	0,038	2,544	6,598	0,105	0,975
MAX	7,82	794,00	10,47	100,26	0,026	9,294	0,139	6,370	11,573	1,140	8,570
STD	0,21	74,18	1,47	27,60	0,008	3,031	0,033	1,557	2,829	0,277	2,035

«Ολοκληρωμένο πλαίσιο μοντελοποίησης υδρολογίας, ποιότητας νερών και στερεοπαροχής σε λεκάνες απορροής ποταμών διαλείπουσας ροής»

<i>ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ: Ρασίνα Ξηροκάμπιο - Πηγάδι (Π4)</i>											
Μήνας	pH	Conductivity	DO	COD	N-NO ₂ ⁻	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₃	TKN	TN	P-PO ₄	Tphenols
	<i>Τμμή</i>	μS	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Δεκ-09	7,79	389,00	7,09	10,63	0,008	0,370	0,116	2,292	2,670	0,050	0,523
Ιαν-10	7,61	457,00	10,10	0,00	0,001	3,235	0,028	1,479	4,715	0,031	0,372
Φεβ-10	7,65	535,00	10,00	-	0,004	3,765	0,047	3,417	7,185	0,042	0,330
Μαρ-10	7,62	558,00	9,77	-	0,005	5,824	0,020	2,667	8,495	0,012	0,330
Απρ-10	7,05	539,00	7,32	-	0,004	1,471	0,024	3,396	4,870	0,020	0,628
Μαϊ-10	7,65	544,00	6,91	-	0,003	2,353	0,059	1,854	4,211	0,055	0,488
Ιουν-10	7,34	374,00	5,88	0,00	0,012	0,370	0,010	3,125	3,507	0,007	0,442
Ιουλ-10	7,62	510,00	6,43	0,00	0,052	0,370	0,022	2,417	2,839	0,042	0,581
Αυγ-10	7,34	499,00	4,95	1,37	0,057	0,471	0,159	-	-	0,664	1,419
Σεπ-10	7,28	564,00	5,24	9,26	0,001	0,370	0,894	-	-	0,144	0,698
Οκτ-10	7,47	560,00	3,36	71,02	0,001	1,765	0,597	-	-	0,159	0,330
Νοε-10	7,44	551,00	4,72	16,00	0,125	1,059	0,283	-	-	0,007	0,442
Δεκ-10	7,70	534,00	9,94	71,18	0,031	1,471	0,088	0,792	2,294	0,054	1,198
Φεβ-11	7,63	555,00	7,33	0,00	0,005	2,118	0,026	4,030	6,153	0,009	0,744
Μαρ-11	7,68	484,00	7,98	0,00	0,001	0,370	0,051	2,700	3,071	0,081	0,837
Απρ-11	7,94	469,00	9,34	0,69	0,004	0,588	0,083	3,490	4,082	0,007	0,330
AVERAGE	7,49	507,63	7,27	15,01	0,020	1,623	0,157	2,638	4,508	0,087	0,606
MAX	7,94	564,00	10,10	71,18	0,125	5,824	0,894	4,030	8,495	0,664	1,419
STD	0,22	59,42	2,12	26,74	0,033	1,554	0,246	0,935	1,915	0,161	0,319

<i>ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ: Ρασίνα Λευκόχωμα - Πηγάδι (Π5)</i>											
Μήνας	pH	Conductivity	DO	COD	N-NO ₂ ⁻	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₃	TKN	TN	P-PO ₄	Tphenols
	<i>Τμή</i>	μS	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Δεκ-09	7,85	605,00	7,14	1,37	0,001	0,370	0,067	1,042	1,413	0,082	0,581
Ιαν-10	7,74	713,00	10,74	0,00	0,005	3,706	0,037	1,833	5,545	0,023	0,330
Φεβ-10	7,59	929,00	9,35	0,00	0,007	0,412	0,047	1,875	2,294	0,071	0,477
Μαρ-10	8,19	869,00	10,34	-	0,008	1,824	0,016	2,875	4,706	0,024	0,330
Απρ-10	7,52	881,00	7,23	-	0,004	0,941	0,024	1,792	2,737	0,028	0,330
Μαϊ-10	7,87	816,00	7,09	-	0,011	1,059	0,041	2,125	3,194	0,116	0,442
Ιουν-10	7,35	716,00	5,73	0,00	0,011	0,370	0,026	2,083	2,464	1,512	0,349
Ιουλ-10	7,54	734,00	6,20	0,00	0,013	0,370	0,026	1,500	1,883	0,007	4,477
Αυγ-10	7,75	667,00	6,14	0,00	0,015	0,370	0,010	-	-	0,463	1,512
Σεπ-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Οκτ-10	7,57	639,00	5,75	82,02	0,001	0,765	0,010	-	-	0,503	0,326
Νοε-10	7,52	632,00	6,67	13,00	0,001	0,529	0,014	-	-	0,007	0,384
Δεκ-10	7,98	610,00	9,90	84,22	0,008	0,370	0,151	7,167	7,545	0,078	0,767
Φεβ-11	8,07	598,00	7,05	0,00	0,023	0,706	0,010	0,894	1,623	0,050	0,767
Μαρ-11	7,69	479,00	7,50	0,00	0,001	0,370	0,024	2,460	2,831	0,049	0,372
Απρ-11	7,95	949,00	8,46	21,60	0,006	6,706	0,110	10,970	17,682	0,007	1,244
AVERAGE	7,69	722,47	7,69	16,85	0,008	1,258	0,041	3,051	4,493	0,201	0,846
MAX	8,19	949,00	10,74	84,22	0,023	6,706	0,151	10,970	17,682	1,512	4,477
STD	0,24	138,62	1,67	31,69	0,006	1,746	0,041	2,975	4,527	0,395	1,066

«Ολοκληρωμένο πλαίσιο μοντελοποίησης υδρολογίας, ποιότητας νερών και στερεοπαροχής σε λεκάνες απορροής ποταμών διαλείπουσας ροής»

Φεβρουάριος 2010						
Θέση	Φίλτρο (g)	Φίλτρο+στερεά (g)	Μάζα στερεών (g)	Όγκος διήθησης (mL)	Αιωρούμενα Στερεά (g/L)	Αιωρούμενα Στερεά (mg/L)
Πηγή Σκορτσινού	0,6245	0,6392	0,0147	450	0,0327	32,67
Βιβάρι Σελλασίας	0,6255	0,6430	0,0175	600	0,0292	29,17
Στενό Βορδόνιας	0,6390	0,6730	0,0340	300	0,1133	113,33
Κελεφίνα - Βασαράς	0,6241	0,6528	0,0287	600	0,0478	47,83
Κελεφίνα - Κλαδάς	0,6171	0,6375	0,0204	450	0,0453	45,33
Γέφυρα Σπάρτης	0,6298	0,6453	0,0155	450	0,0344	34,44
Ψυχικό Σπάρτης - Ευρώτας	0,6128	0,6727	0,0599	450	0,1331	133,11
Μαγουλίτσα - Αγία Ειρήνη	0,6301	0,6467	0,0166	450	0,0369	36,89
Μαγουλίτσα πρίν τη συμβολή με τον Ευρώτα	0,6193	0,6404	0,0211	450	0,0469	46,89
Κουμουτσά - Ρασίνα	0,6235	0,6518	0,0283	450	0,0629	62,89
Αεροδρόμιο - Ρασίνα	0,6270	0,6458	0,0188	450	0,0418	41,78
Γέφυρα Βρονταμά	0,6404	0,6541	0,0137	450	0,0304	30,44

Μάρτιος 2010						
Θέση	Φίλτρο (g)	Φίλτρο+στερεά (g)	Μάζα στερεών (g)	Όγκος διήθησης (mL)	Αιωρούμενα Στερεά (g/L)	Αιωρούμενα Στερεά (mg/L)
Πηγή Σκορτσινού	0,6382	0,6558	0,0176	600	0,0293	29,33
Βιβάρι Σελλασίας	0,6149	0,6335	0,0186	600	0,0310	31,00
Στενό Βορδόνιας	0,6154	0,6297	0,0143	600	0,0238	23,83
Κελεφίνα - Βασαράς	0,6305	0,6500	0,0195	600	0,0325	32,50
Κελεφίνα - Κλαδάς	0,6072	0,6290	0,0218	600	0,0363	36,33
Γέφυρα Σπάρτης	0,6335	0,6483	0,0148	600	0,0247	24,67
Ψυχικό Σπάρτης - Ευρώτας	0,6184	0,6352	0,0168	600	0,0280	28,00
Μαγουλίτσα - Αγία Ειρήνη	0,6190	0,6363	0,0173	600	0,0288	28,83
Μαγουλίτσα πρίν τη συμβολή με τον Ευρώτα	0,6185	0,6283	0,0098	400	0,0245	24,50
Κουμουτσά - Ρασίνα	0,6231	0,6509	0,0278	600	0,0463	46,33
Αεροδρόμιο - Ρασίνα	0,6253	0,6466	0,0213	600	0,0355	35,50
Γέφυρα Βρονταμά	0,6247	0,6399	0,0152	600	0,0253	25,33

«Ολοκληρωμένο πλαίσιο μοντελοποίησης υδρολογίας, ποιότητας νερών και στερεοπαροχής σε λεκάνες απορροής ποταμών διαλείπουσας ροής»

Απρίλιος 2010						
Θέση	Φίλτρο (g)	Φίλτρο+στερεά (g)	Μάζα στερεών (g)	Όγκος διήθησης (mL)	Αιωρούμενα Στερεά (g/L)	Αιωρούμενα Στερεά (mg/L)
Πηγή Σκορτσινού	0,6313	0,6448	0,0135	400	0,0338	33,75
Βιβάρι Σελλασίας	0,6099	0,6176	0,0077	400	0,0193	19,25
Στενό Βορδόνιας	0,6137	0,6295	0,0158	400	0,0395	39,50
Κελεφίνα - Βασαράς	0,6188	0,6278	0,0090	400	0,0225	22,50
Κελεφίνα - Κλαδάς	0,6284	0,6355	0,0071	400	0,0178	17,75
Γέφυρα Σπάρτης	0,6312	0,6466	0,0154	400	0,0385	38,50
Ψυχικό Σπάρτης - Ευρώτας	0,6115	0,6242	0,0127	400	0,0317	31,75
Μαγουλίτσα - Αγία Ειρήνη	0,6128	0,6241	0,0113	400	0,0282	28,25
Μαγουλίτσα πρίν τη συμβολή με τον Ευρώτα	0,6335	0,6472	0,0137	400	0,0343	34,25
Κουμουτσά - Ρασίνα	0,6065	0,6246	0,0181	400	0,0453	45,25
Αεροδρόμιο - Ρασίνα	0,6211	0,6324	0,0113	400	0,0282	28,25
Γέφυρα Βρονταμά	0,6226	0,6308	0,0082	400	0,0205	20,50

Μάιος 2010						
Θέση	Φίλτρο (g)	Φίλτρο+στερεά (g)	Μάζα στερεών (g)	Όγκος διήθησης (mL)	Αιωρούμενα Στερεά (g/L)	Αιωρούμενα Στερεά (mg/L)
Πηγή Σκορτσινού	0,6260	0,6306	0,0046	400	0,0115	11,50
Βιβάρι Σελλασίας	0,6271	0,6325	0,0054	400	0,0135	13,50
Στενό Βορδόνιας	0,6217	0,6235	0,0018	400	0,0045	4,50
Κελεφίνα - Βασαράς	0,6087	0,6147	0,0060	400	0,0150	15,00
Κελεφίνα - Κλαδάς	0,6215	0,6234	0,0019	400	0,0047	4,75
Γέφυρα Σπάρτης	0,6260	0,6333	0,0073	400	0,0182	18,25
Ψυχικό Σπάρτης - Ευρώτας	-	-	-	-	-	-
Μαγουλίτσα - Αγία Ειρήνη	0,6134	0,6258	0,0124	400	0,0310	31,00
Μαγουλίτσα πρίν τη συμβολή με τον Ευρώτα	0,6350	0,6372	0,0022	400	0,0055	5,50
Κουμουτσά - Ρασίνα	0,6171	0,6295	0,0124	400	0,0310	31,00
Αεροδρόμιο - Ρασίνα	0,6079	0,6118	0,0039	400	0,0098	9,75
Γέφυρα Βρονταμά	0,6058	0,6125	0,0067	400	0,0168	16,75

«Ολοκληρωμένο πλαίσιο μοντελοποίησης υδρολογίας, ποιότητας νερών και στερεοπαροχής σε λεκάνες απορροής ποταμών διαλείπουσας ροής»

