

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

***ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΚΑΙ ΓΕΩΧΗΜΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ
ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΤΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ ΚΕΡΙΤΗ***

ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ Μ. ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

ΝΙΚΟΛΑΙΔΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΚΑΡΑΤΖΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΠΑΡΑΝΥΧΙΑΝΑΚΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΧΑΝΙΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2015

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η πραγματοποίηση της παρούσας διπλωματικής διατριβής θα ήταν αδύνατη χωρίς την βοήθεια και την καθοριστική συμβολή ορισμένων ανθρώπων. Συγκεκριμένα, πρώτα από όλους επιθυμώ να ευχαριστήσω:

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Νικολαΐδη Νικόλαο, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου την συγκεκριμένη εργασία καθώς και για την επίβλεψη και την καθοδήγησή του.

Επίσης, ευχαριστώ τους Καθηγητές κ. Καρατζά Γεώργιο και κ. Παρανυχιανάκη Νικόλαο για την συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή.

Θα ήθελα επίσης να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον Γιαννάκη Γεώργιο, υποψήφιο διδάκτορα του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος, για τις ώρες που περάσαμε μαζί στο πεδίο. Οι γνώσεις και οι εμπειρίες που μου μετέδωσε αποτελούν χρήσιμη παρακαταθήκη για την μελλοντική ενασχόληση μου με την υδρολογία.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω να εκφράσω στην υποψήφια διδάκτωρ, Πανακούλια Σωτηρία, ούσα εκείνη που μου μετέδωσε εξ αρχής το μικρόβιο της μοντελοποίησης με το SWAT. Επίσης, την ευχαριστώ ιδιαίτερα για την βοήθειά της κατά την διάρκεια της συγγραφής της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Ευχαριστώ επίσης την Νεραντζάκη Σοφία, μεταπτυχιακή φοιτήτρια του τμήματος ΜΗ.ΠΕΡ, για την βοήθεια και της πολύτιμες συμβουλές της στο στάδιο της βαθμονόμησης του μοντέλου.

Το προσωπικό του εργαστηρίου «Υδρογεωχημικής Μηχανικής και Αποκατάστασης Εδαφών», Βουτσαδάκη Στέλλα και Saru Maria – Liliana, ευχαριστώ για την βοήθεια ,την κατανόηση και την υπομονή που μου έδειξαν κατά την διάρκεια των εργαστηριακών αναλύσεων.

Οφείλω επίσης να ευχαριστήσω τους φίλους, Νίκο, Ροδόπη, Αντώνη, Κωνσταντίνο, Αριάδνη και Μαρκέλλα για την καλή παρέα, τους καφέδες και τις μπύρες καθώς και τις αμέτρητες στιγμές απόγνωσης και γέλιου που περάσαμε κατά την «θητεία» μας στο Πολυτεχνείο Κρήτης.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένεια μου, τους γονείς μου, Μιχάλη και Βίκυ, την αδερφή μου Στεφανία - Αθηνά και την γιαγιά μου Gisela, για την ηθική και υλική στήριξη, καθώς και για την κατανόηση που μου έδειξαν καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

ABSTRACT

The Keritis river basin is considered to be the most important hydrological catchment in the peculiarity of Chania. A hydrological and geochemical simulation was performed, using the modified SWAT-KARST model, to assess the hydrological budget of the watershed as well as its quantitative and qualitative change in the following years. Also the impact and temporal variability of management practices and agricultural and livestock loads to the quality of groundwater and surface water were estimated. Data from three regional climate models for the A1B emission scenario were used in this research to study the impact of climate change in the water resources of the watershed till the end of the 21st century. Simulations results suggest a drastic decrease in precipitation (30%), karstic spring discharge (30% - 40%) and surface runoff (70%). Also, a further quality downgrading is expected in groundwater and surface water. This study is expected to be used as a useful tool for decision makers of the area with the purpose of developing a strategy for an integrated water resource management for the Keritis river basin.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η λεκάνη απορροής του ποταμού Κερίτη θεωρείται η σημαντικότερη υδρολογική λεκάνη του Ν. Χανίων. Πραγματοποιήθηκε προσομοίωση της υδρολογίας και της γεωχημείας, με την χρήση του τροποποιημένου μοντέλου SWAT – KARST, με σκοπό την εκτίμηση του υδατικού ισοζυγίου της λεκάνης καθώς και της ποσοτικής και ποιοτικής μεταβολής του τα επόμενα χρόνια. Ακόμη εκτιμήθηκαν οι επιπτώσεις και η εποχική διακύμανση των πρακτικών διαχείρισης και των φορτίσεων από γεωργικές και κτηνοτροφικές δραστηριότητες στην ποιότητα του υπογείου και του επιφανειακού νερού. Τα δεδομένα τριών περιφερειακών κλιματικών μοντέλων για το σενάριο A1B χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη για την μελέτη των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στους υδατικούς πόρους της λεκάνης ως τα τέλη του 21^{ου} αιώνα. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν μια δραστική μείωση της βροχόπτωσης (30%), της παροχής των καρστικών πηγών (30%-40%) και της επιφανειακής απορροής (70%). Επίσης αναμένεται περαιτέρω υποβάθμιση της ποιότητας των υπογείων και επιφανειακών υδάτων. Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης θα αποτελέσουν ένα χρήσιμο βοήθημα για τους φορείς λήψης αποφάσεων της περιοχής με στόχο την ανάπτυξη μιας στρατηγικής ολοκληρωμένης διαχείρισης υδατικών πόρων για την λεκάνη απορροής του ποταμού Κερίτη.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	i
ABSTRACT	ii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	ii
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	iii
ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ	v
ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ	vii
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1. ΓΕΝΙΚΑ.....	1
1.2. ΣΚΟΠΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	5
2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	6
2.1. ΠΑΓΚΟΣΜΙΟΙ ΒΙΟΓΕΩΧΗΜΙΚΟΙ ΚΥΚΛΟΙ	6
2.1.1. Ο ΚΥΚΛΟΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ	7
2.1.2. Ο ΚΥΚΛΟΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ	9
2.1.3. Ο ΚΥΚΛΟΣ ΤΟΥ ΑΖΩΤΟΥ	12
2.1.4. Ο ΚΥΚΛΟΣ ΤΟΥ ΦΩΣΦΟΡΟΥ.....	16
2.2. ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ.....	18
2.2.1. ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΣΚΟΠΟΣ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ.....	18
2.2.2. ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ	19
2.2.3. ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΚΑΙ ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ	22
2.2.4. ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ SWAT.....	25
2.3. ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ.....	27
2.3.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	27
2.3.2. ΑΙΤΙΑ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ	28
2.3.3. ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ.....	29
2.3.4. ΣΕΝΑΡΙΑ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΑΕΡΙΩΝ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ	30
2.3.5. ΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ.....	31
3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	33
3.1. ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΥΠΑΓΩΓΗ.....	33
3.2. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ ΚΑΙ ΧΡΗΣΕΩΝ ΓΗΣ	34
3.3. ΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	36
3.4. ΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΚΡΗΤΗΣ	41
3.5. ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ.....	42
3.6. ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ	44
3.7. ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΑ ΥΔΑΤΑ	47

3.8.	ΥΠΟΓΕΙΑ ΥΔΑΤΑ	49
3.9.	ΥΔΡΑΥΛΙΚΕΣ ΑΠΟΛΗΨΕΙΣ	50
4.	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	52
4.1.	ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΕΔΙΟΥ.....	52
4.2.	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ ΑΖΩΤΟΥ	57
4.3.	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ.....	60
4.4.	ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ.....	64
4.5.	ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ	65
5.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	66
5.1.	ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΚΑΙ ΧΗΜΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΠΗΓΩΝ ΤΩΝ ΜΕΣΚΛΩΝ	66
5.2.	ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΚΑΙ ΧΗΜΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΠΗΓΩΝ της ΑΓΥΙΑΣ	68
5.3.	ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΚΑΙ ΧΗΜΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ ΚΕΡΙΤΗ.....	70
5.4.	ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΛΕΚΑΝΗΣ ΚΕΡΙΤΗ - ΘΕΡΙΣΟΥ	73
5.5.	ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΛΟΓΩ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ	75
5.6.	ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑΣ ΒΑΣΕΙ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ.....	77
5.7.	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ ΣΤΟ ΥΔΑΤΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ	86
6.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	89
7.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	91
7.1.	ΔΙΕΘΝΕΙΣ ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ	91
7.2.	ΜΕΛΕΤΕΣ	95
7.3.	ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ	95
7.4.	WEB.....	96

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1: Σχηματική αναπαράσταση του υδρολογικού κύκλου (ΠΗΓΗ:USGS).....	8
Εικόνα 2.2: Σχηματική απεικόνιση του κύκλου του άνθρακα (ΠΗΓΗ:NASA).	11
Εικόνα 2.3: Σχηματική απεικόνιση του κύκλου του αζώτου (ΠΗΓΗ:NATURE).	15
Εικόνα 2.4: Σχηματική απεικόνιση του κύκλου του φωσφόρου (ΠΗΓΗ:WIKIPEDIA).	17
Εικόνα 2.5: Σχηματική απεικόνιση ενός υδρολογικού μοντέλου.	18
Εικόνα 2.6: Αύξηση της συγκέντρωσης ατμοσφαιρικού διοξειδίου του άνθρακα (CO ₂), βάση αναλύσεων ατμοσφαιρικών δειγμάτων από γεωτρήσεις πάγων και σύγχρονων μετρήσεων (Petit et al. 1999).....	27
Εικόνα 2.7: (α) Παγκόσμιες ετήσιες εκπομπές ανθρωπογενών αερίων του θερμοκηπίου από το 1970 έως το 2004. (b) Συμμετοχή των διάφορων ανθρωπογενών αερίων του θερμοκηπίου το 2004 εκφρασμένη σε ισοδύναμα διοξειδίου του άνθρακα (CO ₂ – eq). (c) Συμμετοχή των διαφορετικών βιομηχανικών δραστηριοτήτων στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου το 2004 εκφρασμένη σε ισοδύναμα διοξειδίου του άνθρακα (CO ₂ – eq) (Bernstein et al. 2007).	28
Εικόνα 2.8: Μεταβολή της διαθεσιμότητας του νερού για το νησί της Κρήτης, σύμφωνα με το σενάριο A1B του IPPC (Koutroulis et al. 2013).	29
Εικόνα 2.9: Σχηματική απεικόνιση της κατηγοριοποίησης των σεναρίων κλιματικής αλλαγής όπως έχουν προταθεί από την IPPC (Nakicenovic & Swart 2000).	30
Εικόνα 2.10: Σχηματική απεικόνιση ενός Παγκόσμιου Κλιματικού Μοντέλου (GCM) και ενός Περιφερειακού Κλιματικού Μοντέλου (RCM).	31
Εικόνα 3.1: Γεωγραφική υπαγωγή περιοχής μελέτης.	33
Εικόνα 3.2: Χρήσεις γης στη λεκάνη του Κερίτη - Θερίσου.	35
Εικόνα 3.3: Μέση μέγιστη και μέση ελάχιστη θερμοκρασία για τους μετεωρολογικούς σταθμούς στον Αλικιανό και στο Ψ. Πηγάδι.	37
Εικόνα 3.4: Μεταβολή της βροχόπτωσης κατά την χρονική περίοδο 1974 - 2014 (40 έτη).	38
Εικόνα 3.5: (α) Μετεωρολογικοί σταθμοί περιοχής μελέτης (με μπλε) και (β) σταθμοί μοντέλων κλιματικής αλλαγής (με κίτρινο).	40
Εικόνα 3.6: Αναλυτική τομή της γεωλογικής δομής της Κρήτης (ΠΗΓΗ: ΙΓΜΕ).	41
Εικόνα 3.7: Γεωλογία λεκάνης Κερίτη – Θερίσου (ψηφιοποίηση από χάρτη το Εργαστήριου Γεωλογίας και Παλαιοντολογίας, ΑΠΘ).	43
Εικόνα 3.8: Υδρογεωλογικός χάρτης της λεκάνης του Κερίτη (ΠΗΓΗ: Γιαννακοπούλου Ε., 2014).	46
Εικόνα 3.9: Επιφανειακά ύδατα στη λεκάνη του Κερίτη – Θερίσου (Τσάιμος Γ., 2009).	48
Εικόνα 4.1: Καμπύλη στάθμης – παροχής για τον ποταμό Κερίτη στην διατομή των Δρακιανών.	55
Εικόνα 4.2: Μετρήσεις παροχής ποταμού Κερίτη (Διατομή Δρακιανών) για το έτος 2012-2013 (Αλδάκος Θ., 2014).	56
Εικόνα 4.3: Μετρήσεις παροχής ποταμού Κερίτη (Διατομή Δρακιανών).	56
Εικόνα 4.4: Σχηματική απεικόνιση του καρστικού μοντέλου (Nikolaidis et al. 2013).	61
Εικόνα 4.5: Το διπλό σύστημα των δύο ταμειωτήρων.	62
Εικόνα 4.6: Σχηματική απεικόνιση του συνδυασμένου μοντέλου SWAT – KARST.	63

Εικόνα 5.1: Σύγκριση παροχών πεδίου και μοντέλου για τις πηγές των Μεσκλών κατά την περίοδο βαθμονόμησης (Σεπτέμβριος 2000 - Αύγουστος 2005).....	66
Εικόνα 5.2: Παροχή πηγών Μεσκλών για το συνολικό διάστημα της επαλήθευσης (1978 - 2005).....	66
Εικόνα 5.3: Χημική απόκριση των πηγών των Μεσκλών.	67
Εικόνα 5.4: Παροχή πηγών Αγυιάς για την χρονική περίοδο 1978 – 1985.....	68
Εικόνα 5.5: Χημική απόκριση των πηγών της Αγυιάς.	69
Εικόνα 5.6: Παροχή ποταμού Κερίτη (διατομή Δρακιανών) για το χρονικό διάστημα 2012 – 2013.....	70
Εικόνα 5.7: Παροχή ποταμού Κερίτη (διατομή Δρακιανών) για την χρονική περίοδο 2014 – 2015.	70
Εικόνα 5.8: Υδατικό ισοζύγιο της λεκάνης του Κερίτη για τις δεκαετίες 1981-1990, 1991-2000 και 2001-2010.....	73
Εικόνα 5.9: Συμμετοχή των πηγών της Αγυιάς, των Μεσκλών και της επιφανειακής απορροής στην συνολική παροχή του ποταμού Κερίτη.	73
Εικόνα 5.10: Εκτιμώμενο υδατικό ισοζύγιο της λεκάνης απορροής του ποταμού Κερίτη.	74
Εικόνα 5.11: Μέσος όρος βροχόπτωσης ανά δεκαετία για τον σταθμό Αλικιανό (1974-2015) και πρόβλεψη βάσει σεναρίων κλιματικής αλλαγής έως 2100.	75
Εικόνα 5.12: Μέσος όρος βροχόπτωσης ανά δεκαετία για τον σταθμό Ψ. Πηγάδι (1974-2015) και πρόβλεψη βάσει σεναρίων κλιματικής αλλαγής έως 2100.	75
Εικόνα 5.13: Μέση ετήσια ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία για τον σταθμό Ψ.Πηγάδι (1974 -2015) και πρόβλεψη έως το 2100.	76
Εικόνα 5.14: Μεταβολή παροχής σύμφωνα με το μοντέλο κλιματικής αλλαγής KnhmiRacmoEcham5.	79
Εικόνα 5.15: Μεταβολή παροχής σύμφωνα με το μοντέλο κλιματικής αλλαγής MpiRemoEcham5.	80
Εικόνα 5.16: Μεταβολή παροχής σύμφωνα με το μοντέλο κλιματικής αλλαγής SmhiRcaEcham5.	81
Εικόνα 5.17: Μεταβολή της συγκέντρωσης νιτρικού αζώτου σύμφωνα με το μοντέλο KnhmiRacmo2Echam5.	83
Εικόνα 5.18: Μεταβολή της συγκέντρωσης νιτρικού αζώτου σύμφωνα με το μοντέλο MpiRemoEcham5.	84
Εικόνα 5.19: Μεταβολή της συγκέντρωσης νιτρικού αζώτου σύμφωνα με το μοντέλο SmhiRcaEcham5.	85
Εικόνα 5.20: Μεταβολή βροχόπτωσης, εξατμισοδιαπνοής και παροχής ποταμού Κερίτη υπό τρία μοντέλα κλιματικής αλλαγής (σε Mm^3 και mm).	86
Εικόνα 5.21: Προβλέψεις μέσων όρων 20-ετίας βροχόπτωσης, εξατμισοδιαπνοής και συνολικής παροχής για την λεκάνη του Κερίτη.....	87
Εικόνα 5.22: Εκτιμώμενο υδατικό ισοζύγιο λεκάνης Κερίτη για την δεκαετία 2091-2100.	88

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1: Περιφερειακά κλιματικά μοντέλα (Regional Climate Models) (Koutroulis et al. 2013)....	32
Πίνακας 3.1: Στατιστική επεξεργασία δεδομένων θερμοκρασία για τους μετεωρολογικούς σταθμούς στον Αλικιανό και στο Ψ. Πηγάδι.	36
Πίνακας 3.2: Δεδομένα βροχόπτωσης από τους πέντε βροχομετρικούς σταθμούς της περιοχής μελέτης.	38
Πίνακας 3.3: Κατανομή σχετικής υγρασίας ανά μήνα για την λεκάνη Κερίτη - Θερίσου.	39
Πίνακας 3.4: Κατανομή της ηλιοφάνειας σε ώρες ανά μήνα για την λεκάνη Κερίτη - Θερίσου.	39
Πίνακας 3.5: Υδραυλικές απολήψεις στην λεκάνη Κερίτη – Θερίσου.	51
Πίνακας 4.1: Μετρήσεις νιτρικού αζώτου στον ποταμό Κερίτη (διατομή Δρακιανών).	53
Πίνακας 4.2: Συγκέντρωση νιτρικού αζώτου στην λίμνη της Αγυιάς (υπερχειλίση).	53
Πίνακας 4.3: Συγκέντρωση νιτρικού αζώτου στις πηγές των Μεσκλών.	54
Πίνακας 4.4: Μετρήσεις παροχής στην διατομή των Δρακιανών (2005-2015).	55
Πίνακας 4.5: Αριθμός και συνολικό βάρος αιγοπροβάτων στην λεκάνη του Κερίτη – Θερίσου.	57
Πίνακας 4.6: Υπολογισμός ετήσιας ποσότητας κοπριάς σε κάθε οικισμό της περιοχής μελέτης.	58
Πίνακας 4.7: Ετήσια ποσότητα κοπριάς ανά εκτάριο στη λεκάνη Κερίτη – Θερίσου.	59
Πίνακας 4.8: Ποσότητα λιπάσματος σε [kg/ha] για διαφορετικές χρήσεις γης της λεκάνης απορροής Κερίτη-Θερίσου.	59
Πίνακας 4.9: Παραμετροποίηση του μοντέλου SWAT.	64
Πίνακας 4.10: Κριτήρια αξιολόγησης της προσομοίωσης βάσει στατιστικών δεικτών (ΠΗΓΗ: (Moriasi & Arnold 2007))	65
Πίνακας 5.1: Στατιστικοί δείκτες βαθμονόμησης (2000-2005) και επαλήθευσης (1978-2000) για τις μηνιαίες παροχές των πηγών των Μεσκλών.	67
Πίνακας 5.2: Στατιστικοί δείκτες βαθμονόμησης της χημικής απόκρισης των πηγών των Μεσκλών... 67	67
Πίνακας 5.3: Στατιστικοί δείκτες βαθμονόμησης (1978-1985) για τις μηνιαίες παροχές των πηγών της Αγυιάς.	68
Πίνακας 5.4: Στατιστικοί δείκτες βαθμονόμησης της χημικής απόκρισης των πηγών της Αγυιάς.	69
Πίνακας 5.5: : Στατιστικοί δείκτες βαθμονόμησης (2012-2013) και επαλήθευσης (2014-2015) για την ημερήσια παροχή του ποταμού Κερίτη.	71
Πίνακας 5.6: Στατιστικοί δείκτες βαθμονόμησης της χημικής απόκρισης του ποταμού Κερίτη.	72
Πίνακας 5.7: Αναμενόμενη ποσοτική και ποσοστιαία μεταβολή της παροχής των πηγών των Μεσκλών βάσει των τριών μοντέλων κλιματικής αλλαγής.	77
Πίνακας 5.8: Αναμενόμενη ποσοτική και ποσοστιαία μεταβολή της παροχής των πηγών της Αγυιάς βάσει των τριών μοντέλων κλιματικής αλλαγής.	77
Πίνακας 5.9: Αναμενόμενη ποσοτική και ποσοστιαία μεταβολή της επιφανειακής απορροής του ποταμού Κερίτη βάσει των τριών μοντέλων κλιματικής αλλαγής.	78
Πίνακας 5.10: Αναμενόμενη ποσοτική και ποσοστιαία μεταβολή της παροχής του ποταμού Κερίτη (διατομή Δρακιανών) βάσει των τριών μοντέλων κλιματικής αλλαγής.	78

Πίνακας 5.11: Μεταβολή συγκέντρωσης νιτρικού αζώτου (N-NO_3) στις καρστικές πηγές της Αγυιάς και των Μεσκλών.	82
Πίνακας 5.12: Μεταβολή συγκέντρωσης νιτρικού αζώτου (N-NO_3) στην επιφανειακή και συνολική απορροή του ποταμού Κερίτη.	82

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. ΓΕΝΙΚΑ

Το νερό είναι μια από τις πιο διαδεδομένες χημικές ενώσεις στην φύση. Θεωρείται ότι το περισσότερο νερό που απαντάται στο διάστημα έχει δημιουργηθεί ως παραπροϊόν του σχηματισμού των άστρων. Ως εκ τούτου έχουν ανιχνευθεί τεράστιες ποσότητες νερού στα διαστρικά νέφη. Το δίπολο υδρογόνου – οξυγόνου προσδίδει στο μόριο του νερού τις ιδιαίτερες φυσικοχημικές ιδιότητες που του επιτρέπουν να υποστηρίξει την δημιουργία και την συντήρηση της ζωής. Δεν είναι τυχαίο ότι οι αστρονόμοι στην προσπάθεια τους να απαντήσουν στο ερώτημα «υπάρχει ζωή εκεί έξω» αναζητούν πλανήτες που έχουν νερό και μάλιστα σε υγρή μορφή. Η ίδια η ύπαρξη της ζωής φαίνεται να προϋποθέτει την παρουσία νερού σε υγρή μορφή. Η περιεκτικότητα σε νερό του ανθρώπινου σώματος είναι περίπου 70% ενώ φτάνει μέχρι και το 99.8% στις μέδουσες (wikipedia.org).

Το νερό καλύπτει το 70% περίπου της επιφάνειας του πλανήτη και απαντάται και στις τρεις μορφές του: στερεή, υγρή και αέρια. Όμως από τα συνολικά 1.386 εκατομμύρια κυβικά χιλιόμετρα που υπάρχουν στην Γη μόνο το 3% αντιστοιχεί σε «γλυκό» νερό, που μπορεί δηλαδή να καταναλωθεί από τον άνθρωπο και τα ζώα για τις ανάγκες τους. Το υπόλοιπο 97% σχηματίζει ωκεανούς και θάλασσες «αλμυρού» νερού. Παρόλα αυτά στην πραγματικότητα μόνο το 1% του «γλυκού» νερού είναι άμεσα διαθέσιμο, καθώς το υπόλοιπο βρίσκεται αποθηκευμένο σε παγετώνες ή βαθιά μέσα στο έδαφος (υπόγειο νερό) (**United States Geological Survey**). Το νερό δεν είναι στατικό στην επιφάνεια της Γης. Αντίθετα υφίσταται μεγάλης κλίμακας μεταφορά. Η συνεχής ανακύκλωση του νερού ανάμεσα στην επιφάνεια, στην ατμόσφαιρα και το υπέδαφος της Γης ονομάζεται υδρολογικός κύκλος. Η κινητήρια δύναμη πίσω από τον υδρολογικό κύκλο θεωρείται η ηλιακή ακτινοβολία. Συνέπεια του υδρολογικού κύκλου είναι η δημιουργία ποταμών και χειμάρρων. Τα ποτάμια είχαν και εξακολουθούν να έχουν ιδιαίτερη επίδραση στην εξέλιξη του ανθρώπινου πληθυσμού. Ενδεικτικό αυτής της άποψης είναι ότι οι πρώτοι μεγάλοι πολιτισμοί άνθισαν σε περιοχές που διαρρέονταν από μεγάλους ποταμούς (Αίγυπτος – Νείλος, Μεσοποταμία – Τίγρης και Ευφράτης). Αλλά και κατά την νεότερη και σύγχρονη ιστορία τα ποτάμια επιτάχυναν την ανθρώπινη ανάπτυξη, ιδιαίτερα κατά την βιομηχανική επανάσταση. Η επιστήμη που ασχολείται με τον υδρολογικό κύκλο και τις διεργασίες που αυτός περιλαμβάνει ονομάζεται υδρολογία. Η υδρολογία συνδυάζει τα πεδία πολλών επιστημών όπως της γεωλογίας, της γεωγραφίας, της περιβαλλοντικής μηχανικής και της βιολογίας. Σκοπός της υδρολογίας είναι η μελέτη της κυκλοφορίας του νερού στην Γη, των υδάτινων σωμάτων, των αλληλεπιδράσεων τους και των ποσοτικών και ποιοτικών μεταβολών τους (**Τσακίρης, 2004**).

Η ποσότητα και η ποιότητα του νερού σε μια περιοχή μπορεί να καθορίσει σε πολύ μεγάλο βαθμό και την ποιότητα της ζωής εκεί. Σήμερα ο κόσμος βρίσκεται σε κρίσιμη καμπή και αυτό οφείλεται εν μέρει στην κατάσταση των διαθέσιμων υδάτινων αποθεμάτων. Οι κυριότερες παράγοντες ποσοτικής και ποιοτικής υποβάθμισης των υδάτων είναι η αύξηση του πληθυσμού, η κλιματική αλλαγή και οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Κατά την αρχή της νεολιθικής εποχής (8.000 π.Χ.) ο συνολικός πληθυσμός της Γης ήταν μόλις πέντε εκατομμύρια. Έπρεπε να έρθει η εποχή της βιομηχανικής επανάστασης (1.800 μ.Χ.) για να φτάσει το ένα δισεκατομμύριο κατοίκους. Κατά την διάρκεια του 20^{ου} αιώνα μόνο ο πληθυσμός της Γης αυξήθηκε από 1,65 σε 6 δισεκατομμύρια. Σύμφωνα με τις προβλέψεις των Ηνωμένων Εθνών ο συνολικός πληθυσμός της Γης αναμένεται να φτάσει μεταξύ 10 και 13 δισεκατομμύρια στο τέλος του 21^{ου} αιώνα (worldometers.info). Προκύπτουν λοιπόν ζητήματα αναφορικά με την επάρκεια των τροφίμων για έναν τόσο ταχέως αυξανόμενο πληθυσμό. Η παραγωγή τροφίμων είναι ένας μεγάλος καταναλωτής νερού. Ειδικότερα, η κτηνοτροφία απαιτεί πολλαπλάσιες ποσότητες νερού σε σχέση με την γεωργία. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι ένα κιλό βοδινού κρέατος απαιτεί 15.000 λίτρα νερού για την παραγωγή του (gracelinks.org). Είναι αμφίβολο αν έχει τη δυνατότητα ο πλανήτης να συνεχίσει να στηρίζει μια τέτοια παραγωγή.

Η εποχή της βιομηχανικής επανάστασης που αποτέλεσε ορόσημο για την αλματώδη αύξηση του ανθρώπινου πληθυσμού και την οικονομική ανάπτυξη συνοδεύτηκε από ποιοτική υποβάθμιση των υδατικών αποθεμάτων. Παράλληλα η εντατική καύση υδρογονανθράκων απελευθέρωσε στην ατμόσφαιρα κολοσσιαίες ποσότητες αερίων του θερμοκηπίου. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την μεταβολή του κλίματος της Γης. Η μεταβολή αυτή μεταφράζεται ως μεταβολή στην ποσότητα, την ένταση και τον χρόνο των κατακρημνίσεων, την αύξηση της μέσης θερμοκρασίας της επιφάνειας της Γης που με την σειρά της επηρεάζει άλλα καιρικά φαινόμενα και την ένταση τους (**National Aeronautical & Space Agency**). Η ανθρώπινη ανάπτυξη και εκμετάλλευση έχει προκαλέσει σημαντική ποιοτική υποβάθμιση των υδάτων. Η υποβάθμιση μπορεί να οφείλεται σε ρύπανση λόγω ανεξέλεγκτης διάθεσης αποβλήτων από βιομηχανίες ή αστικά κέντρα. Στις αναπτυσσόμενες χώρες το 80% των αστικών λυμάτων καταλήγουν ανεπεξέργαστα στους υδάτινους αποδέκτες. Παράλληλα η βιομηχανία απορρίπτει ετησίως περίπου 300 με 400 εκατομμύρια τόνους ρυπασμένου αποβλήτων σε υδάτινα συστήματα. Η γεωργία είναι επίσης ένας σημαντικός παράγοντας ρύπανσης λόγω της χρήσης λιπασμάτων, φυτοφαρμάκων και ζιζανιοκτόνων. Το άζωτο από τις γεωργικές δραστηριότητες είναι ο κύριος χημικός ρύπος των υπογείων υδροφόρων. Τέλος η κτηνοτροφία έχει σημαντική επίδραση στην υποβάθμιση των υδατικών αποθεμάτων λόγω της εναπόθεσης κοπριάς από τα ζώα (**World Health Organization**). Σήμερα έχουν αναπτυχθεί τεχνολογίες και νομοθεσία που περιορίζουν σημαντικά την υδατική ρύπανση από τις παραπάνω πηγές. Οι βιομηχανίες είναι πλέον υποχρεωμένες να εγκαθιστούν συστήματα ελέγχου και επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων τους ενώ οι οικισμοί υποχρεούνται να εγκαθιστούν μονάδες βιολογικού καθαρισμού. Στον κλάδο της γεωργίας άρχισαν να δημιουργούνται και να εφαρμόζονται ορθότερες ή εναλλακτικές πρακτικές λίπανσης.

Η ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου αναμένεται να επηρεαστεί από την κλιματική αλλαγή που σε συνδυασμό με της ανθρωπογενείς δραστηριότητες της περιοχής θα οδηγήσει σε σημαντική ποσοτική και ποιοτική υποβάθμιση των διαθέσιμων υδάτινων αποθεμάτων (greenpeace.org). Η υπεράντληση και οι παρατεταμένες περίοδοι περιορισμένης βροχόπτωσης ή ξηρασίας έχουν οδηγήσει την ισορροπία μεταξύ του διαθέσιμου και του ζητούμενου νερού σε πολλές χώρες της νότιας Ευρώπης σε οριακό σημείο. Μειωμένες παροχές στους ποταμούς, ελάττωση της στάθμης των λιμνών και πτώση των υδροφόρων οριζόντων αναφέρονται όλο και πιο συχνά μαζί με δυσμενείς επιπτώσεις στα ποτάμια και λιμναία οικοσυστήματα. Συχνά μια δραματική ποιοτική υποβάθμιση ακολουθεί τον περιορισμό των υδάτινων πόρων εξαιτίας του μικρότερου διαθέσιμου όγκου διάλυσης των ρυπαντών. Επίσης, ολοένα και περισσότερο θαλασσινό νερό εισχωρεί στους παρόχθιους υδροφορείς εξαιτίας της εντατικής εκμετάλλευσης τους (**IPPC**). Η περιοχή της Μεσογείου είναι εξαιρετικά ευαίσθητη στις επιζήμιες επιπτώσεις της λειψυδρίας και της ξηρασίας. Δοκιμάζεται όχι μόνο από χαμηλές βροχοπτώσεις αλλά και από σημαντικές πιέσεις στα διαθέσιμα υδάτινα αποθέματα από την γεωργία και τον τουρισμό. Αν και στην Ευρώπη 24% του συνολικού νερού που καταναλώνεται χρησιμοποιείται για τις αγροτικές ανάγκες, σε ορισμένες περιοχές της Μεσογείου αυτό το ποσοστό ξεπερνάει το 80%. Το μεγαλύτερο μέρος του νερού καταναλώνεται κατά το θέρους που οι ανάγκες των καλλιεργειών σε νερό μεγιστοποιούνται όμως ελαχιστοποιείται αντίστοιχα η διαθεσιμότητα των διαθέσιμων υδατικών πόρων. Παράλληλα η τουριστική ανάπτυξη στις Μεσογειακές χώρες αν και είναι ένα σημαντική συνισταμένη της οικονομικής ανάπτυξης ασκεί με την σειρά τις σημαντικές πιέσεις στα διαθέσιμα ύδατα. Την αύξηση του αριθμού των παραθεριστών τις προηγούμενες δεκαετίες ακολούθησε σημαντική οικοδόμηση κατά μήκος της ακτογραμμής. Η τουριστική βιομηχανία δεν καταναλώνει μόνο νερό για πόση, τροφή ή προσωπική υγιεινή αλλά και για εγκαταστάσεις πολυτελείας όπως πισίνες, θαλάσσια πάρκα και γήπεδα γκολφ. Ακόμη η περίοδος αιχμής του τουρισμού είναι το θέρος όταν τα υδατικά αποθέματα βρίσκονται ήδη υπό σημαντική πίεση.