Ιούνιος 2010						
Θέση	Φίλτρο (g)	Φίλτρο+στερεά (g)	Μάζα στερεών (g)	Όγκος διήθησης (mL)	Αιωρούμενα Στερεά (g/L)	Αιωρούμενα Στερεά (mg/L)
Πηγή Σκορτσινού	0,4920	0,4988	0,0068	400	0,0170	17,00
Βιβάρι Σελλασίας	0,4939	0,5018	0,0079	400	0,0198	19,75
Στενό Βορδόνιας	0,4826	0,4928	0,0102	400	0,0255	25,50
Κελεφίνα - Βασαράς	0,4847	0,4885	0,0038	400	0,0095	9,50
Κελεφίνα - Κλαδάς	0,4992	0,5010	0,0018	400	0,0045	4,50
Γέφυρα Σπάρτης	0,5048	0,5113	0,0065	400	0,0162	16,25
Ψυχικό Σπάρτης - Ευρώτας	0,4783	0,4915	0,0132	400	0,0330	33,00
Μαγουλίτσα - Αγία Ειρήνη	0,4772	0,4893	0,0121	400	0,0303	30,25
Μαγουλίτσα πρίν τη συμβολή με τον Ευρώτα	-	-	-	-	-	-
Κουμουτσά - Ρασίνα	0,4807	0,4921	0,0114	400	0,0285	28,50
Αεροδρόμιο - Ρασίνα	0,4910	0,4938	0,0028	400	0,0070	7,00
Γέφυρα Βρονταμά	0,4643	0,4701	0,0058	400	0,0145	14,50

Ιούλιος 2010						
Θέση	Φίλτρο (g)	Φίλτρο+στερεά (g)	Μάζα στερεών (g)	Όγκος διήθησης (mL)	Αιωρούμενα Στερεά (g/L)	Αιωρούμενα Στερεά (mg/L)
Πηγή Σκορτσινού	0,4889	0,4919	0,0030	400	0,0075	7,50
Βιβάρι Σελλασίας	0,4972	0,5026	0,0054	400	0,0135	13,50
Στενό Βορδόνιας	0,4894	0,4903	0,0009	400	0,0023	2,25
Κελεφίνα - Βασαράς	0,5038	0,5066	0,0028	400	0,0070	7,00
Κελεφίνα - Κλαδάς	0,4922	0,4957	0,0035	400	0,0087	8,75
Γέφυρα Σπάρτης	0,4945	0,4983	0,0038	400	0,0095	9,50
Ψυχικό Σπάρτης - Ευρώτας	0,4762	0,4798	0,0036	400	0,0090	9,00
Μαγουλίτσα - Αγία Ειρήνη	0,4757	0,4836	0,0079	400	0,0197	19,75
Μαγουλίτσα πρίν τη συμβολή με τον Ευρώτα	0,4845	0,4913	0,0068	400	0,0170	17,00
Κουμουτσά - Ρασίνα	0,4786	0,4841	0,0055	400	0,0137	13,75
Αεροδρόμιο - Ρασίνα	0,4912	0,4944	0,0032	400	0,0080	8,00
Γέφυρα Βρονταμά	0,4857	0,4908	0,0051	400	0,0128	12,75

«Ολοκληρωμένο πλαίσιο μοντελοποίησης υδρολογίας, ποιότητας νερών και στερεοπαροχής σε λεκάνες απορροής ποταμών διαλείπουσας ροής»

Αύγουστος 2010						
Θέση	Φίλτρο (g)	Φίλτρο+στερεά (g)	Μάζα στερεών (g)	Όγκος διήθησης (mL)	Αιωρούμενα Στερεά (g/L)	Αιωρούμενα Στερεά (mg/L)
Πηγή Σκορτσινού	0,5007	0,5054	0,0047	400	0,0117	11,75
Βιβάρι Σελλασίας	0,4835	0,4877	0,0042	400	0,0105	10,50
Στενό Βορδόνιας	0,4971	0,5002	0,0031	400	0,0077	7,75
Κελεφίνα - Βασαράς	0,4847	0,4881	0,0034	400	0,0085	8,50
Κελεφίνα - Κλαδάς	-	-	-	-	-	-
Γέφυρα Σπάρτης	0,4977	0,5031	0,0054	400	0,0135	13,50
Ψυχικό Σπάρτης - Ευρώτας	0,4945	0,5001	0,0056	400	0,0140	14,00
Μαγουλίτσα - Αγία Ειρήνη	0,4779	0,4801	0,0022	400	0,0055	5,50
Μαγουλίτσα πριν τη συμβολή με τον Ευρώτα	-	-	-	-	-	-
Κουμουτσά - Ρασίνα	0,4951	0,5026	0,0075	400	0,0188	18,75
Αεροδρόμιο - Ρασίνα	-	-	-	-	-	-
Γέφυρα Βρονταμά	0,4936	0,4981	0,0045	400	0,0113	11,25

Σεπτέμβριος 2010						
Θέση	Φίλτρο (g)	Φίλτρο+στερεά (g)	Μάζα στερεών (g)	Όγκος διήθησης (mL)	Αιωρούμενα Στερεά (g/L)	Αιωρούμενα Στερεά (mg/L)
Πηγή Σκορτσινού	0,4793	0,4882	0,0089	400	0,0223	22,25
Βιβάρι Σελλασίας	0,4791	0,4831	0,0040	400	0,0100	10,00
Στενό Βορδόνιας	0,4803	0,4883	0,0080	400	0,0200	20,00
Κελεφίνα - Βασαράς	0,4710	0,4747	0,0037	400	0,0093	9,25
Κελεφίνα - Κλαδάς	-	-	-	-	-	-
Γέφυρα Σπάρτης	0,4776	0,4826	0,0050	400	0,0125	12,50
Ψυχικό Σπάρτης - Ευρώτας	0,4878	0,4974	0,0096	400	0,0240	24,00
Μαγουλίτσα - Αγία Ειρήνη	0,4766	0,4840	0,0074	400	0,0185	18,50
Μαγουλίτσα πριν τη συμβολή με τον Ευρώτα	-	-	-	-	-	-
Κουμουτσά - Ρασίνα	0,4744	0,4827	0,0083	400	0,0208	20,75
Αεροδρόμιο - Ρασίνα	-	-	-	-	-	-
Γέφυρα Βρονταμά	0,5007	0,5046	0,0039	400	0,0098	9,75

«Ολοκληρωμένο πλαίσιο μοντελοποίησης υδρολογίας, ποιότητας νερών και στερεοπαροχής σε λεκάνες απορροής ποταμών διαλείπουσας ροής»

Οκτώβριος 2010						
Θέση	Φίλτρο (g)	Φίλτρο+στερεά (g)	Μάζα στερεών (g)	Όγκος διήθησης (mL)	Αιωρούμενα Στερεά (g/L)	Αιωρούμενα Στερεά (mg/L)
Πηγή Σκορτσινού	0,5304	0,5364	0,0060	400	0,0150	15,00
Βιβάρι Σελλασίας	0,4975	0,5007	0,0032	400	0,0080	8,00
Στενό Βορδόνιας	0,4992	0,5069	0,0077	400	0,0193	19,25
Κελεφίνα - Βασαράς	0,5336	0,5381	0,0045	400	0,0113	11,25
Κελεφίνα - Κλαδάς	0,5183	0,5213	0,0030	400	0,0075	7,50
Γέφυρα Σπάρτης	0,4890	0,4938	0,0048	400	0,0120	12,00
Ψυχικό Σπάρτης - Ευρώτας	0,4895	0,4998	0,0103	400	0,0258	25,75
Μαγουλίτσα - Αγία Ειρήνη	0,5141	0,5253	0,0112	400	0,0280	28,00
Μαγουλίτσα πριν τη συμβολή με τον Ευρώτα	-	-	-	-	-	-
Κουμουτσά - Ρασίνα	0,4993	0,5110	0,0117	400	0,0293	29,25
Αεροδρόμιο - Ρασίνα	-	-	-	-	-	-
Γέφυρα Βρονταμά	0,5174	0,5234	0,0060	400	0,0150	15,00

Νοέμβριος 2010						
Θέση	Φίλτρο (g)	Φίλτρο+στερεά (g)	Μάζα στερεών (g)	Όγκος διήθησης (mL)	Αιωρούμενα Στερεά (g/L)	Αιωρούμενα Στερεά (mg/L)
Πηγή Σκορτσινού	0,4844	0,4909	0,0065	400	0,0163	16,25
Βιβάρι Σελλασίας	0,4713	0,4756	0,0043	400	0,0108	10,75
Στενό Βορδόνιας	0,4815	0,4862	0,0047	400	0,0118	11,75
Κελεφίνα - Βασαράς	0,4778	0,4806	0,0028	400	0,0070	7,00
Κελεφίνα - Κλαδάς	0,4805	0,4824	0,0019	400	0,0048	4,75
Γέφυρα Σπάρτης	0,4821	0,4869	0,0048	400	0,0120	12,00
Ψυχικό Σπάρτης - Ευρώτας	0,4854	0,4921	0,0067	400	0,0168	16,75
Μαγουλίτσα - Αγία Ειρήνη	0,4833	0,4949	0,0116	400	0,0290	29,00
Μαγουλίτσα πριν τη συμβολή με τον Ευρώτα	-	-	-	-	-	-
Κουμουτσά - Ρασίνα	0,4754	0,4895	0,0141	400	0,0353	35,25
Αεροδρόμιο - Ρασίνα	-	-	-	-	-	-
Γέφυρα Βρονταμά	0,4746	0,4801	0,0055	400	0,0138	13,75

«Ολοκληρωμένο πλαίσιο μοντελοποίησης υδρολογίας, ποιότητας νερών και στερεοπαροχής σε λεκάνες απορροής ποταμών διαλείπουσας ροής»

Δεκέμβριος 2010						
Θέση	Φίλτρο (g)	Φίλτρο+στερεά (g)	Μάζα στερεών (g)	Όγκος διήθησης (mL)	Αιωρούμενα Στερεά (g/L)	Αιωρούμενα Στερεά (mg/L)
Πηγή Σκορτσινού	0,5831	0,5923	0,0092	400	0,0230	23,00
Βιβάρι Σελλασίας	0,5686	0,5721	0,0035	400	0,0088	8,75
Στενό Βορδόνιας	0,5907	0,5957	0,0050	400	0,0125	12,50
Κελεφίνα - Βασαράς	0,5891	0,5949	0,0058	400	0,0145	14,50
Κελεφίνα - Κλαδάς	0,5809	0,5829	0,0020	400	0,0050	5,00
Γέφυρα Σπάρτης	0,5833	0,5930	0,0097	400	0,0242	24,25
Ψυχικό Σπάρτης - Ευρώτας	0,5725	0,5817	0,0092	400	0,0230	23,00
Μαγουλίτσα - Αγία Ειρήνη	0,5693	0,5784	0,0091	400	0,0228	22,75
Μαγουλίτσα πριν τη συμβολή με τον Ευρώτα	-	-	-	-	-	-
Κουμουτσά - Ρασίνα	0,5839	0,6007	0,0168	400	0,0420	42,00
Αεροδρόμιο - Ρασίνα	-	-	-	-	-	-
Γέφυρα Βρονταμά	0,5817	0,5892	0,0075	400	0,0187	18,75

Φεβρουάριος 2011						
Θέση	Φίλτρο (g)	Φίλτρο+στερεά (g)	Μάζα στερεών (g)	Όγκος διήθησης (mL)	Αιωρούμενα Στερεά (g/L)	Αιωρούμενα Στερεά (mg/L)
Πηγή Σκορτσινού	0,5872	0,5933	0,0061	400	0,0153	15,25
Βιβάρι Σελλασίας	0,5914	0,5981	0,0067	400	0,0167	16,75
Στενό Βορδόνιας	0,5787	0,5846	0,0059	400	0,0148	14,75
Κελεφίνα - Βασαράς	0,5764	0,5846	0,0082	400	0,0205	20,50
Κελεφίνα - Κλαδάς	0,4875	0,4978	0,0103	400	0,0258	25,75
Γέφυρα Σπάρτης	0,4760	0,4770	0,0010	400	0,0025	2,50
Ψυχικό Σπάρτης - Ευρώτας	0,4861	0,4870	0,0009	400	0,0023	2,25
Μαγουλίτσα - Αγία Ειρήνη	0,4927	0,5047	0,0120	400	0,0300	30,00
Μαγουλίτσα πριν τη συμβολή με τον Ευρώτα	0,4835	0,4983	0,0148	400	0,0370	37,00
Κουμουτσά - Ρασίνα	0,4900	0,5038	0,0138	400	0,0345	34,50
Αεροδρόμιο - Ρασίνα	0,4674	0,4760	0,0086	400	0,0215	21,50
Γέφυρα Βρονταμά	0,4834	0,5031	0,0197	400	0,0493	49,25

«Ολοκληρωμένο πλαίσιο μοντελοποίησης υδρολογίας, ποιότητας νερών και στερεοπαροχής σε λεκάνες απορροής ποταμών διαλείπουσας ροής»

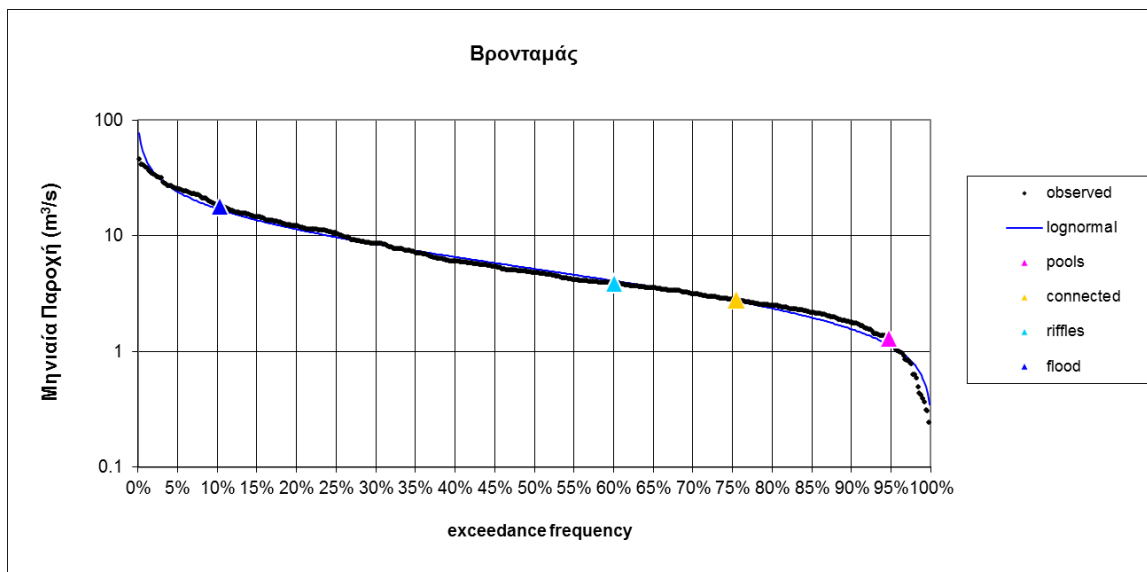
Μάρτιος 2011						
Θέση	Φίλτρο (g)	Φίλτρο+στερεά (g)	Μάζα στερεών (g)	Όγκος διήθησης (mL)	Αιωρούμενα Στερεά (g/L)	Αιωρούμενα Στερεά (mg/L)
Πηγή Σκορτσινού	0,5779	0,5923	0,0144	250	0,0576	57,60
Βιβάρι Σελλασίας	0,5920	0,5981	0,0061	250	0,0244	24,40
Στενό Βορδόνιας	0,5945	0,5989	0,0044	250	0,0176	17,60
Κελεφίνα - Βασαράς	0,5863	0,5956	0,0093	250	0,0372	37,20
Κελεφίνα - Κλαδάς	0,5772	0,5873	0,0101	250	0,0404	40,40
Γέφυρα Σπάρτης	0,5657	0,5975	0,0318	250	0,1272	127,20
Ψυχικό Σπάρτης - Ευρώτας	0,5797	0,5920	0,0123	250	0,0492	49,20
Μαγουλίτσα - Αγία Ειρήνη	0,5824	0,5928	0,0104	250	0,0416	41,60
Μαγουλίτσα πριν τη συμβολή με τον Ευρώτα	0,5786	0,5892	0,0106	250	0,0424	42,40
Κουμουτσά - Ρασίνα	0,5792	0,5898	0,0106	250	0,0424	42,40
Αεροδρόμιο - Ρασίνα	0,5816	0,5907	0,0091	250	0,0364	36,40
Γέφυρα Βρονταμά	0,5769	0,5945	0,0176	250	0,0704	70,40

Απρίλιος 2011						
Θέση	Φίλτρο (g)	Φίλτρο+στερεά (g)	Μάζα στερεών (g)	Όγκος διήθησης (mL)	Αιωρούμενα Στερεά (g/L)	Αιωρούμενα Στερεά (mg/L)
Πηγή Σκορτσινού	0,4939	0,5016	0,0077	250	0,0308	30,80
Βιβάρι Σελλασίας	0,4858	0,4903	0,0045	250	0,0180	18,00
Στενό Βορδόνιας	0,4937	0,5077	0,0140	250	0,0560	56,00
Κελεφίνα - Βασαράς	0,4838	0,4920	0,0082	250	0,0328	32,80
Κελεφίνα - Κλαδάς	0,4838	0,4901	0,0063	250	0,0252	25,20
Γέφυρα Σπάρτης	0,4941	0,5059	0,0118	250	0,0472	47,20
Ψυχικό Σπάρτης - Ευρώτας	0,4788	0,4927	0,0139	250	0,0556	55,60
Μαγουλίτσα - Αγία Ειρήνη	0,4739	0,4835	0,0096	250	0,0384	38,40
Μαγουλίτσα πριν τη συμβολή με τον Ευρώτα	0,4903	0,4964	0,0061	250	0,0244	24,40
Κουμουτσά - Ρασίνα	0,4846	0,4943	0,0097	250	0,0388	38,80
Αεροδρόμιο - Ρασίνα	0,4779	0,4846	0,0067	250	0,0268	26,80
Γέφυρα Βρονταμά	0,4986	0,5038	0,0052	250	0,0208	20,80

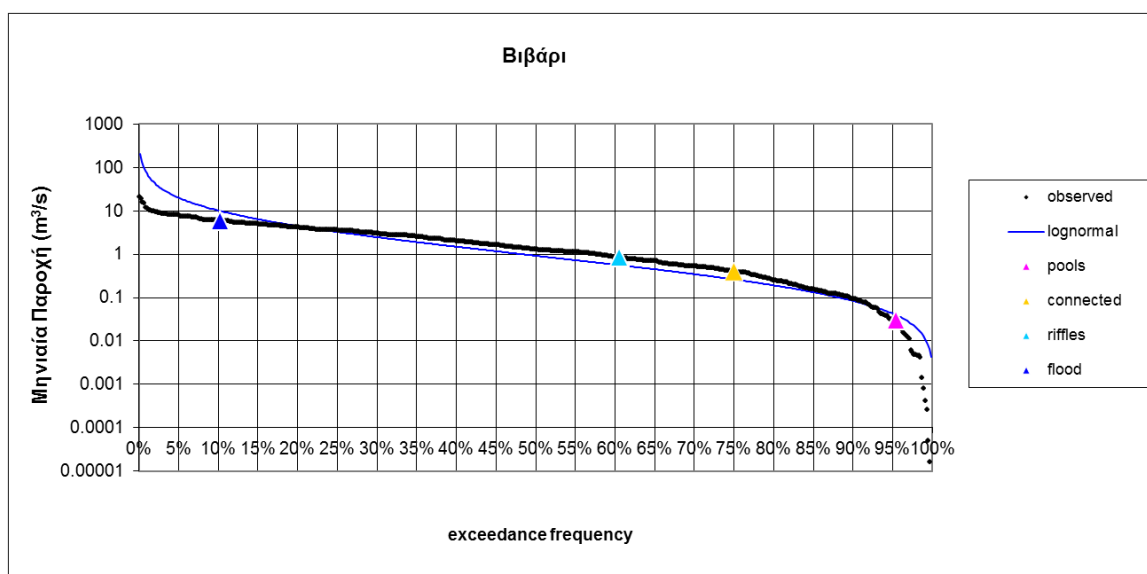
Δειγματοληψία μετά από βροχόπτωση							
Θέση	Ημερομηνία	Φίλτρο (g)	Φίλτρο+στερεά (g)	Μάζα στερεών (g)	Όγκος διήθησης (mL)	Αιωρούμενα Στερεά (g/L)	Αιωρούμενα Στερεά (mg/L)
Κλαδάς	26/2/2011	0,4695	0,4850	0,0155	200	0,0775	77,50
Γέφυρα Βρονταμά	22/2/2011	0,4560	0,4810	0,0250	100	0,2500	250,00
Αεροδρόμιο - Ρασίνα	30/1/2011	0,4691	0,5108	0,0417	200	0,2085	208,50
Ρασίνα Ξηροκάμπι	30/1/2011	0,5896	0,6021	0,0125	100	0,1250	125,00

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ II

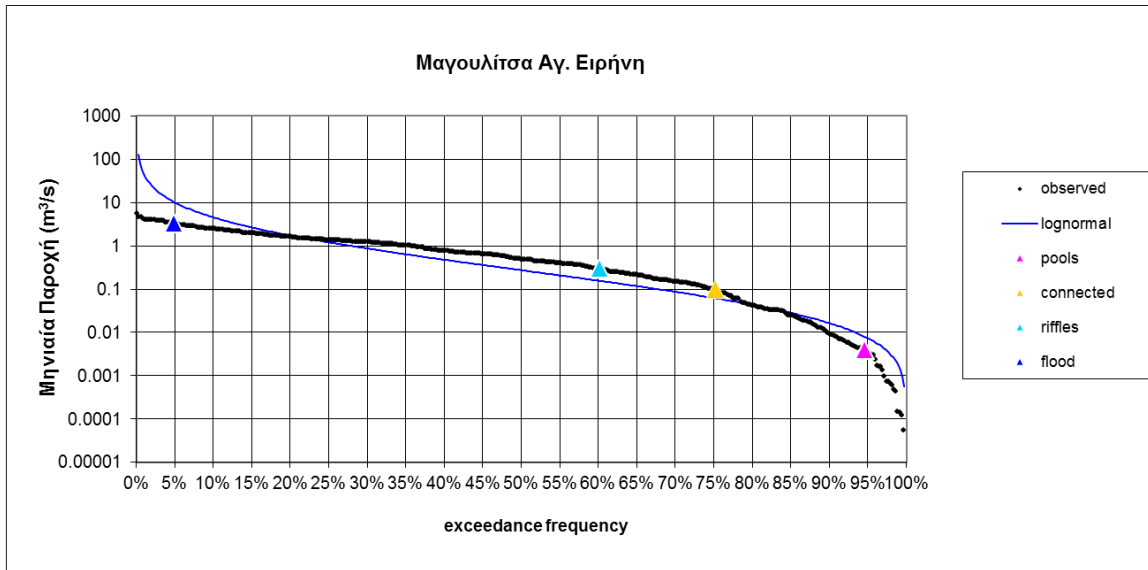
**(Καμπύλες διάρκειας ροής (Flow Duration Curves) στις υπό
μελέτη θέσεις για την περίοδο 1970-2011)**



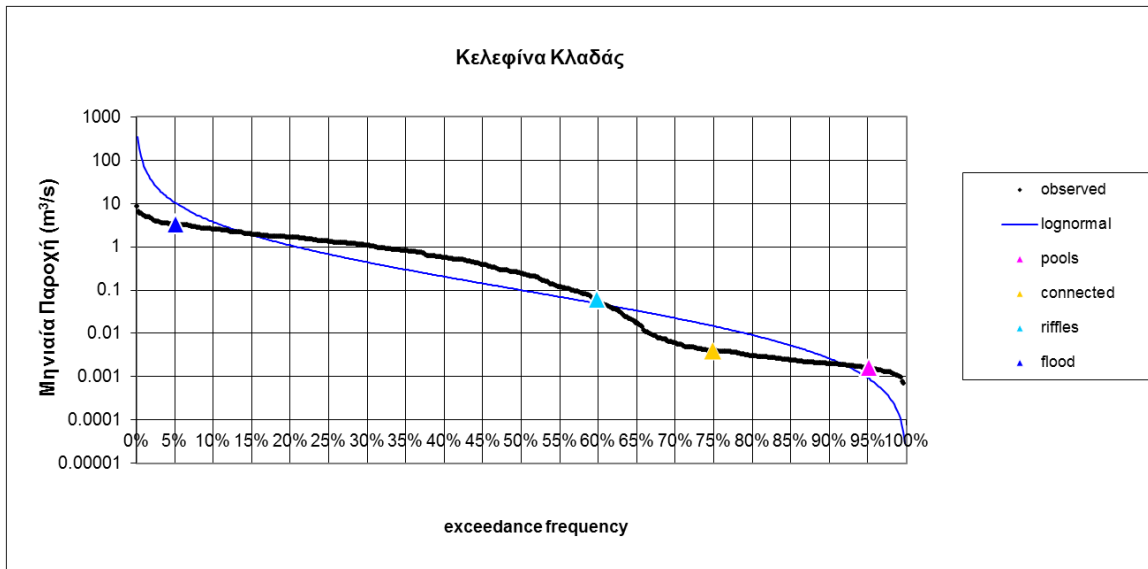
Καμπύλη διάρκειας ροής (Flow Duration Curve) στην θέση Βρονταμάς (1970-2011)