Σε όλον τον κόσμο η προστασία των υδάτινων πόρων αποτελεί πεδίο έρευνας και συνεργασίας πολλών φορέων στα πλαίσια της γενικότερης περιβαλλοντικής πολιτικής. Η Ευρωπαϊκή Ένωση αναγνωρίζοντας τον κίνδυνο και ως μέρος της περιβαλλοντικής της πολιτικής έχει αναλάβει πρωτοβουλίες για την προστασία των υδάτινων αποθεμάτων της επικράτειας της. Η υδατική πολιτική της Ευρωπαϊκής Ένωσης έχει εκφραστεί κυρίως με την Οδηγία 2000/60/ΕΚ (**EU Water Framework Directive**), ή οποία τέθηκε σε ισχύ στις 22 Δεκεμβρίου 2000. Απώτερος στόχος της οδηγίας είναι η αποτροπή περαιτέρω υποβάθμισης και η επίτευξη καλής κατάστασης στα ύδατα της Ευρωπαϊκής Ένωσης έως το 2015. Η Οδηγία 2000/60/ΕΚ δημιουργεί ένα θεσμικό και νομικό πλαίσιο το οποίο, αποτρέπει την περαιτέρω υποβάθμιση ενώ προστατεύει και βελτιώνει την κατάσταση όλων των υδάτινων πόρων, προωθεί την βιώσιμη διαχείριση των υδάτων, μέσω της μακροπρόθεσμης προστασίας τους, ενισχύει την προστασία του υδάτινου περιβάλλοντος με την εφαρμογή μέτρων για την μείωση της απόρριψης ρυπαντικών ουσιών και την εξάλειψη της απόρριψης επικίνδυνων ρυπαντών που προσδιορίζονται και επικαιροποιούνται σε ειδικούς καταλόγους και τέλος συμβάλλει στην αντιμετώπιση των επιπτώσεων ακραίων φαινομένων, ξηρασίας ή πλημμύρας

Η Οδηγία 2000/60/ΕΚ δημιουργεί μια νέα πραγματικότητα στην διαχείριση των υδάτινων πόρων. Το νερό δεν αντιμετωπίζεται πλέον απλά ως ένας οικονομικός πόρος αλλά ως ένα

ολοκληρωμένο σύστημα σε αλληλεπίδραση με την φύση και τον άνθρωπο. Από την εφαρμογή της Οδηγίας αναμένεται να προκύψουν σημαντικά οφέλη. Πιο συγκεκριμένα ανάμεσα στους γενικότερους στόχους της οδηγίας περιλαμβάνεται η διατήρηση και η αποκατάσταση της καλής κατάστασης των επιφανειακών και υπογείων υδάτων, η ενοποίηση και συμπλήρωση της αποσπασματικής ευρωπαϊκής νομοθεσίας για τα νερά, η διαχείριση των υδάτων σε επίπεδο υδατικής περιφέρειας με καθορισμένη αρμόδια αρχή βάσει συγκεκριμένων προγραμμάτων – σχεδίων διαχείρισης, η ενεργή συμμετοχή των τοπικών φορέων, των Μη Κυβερνητικών Οργανώσεων και του κοινού γενικότερα στην λήψη των αποφάσεων και τέλος η ορθή πολιτική τιμολόγησης του νερού που να προάγει την ποσοτική και ποιοτική του αειφορία. Στο άρθρο 4 παρ. 1 της οδηγίας καθορίζονται οι περιβαλλοντικοί στόχοι για όλες τις κατηγορίες υδάτων καθώς και ο χρονικός ορίζοντας επίτευξής τους. Έτσι για τα επιφανειακά ύδατα ορίζεται αφενός η εφαρμογή όλων των απαραίτητων μέτρων για την πρόληψη της υποβάθμισής τους και αφετέρου η αναβάθμιση τους με στόχο την επίτευξη καλής οικολογικής κατάστασης το αργότερο έως το 2015. Αντίστοιχα για τα υπόγεια ύδατα ορίζεται η λήψη μέτρων για την πρόληψη και τον περιορισμό της ρύπανσης και παράλληλα η επίτευξη ισορροπίας μεταξύ άντλησης και ανατροφοδότησης ώστε να έρθουν σε καθεστώς καλής κατάστασης έως το 2015. Στον Ελλαδικό χώρο επικρατούν μεγάλες διακυμάνσεις στην ποσότητα των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων όχι μόνο στον χώρο αλλά και στον χρόνο. Επιπλέον η συγκέντρωση του πληθυσμού σε χώρους με περιορισμένους υδάτινους πόρους αποτρέπουν την ορθολογική διαχείρισή τους. Επιλογές χωρίς στρατηγικό και αναπτυξιακό σχεδιασμό αλλά και η απουσία προσωπικού και υλικοτεχνικών υποδομών έχουν εντείνει το πρόβλημα με φυσικό επακόλουθο την σπατάλη οικονομικών και υδάτινων πόρων (ΥΠΕΚΑ,).

Η σημαντικότερη ίσως υστέρηση της χώρας μας σε σχέση με την ορθολογική διαχείριση των υδατικών πόρων είναι η απουσία ενός ολοκληρωμένου και αξιόπιστου δικτύου συστημάτων μέτρησης των υδάτων που θα συνδέει όλους τους εμπλεκόμενους φορείς. Απουσιάζουν έτσι σημαντικά στοιχεία που θα μπορούσαν να βοηθήσουν στην λήψη ορθών αποφάσεων στην διαχείριση του υδατικού δυναμικού της χώρας και στην εφαρμογής της Οδηγίας 2000/60/ΕΚ.

Η Κρήτη είναι ένα νησί της ανατολικής Μεσογείου. Εξαιτίας της γεωγραφικής της θέσης μειονεκτεί ως προς την ποσότητα των κατακρημνισμάτων που δέχεται και συνεπώς ως προς τα αποθέματα γλυκού νερού που διαθέτει. Το νησί της Κρήτης έχει έναν μόνιμο πληθυσμό 623.000 κατοίκων. Κατά την τουριστική περίοδο καταφθάνουν στο νησί περίπου 3.600.000 παραθεριστές. Επίσης στο νησί υπάρχει σημαντική αγροτική παραγωγή, κυρίως ελιές και οπωροφόρα δέντρα. Προκύπτουν λοιπόν σημαντικές πιέσεις στα διαθέσιμα αποθέματα γλυκού νερού ιδίως κατά τους θερινούς μήνες. Οι περιβαλλοντικές πιέσεις στα υδατικά αποθέματα επαυξάνονται περαιτέρω υπό το βάρος της κλιματικής αλλαγής που μεταφράζεται σε μείωση των βροχοπτώσεων και αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του νησιού.

1.2. ΣΚΟΠΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η λεκάνη απορροής Κερίτη είναι η σημαντικότερη υδρολογική λεκάνη του νομού Χανίων. Βρίσκεται δυτικά του νομού Χανίων σε απόσταση 15 km. Η σημασία της λεκάνης για την περιοχή φαίνεται από το γεγονός ότι είναι ο κύριος τροφοδότης υδρευτικού και αρδευτικού νερού για όλο σχεδόν το βόρειο τμήμα του νομού Χανίων.

Ένα γιγάντιο καρστικό σύστημα που τροφοδοτείται από το ορεινό όγκο των Λευκών Ορέων που με την σειρά του τροφοδοτεί τις πηγές των Μεσκλών και τις Αγυιάς που και αυτές με την σειρά τους τροφοδοτούν τον ποταμό Κερίτη. Τα νερά των πηγών χρησιμοποιούνται για ύδρευση αλλά και για άρδευση. Το 1927-1928 δημιουργήθηκε η τεχνητή λίμνη της Αγυιάς η οποία εξελίχθηκε σε ένα υψηλής σημασίας υδροβιότοπο. Στην λεκάνη λειτουργεί πλήθος γεωτρήσεων που χρησιμοποιούνται για άρδευση μεγάλων εκτάσεων. Νοτιότερα των πηγών της Αγυιάς υπάρχουν οι γεωτρήσεις των Μυλωνιανών με παροχή 2.700 m³/h, από τις μεγαλύτερες στον Ελλαδικό χώρο, οι οποίες υδροδοτούν εκτός από την πόλη των Χανίων όλη την βόρεια ζώνη του νομού. Η επιρροή της λεκάνης στην ζωή και την οικονομία της περιοχής είναι μεγάλη.

Κατά την εκπόνηση της μελέτης έγινε:

- Μελέτη της απόκρισης των καρστικών πηγών της Αγυιάς και των Μεσκλών βάσει του μοντέλου των δύο ταμειωτήρων (**Kourgialas et al. 2010**) (**Nikolaidis et al. 2013**).
- Δημιουργία βάσης δεδομένων ποσοτικών και ποιοτικών χαρακτηριστικών των καρστικών πηγών της Αγυιάς και των Μεσκλών και του ποταμού Κερίτη.
- Δειγματοληψία των καρστικών πηγών της Αγυιάς και του ποταμού Κερίτη και πραγματοποίηση φυσικοχημικών αναλύσεων.

Η διπλωματική εργασία έχει ως στόχο την μελέτη του υδατικού ισοζυγίου της λεκάνης απορροής Κερίτη – Θερίσου. Εκτός από την υδρολογία γίνεται επίσης εκτίμηση των φορτίων αζώτου και φωσφόρου. Τα φορτία αυτά προέρχονται κυρίως από τις αγροτικές και κτηνοτροφικές πρακτικές. Πρόκειται δηλαδή για μια ολοκληρωμένη προσομοίωση των κυριότερων βιογεωχημικών κύκλων σε επίπεδο λεκάνης απορροής. Η μελέτη χρησιμοποιεί το σύνολο των διαθέσιμων δεδομένων που υπάρχουν για την περιοχή, από τις πιο παλιές μετρήσεις παροχής των πηγών μέχρι τις πιο πρόσφατες μετρήσεις παροχής του ποταμού Κερίτη.

Λόγω της σοβαρότητας των επιπτώσεων που αναμένεται να έχουν οι κλιματικές αλλαγές στους διαθέσιμους υδατικούς πόρους των Μεσογειακών χωρών και του ισχυρού πλήγματος που θα δεχτούν οι χώρες αυτές σε σημαντικούς οικονομικούς τομείς όπως ο τουρισμός, η γεωργία και η κτηνοτροφία κρίνεται αναγκαία η εκτίμηση των ποσοτικών και ποιοτικών χαρακτηριστικών των υδάτινων πόρων υπό το πρίσμα των κλιματικών αλλαγών.

Η παρούσα εργασία αναμένεται να αποτελέσει παρακαταθήκη για μελλοντικές μελέτες. Η καταγραφή και η ανάλυση όλων των πιέσεων που δέχονται ή θα δεχτούν τα υδάτινα αποθέματα θα αποτελέσουν αναμένεται να βοηθήσουν την τοπική κοινωνία να αντιμετωπίσει τις προκλήσεις του μέλλοντος και να χαράξει την πορεία της προς την κατεύθυνση της βιώσιμης ανάπτυξης.

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1. ΠΑΓΚΟΣΜΙΟΙ ΒΙΟΓΕΩΧΗΜΙΚΟΙ ΚΥΚΛΟΙ

Στη φύση παρατηρείται μια αδιάκοπη κυκλοφορία υλικών ουσιών, με εναλλασσόμενη ανόργανη και οργανική μορφή. Οι χημικές ουσίες που είναι απαραίτητες για το μεταβολισμό ανακυκλώνονται συνεχώς, ενώ η ενέργεια που απαιτείται μετατρέπεται σε θερμότητα και χάνεται. Έτσι η Γη θεωρείται κλειστό σύστημα ως προς την μάζα (απειροελάχιστες ποσότητες εισέρχονται με την μορφή μετεωριτών ή χάνονται από τα ανώτατα στρώματα της ατμόσφαιρας) ενώ αντίθετα ανοικτό ως προς την ενέργεια (η Γη δέχεται τεράστιες ποσότητες ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από τον Ήλιο και το διάστημα).

Το σύνολο των διεργασιών που ελέγχουν την μεταφορά (transport) και την μετατροπή (transformation) μιας χημικής ουσίας μεταξύ βιόσφαιρας, υδρόσφαιρας, λιθόσφαιρας και ατμόσφαιρας αποτελεί το βιογεωχημικό κύκλο του στοιχείου αυτού. Οι σημαντικότεροι βιογεωχημικοί κύκλοι είναι του νερού (H_2O), του άνθρακα (C), του οξυγόνου (O_2), του αζώτου (N_2), του φωσφόρου (P) και του θείου (S).

Οι βιογεωχημικοί κύκλοι εξυπηρετούν ένα σύνολο λειτουργιών σε ένα οικοσύστημα και εξασφαλίζουν την επιβίωση πολλών οργανισμών συμπεριλαμβανομένου του ανθρώπου.

- Επιτρέπουν την μετατροπή της ύλης από την μια μορφή σε μια άλλη. Πολλοί οργανισμοί καταναλώνουν μια ουσία μόνο όταν είναι σε μια συγκεκριμένη μορφή. Οι βιογεωχημικοί επιτρέπουν την μετατροπή μιας ουσίας από μια μορφή σε μια άλλη και συνεπώς την κατανάλωσή τους από το βιοτικό περιβάλλον.
- Επιτρέπουν την μεταφορά από μια τοποθεσία σε μια άλλη. Για παράδειγμα το άζωτο είναι σε πολύ υψηλή συγκέντρωση στην ατμόσφαιρα αλλά μικρό του μέρος μεταφέρεται στο έδαφος μέσω του κύκλου του αζώτου.
- Διευκολύνουν την αποθήκευση των ουσιών. Η ουσία που κινείται σε έναν βιογεωχημικό κύκλο συχνά αποθηκεύεται για ορισμένο χρονικό διάστημα σε κάποιον βιοτικό ή αβιοτικό ταμειευτήρα. Από κει απελευθερώνονται σε μικρές ποσότητες ώστε να καταναλωθούν από τους οργανισμούς.
- Ουσίες που μεταφέρονται διαμέσου των βιογεωχημικών κύκλων αποθηκεύονται σε φυσικές αποθήκες και απελευθερώνονται στους οργανισμούς σε μικρές ποσότητες.
- Ρυθμίζουν την ισορροπία των οικοσυστημάτων. Τα οικοσυστήματα λειτουργούν σε ένα σημείο ισορροπίας και όταν αυτό για κάποιο λόγο διαταραχθεί είναι δυνατόν να επιστρέψει σε στο σημείο ισορροπίας διαμέσου των βιογεωχημικών κύκλων μετά από κάποιο χρόνο.

Αλλαγές στους βιογεωχημικούς κύκλους συμβαίνουν σε παγκόσμιο επίπεδο ως αποτέλεσμα ανθρωπίνων δραστηριοτήτων με σημαντικές επιπτώσεις στο παρόν και το μέλλον.