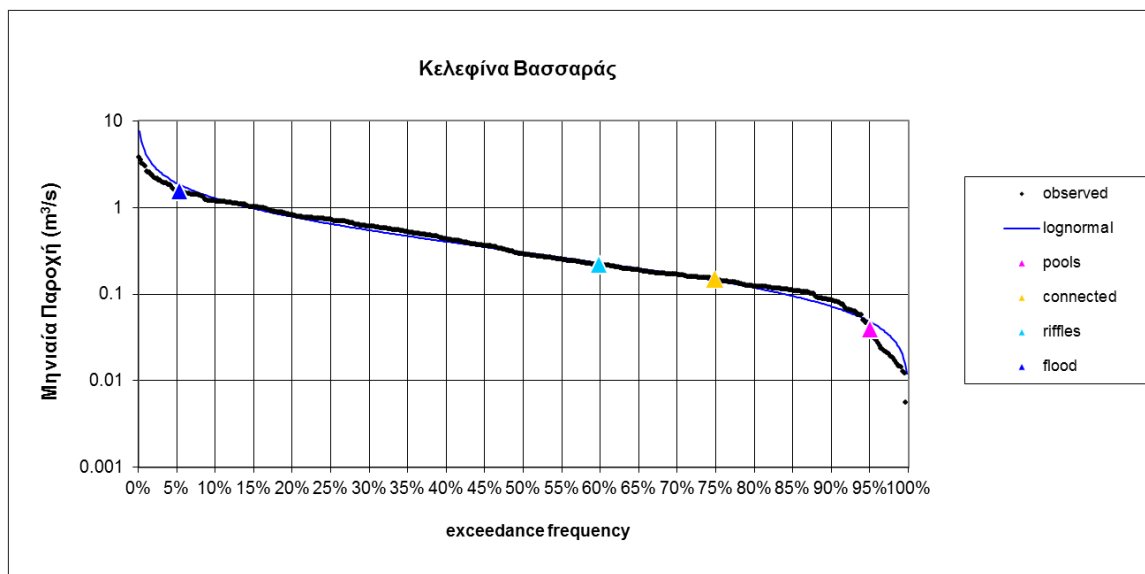
Καμπύλη διάρκειας ροής (Flow Duration Curve) στην θέση Βιβάρι (1970-2011)



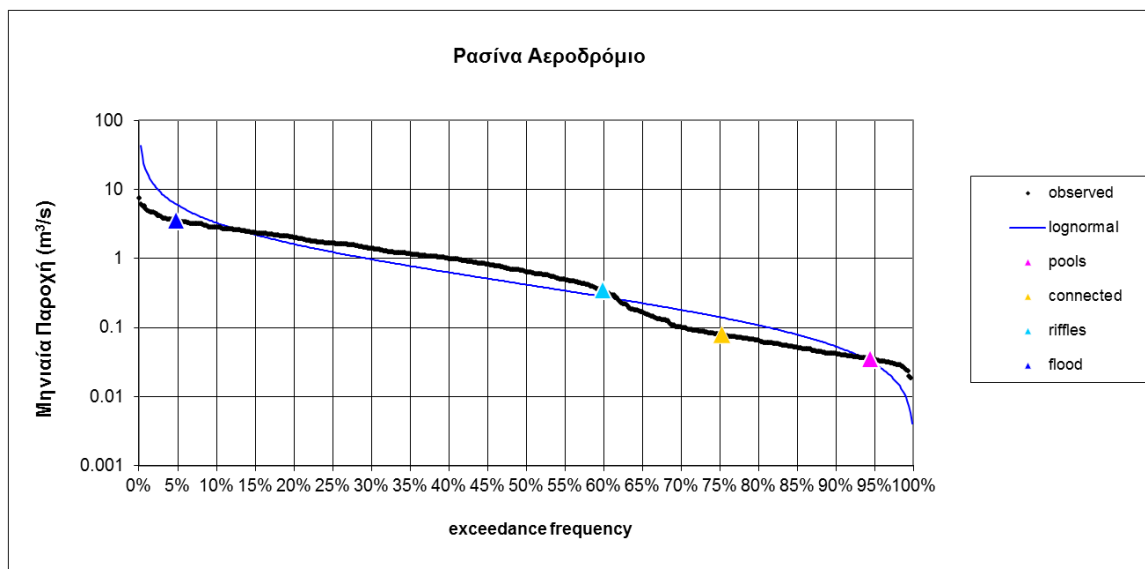
Καμπύλη διάρκειας ροής (Flow Duration Curve) στην θέση Μαγουλίτσα Αγ. Ειρήνη (1970-2011)



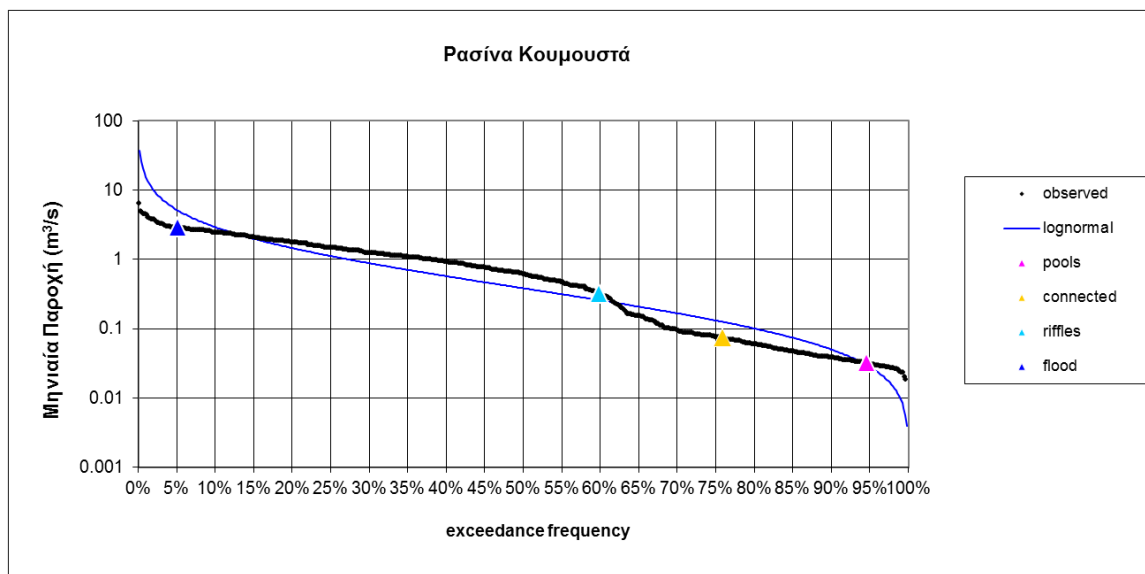
Καμπύλη διάρκειας ροής (Flow Duration Curve) στην θέση Κελεφίνα Κλαδάς (1970-2011)



Καμπύλη διάρκειας ροής (Flow Duration Curve) στην θέση Κελεφίνα Βασσαράς (1970-2011)



Καμπύλη διάρκειας ροής (Flow Duration Curve) στην θέση Ρασίνα Αεροδρόμιο (1970-2011)

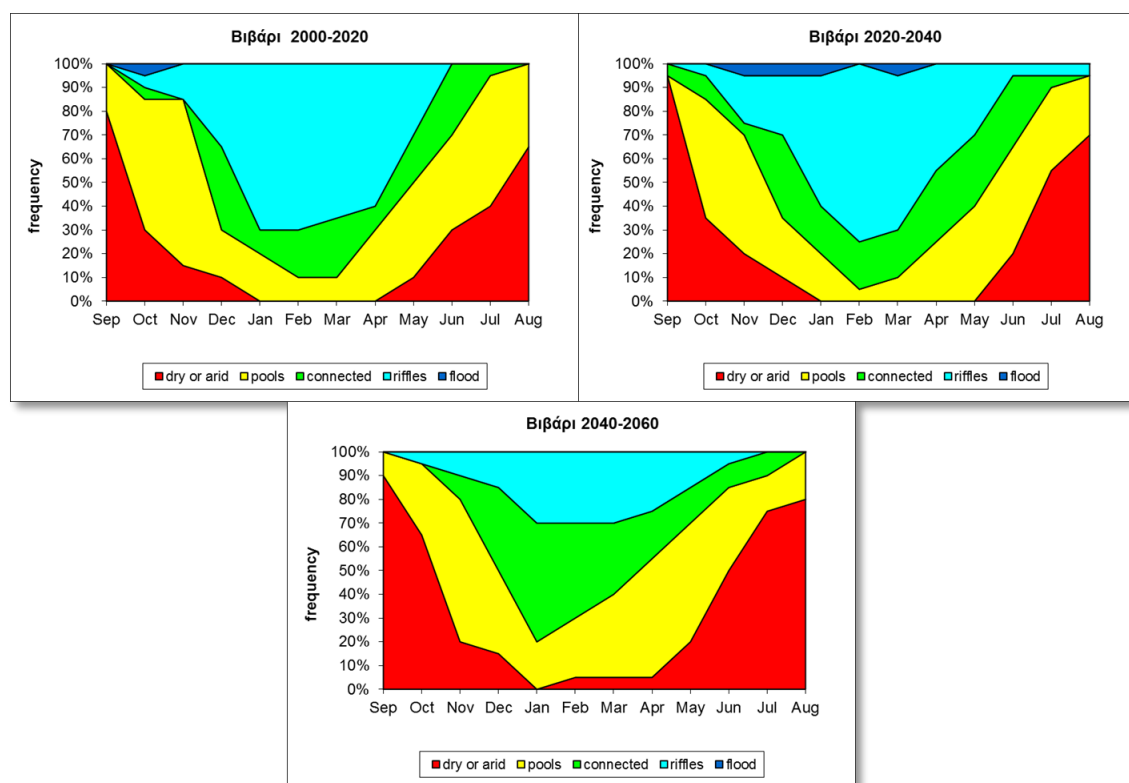


Καμπύλη διάρκειας ροής (Flow Duration Curve) στην θέση Ρασίνα Κουμουστά (1970-2011)

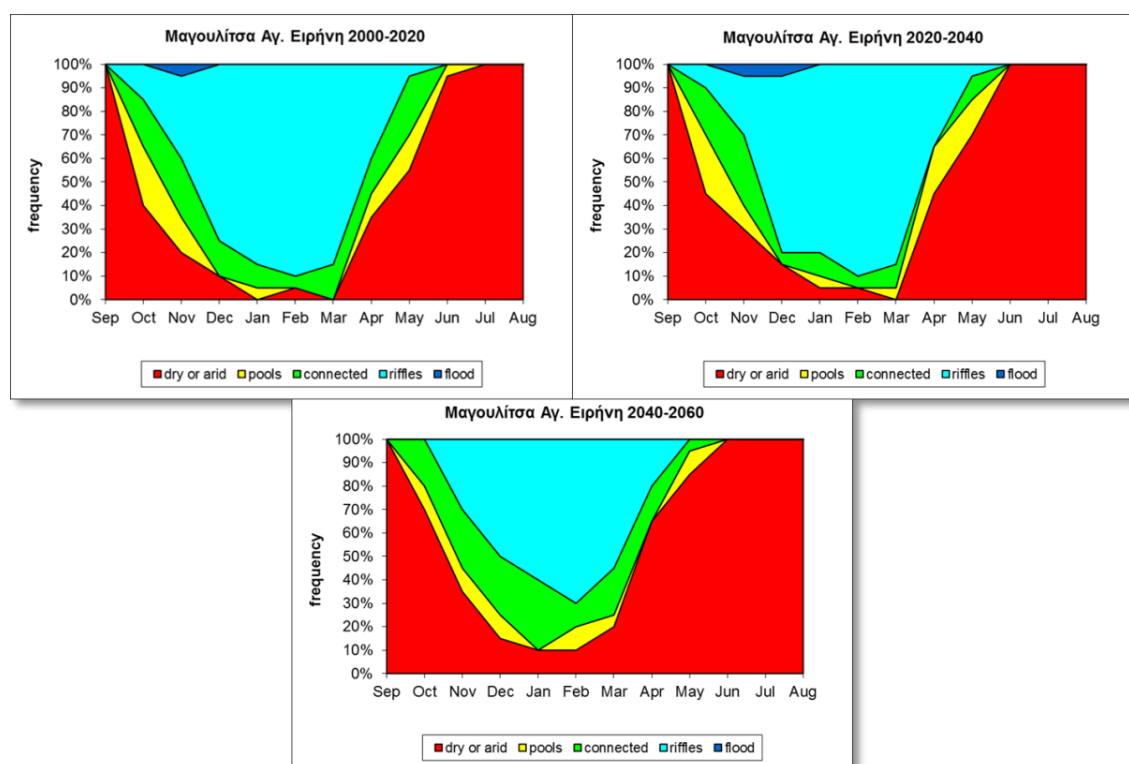
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ

(Διαγράμματα συχνότητας της υδρόβιας κατάστασης ASGF)

«Ολοκληρωμένο πλαίσιο μοντελοποίησης υδρολογίας, ποιότητας νερών και στερεοπαροχής σε
λεκάνες απορροής ποταμών διαλείπουσας ροής»

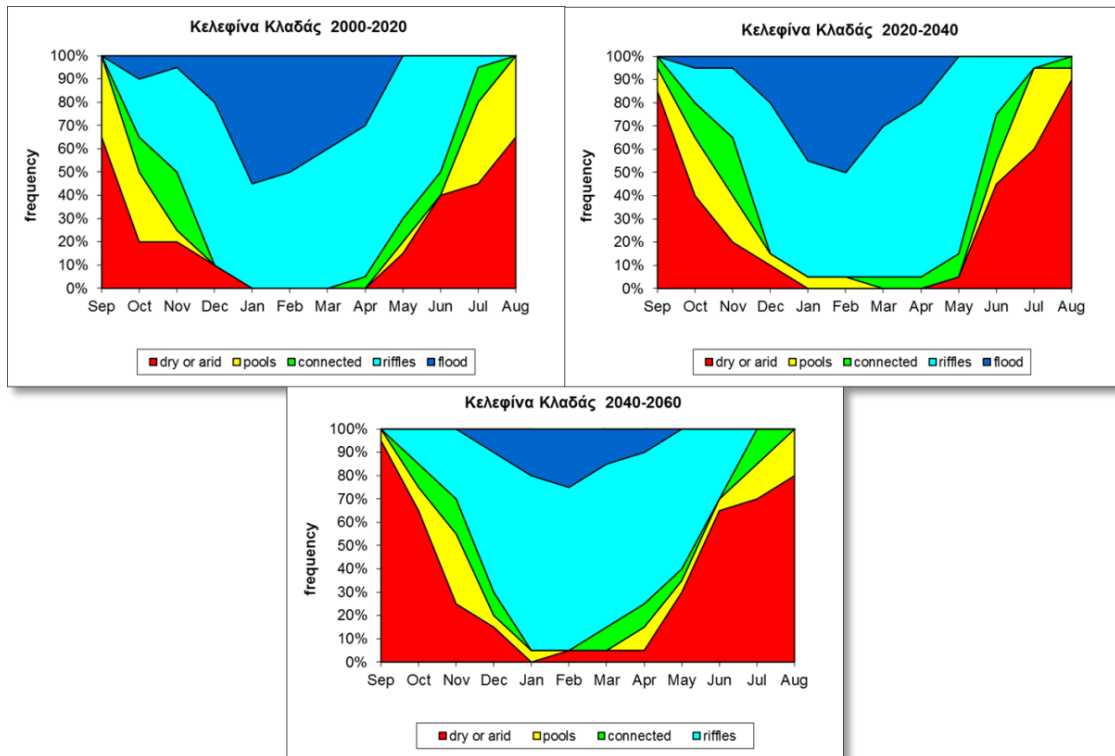


Βιβάρι - Aquatic States Frequency Graph (2000-2060) – KNMI-RACMO2

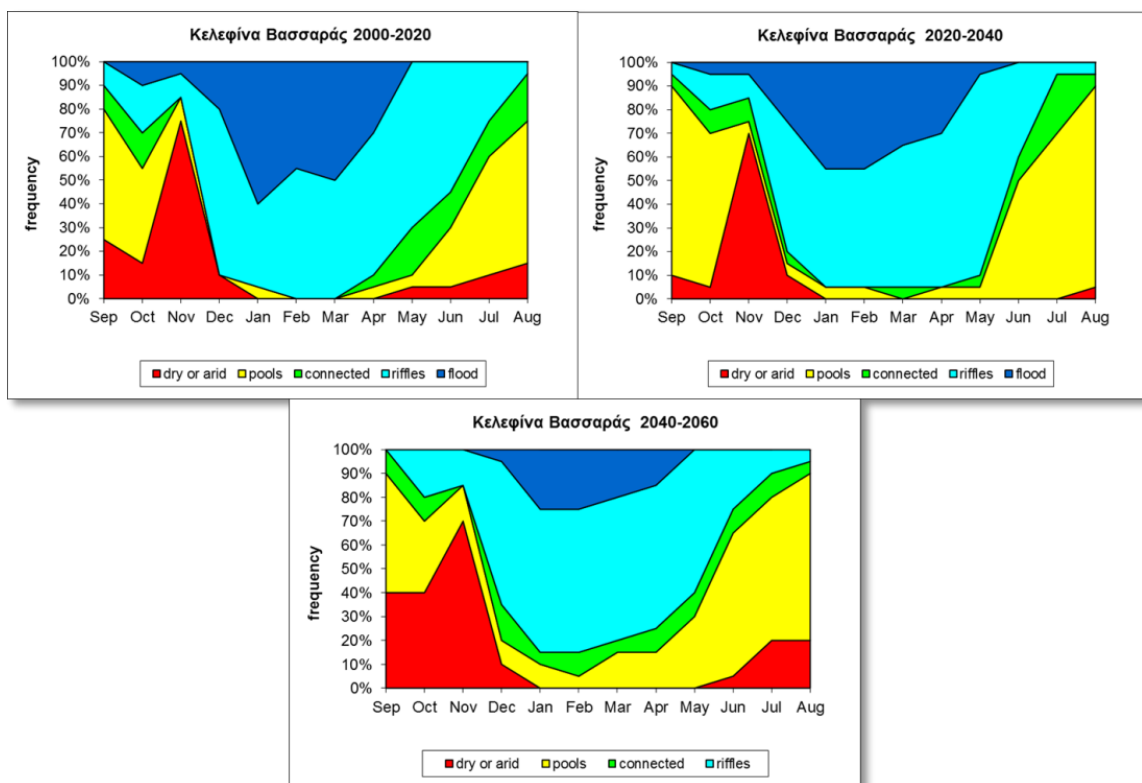


Μαγουλίτσα Αγ. Ειρήνη - Aquatic States Frequency Graph (2000-2060)– KNMI-RACMO2

«Ολοκληρωμένο πλαίσιο μοντελοποίησης υδρολογίας, ποιότητας νερών και στερεοπαροχής σε λεκάνες απορροής ποταμών διαλείπουσας ροής»

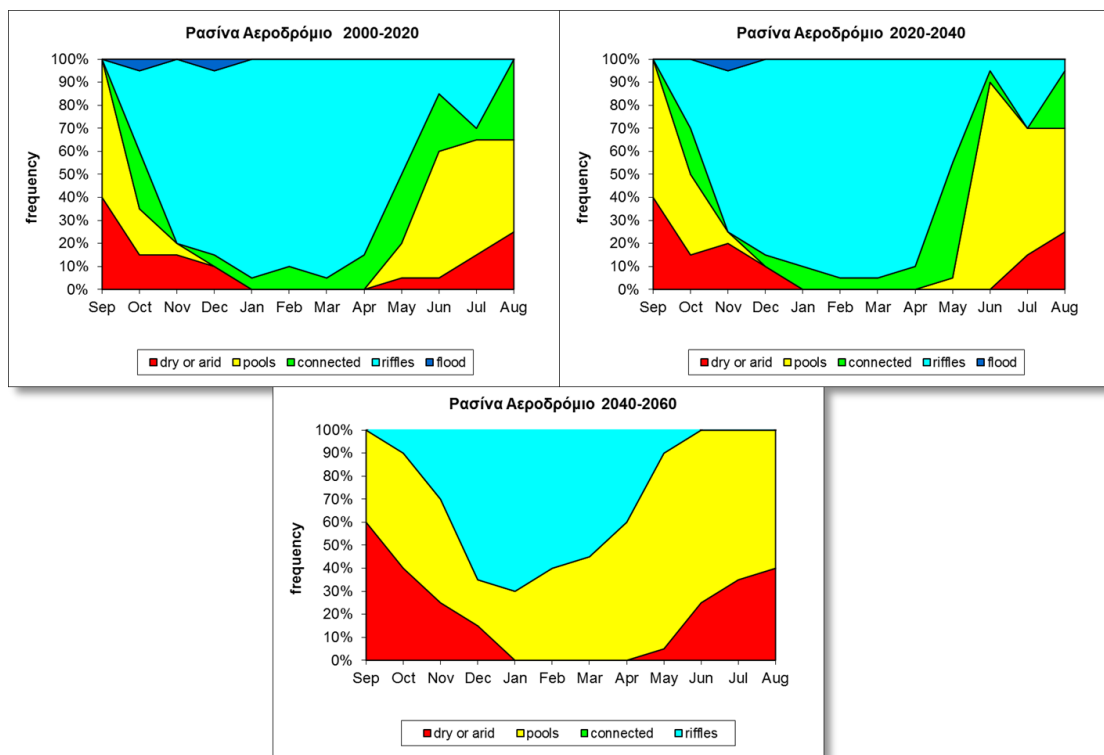


Κελεφίνα Κλαδάς - Aquatic States Frequency Graph (2000-2060) – KNMI-RACMO2

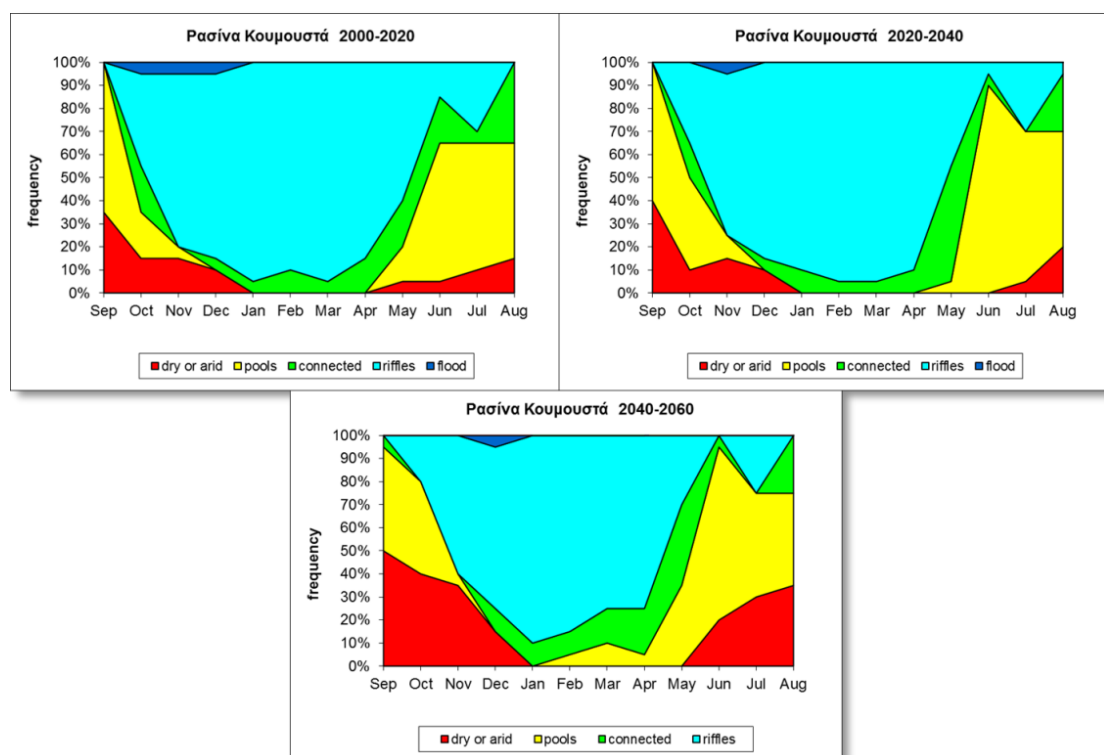


Κελεφίνα Βασσαράς - Aquatic States Frequency Graph (2000-2060) – KNMI-RACMO2

«Ολοκληρωμένο πλαίσιο μοντελοποίησης υδρολογίας, ποιότητας νερών και στερεοπαροχής σε
λεκάνες απορροής ποταμών διαλείπουσας ροής»

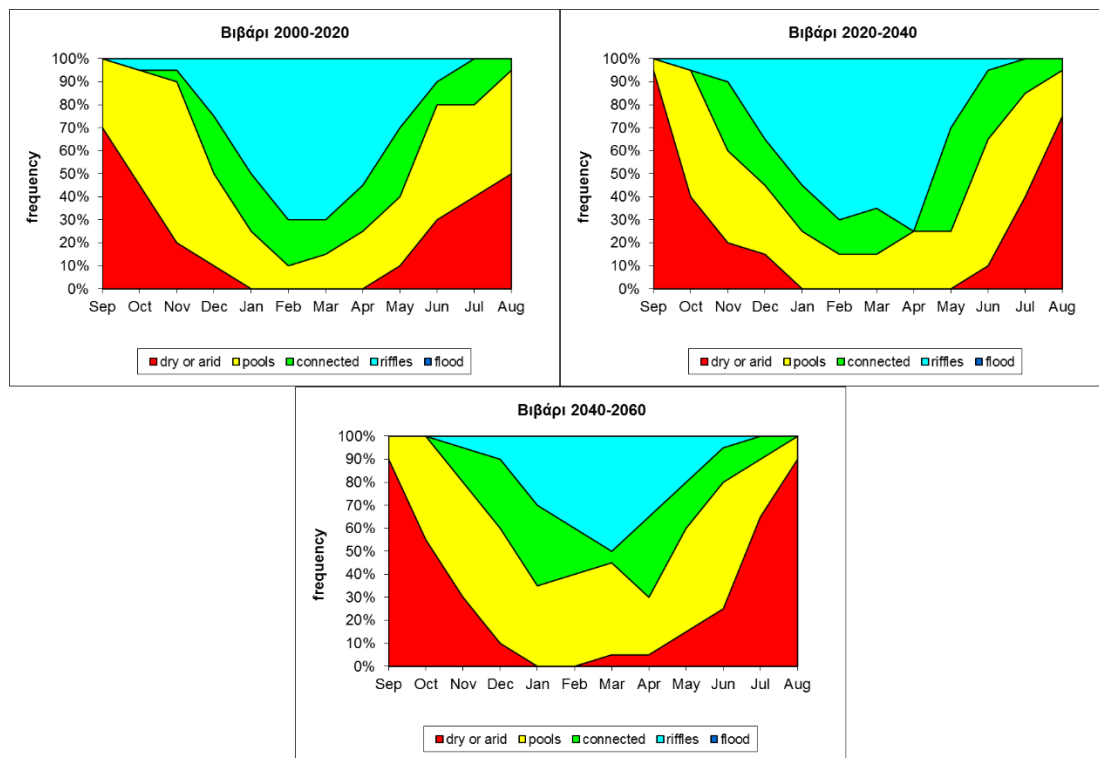


Ρασίνα Αεροδρόμιο - Aquatic States Frequency Graph (2000-2060) – KNMI-RACMO2

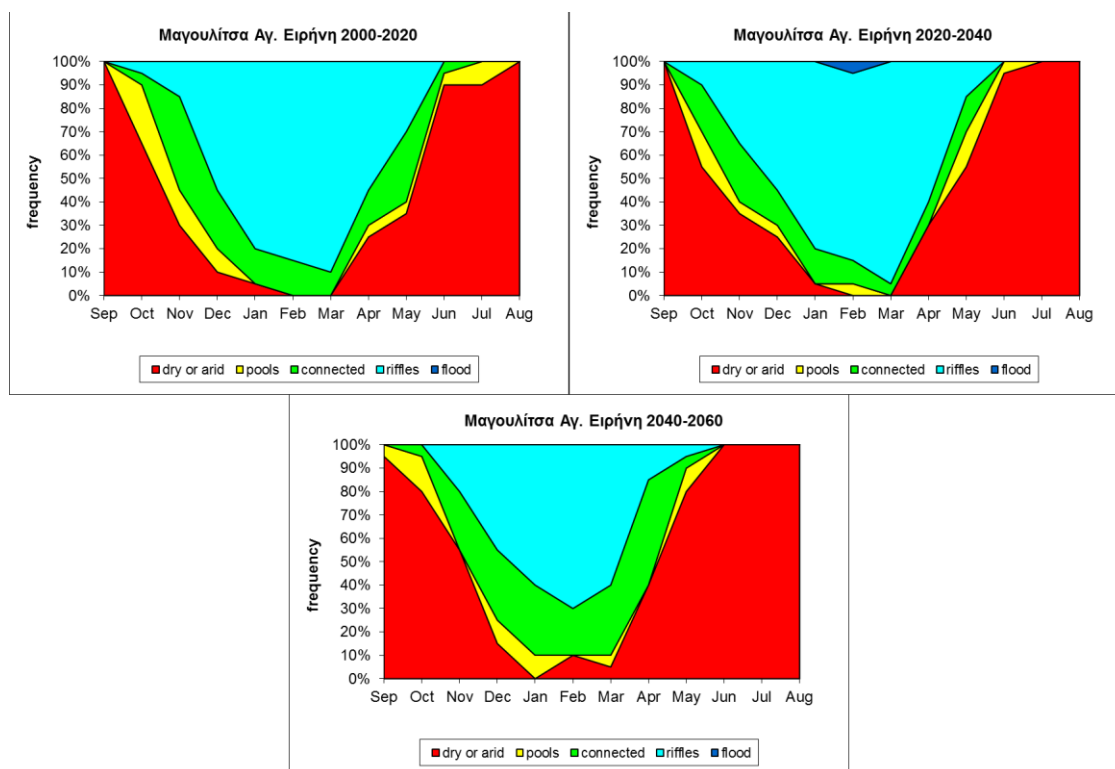


Ρασίνα Κουμουστά - Aquatic States Frequency Graph (2000-2060) – KNMI-RACMO2

«Ολοκληρωμένο πλαίσιο μοντελοποίησης υδρολογίας, ποιότητας νερών και στερεοπαροχής σε
λεκάνες απορροής ποταμών διαλείπουσας ροής»

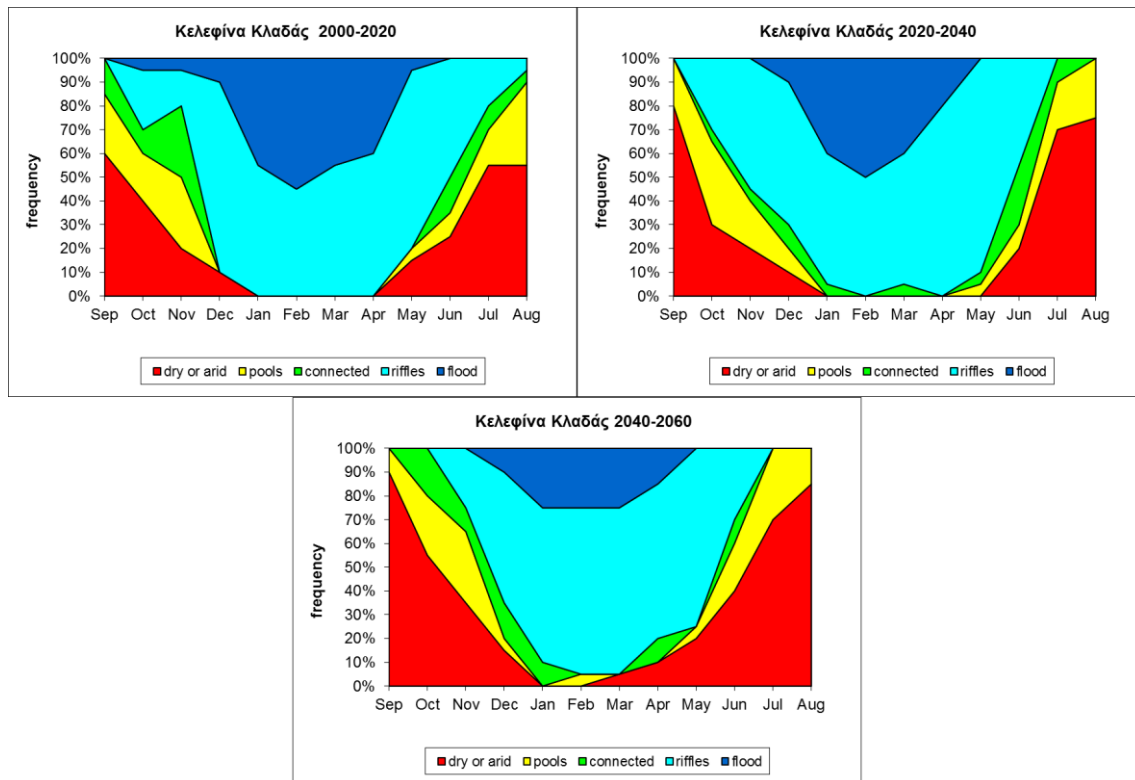


Βιβάρι - Aquatic States Frequency Graph (2000-2060) – MPI-M-REMO

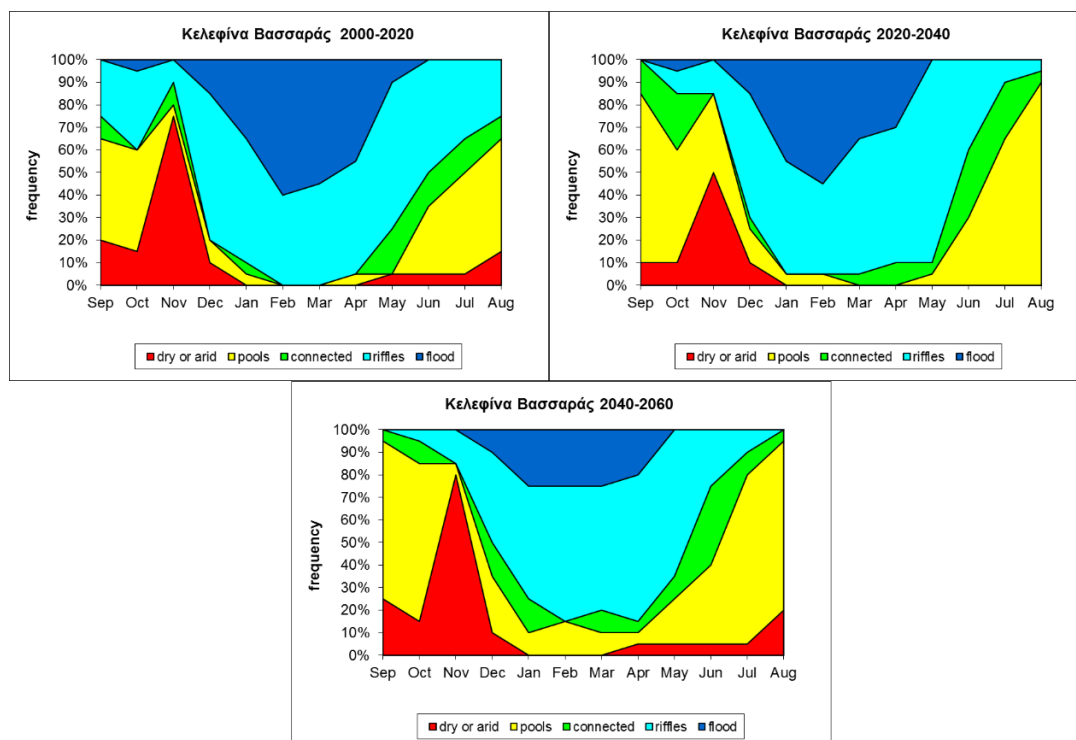


Μαγουλίτσα Αγ. Ειρήνη - Aquatic States Frequency Graph (2000-2060)– MPI-M-REMO

«Ολοκληρωμένο πλαίσιο μοντελοποίησης υδρολογίας, ποιότητας νερών και στερεοπαροχής σε λεκάνες απορροής ποταμών διαλείπουσας ροής»