2.1.1. Ο ΚΥΚΛΟΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ

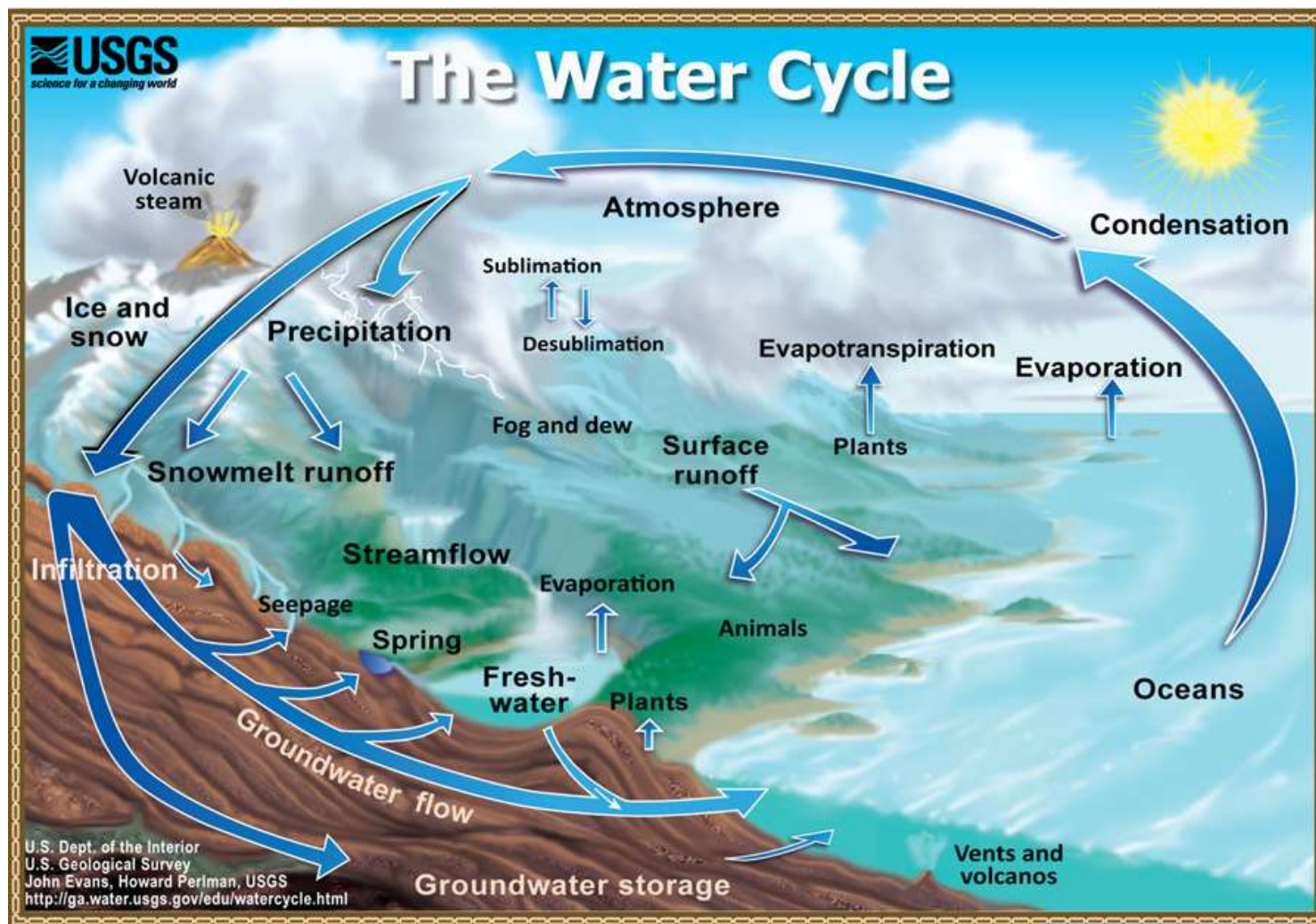
Ο υδρολογικός κύκλος περιλαμβάνει όλες τις διεργασίες που συμμετέχουν στην μεταφορά του νερού μεταξύ της ατμόσφαιρας, της επιφάνειας της Γης και των ωκεανών.

Συνοπτικά ο υδρολογικός κύκλος θα μπορούσε να περιγραφεί ως εξής: Νερό των ωκεανών εξατμίζεται και μεταφέρεται στην ατμόσφαιρα με την μορφή υδρατμών. Από αυτό το νερό το μεγαλύτερο μέρος επιστρέφει σχεδόν αμέσως πίσω με την μορφή κατακρημνίσεων στους ωκεανούς και τις θάλασσες. Το υπόλοιπο δύναται να μεταφερθεί πάνω από την στεριά και να κατακρημνιστεί εκεί. Το νερό αυτό είναι υπεύθυνο για την δημιουργία των ποταμών της Γης.

Η κατακρήμνιση στην επιφάνεια της Γης μπορεί να πάρει διάφορες μορφές. Η πιο συνηθισμένη είναι η βροχόπτωση. Οι άλλες είναι η χιονόπτωση και η χαλαζόπτωση. Οι κατακρημνίσεις είναι αυτές που τροφοδοτούν τα υδατορεύματα. Μια λεκάνη απορροής είναι η γεωγραφική ενότητα στην οποία όλη η επιφάνεια της συμμετέχει στην τροφοδοσία ενός ποταμού ή χειμάρρου. Τα υδατορεύματα συνήθως καταλήγουν στον ωκεανό ή στην θάλασσα. Είναι όμως δυνατόν να καταλήγουν και σε λίμνες. Οι λίμνες φυσικές ή τεχνητές είναι σημαντικοί ταμιευτήρες αποθήκευσης γλυκού νερού.

Άλλες δύο πολύ σημαντικές διεργασίες απομάκρυνσης του νερού από την επιφάνεια του εδάφους είναι η εξάτμιση και η διαπνοή. Η εξάτμιση είναι η απομάκρυνση του νερού με την μορφή υδρατμών από το έδαφος. Διαπνοή είναι η δέσμευση και απομάκρυνση του εδαφικού νερού διαμέσου των στομάτων των φύλων των φυτών με την μορφή υδρατμών. Επειδή συχνά είναι πολύ δύσκολη η διάκριση αυτών των δύο διεργασιών στο πεδίο συνηθίζεται να μελετώνται ταυτόχρονα. Ο όρος εξατμισοδιαπνοή ή ορθότερα εξατμοδιαπνοή χρησιμοποιείται για να περιγράψει τα δύο φαινόμενα ταυτόχρονα.

Δεν καταλήγει όμως όλο το νερό της βροχόπτωσης σε ποτάμια ή λίμνες. Μέρος είναι δυνατόν να διηθηθεί στο υπέδαφος. Από κει μπορεί είτε να αποτελέσει μέρος της εδαφικής υγρασίας, είτε να τροφοδοτήσει ποτάμια και λίμνες πλευρικά, είτε να κινηθεί προς τα κάτω εμπλουτίζοντας τους υπόγειους υφροφορείς. Το νερό στους υπόγειους υδροφορείς δεν είναι στατικό αλλά μετακινείται. Το ταξίδι του υπογείου νερού μπορεί να διαρκέσει από ώρες ή μέρες μέχρι χιλιάδες ή και εκατομμύρια χρόνια. Στην πορεία μέσα στο υπέδαφος το νερό μπορεί να επιστρέψει στην επιφάνεια της Γης σχηματίζοντας πηγές. Η ποσότητα και η ποιότητα του υπογείου νερού είναι συνάρτηση του τύπου των πετρωμάτων στα οποία διηθούνται.



Εικόνα 2.1: Σχηματική αναπαράσταση του υδρολογικού κύκλου (ΠΗΓΗ:USGS).

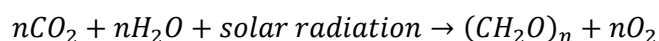
2.1.2. Ο ΚΥΚΛΟΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ

Όλη η ζωή στηρίζεται στην χημεία του άνθρακα. Ο άνθρακας είναι το κύριο χημικό στοιχείο της έμβιας ύλης, από τα ορυκτά καύσιμα έως πολυπλοκότερα μόρια που ελέγχουν την γενετική αναπαραγωγή στους οργανισμούς. Εάν και τόσο σημαντικό στοιχείο αποτελεί μόλις το 0.032% της λιθόσφαιρας.

Ο άνθρακας αποθηκεύεται στον πλανήτη μας στους εξής κύριους ταμιευτήρες: ως οργανικός άνθρακας στα μόρια των ζωντανών και νεκρών οργανισμών, ως αέριο διοξείδιο του άνθρακα στην ατμόσφαιρα (CO_2), ως οργανικό υλικό στο έδαφος, ως ορυκτό καύσιμο ή ως ιζηματογενείς αποθέσεις όπως ασβεστόλιθος, δολομίτης και κιμωλία και τέλος ως διαλυμένο διοξείδιο του άνθρακα και ανθρακικό ασβέστιο στους ωκεανούς

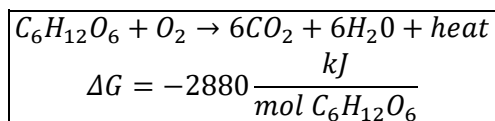
Φωτοσύνθεση και Αναπνοή

Τα οικοσυστήματα τροφοδοτούνται κυρίως από το διοξείδιο του άνθρακα της ατμόσφαιρας. Οι αυτότροφοι οργανισμοί έχουν εξειδικευμένους μηχανισμούς με τους οποίους επιτρέπουν την απορρόφηση διοξειδίου του άνθρακα από την ατμόσφαιρα. Οι οργανισμοί αυτοί μετατρέπουν μέσω της διεργασίας της φωτοσύνθεσης το διοξείδιο του άνθρακα σε πολυσακχαρήτες χρησιμοποιώντας νερό και ηλιακή ενέργεια.



Τα οργανικά μόρια που προκύπτουν μπορούν έπειτα να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή πολύπλοκων μορίων όπως πρωτεΐνες, κυτταρίνη και αμινοξέα. Πολλά από τα οργανικά υλικά που παράγονται από τους αυτότροφους οργανισμούς μεταφέρονται και στους ετερότροφους μέσω της κατανάλωσης.

Ο άνθρακας επιστρέφει στην ατμόσφαιρα με την μορφή διοξειδίου του άνθρακα μέσω της διεργασίας της αναπνοής. Η διεργασία της αναπνοής συντελείται τόσο στους ετερότροφους όσο και στους αυτότροφους οργανισμούς και περιλαμβάνει την διάσπαση των πολύπλοκων οργανικών ενώσεων σε διοξείδιο του άνθρακα και άλλα παραπροϊόντα.



Άνθρακας στους Ωκεανούς

Το διοξείδιο του άνθρακα εισέρχεται στους ωκεανούς μέσω απλής διάχυσης. Εκεί μπορεί να μετατραπεί σε ανθρακικό οξύ (H_2CO_3). Το ανθρακικό οξύ, ως ασθενές οξύ, μπορεί να αντιδράσει με το νερό των ωκεανών και να διασπαστεί σε (HCO_3^-) ή (CO_3^{2-})

Διάφορες θαλάσσιες μορφές ζωής δεσμεύουν τις ανθρακικές ρίζες με ασβέστιο και δημιουργούν ανθρακικό ασβέστιο (CaCO_3). Το ανθρακικό ασβέστιο αποτελεί δομικό στοιχείο για σκληρά μέρη του σώματος (hard body parts) πολλών οργανισμών, όπως κελύφη.

Όταν οι οργανισμοί αυτοί αποθνήσκουν εναποτίθενται στον πυθμένα των ωκεανών και δημιουργούν πλούσιες σε άνθρακα αποθέσεις. Με την πάροδο των ετών μετατρέπονται σε

ιζηματογενή πετρώματα. Οι ωκεάνιες αποθέσεις είναι με διαφορά ο μεγαλύτερος ταμιευτήρας άνθρακα στον πλανήτη.

Άνθρακας στην Λιθόσφαιρα

Άνθρακας εναποτίθεται στην λιθόσφαιρα τόσο σε οργανική όσο και σε ανόργανη μορφή. Ανόργανες εναποθέσεις άνθρακα στην λιθόσφαιρα αποτελούν τα κοιτάσματα πετρελαίου, φυσικού αερίου, κάρβουνου και σχιστολιθικού πετρελαίου. Οργανικές αποθέσεις άνθρακα στην λιθόσφαιρα είναι τα απορρίμματα, η οργανική ύλη και οι χουμικές ενώσεις του εδάφους. Ακόμα μικρότερες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα απελευθερώνονται από το εσωτερικό της Γης από ηφαιστειακές εκρήξεις.

Ανθρωπογενείς επιδράσεις στον κύκλο του Άνθρακα

Μέχρι πρόσφατα η ροή του αποθηκευμένου στα ορυκτά καύσιμα άνθρακα προς την ατμόσφαιρα ήταν αμελητέα. Η βιομηχανική επανάσταση αύξησε την χρήση κάρβουνου, πετρελαίου και φυσικού αερίου.

Η καύση ορυκτών καυσίμων δεν είναι η μόνη ανθρωπογενής δραστηριότητα που έχει επηρεάσει τον κύκλο του άνθρακα. Πριν την εξάπλωση του ανθρώπινου πολιτισμού η ποσότητα του άνθρακα αποθηκευμένου στην έμβια ύλη ήταν σχεδόν σταθερή, γιατί η ποσότητα του άνθρακα που δεσμευόταν μέσω της διεργασίας της φωτοσύνθεσης ισούταν με αυτήν που απελευθερωνόταν πίσω στην ατμόσφαιρα μέσω της κυτταρικής αναπνοής και αποσύνθεσης. Τους τελευταίους όμως αιώνες, οι άνθρωποι έχουν περιορίσει την συνολική επιφάνεια της Γης που καλύπτεται με δάση. Η μείωση του αριθμού των δέντρων μειώνει την ποσότητα του άνθρακα που μπορεί να αποθηκευτεί στην έμβια ύλη.

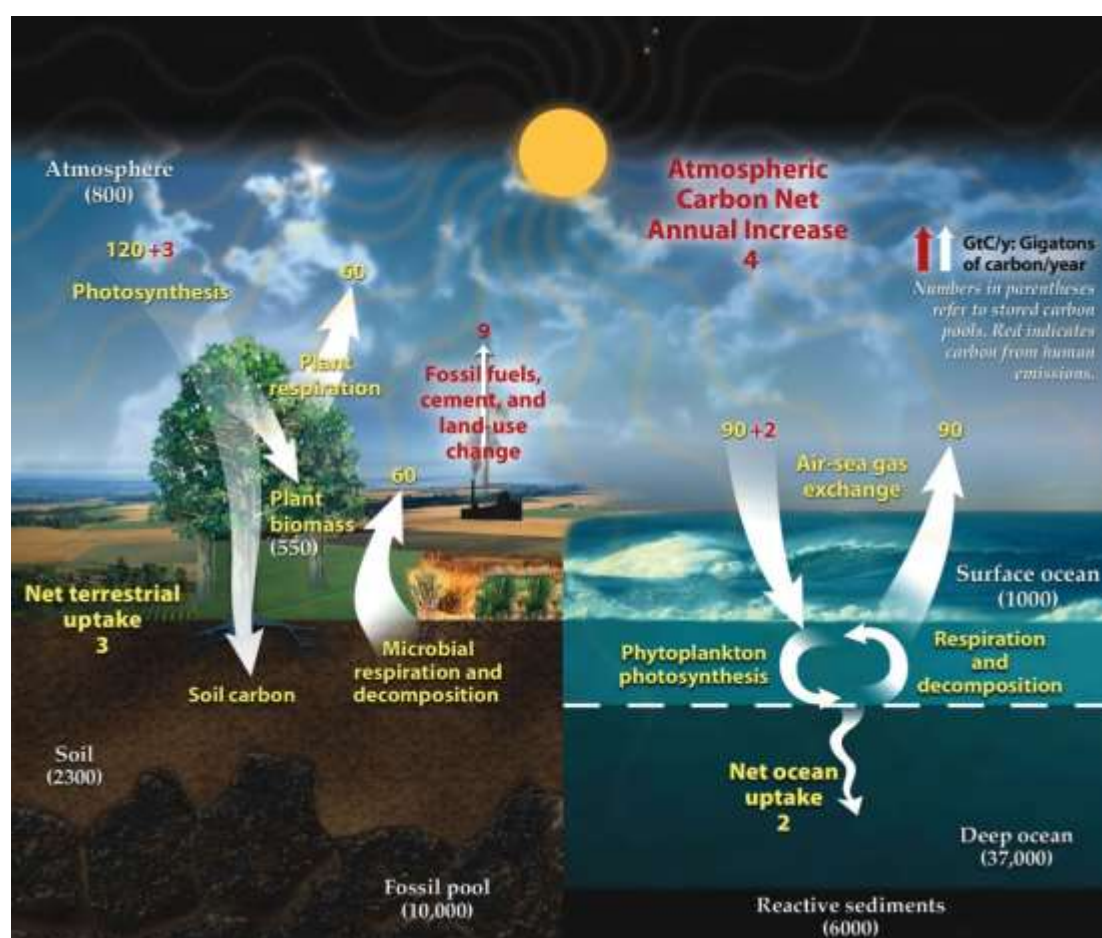
Η καύση ορυκτών καυσίμων και η αποψίλωση των δασών έχει μεταβάλλει την ισορροπία μεταξύ του άνθρακα της ατμόσφαιρας και του άνθρακα των ωκεανών. Η αυξημένη συγκέντρωση του άνθρακα στην ατμόσφαιρα προκαλεί μια αυθόρμητη ροή προς τους ωκεανούς. Καθώς το διοξείδιο του άνθρακα εισέρχεται στο νερό των ωκεανών μειώνει το pH του. Η μείωση του pH επιβραδύνει τον ρυθμό με τον οποίο το διοξείδιο του άνθρακα εισέρχεται στο νερό των ωκεανών.