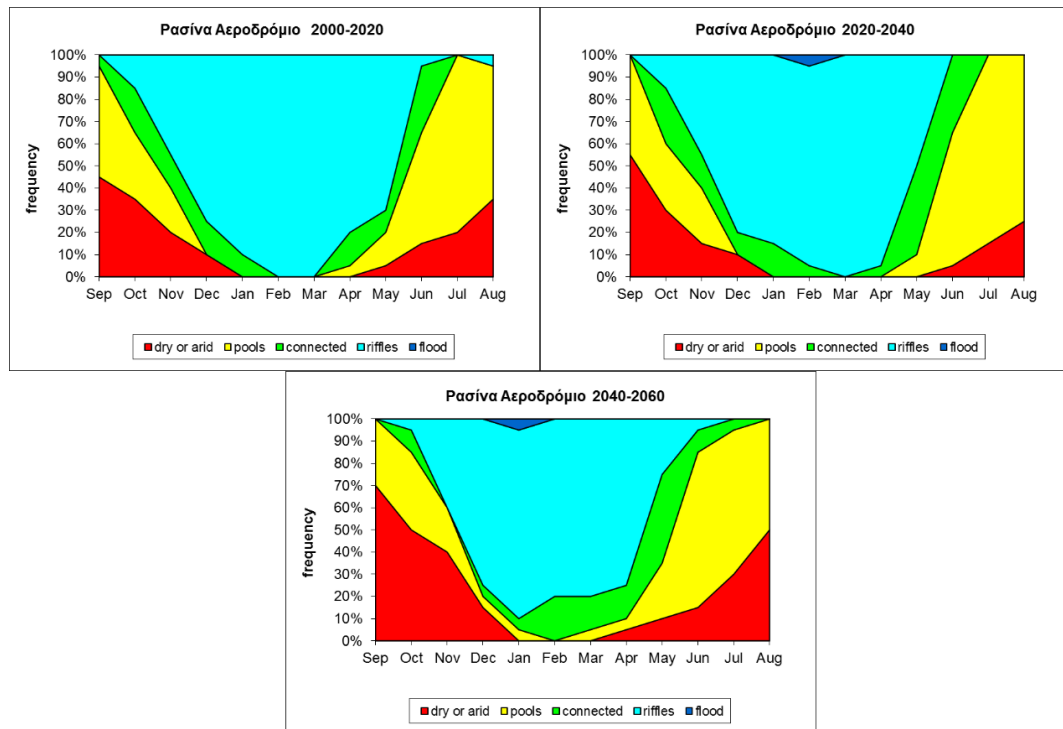


Κελεφίνα Κλαδάς - Aquatic States Frequency Graph (2000-2060) – MPI-M-REMO

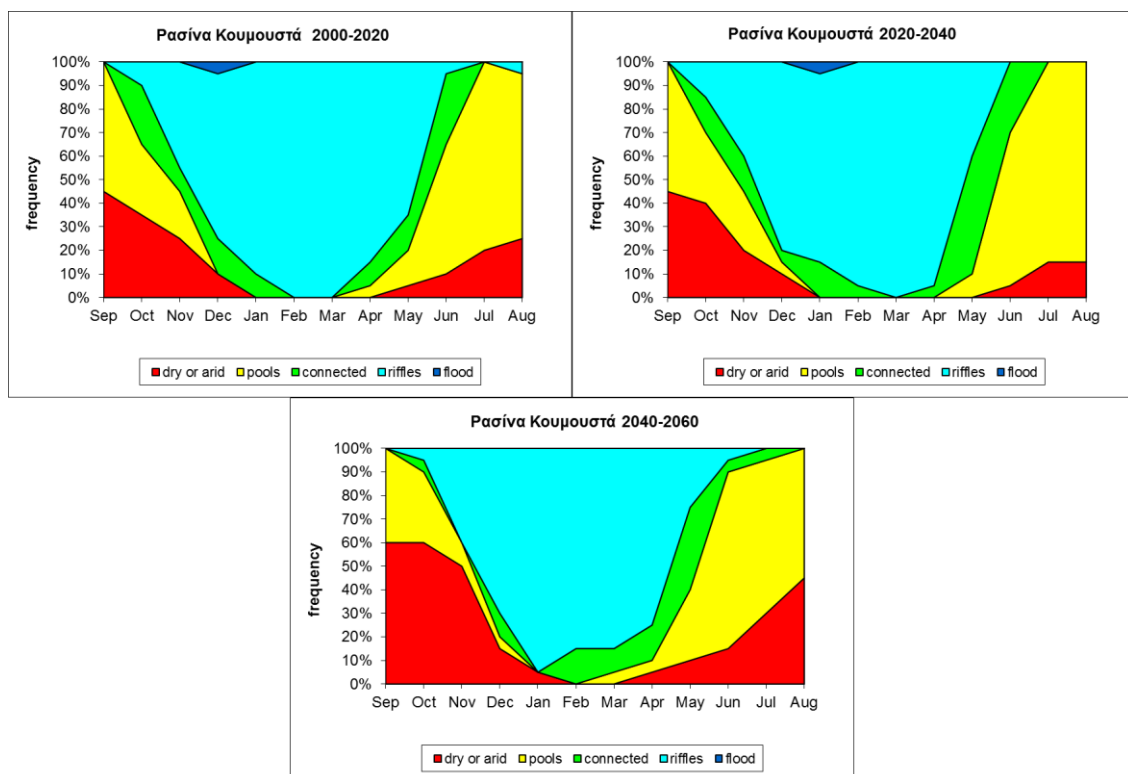


Κελεφίνα Βασσαράς - Aquatic States Frequency Graph (2000-2060) – MPI-M-REMO

«Ολοκληρωμένο πλαίσιο μοντελοποίησης υδρολογίας, ποιότητας νερών και στερεοπαροχής σε
λεκάνες απορροής ποταμών διαλείπουσας ροής»

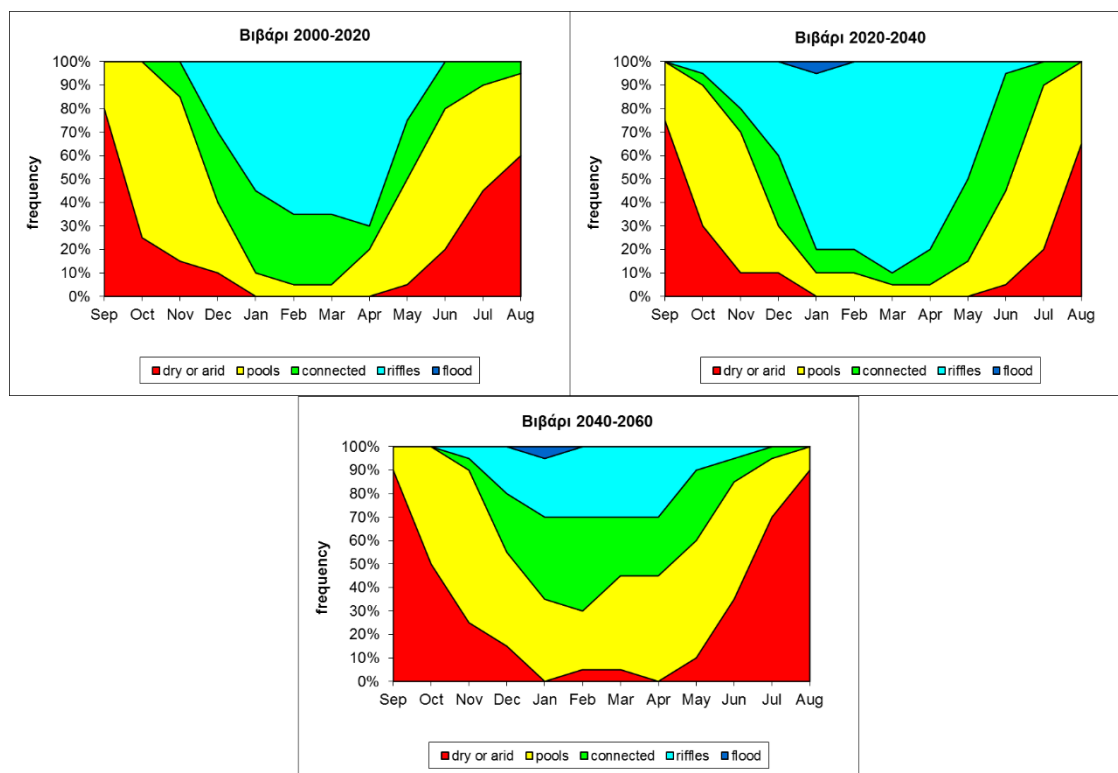


Ράσινα Αεροδρόμιο - Aquatic States Frequency Graph (2000-2060) – MPI-M-REMO

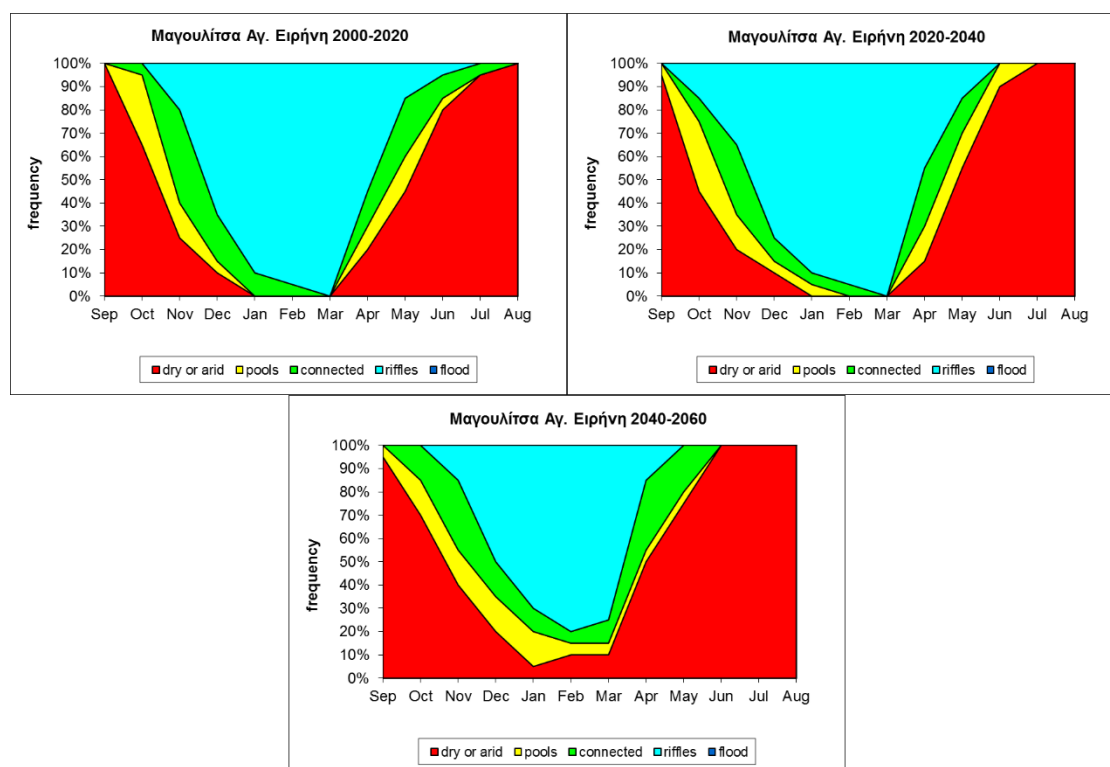


Ράσινα Κουμουστά - Aquatic States Frequency Graph (2000-2060) – MPI-M-REMO

«Ολοκληρωμένο πλαίσιο μοντελοποίησης υδρολογίας, ποιότητας νερών και στερεοπαροχής σε
λεκάνες απορροής ποταμών διαλείπουσας ροής»