Ο «χαμένος» άνθρακας

Η συγκέντρωση του άνθρακα στην ατμόσφαιρα δεν συμφωνεί με τις προβλέψεις των επιστημόνων, καθώς υπάρχει λιγότερος απ' όσο είχε προβλεφθεί. Αυτή η χαμένη ποσότητα άνθρακα πρέπει να συσχετίζεται με μια άγνωστη δεξαμενή –ταμιευτήρα. Ο άγνωστος ταμιευτήρας είναι είτε ένας άγνωστος μηχανισμός που αφαιρεί άνθρακα από την ατμόσφαιρα είτε ένας γνωστός που αφαιρεί άνθρακα με μεγαλύτερο ρυθμό απ' ότι έχει εκτιμηθεί από τους επιστήμονες.

Μια υπόθεση είναι ότι η αυξημένες ποσότητες άνθρακα στην ατμόσφαιρα αύξησαν την πρωτογενή παραγωγικότητα και έτσι τον ρυθμό με τον οποίο ο άνθρακας αφαιρείται από την ατμόσφαιρα (**Nemani et al. 2003**). Πειράματα έχουν δείξει ότι οι αυξημένες συγκεντρώσεις διοξειδίου του άνθρακα αυξάνουν την ανάπτυξη των φυτών αλλά είναι αβέβαιο αν αυτό το

φαινόμενο έχει σημαντικές επιδράσεις και στην πραγματικότητα. Ο άνθρακας δεν είναι ο περιοριστικός παράγοντας της ανάπτυξης των φυτών. Από την άλλη η αύξηση του διαθέσιμου αζώτου από ανθρωπογενείς δραστηριότητες είναι δυνατόν υποβοήθησε τον μηχανισμό αυτόν. Μια άλλη υπόθεση υποστηρίζει ότι ο άγνωστος ταμειυτήρας άνθρακα έχει να κάνει με την κλιματική αλλαγή. Η αύξηση της παγκόσμιας θερμοκρασίας θα μπορούσε να αυξήσει τον ρυθμό ανάπτυξης των φυτών που με την σειρά του θα μπορούσε να ενισχύσει τον ρυθμό με τον οποίο τα φυτά προσλαμβάνουν διοξείδιο του άνθρακα από την ατμόσφαιρα. Εναλλακτικά η αύξηση της θερμοκρασίας θα μπορούσε να ενισχύσει τους μηχανισμούς βιο-αποικοδόμησης. Με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η διαθεσιμότητα θρεπτικών συστατικών που ήταν δεσμευμένα στην οργανική ύλη. Αν η έλλειψη των συστατικών αυτών περιόριζε την ανάπτυξη των φυτών, η απελευθέρωσή τους επιταχύνει την παραγωγικότητα των φυτών.



Εικόνα 2.2: Σχηματική απεικόνιση του κύκλου του άνθρακα (ΠΗΓΗ:NASA).

2.1.3. Ο ΚΥΚΛΟΣ ΤΟΥ ΑΖΩΤΟΥ

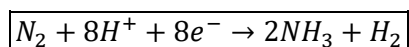
Το άζωτο είναι απαραίτητο συστατικό για όλους τους ζωντανούς οργανισμούς. Χρησιμοποιείται για την παραγωγή ενός αριθμού πολύπλοκων οργανικών μορίων όπως αμινοξέων (amino acids) και νουκλεοτιδίων (nucleotides), τα δομικά στοιχεία των πρωτεϊνών και του DNA και RNA αντίστοιχα. Παρόλο που το άζωτο είναι το συστατικό με την μεγαλύτερη συγκέντρωση στην ατμόσφαιρα της Γης (78%) με την μορφή μοριακού αζώτου (N_2), δεν είναι δυνατόν να καταναλωθεί σε αυτήν την μορφή από τους οργανισμούς. Αυτό καθιστά το άζωτο σπάνιο πόρο και συχνά περιοριστικό παράγοντα σε πολλά οικοσυστήματα. Μόνο όταν το μοριακό άζωτο (N_2) μετατρέπεται σε αμμωνιακό (NH_3) καθίσταται διαθέσιμο στους αυτότροφους οργανισμούς.

Ο κύκλος του αζώτου είναι η διεργασία διαμέσου της οποίας το άζωτο μετατρέπεται στις διάφορες μορφές του. Το άζωτο υφίσταται πολλές μετατροπές σε ένα οικοσύστημα καθώς μετασχηματίζεται από μια μορφή σε μια άλλη καθώς διάφοροι οργανισμοί το χρησιμοποιούν για να αναπτυχθούν και σε ορισμένες περιπτώσεις για την παραγωγή ενέργειας. Οι ανθρώπινες δραστηριότητες ασκούν μια ολοένα και μεγαλύτερη πίεση στον κύκλο του αζώτου. Οι κυριότερες δραστηριότητες που τον επηρεάζουν τον κύκλο είναι η παραγωγή λιπασμάτων και η καύση ορυκτών καυσίμων

Αζωτοδέσμευση

Παρόλο που το άζωτο είναι τόσο διαδεδομένο στην ατμόσφαιρα είναι συχνά το περιοριστικό θρεπτικό συστατικό σε πολλά οικοσυστήματα. Αυτό οφείλεται στην ανικανότητα των οργανισμών να προσλάβουν ατμοσφαιρικό άζωτο για τις ανάγκες τους. Για να είναι το άζωτο **βίο-διαθέσιμο** θα πρέπει να μετατραπεί πρώτα σε διαφορετικές χημικές μορφές. Η διεργασία με την οποία το ατμοσφαιρικό άζωτο σε βιολογικά διαθέσιμες μορφές (NH_3) ονομάζεται αζωτοδέσμευση.

Το ατμοσφαιρικό άζωτο (N_2) σαν διατομικό μόριο έχει μια ιδιαίτερα σταθερή δομή, λόγω του τριπλού ομοιοπολικού δεσμού που δημιουργείται μεταξύ των ατόμων και η διάσπασή του απαιτεί μεγάλη ποσότητα ενέργειας.

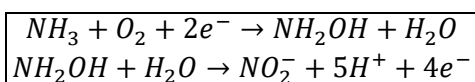


Μόνο μια συγκεκριμένη ομάδα προκαρυωτικών οργανισμών είναι ικανή να πραγματοποιήσει αυτή την **ενεργοβώρα** διεργασία. Αυτή η διεργασία πραγματοποιεί το 90% της συνολικής αζωτοδέσμευσης. Το υπόλοιπο 10 % δεσμεύεται ως αποτέλεσμα ηλεκτρικών εκκενώσεων της ατμόσφαιρας ή μέσω διάφορων βιομηχανικών διεργασιών, όπως η καύση ορυκτών καυσίμων.

Νιτροποίηση

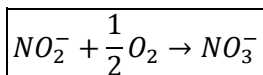
Νιτροποίηση ονομάζεται η διεργασία διαμέσου της οποίας η αμμωνία μετατρέπεται σε νιτρώδη και έπειτα σε νιτρικά. Η διεργασία είναι αερόβια και πραγματοποιείται αποκλειστικά από προκαρυωτικούς οργανισμούς.

Στο πρώτο στάδιο της διεργασίας γίνεται οξείδωση της αμμωνίας σε νιτρώδη από μικροοργανισμούς που ονομάζονται οξειδωτές αμμωνίας (ammonia oxidizers). Αρχικά η αμμωνία μετατρέπεται αρχικά σε υδροξυλαμίνη (hydroxylamine) και έπειτα σε νιτρώδη με την βοήθεια των ενζύμων ammonia monooxygenase και hydroxylamine oxidoreductase. Οι μεταβολικές διεργασίες που πραγματοποιούνται παράγουν πολύ μικρά ποσά ενέργειας για αυτό και οι μικροοργανισμοί αναπτύσσονται πολύ αργά. Παράλληλα, οι αερόβιοι οξειδωτές αμμωνίας (ammonia oxidizers) σαν αυτότροφοι μικροοργανισμοί δεσμεύουν διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) και το μετατρέπουν σε οργανικό άνθρακα. Η κύρια διαφορά τους με τους φωτοσυνθετικούς οργανισμούς είναι ότι χρησιμοποιούν την αμμωνία σαν πηγή ενέργειας και όχι την ηλιακή ακτινοβολία.



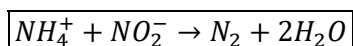
Αν και η αζωτοδέσμευση πραγματοποιείται από ένα πλήθος μικροοργανισμών, η οξείδωση της αμμωνίας πραγματοποιείται από πολύ συγκεκριμένους προκαρυωτικούς οργανισμούς. Αυτοί είναι οι Nitrosomonas, Nitrospira και Nitrosococcus. Πρόσφατα ανακαλύφθηκαν και κάποιο τύποι αρχαιοβακτηρίων που επίσης οξειδώνουν την αμμωνία (**Könneke et al. 2005**). Αν και τα συγκεκριμένα αρχαιοβακτήρια φαίνεται να υπερτερούν σε συγκεκριμένα οικοσυστήματα, λίγα είναι γνωστά για τον τρόπο δράσης τους και την συνολική επίδρασή τους στον κύκλο του αζώτου.

Το δεύτερο στάδιο της νιτροποίησης περιλαμβάνει την οξείδωση των νιτρώδων (NO₂) σε νιτρικά (NO₃). Πραγματοποιείται από βακτήρια οξειδωτές των νιτρώδων (nitrate oxidizing bacteria). Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν τα βακτήρια των ειδών Nitrobacter, Nitrospira, Nitrospira και Nitrococcus. Η οξείδωση των νιτρώδων, όπως και της αμμωνίας, αποφέρει πολύ μικρό ενεργειακό όφελος. Στην πραγματικότητα πολλά μόρια αμμωνίας ή νιτρώδων απαιτούνται για την δέσμευση ενός μορίου διοξειδίου του άνθρακα (CO₂).



Anammox

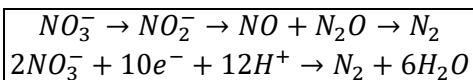
Μέχρι πρόσφατα θεωρούνταν ότι όλοι η νιτροποίηση γινόταν υπό αερόβιες συνθήκες. Πρόσφατα ανακαλύφθηκε ένας νέος τύπος οξείδωσης της αμμωνίας που πραγματοποιείται κάτω από αναερόβιες συνθήκες (**Strous et al. 1999**). Τα βακτήρια αυτά οξειδώνουν την αμμωνία χρησιμοποιώντας τα νιτρώδη σαν δέκτη ηλεκτρονίων. Τα βακτήρια αυτά αρχικά ανακαλύφθηκαν σε δεξαμενές εγκαταστάσεων βιολογικών καθαρισμών και αργότερα σε υδατικά συστήματα όπου επικρατούσαν ανοξικές συνθήκες.



Απονιτροποίηση

Απονιτροποίηση είναι η διαδικασία μετατροπής των νιτρικών σε μοριακό άζωτο (N₂). Η διεργασία αυτή απομακρύνει βιοδιαθέσιμο άζωτο από τα οικοσυστήματα και το επιστρέφει στην ατμόσφαιρα. Αν και το μοριακό άζωτο είναι το τελικό προϊόν της διεργασίας της

απονιτροποίησης σχηματίζεται ένας μεγάλος αριθμός ενδιάμεσων αερίων. Μερικά από αυτά, όπως το υποξείδιο του αζώτου (N_2O), θεωρούνται αέρια του θερμοκηπίου, αντιδρούν με το όζον και συμβάλλουν στο φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής.



Η απονιτροποίηση είναι μια αναερόβια διεργασία που πραγματοποιείται σε εδάφη, ιζήματα και ανοξικές ζώνες υδάτων. Η απονιτροποίηση πραγματοποιείται από ένα πλήθος προκαρυωτικών οργανισμών ενώ εικάζεται ότι μπορεί να πραγματοποιηθεί και από ορισμένους ευκαρυωτικούς μικροοργανισμούς (**Risgaard-Petersen et al. 2006**). Τα απονιτροποιητικά βακτήρια ανήκουν στα είδη *Bacillus*, *Paracoccus* και *Pseudomonas*. Είναι χημειότροφοι οργανισμοί άρα χρειάζονται και μια πηγή οργανικού άνθρακα.

Η σημασία της απονιτροποίησης είναι ότι απομακρύνει το δεσμευμένο άζωτο από τα οικοσυστήματα και το επιστρέφει στην ατμόσφαιρα σε μια βιολογικά ανενεργή μορφή.

Αμμωνιοποίηση

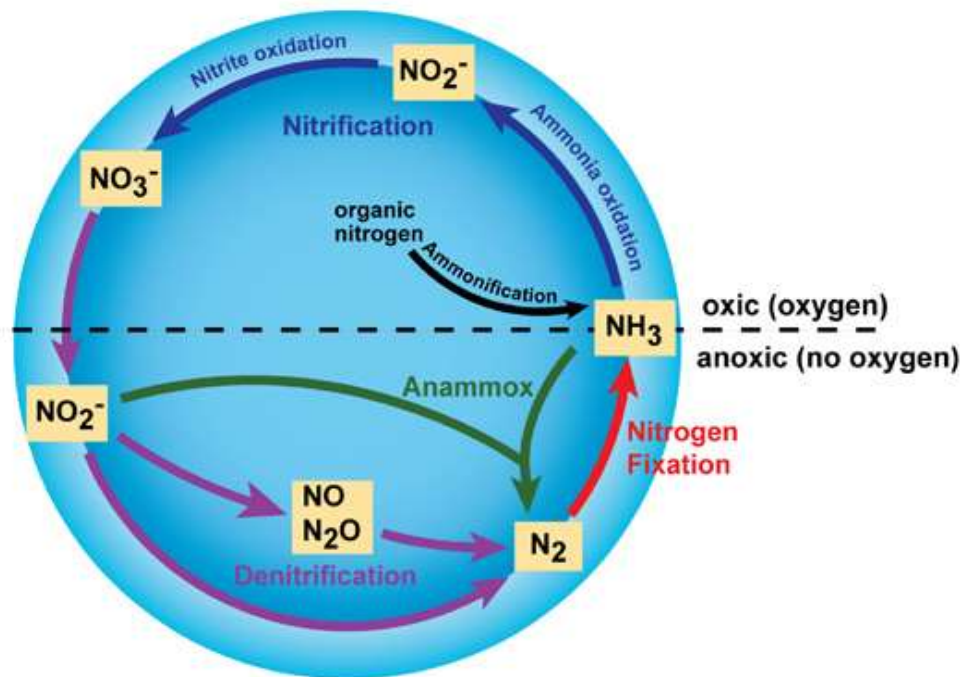
Τα νεκρά κύτταρα των οργανισμών και τα απόβλητα τους περιέχουν άζωτο δεσμευμένο σε οργανικές ουσίες (αμινοξέα, νουκλεικά οξέα κλπ.). Πολλοί μικροοργανισμοί και φύκη διασπούν την οργανική ύλη απελευθερώνοντας ανόργανο άζωτο με την μορφή αμμωνίας. Η παραγόμενη αμμωνία μπορεί να χρησιμοποιηθεί εκ νέου από τα φυτά και άλλους μικροοργανισμούς για τις διατροφικές τους ανάγκες.

Οικολογικές επιπτώσεις από ανθρωπογενείς επιδράσεις στον κύκλο του αζώτου.

Πολλές ανθρωπογενείς δραστηριότητες έχουν σημαντικές επιπτώσεις στον κύκλο του αζώτου. Επειδή το άζωτο είναι συχνά ο περιοριστικός παράγοντας σε πολλά οικοσυστήματα μεγάλες αλλαγές στην διαθεσιμότητα του οδηγούν σε δραματικές αλλαγές στα χερσαία και υδάτινα οικοσυστήματα. Η βιομηχανική δέσμευση αζώτου έχει αυξηθεί εκθετικά από το 1940 και οι ανθρωπίνες δραστηριότητες έχουν διπλασιάσει την συνολική ποσότητα του αζώτου που δεσμεύεται παγκοσμίως (**Vitousek et al. 1997**).

- Η καύση ορυκτών καυσίμων ή η καύση δασικών εκτάσεων έχει αυξήσει την ατμοσφαιρική εναπόθεση αζωτούχων ενώσεων, καθώς συνεισφέρουν στο φαινόμενο της όξινης βροχής.
- Η εφαρμογή αζωτούχων λιπασμάτων σε καλλιέργειες αύξησε τα επίπεδα απονιτροποίησης και έκλυσης νιτρικών στο υπόγειο νερό. Οι επιπλέον ποσότητες νιτρικών καταλήγουν τελικά σε χειμάρρους, ποτάμια, λίμνες και εκβολές ποταμών. Σε αυτά τα συστήματα, η περίσσεια αζώτου είναι δυνατόν να οδηγήσει σε φαινόμενα ευτροφισμού και ανοξικών συνθηκών (Howarth 2008).
- Τα κτηνοτροφικά απόβλητα απελευθερώνουν μεγάλες ποσότητες αμμωνίας στο περιβάλλον. Αυτά εισέρχονται στο έδαφος και έπειτα στον υδρολογικό κύκλο μέσω της απορροής και της υπόγειας ροής.
- Υγρά απόβλητα και διαρροές σηπτικών δεξαμενών.

Το άζωτο είναι αδιαμφισβήτητα το πιο σημαντικό θρεπτικό συστατικό καθώς ρυθμίζει την πρωτογενή παραγωγή και τη βιοποικιλότητα (Vitousek et al. 2002). Από την άλλη όμως η πληθυσμιακή έκρηξη και οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες αποτελούν σημαντική απειλή για τους διαθέσιμους πόρους και έχουν αλλάξει δραματικά τις ισορροπίες στον κύκλο του αζώτου.



Εικόνα 2.3: Σχηματική απεικόνιση του κύκλου του αζώτου (ΠΗΓΗ:NATURE).

2.1.4. Ο ΚΥΚΛΟΣ ΤΟΥ ΦΩΣΦΟΡΟΥ

Ο κύκλος του φωσφόρου είναι ο βιογεωχημικός κύκλος που οφείλεται για την μεταφορά και βιογεωχημική μετατροπή του φωσφόρου μεταξύ της λιθόσφαιρας (γεώσφαιρας), υδρόσφαιρας και βιόσφαιρας (Εικόνα 2.4). Επειδή ο φώσφορος και όλες σχεδόν οι χημικές ενώσεις που σχηματίζει είναι στέρεες στις συνθήκες θερμοκρασίας και πιέσεις που επικρατούν στην Γη, Σε αντίθεση με τους άλλους βιογεωχημικούς κύκλους η ατμόσφαιρα δεν παίζει κάποιον ιδιαίτερο ρόλο στην λειτουργία αυτού του κύκλου (**Filippelli 2008**). Η μεγαλύτερη ποσότητα αζώτου είναι αποθηκευμένη σε πετρώματα, ιζήματα και στον πυθμένα των ωκεανών ενώ μόλις μια μικρή ποσότητα είναι δεσμευμένη στα έμβια όντα.

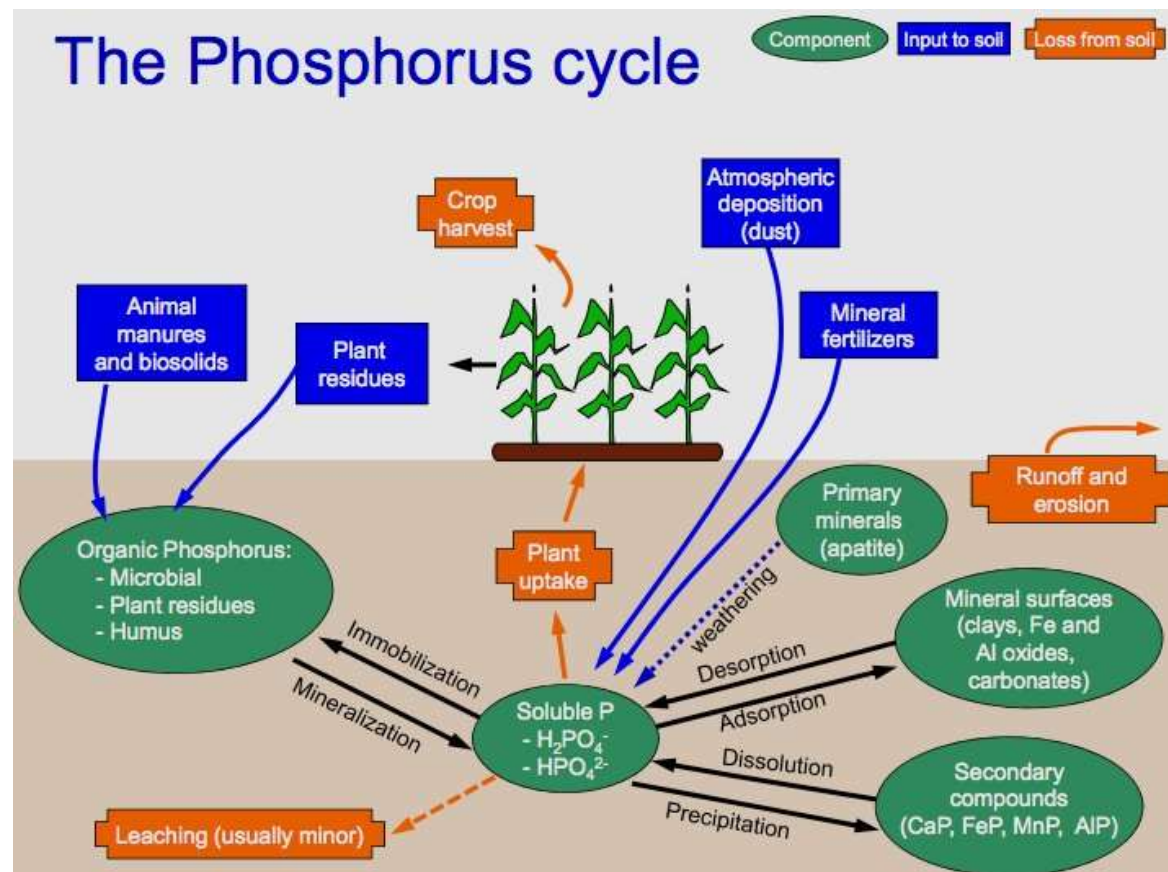
Ο φώσφορος στην επιφάνεια της Γης εμφανίζεται κυρίως με την μορφή ανόργανων φωσφορικών πετρωμάτων. Φωσφορικά απελευθερώνονται από τα πετρώματα λόγω διάβρωσης και είτε αντιδρούν με άλλα εδαφικά συστατικά είτε προσλαμβάνονται από τους έμβιους οργανισμούς.

Τα φυτά διαλύουν τις ιονισμένες μορφές του φωσφόρου και το απορροφούν στον οργανισμό τους. Από εκεί και έπειτα ο φώσφορος μεταφέρεται δια μέσω της τροφικής αλυσίδας στους φυτοφάγους και στα σαρκοφάγους οργανισμούς. Ο φώσφορος αποβάλλεται από τους οργανισμούς πίσω στο περιβάλλον μέσω των ούρων και των περιττωμάτων. Ο φώσφορος απελευθερώνεται στο έδαφος απ' όπου βιο αποικοδομείται μαζί με νεκρή οργανική ύλη και ο κύκλος επαναλαμβάνεται. Ο φώσφορος είναι ένα απαραίτητο θρεπτικό συστατικό για τους οργανισμούς ιδιαίτερα με την μορφή των (HPO_4) (PO_4).

Τα φωσφορικά ιόντα είναι αποδοτικά λιπάσματα, αλλά και σημαντικοί ρυπαντές στα υδάτινα οικοσυστήματα. Ο φώσφορος είναι συχνά το θρεπτικό στοιχείο με περιορισμένη διαθεσιμότητα και έτσι μια μικρή αύξηση της συγκέντρωσής του στο περιβάλλον μπορεί να οδηγήσει σε ευτροφισμό (**Oelkers & Valsami-Jones 2008**). Ο σημαντικότερος βιολογικός ρόλος του φωσφόρου είναι ότι χρησιμοποιείται σε σημαντικά βιολογικά μόρια των οργανισμών όπως, νουκλεοτίδια, τριφωσφορική αδενοσίνη, και φωσφολιπίδια.

Η κύρια ανθρωπογενής παρέμβαση στον κύκλο του αζώτου πραγματοποιείται από την εφαρμογή λιπασμάτων. Η εκτενής εφαρμογή λιπασμάτων τα τελευταία χρόνια έχει αλλάξει δραματικά τους κύκλους αζώτου και φωσφόρου. Επειδή η βλάστηση δεν είναι ικανή να χρησιμοποιήσει όλη την ποσότητα φωσφορικών μεγάλο μέρος της καταλήγει στα υδάτινα οικοσυστήματα μέσω της επιφανειακής απορροής. Κόπρανα ζώων χρησιμοποιείται επίσης σαν λίπασμα ιδίως σε αναπτυσσόμενες χώρες.

Εγκαταστάσεις επεξεργασίας αστικών αποβλήτων είναι επίσης μια σημαντική πηγή ρύπανσης με φωσφορικά ιδίως όταν δεν εφαρμόζεται τριτοβάθμια επεξεργασία. Τα υδάτινα οικοσυστήματα αποτελούν τους συνηθέστερους αποδέκτες επεξεργασμένων λυμάτων.



Εικόνα 2.4: Σχηματική απεικόνιση του κύκλου του φωσφόρου (ΠΗΓΗ:WIKIPEDIA).

2.2. ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

2.2.1. ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΣΚΟΠΟΣ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

Ως μοντέλο θεωρείται ένα σύνολο εξισώσεων το οποίο μπορεί να περιγράψει και να προβλέψει με σχετική ακρίβεια την συμπεριφορά ή την απόκριση ενός φυσικού, χημικού ή βιολογικού συστήματος. Έτσι, τα μοντέλα υδατικού ισοζυγίου δίνουν μια συνολική αναπαράσταση του υδρολογικού κύκλου και των συνιστωσών του σε μια συγκεκριμένη χωρική ενότητα, όπως η υδρολογική λεκάνη, μέσω της οποίας τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα μετασχηματίζονται σε απορροή (Εικόνα 2.5).



Εικόνα 2.5: Σχηματική απεικόνιση ενός υδρολογικού μοντέλου.

Τα υδρολογικά μοντέλα χρησιμοποιούνται σε ένα ευρύ πεδίο εφαρμογών, που περιλαμβάνει τον σχεδιασμό, την ανάπτυξη και την διαχείριση των υδάτινων πόρων, την πρόβλεψη πλημμυρικών φαινομένων και ξηρασίας, την μελέτη της ποιότητας των υδάτων, την μελέτη της υδρο-οικολογίας και του κλίματος (**Pechlivanidis et al. 2011**).

Μεταξύ άλλων, στους στόχους της υδρολογικής μοντελοποίησης περιλαμβάνονται (**Singh & Woolhiser 2002**):

- Η προβολή/προέκταση (interpolation) σημειακών μετρήσεων στην χωρική και χρονική διάσταση.
- Η κατανόηση των υδρολογικών συστημάτων και η εκτίμηση των επιπτώσεων των αλλαγών, όπως η κλιματική αλλαγή και οι αλλαγές στις χρήσεις γης, στα υδάτινα αποθέματα.

Η δημιουργία νέων ή η βελτίωση παλαιότερων μοντέλων για την ανάπτυξη διαχειριστικών πρακτικών σε υδρολογικά συστήματα στο παρόν και στο μέλλον, όπως η διαχείριση υπογείων υδροφορέων, η αποκατάσταση υγροβιότοπων, η διαχείριση αρδευτικού νερού, η αποκατάσταση της ροής των υδατορευμάτων, η εκτίμηση της ποιότητας του νερού και η πρόβλεψη και η διαχείριση πλημμυρικών φαινομένων και φαινομένων ξηρασίας.

2.2.2. ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

Η κατηγοριοποίηση των υδρολογικών μοντέλων μπορεί να πραγματοποιηθεί με πολλούς τρόπους (**Singh & Frevert 2006**) (**Singh 1995**). Μια από τις πιο κοινές πρακτικές είναι η κατηγοριοποίηση των υδρολογικών μοντέλων βάσει της δομής τους, της χωρικής κατανομής, της στοχαστικότητας και της δυνατότητας εφαρμογής τους σε χωρική και χρονική κλίμακα .

Ανάλογα με την δομή του μοντέλου, η κατηγοριοποίηση του μοντέλου μπορεί να γίνει σε μαθηματικά μοντέλα, σε εννοιολογικά μοντέλα, σε μοντέλα φυσικής βάσης και σε υβριδικά μοντέλα. Το βασικό χαρακτηριστικό των μαθηματικών μοντέλων είναι ότι βασίζονται σε παρατηρήσεις και ότι προσπαθούν να χαρακτηρίσουν την απόκριση του συστήματος από διαθέσιμα δεδομένα. Η προσέγγιση αυτή καθιστά τα μοντέλα αυτά εμπειρικά. Ένα πρώτο παράδειγμα αυτής της προσέγγισης ήταν η θεωρία του μοναδιαίου υδρογραφήματος από τον **Sherman το 1932**. Η απλότητα αυτών των μοντέλων επέτρεψε την εφαρμογή τους με σχετική ευκολία σε λεκάνες χωρίς δεδομένα μετρήσεων. Πρέπει να σημειωθεί όμως ότι τα μαθηματικά μοντέλα στηρίζονται στην ποσότητα και την ποιότητα των διαθέσιμων δεδομένων και παρόλο που έχουν εφαρμοστεί για την εκτίμηση ακραίων γεγονότων ή την μοντελοποίηση λεκανών απουσία μετρήσεων πεδίου, τα αποτελέσματα στερούνται υψηλού βαθμού εμπιστοσύνης.

Μια από τις πιο σύγχρονες προσεγγίσεις στην υδρολογική μοντελοποίηση είναι τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (**Lange 1999**)(**Jain et al. 2004**)(**Dawson et al. 2006**). Στα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (Artificial Neuron Network, ANN) χρησιμοποιούνται διαθέσιμα δεδομένα βροχόπτωσης και απορροής για να «εκπαιδευτούν» στην συμπεριφορά των διεργασιών βροχόπτωσης – απορροής. Τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα αποτελούνται από τρία επίπεδα: το πρώτο επίπεδο αποτελείται από δεδομένα εισόδου, η βροχόπτωση, το δεύτερο επίπεδο αποτελείται από τους τεχνητούς νευρώνες του μοντέλου και το τρίτο και τελευταίο επίπεδο από τα δεδομένα εξόδου. Μέσω της διαδικασίας της «εκπαίδευσης», τα μοντέλα αυτού του τύπου τροφοδοτούνται με ένα σετ δεδομένων εισόδου και εξόδου και προσαρμόζουν την εσωτερική δομή του δικτύου τους, έτσι ώστε η απόκρισή τους να προσομοιάζει την απόκριση της λεκάνης απορροής (**Lekkas 2008**).