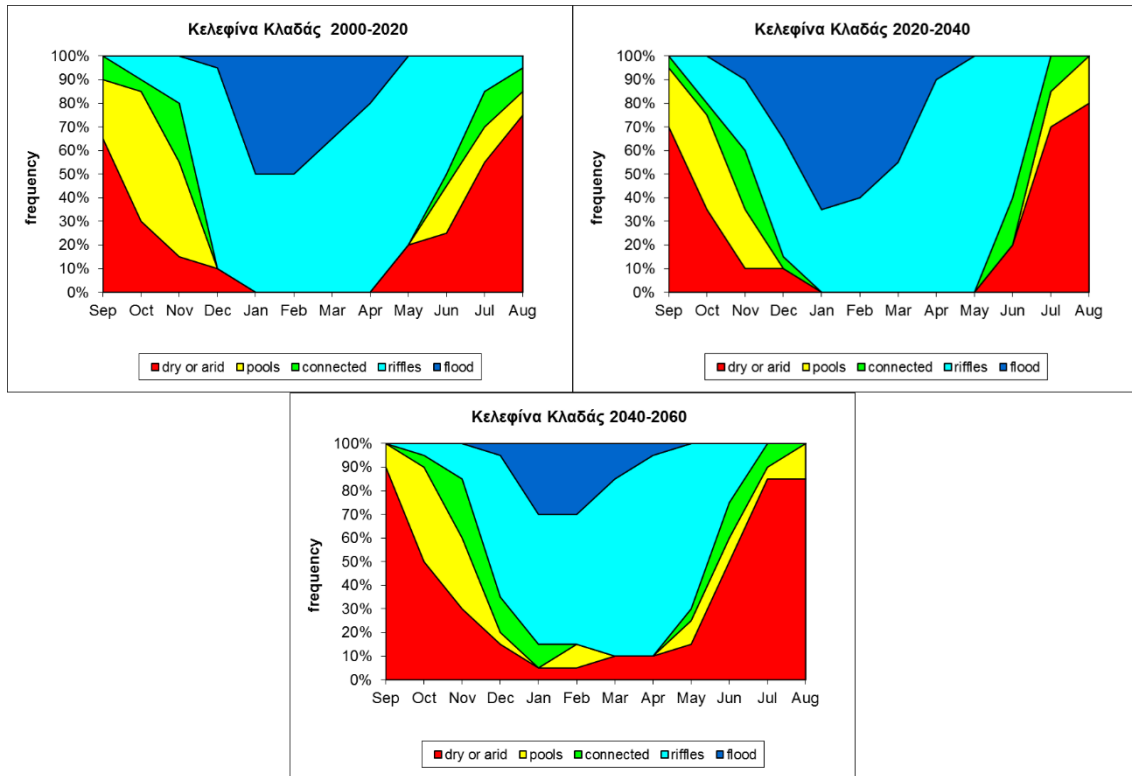


Βιβάρι - Aquatic States Frequency Graph (2000-2060) – SMHI-RCA

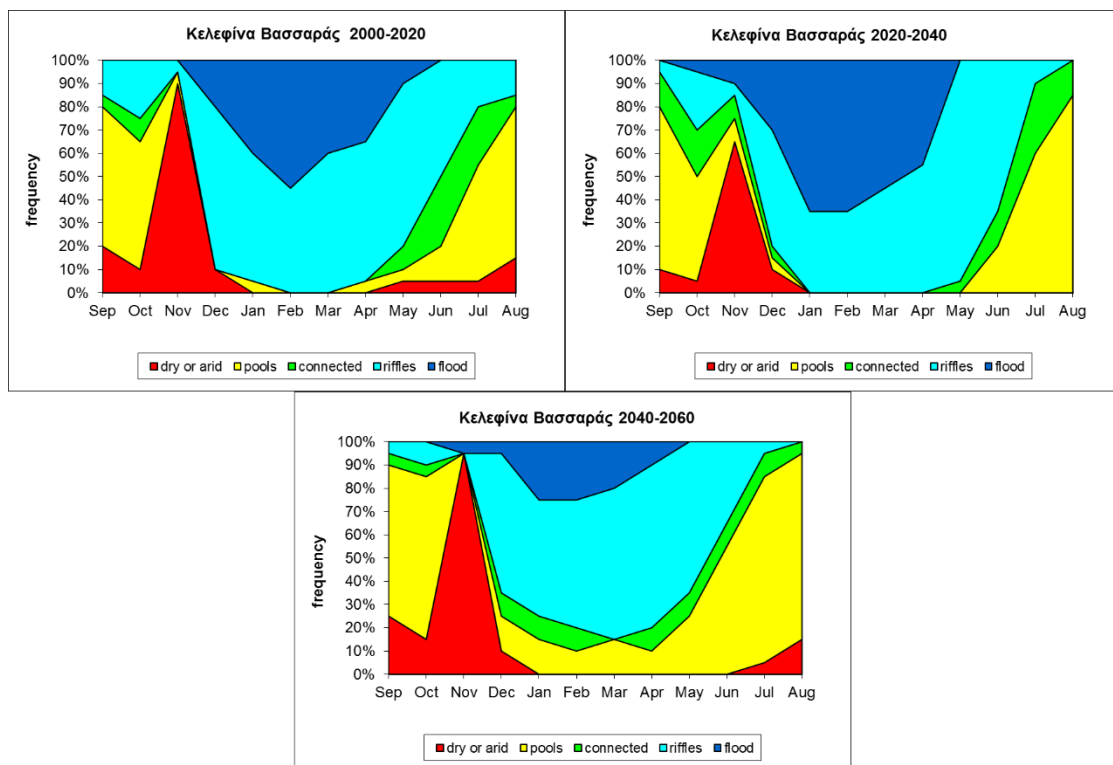


Μαγουλίτσα Αγ. Ειρήνη - Aquatic States Frequency Graph (2000-2060)– SMHI-RCA

«Ολοκληρωμένο πλαίσιο μοντελοποίησης υδρολογίας, ποιότητας νερών και στερεοπαροχής σε
λεκάνες απορροής ποταμών διαλείπουσας ροής»

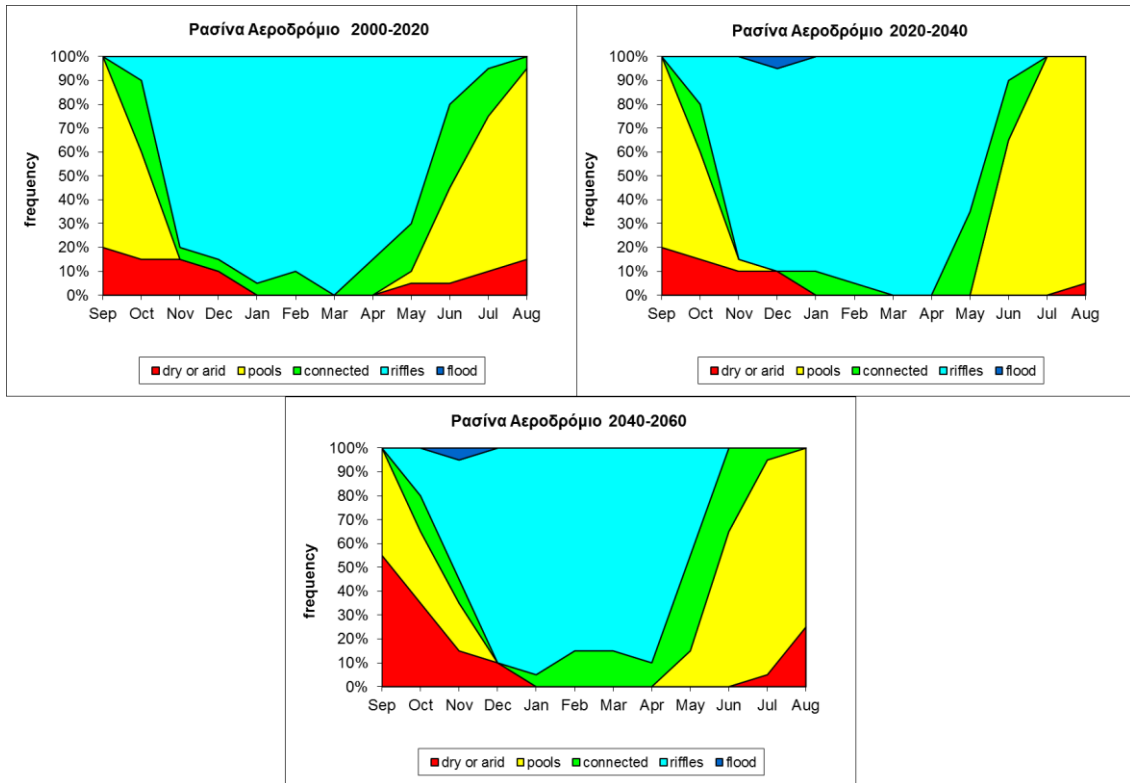


Κελεφίνα Κλαδάς - Aquatic States Frequency Graph (2000-2060) – SMHI-RCA

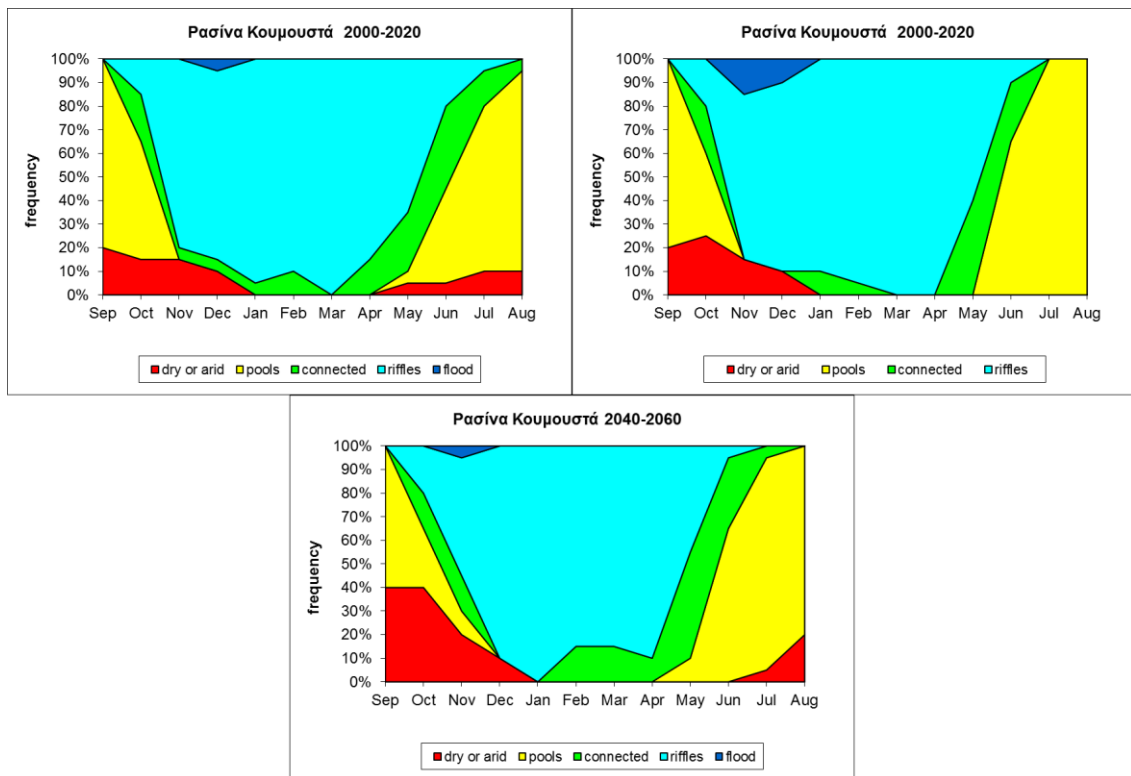


Κελεφίνα Βασσαράς - Aquatic States Frequency Graph (2000-2060) – SMHI-RCA

«Ολοκληρωμένο πλαίσιο μοντελοποίησης υδρολογίας, ποιότητας νερών και στερεοπαροχής σε λεκάνες απορροής ποταμών διαλείπουσας ροής»



Ρασία Αεροδρόμιο - Aquatic States Frequency Graph (2000-2060) – SMHI-RCA



Ρασία Κουμουστά - Aquatic States Frequency Graph (2000-2060) – SMHI-RCA

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ IV

**(Δεδομένα καταναλώμενης ηλεκτρικής ενέργειας γεωτρήσεων
άρδευσης και υπολογιζόμενη ποσότητα νερού)**

$$\text{Σχέση Ισχύος:}$$

$$P \text{ (kW)} = Q(\text{m}^3) * h(\text{m}) * 1.15 / 222$$

Υπολεκάνες	Δήμοι	Ποσοστό ανά Υπολεκάνη	Αρδευόμενη Έκταση	Αρδευόμενη Έκταση * Ποσοστό ανά Υπολεκάνη		Επίπεδο Στάθμης Αντλησης	ΣΑ*h
		%	Στρέμματα	Στρέμματα	m ²	h, m	m ³
Βιβάρι	Δ. Πελλάνας	85	3446	2929.1	2929100	10	29291000
	Δ. Οινούντος	10	2449	244.9	244850	20	4897000
Οινούντας - Βασαράς	Δ. Οινούντος	42	2449	1028.4	1028370	20	20567400
	Δ. Οινούντος	32	2449	783.5	783520	90	70516800
Οινούντας - Κελεφίνα	Δ. Θεραπνών	26	8443.5	2195.3	2195310	20	43906200
	Δ. Σπάρτης	3	25731	771.9	771930	15	11578950
Πάρνωνας	Δ. Θεραπνών	44	8444	3715.1	3715140	240	891633600
	Δ. Πελλάνας	13	3446	448.0	447980	10	4479800
	Δ. Οινούντος	11	2449	269.3	269335	90	24240150
	Δ. Μυστρά	100	15607	15607.0	15607000	10	156070000
Βρονταμάς	Δ. Σπάρτης	97	25731	24959.1	24959070	15	374386050
	Δ. Φάριδος	82	16304	13369.3	13369280	30	401078400
	Δ. Θεραπνών	21	8444	1773.1	1773135	240	425552400
	Δ. Κροκεών	22	1889	415.6	415580	50	20779000
	Δ. Σκάλας	2	24121	482.4	482420	5	2412100

Υπολεκάνες	Αρδευόμενη Έκταση ανά Υπολεκάνη	ΣΑ*h ανά Υπολεκάνη	ΣΑ*h/Αρδευόμενη Έκταση	ΣΑ*h/ΣΑi	ΣΑ*h/ΣΑi * Αρδευόμενη Ισχύ	Q _{irrigation} ΔΕΗ	Q _{irrigation} ΔΕΗ
	m ²	m ³	H, m	m	P, KW m	m ³	εκ. m ³
Βιβάρι	3173950	34188000	10.77	0.01379	188534.45	3378875.919	3.38
Οινούντας - Βασαράς	1028370	20567400	20.00	0.00830	113421.77	1094766.656	1.09
Οινούντας - Κελεφίνα	3750760	126001950	33.59	0.05083	694855.17	3992927.627	3.99
Πάρνωνας	3715140	891633600	240.00	0.35968	4917036.75	3955007.823	3.96
Βρονταμάς (Σπάρτη)	56841380	1406585800	24.75	0.56741	7756811.85	60511340.78	60.51
ΣΥΝΟΛΟ ΥΠΟΚΑΤΑΣΤΗΜΑ ΣΠΑΡΤΗΣ		2478976750					73