Τα εννοιολογικά ή παραμετρικά μοντέλα έχουν δύο κύρια χαρακτηριστικά: Πρώτον, η δομή τους είναι καθορισμένη πριν από κάθε προσομοίωση και δεύτερον, δεν έχουν όλες οι παράμετροι του μοντέλου φυσική σημασία. Για τον λόγο αυτό, τουλάχιστον κάποιες από τις παραμέτρους του μοντέλου πρέπει να εκτιμηθούν μέσω της διαδικασίας της βαθμονόμησης χρησιμοποιώντας δεδομένα πεδίου. Στα παραμετρικά μοντέλα πραγματοποιείται προσομοίωση του συνόλου του υδρολογικού κύκλου. Τα παραμετρικά μοντέλα διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους σε πολυπλοκότητα και η δομή των μοντέλων αυτών στηρίζεται στην σχηματική απεικόνιση των σημαντικότερων διεργασιών του υδρολογικού κύκλου. Σύμφωνα με τον (**Wheater 2002**) «μια απλή δομή μοντέλου δεν αντιπροσωπεύει την πολυπλοκότητα της σχέσης μεταξύ βροχόπτωσης και απορροής και ένα πολύπλοκο μοντέλο απαιτεί δεδομένα που δεν είναι πάντα διαθέσιμα». Η πολυπλοκότητα ενός μοντέλου μπορεί να περιοριστεί σε σημαντικό βαθμό μέσω στατιστικών αναγνώρισης (identification statistics) (**DUNN et al. n.d.**) ή ανάλυσης ευαισθησίας (**FENICIA et al. n.d.**) (**van Werkhoven et al. 2009**)

κρατώντας τις αδρανείς παραμέτρους σταθερές ή μέσω αναδιάταξης της δομής του μοντέλου (McIntyre & Al-Qurashi 2009).

Τα μοντέλα φυσικής βάσης προσομοιώνουν τις υδρολογικές διεργασίες όπως την εξατμισοδιαπνοή, την διήθηση, την υπερχειλίση και την ροή στην κορεσμένη και ακόρεστη ζώνη χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις της κίνησης (συνήθως με την μορφή μη - γραμμικών μερικών διαφορικών εξισώσεων) βασισμένες στην μηχανική του συνεχούς μέσου. Συνήθως, οι εξισώσεις επιλύονται αριθμητικά με την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών ή πεπερασμένων στοιχείων, αν και έχουν χρησιμοποιηθεί και αναλυτικές λύσεις. Θεωρητικά, τα μοντέλα φυσικής βάσης καθορίζονται από μετρήσιμες παραμέτρους και μπορούν να τρέχουν συνεχείς προσομοιώσεις απορροής χωρίς βαθμονόμηση (Beven 2001). Η φυσική δομή του μοντέλου είναι βασισμένη σε εργαστηριακές ή μικρής κλίμακας μετρήσεις πεδίου και αυτό έχει ως συνέπεια να επηρεάζονται από την φύση των μετρήσεων ή/και των εργαστηριακών πειραμάτων. Η γενίκευση των τιμών των παραμέτρων του μοντέλου για μεγαλύτερη χωρική κλίμακα συχνά απαιτεί την θεώρηση ότι οι φυσικές διεργασίες και ιδιότητες είναι ανεξάρτητες της κλίμακας μεγέθους, προκαλώντας αβεβαιότητα για την ορθότητα της εφαρμογής τους (Beven 2004). Για την μείωση των απαιτήσεων σε υπολογιστική ισχύ και δεδομένα πεδίου συχνά απλοποιούνται οι διεργασίες, και χρησιμοποιούνται απλοποιημένες εξισώσεις όπως η εξίσωση St. Venant, η εξίσωση Green-Ampt, (Heber Green & Ampt 1911) (Mein & Larson 1973) γεγονός που οδηγεί σε διαφοροποίηση από την πραγματικότητα.

Οι λεκάνες απορροής παρουσιάζουν μεγάλη χωρική ανομοιογένεια κάνοντας απαγορευτική την παρατήρηση τους ή/και την αναπαράστασή τους σε μοντέλο. Αυτό γίνεται ακόμα πιο προφανές στην αναπαράσταση των υπεδάφινων διεργασιών λόγω της δυσκολίας των μετρήσεων πεδίου και του υψηλού βαθμού της ετερογένειας που παρουσιάζουν τα εδάφη και οι υπόγειοι υδροφορείς. Θεωρητικά οι παράμετροι των μοντέλων φυσικής βάσης είναι μετρήσιμες ποσότητες όμως πρακτικά κάτι τέτοιο δεν είναι πάντα εφικτό κατά την μοντελοποίηση, διότι τέτοιες μετρήσεις είναι συνήθως σημειακές (Wheater 2002). Για αυτό τέτοια μοντέλα χρησιμοποιούν μέσες τιμές των ιδιοτήτων της υδρολογικής λεκάνης σε κλίμακα μεγαλύτερη της διακύμανσης που παρουσιάζουν στην πραγματικότητα.

Υβριδικά Μοντέλα

Αν και πολλά μοντέλα κατηγοριοποιούνται σε μια από τις παραπάνω κατηγορίες, η αλήθεια είναι ότι πολλά από αυτά περιλαμβάνουν στοιχεία από δύο ή και παραπάνω κατηγορίες μοντέλων. Τα υβριδικά μοντέλα προσφέρουν την δυνατότητα αντιμετώπισης των προβλημάτων που σχετίζονται με την ανικανότητα αναγνώρισης των παραμέτρων μειώνοντας τις διαστάσεις των παραμέτρων (Beven 2006). Τα πλεονεκτήματα των υβριδικών μοντέλων είναι ότι χρησιμοποιούν την παραμετροποίηση των μαθηματικών μοντέλων και της ικανότητάς τους να χαρακτηρίσουν τις παρατηρήσεις στατιστικά καθώς και την προηγούμενη επιστημονική γνώση για να αποδώσουν αποδοτικά την δομή των υδρολογικών διεργασιών. Πολλά φυσικής βάσης μοντέλα είναι στην πραγματικότητα υβριδικά φυσικής βάσης – παραμετρικά μοντέλα, όπως για παράδειγμα το μοντέλο SWAT (Arnold et al. 1993). Σκοπός τους είναι να απλοποιήσουν την δομή του μοντέλου αναπαριστώντας κάποιες από

τις φυσικές διεργασίες με παραμετρική μορφή, κυρίως σε περιπτώσεις όπου οι φυσικοί παράμετροι είναι δύσκολο να μετρηθούν.

Εκτός της δομής υπάρχουν και άλλες μέθοδοι κατηγοριοποίησης των υδρολογικών μοντέλων. Οι συνηθέστερες από αυτές είναι η κατηγοριοποίηση με βάση την διακριτοποίηση του μοντέλου, της στοχαστική ή μη θεώρησης των φαινομένων και τέλος με βάση την χρονική και χωρική κλίμακα της προσομοίωσης.

Τα ενιαία ή αδρομερή μοντέλα θεωρούν την υδρολογική λεκάνη ως μια απλή ενιαία μονάδα, με τις μεταβλητές κατάστασης να αποτελούν μέσες τιμές των παραμέτρων όλης της λεκάνης (**Beven 2001**). Σε γενικές γραμμές ένα ενιαίο μοντέλο εκφράζεται με διαφορικές ή εμπειρικές αλγεβρικές εξισώσεις, μη λαμβάνοντας υπόψη την χωρική διακύμανση των διεργασιών, των εισόδων, των οριακών συνθηκών και της γεωμορφολογίας του υδρολογικού συστήματος (Singh 1995). Τα κατανεμημένα μοντέλα, σε αντίθεση με τα ενιαία, βασίζονται στην υπόθεση της χωρικής κατανομής, με τις μεταβλητές κατάστασης να αποτελούν τοπικές μέσες τιμές, και βασίζονται στην διακριτοποίηση της λεκάνης σε έναν αριθμό στοιχείων ή επιλύοντας τις εξισώσεις του μοντέλου για κάθε διακριτοποιημένο στοιχείο ξεχωριστά (**Singh & Frevert 2006**). Τα κατανεμημένα μοντέλα είναι ικανά να λάβουν υπόψιν τους σε κάποιο βαθμό την χωρική διακύμανση των διεργασιών, των εισόδων, των οριακών συνθηκών και των χαρακτηριστικών της λεκάνης. Παρόλα αυτά, κυρίως λόγω έλλειψης δεδομένων οι παράμετροι στα κατανεμημένα μοντέλα λαμβάνουν την ίδια τιμή σε κλίμακα μεγαλύτερη από την κλίμακα διακριτοποίησης της υδρολογικής λεκάνης (**Beven 2001**).

Τα ημι-κατανεμημένα μοντέλα συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα και των δύο τύπων χωρικής απεικόνισης. Αυτή η κατηγορία μοντέλων δεν χρησιμοποιεί μια συνεχή χωρική διακριτοποίηση των παραμέτρων της λεκάνης, αλλά διακριτοποιεί την λεκάνη σε έναν ορισμένο βαθμό που επιλέγεται από τον χρήστη, χρησιμοποιώντας ένα σύστημα ενιαίων μοντέλων. Ένα ημι-κατανεμημένο μοντέλο μπορεί να αναπαραστήσει τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά μιας λεκάνης απαιτώντας παράλληλα λιγότερη υπολογιστική ισχύ και μικρότερο αριθμό δεδομένων απ' ό,τι τα πλήρως κατανεμημένα μοντέλα (**Orellana et al. 2008**).

Τα μοντέλα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως ντετερμινιστικά ή προσδιοριστικά όταν τα αποτελέσματα προκύπτουν μόνο από τις σχέσεις μεταξύ και των δεδομένων. Τα προσδιοριστικά μοντέλα παράγουν ένα μόνο αποτέλεσμα από τις προσομοιώσεις τους για ένα συγκεκριμένο σετ δεδομένων εισόδου και παραμέτρων του μοντέλου. Τα στοχαστικά μοντέλα χρησιμοποιούν τυχαίες μεταβλητές για να αναπαραστήσουν διεργασίες και παράγουν διαφορετικά αποτελέσματα για ένα συγκεκριμένο σετ δεδομένων εισόδου και παραμέτρων του μοντέλου για κάθε προσομοίωση (**Beven 2001**). Ένα συγκεκριμένο σετ δεδομένων εισόδου θα αποδώσει ένα αποτέλεσμα βασισμένα σε μια στατιστική κατανομή. Αυτό επιτρέπει μια τυχαιότητα ή αβεβαιότητα στο αποτέλεσμα της προσομοίωσης λόγω της αβεβαιότητας στα δεδομένα εισόδου, στις οριακές συνθήκες ή στα παραμέτρους του μοντέλου. Μικτά προσδιοριστικά-στοχαστικά μοντέλα μπορούν να δημιουργηθούν εισάγοντας μοντέλα στοχαστικής ανάλυσης σε προσδιοριστικά μοντέλα. Για παράδειγμα, βροχόπτωση παραγόμενη από στοχαστική ανάλυση μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν δεδομένο εισόδου σε προσδιοριστικά μοντέλα βροχόπτωσης-απορροής, ή ένα

προσδιοριστικό μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αναπαραστήσει ένα στοχαστικό σύστημα χρησιμοποιώντας προσομοίωση Monte-Carlo (**Singh 1995**).

Τα υδρολογικά μοντέλα βροχόπτωσης-απορροής μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε συνεχή μοντέλα και μοντέλα μεμονωμένου υδρολογικού γεγονότος. Τα συνεχή υδρολογικά μοντέλα χρησιμοποιούν σαν δεδομένο εισόδου μια χρονοσειρά βροχόπτωσης, που δύναται να εμπεριέχει περισσότερα από ένα γεγονότα βροχόπτωσης, ενώ τα μοντέλα μεμονωμένου υδρολογικού γεγονότος λαμβάνουν υπόψη τους ένα μόνο γεγονός βροχόπτωσης. Η χρονική κλίμακα του μοντέλου μπορεί να προσδιοριστεί από το χρονικό βήμα που χρησιμοποιήθηκε για τα δεδομένα εισόδου και τους υπολογισμούς του μοντέλου, ή από το χρονικό βήμα που χρησιμοποιήθηκε για τα αποτελέσματα και την βαθμονόμηση του μοντέλου, γεγονός που καθορίζεται από τον σκοπό της μοντελοποίησης (**Singh 1995**). Άλλες υποκατηγορίες των συνεχών μοντέλων είναι τα μοντέλα με ετήσιο, μηνιαίο, ημερήσιο ή και μικρότερο από ημερήσιο χρονικό βήμα.

Μια ακόμη κατηγοριοποίηση των μοντέλων αφορά την χωρική τους κλίμακα. Η κατηγοριοποίηση αυτή όμως είναι αυθαίρετη και όχι εννοιολογική, και θα ήταν ιδανικότερο η κατηγοριοποίηση να πραγματοποιηθεί με βάση την ομοιογένεια, για παράδειγμα την κλίμακα στην οποία οι διεργασίες θα μπορούσαν να θεωρηθούν ομοιογενείς, όπως το μέγεθος της μονάδας υδρολογικής απόκρισης (**Young et al. 2006**) (**Wagner et al. 2007**).

2.2.3. ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΚΑΙ ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ

Η βαθμονόμηση ενός μοντέλου είναι η διαδικασία της επιλογής των κατάλληλων τιμών των παραμέτρων του μοντέλου έτσι ώστε η υδρολογική απόκριση της λεκάνης να προσομοιώνεται με ακρίβεια (**Moore & Doherty 2005**). Υπάρχουν δύο τύποι παραμέτρων στα περισσότερα μοντέλα: φυσικές παράμετροι και παράμετροι διεργασιών. Οι φυσικές παράμετροι αντιπροσωπεύουν φυσικές ιδιότητες της λεκάνης και είναι συνήθως μετρήσιμες ιδιότητες της λεκάνης, όπως η έκταση της λεκάνης, η κλίση του εδάφους κ.α. Οι παράμετροι διεργασιών αντιπροσωπεύουν χαρακτηριστικά της λεκάνης τα οποία δεν είναι άμεσα μετρήσιμες ιδιότητες, όπως το μέσο βάθος του υπόγειο υδροφορέα, ο μη γραμμικός συντελεστής εκφόρτισης ταμειυτήρα κ.α. Υπάρχουν βέβαια και φυσικές ιδιότητες που ενώ θεωρητικά αποτελούν μετρήσιμες ποσότητες αλλά στην πράξη η μέτρηση τους είναι απαγορευτική, για παράδειγμα η υδραυλική αγωγιμότητα και το πορώδες, με αποτέλεσμα να εκτιμώνται κατά την βαθμονόμηση. Η διαδικασία της βαθμονόμησης μπορεί να είναι χειροκίνητη ή αυτόματη, στην πράξη όμως είναι συχνά ένας συνδυασμός των δύο.

Η χειροκίνητη βαθμονόμηση βασίζεται στην ευχέρεια του χρήστη να προσαρμόσει τις παραμέτρους του μοντέλου κατά την κρίση του μέχρι το αποτέλεσμα της προσομοίωσης να ταιριάζει αρκετά με τα δεδομένα πεδίου. Η ρύθμιση των παραμέτρων πραγματοποιείται συνήθως με την μέθοδο της δοκιμής και του σφάλματος, έτσι απαιτείται εξοικείωση με την δομή του μοντέλου και μελέτη των υδρολογικών λεκανών που μοντελοποιούνται. Γενικά είναι δύσκολο να προσδιοριστεί η βέλτιστη βαθμονόμηση ή το σημείο στο οποίο πρέπει να τερματιστεί η διαδικασία της βαθμονόμησης και έτσι διαφορετικά αποτελέσματα προκύπτουν από διαφορετικούς χρήστες (**Wheater 2002**). Ο χρονοβόρος χαρακτήρας αυτής της διαδικασίας αποτελεί άλλο ένα πρόβλημα.

Η ανάπτυξη μεθόδων βασισμένων σε υπολογιστές για την αυτόματη βαθμονόμηση υδρολογικών μοντέλων έχει βασιστεί στην ανάγκη επιτάχυνσης της διαδικασίας της βαθμονόμησης. Ένας άλλος στόχος ήταν η ανάπτυξη μιας αντικειμενικής στρατηγικής για την εκτίμηση των παραμέτρων που να παρέχει σταθερή αξιοπιστία και απόδοση και να περιορίζει την υποκειμενική ανθρώπινη κρίση που υπάρχει στην χειροκίνητη βαθμονόμηση (**Boyle et al. 2000**). Οι μέθοδοι αυτόματης βαθμονόμησης είναι πιο αντικειμενικές και περιορίζουν την ανάγκη εξειδίκευσης με το μοντέλο, παρόλα αυτά δεν έχουν ωριμάσει ακόμα σε σημείο που να μπορούν να αντικαταστήσουν εντελώς την χειροκίνητη βαθμονόμηση λόγω της δυσκολίας κατασκευής αντικειμενικών συναρτήσεων και αλγορίθμων βελτιστοποίησης που να αναπαράγουν την ανθρώπινη κρίση. Η αυτόματη βαθμονόμηση είναι πιο αποτελεσματική όταν χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με την χειροκίνητη προσέγγιση.

Μια τυπική διαδικασία αυτόματου προσδιορισμού των παραμέτρων ενός μοντέλου αποτελείται από τα ακόλουθα στάδια: την επιλογή της αντικειμενικής συνάρτησης, τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης, τα κριτήρια τερματισμού της διαδικασίας και τα δεδομένα βαθμονόμησης. Ο σκοπός της αυτόματης βαθμονόμησης είναι να βρεθούν οι τιμές εκείνες για τις οποίες βελτιστοποιείται (μεγιστοποιείται ή ελαχιστοποιείται) η αριθμητική τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης.

Μια αντικειμενική συνάρτηση είναι μια αριθμητική μέτρηση της διαφοράς μεταξύ των δεδομένων εξόδου του μοντέλου και των δεδομένων πεδίου της υδρολογικής λεκάνης (**Schaefli & Gupta 2007**).

Μια από τις πιο γνωστές αντικειμενικές συναρτήσεις στην υδρολογική βιβλιογραφία είναι ο δείκτης NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency), ο οποίος υπολογίζει το ποσοστό της διακύμανσης των δεδομένων του μοντέλου (**Nash & Sutcliffe 1970**). Πρόσφατες έρευνες υποδεικνύουν ότι ο δείκτης NSE επιτυγχάνει να αποδώσει τη συσχέτιση με τις τιμές πεδίου ενώ υποεκτιμάται η διακύμανση και η μέση τιμή της απορροής (**Schaefli & Gupta 2007**)(**Gupta et al. 2009**). Ο δείκτης KGE προτάθηκε πρόσφατα για να ξεπεραστούν κάποιοι από τους περιορισμούς του δείκτη NSE (**Gupta et al. 2009**). Στις λίγες μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί ως τώρα, ο δείκτης KGE κατορθώνει αποδώσει ικανοποιητικά την διακύμανση, τις ακραίες και μέσες τιμές της απορροής, κρατώντας υψηλή την γραμμική συσχέτιση μεταξύ παρατηρούμενων τιμών και των δεδομένων του μοντέλου.

Η επαλήθευση λαμβάνει χώρα έπειτα από την βαθμονόμηση για να εξετάσει αν το μοντέλο προσομοιώνει ικανοποιητικά τα δεδομένα πεδίου που δεν χρησιμοποιήθηκαν κατά την βαθμονόμηση. Συνήθως η απόδοση του μοντέλου είναι καλλίτερη κατά την βαθμονόμηση παρά κατά την επαλήθευση του μοντέλου, φαινόμενο που ονομάζεται απόκλιση του μοντέλου. Όταν ο βαθμός της απόκλισης του μοντέλου λαμβάνει μη αποδεκτές τιμές, η δομή του μοντέλου και η διαδικασία της βαθμονόμησης πρέπει να εξεταστούν για ακατάλληλες παραδοχές.

Η πιο συνηθισμένη μέθοδος που χρησιμοποιείται περιλαμβάνει την διαίρεση των δεδομένων πεδίου σε δύο ή περισσότερες χρονοσειρές από τις οποίες η μια χρησιμοποιείται για την βαθμονόμηση του μοντέλου και οι υπόλοιπες για την επαλήθευσή του.

Πρόσφατα έχουν προταθεί οι ακόλουθες μεθοδολογίες (Ewen & Parkin 1996):

- Απλή διαίρεση των δεδομένων
- Διαφορική διαίρεση των δεδομένων, όπου η διαίρεση των δεδομένων πραγματοποιείται με βάση το ρυθμό της βροχόπτωσης (ή κάποιας άλλης μεταβλητής)
- Χρήση δεδομένων από δύο διαφορετικές υδρολογικές ενότητες. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για να πραγματοποιηθεί μια ακόμη γενικότερη επαλήθευση του μοντέλου καθώς περιλαμβάνει βαθμονόμηση του μοντέλου με βάση δεδομένα από μια λεκάνη και επαλήθευση με δεδομένα από κάποια άλλη.
- Διαφορική χρήση δεδομένων από δύο διαφορετικές υδρολογικές ενότητες. Τα δεδομένα πεδίου κάθε λεκάνης χωρίζονται σε δύο μέρη. Η βαθμονόμηση πραγματοποιείται, για παράδειγμα με τα δεδομένα της πρώτης λεκάνης για την ξηρή περίοδο και επαληθεύεται με τα δεδομένα της δεύτερης λεκάνης για την υγρή περίοδο.

2.2.4. TO MONTELO SWAT

Το SWAT (Soil and Water Assessment Tool) αναπτύχθηκε από την Υπηρεσία Αγροτικών Ερευνών των ΗΠΑ (USDA – ARS, Agricultural Research Service) για να προβλέψει τις επιπτώσεις των πρακτικών διαχείρισης γης στο νερό, τα ιζήματα και τις αγροτικές χημικές φορτίσεις σε μεγάλες και πολύπλοκες λεκάνες απορροής με διάφορους τύπους εδαφών, χρήσεων γης και διαχειριστικών πρακτικών σε μεγάλο βάθος χρόνου. Η αποτελεσματικότητά του, το κατέστησε διεθνώς αποδεκτό ως ένα από τα πλέον κατάλληλα εργαλεία προσομοίωσης μεγάλων και πολύπλοκων λεκανών απορροής (**Arnold & Fohrer 2005**) (**Gassman et al. 2005**). Το SWAT τα πληροί τα κριτήρια ενός υψηλής ποιότητα υδρολογικού μοντέλου χάρη στα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Το SWAT είναι ένα φυσικό μοντέλο με την έννοια ότι η μαθηματική του δομή είναι βασισμένη σε μαθηματικές εξισώσεις που περιγράφουν φυσικά φαινόμενα και διεργασίες. Για τον λόγο αυτό το SWAT απαιτεί συγκεκριμένες πληροφορίες για τον καιρό, τα χαρακτηριστικά των εδαφών, την τοπογραφία, την βλάστηση και τις διαχειριστικές πρακτικές που πραγματοποιούνται στην λεκάνη απορροής. Οι φυσικές διεργασίες που σχετίζονται με τον υδρολογικό κύκλο, την μεταφορά ιζημάτων, την ανάπτυξη των καλλιεργειών, τους βιογεωχημικούς κύκλους μοντελοποιούνται απευθείας από το SWAT χρησιμοποιώντας τα δεδομένα εισόδου. Τα πλεονεκτήματα αυτής της προσέγγισης είναι:
 - Η δυνατότητα μοντελοποίησης λεκανών απορροής για τις οποίες δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα.
 - Η δυνατότητα ποσοτικοποίησης των επιπτώσεων (κλιματική αλλαγή, αλλαγή χρήσεων γης) εναλλακτικά δεδομένα εισόδου.
- Το SWAT μπορεί να λειτουργήσει με μικρό αριθμό δεδομένων εισόδου όταν δεν προσομοιώνονται εξειδικευμένα διεργασίες όπως η μεταφορά βακτηρίων. Τα δεδομένα αυτά είναι συνήθως διαθέσιμα από δημόσιες υπηρεσίες.
- Το SWAT χρησιμοποιεί υπολογιστικά αποδοτικούς αλγορίθμους. Αυτό επιτρέπει την προσομοίωση μεγάλων λεκανών απορροής ή πολύπλοκων διαχειριστικών πρακτικών χωρίς να απαιτεί μεγάλη υπολογιστική ισχύ.
- Το SWAT μπορεί να τρέξει προσομοιώσεις υδρολογικών λεκανών για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Σε πολλές περιπτώσεις ρύπανσης απαιτείται η παρακολούθηση της εξέλιξης της σε μεγάλο βάθος χρόνου που μπορεί να φτάνει και αρκετές δεκαετίες. Άλλο ένα παράδειγμα είναι η μελέτη των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής σε μια λεκάνη απορροής.

Το μοντέλο SWAT δεν είναι σχεδιασμένο να προσομοιώνει μεμονωμένα πλημμυρικά φαινόμενα αλλά τις διεργασίες βροχόπτωσης - απορροής και διαχείρισης στη λεκάνη απορροής με μεγάλο βαθμό χωρικής λεπτομέρειας λόγω της διαίρεσης της λεκάνης σε επιμέρους υπολεκάνες.

Το SWAT δημιουργήθηκε το 1990 ενσωματώνοντας πολλά προγράμματα της ARS (Agricultural Research Service). Τα μοντέλα GLEAMS (Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems), GREAMS (Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems) και EPIC (Erosion – Productivity Impact Calculator)

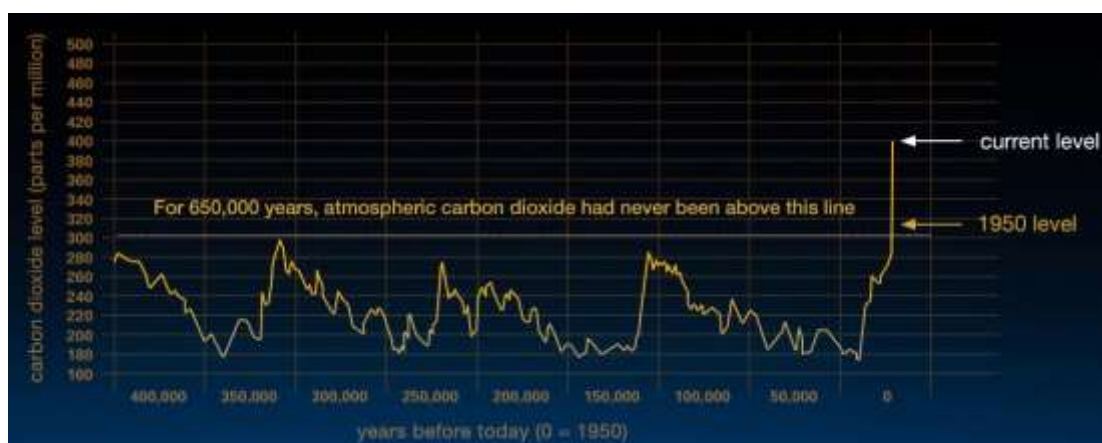
προστέθηκαν στον κορμό του κύριου προγράμματος του SWAT αυξάνοντας τον αριθμό και την μεθοδολογία προσομοίωσης φυσικοχημικών διεργασιών. Το SWAT έχει αναπτυχθεί σε μεγάλο βαθμό από τότε που πρωτοεμφανίστηκε το 1990. Σήμερα δύναται η δυνατότητα εφαρμογής του σε γραφικό περιβάλλον Windows (Visual Basic), GRASS και ArcGIS.

2.3. ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ

2.3.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το κλίμα της Γης αλλάζει με το πέρασμα των αιώνων. Μόνο τα τελευταία 650.000 χρόνια υπήρξαν επτά παγετώδεις εποχές, με την τελευταία εποχή των παγετώνων να φτάνει στο τέλος της πριν από περίπου 7.000 χρόνια, σηματοδοτώντας την απαρχή των σύγχρονων κλιματικών συνθηκών και του ανθρώπινου πολιτισμού. Οι περισσότερες από αυτές τις κλιματικές αλλαγές οφείλονται σε πολύ μικρές μεταβολές της τροχιάς της Γης γύρω από τον Ήλιο, που επηρεάζουν την ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται ο πλανήτης. Η σύγχρονη τάση αύξησης της θερμοκρασίας της Γης είναι εξαιρετικής σημασίας καθώς πιστεύεται ότι οφείλεται κυρίως στον ανθρώπινο παράγοντα και συντελείται με τον υψηλότερο ρυθμό των τελευταίων 1.300 ετών (**Santer et al. 2013**).

Η ιδιότητα του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) και άλλων αερίων να δεσμεύουν θερμική ενέργεια διαπιστώθηκε στα μέσα του 19^{ου} αιώνα από τον John Tyndall. Ο Tyndall κατασκεύασε το πρώτο φασματοφωτόμετρο και με πειράματα απέδειξε ότι τα μόρια του νερού, του διοξειδίου του άνθρακα και του όζοντος δεσμεύουν ισχυρά την θερμότητα (υπέρυθη ακτινοβολία) ενώ το οξυγόνο, το άζωτο και το υδρογόνο είναι σχεδόν διαφανή σε αυτού του είδους την ακτινοβολία. Ο ίδιος ο επιστήμονας ανέφερε πως χωρίς υδρατμούς η επιφάνεια της Γης θα ήταν «κάτω από την σιδερένια πυγμή των παγετώνων». Αργότερα υποστήριξε πως οι μεταβολές στην ποσότητα των υδρατμών και του διοξειδίου του άνθρακα της ατμόσφαιρας μπορεί να σχετίζονται με τις κλιματικές αλλαγές. Σήμερα είναι αδιαμφισβήτητο πως οι αυξημένες συγκεντρώσεις αερίων του θερμοκηπίου προκαλούν την υπερθέρμανση της Γης. Δείγματα πάγου που ελήφθησαν από γεωτρήσεις στην Γροιλανδία, Ανταρκτική και από παγετώνες τροπικών βουνών αποδεικνύουν πως το κλίμα της Γης επηρεάζεται από μεταβολές στα επίπεδα των αερίων του θερμοκηπίου (Εικόνα 2.6). Έχει ανακαλυφθεί μάλιστα πως στο παρελθόν μεγάλης κλίμακας κλιματικές αλλαγές συνέβησαν πολύ γρήγορα σε κλίμακα δεκάδων ετών και όχι εκατομμυρίων ή χιλιάδων.



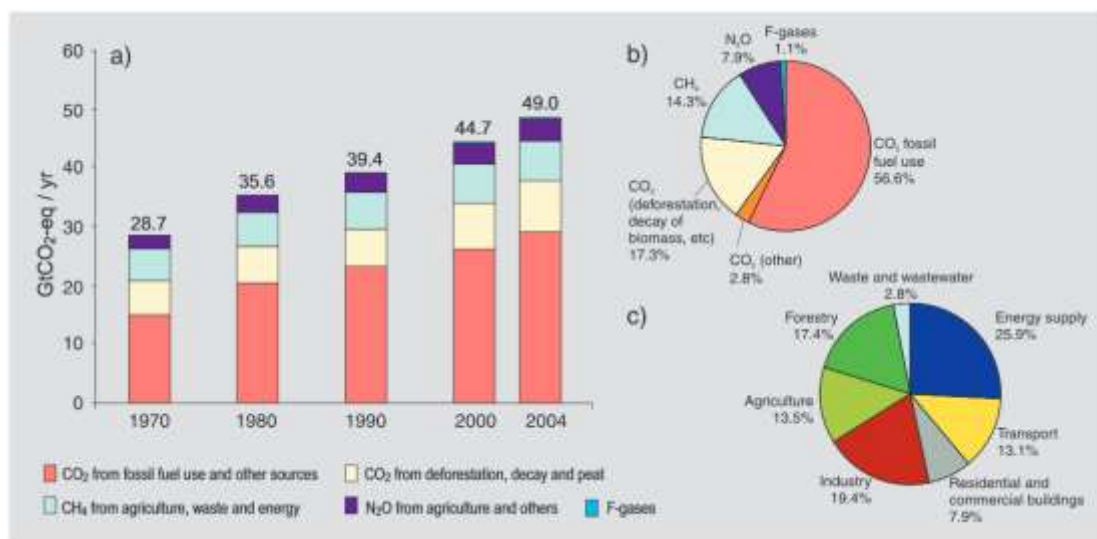
Εικόνα 2.6: Αύξηση της συγκέντρωσης ατμοσφαιρικού διοξειδίου του άνθρακα (CO_2), βάση αναλύσεων ατμοσφαιρικών δειγμάτων από γεωτρήσεις πάγων και σύγχρονων μετρήσεων (Petit et al. 1999).

2.3.2. ΑΙΤΙΑ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ

Υπάρχουν πολλοί παράγοντες που επιδρούν στο Γήινο κλίμα. Γενικά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο κατηγορίες «φυσικούς» και «ανθρωπογενείς». Από τις αρχές του 20^{ου} αιώνα έχει παρατηρηθεί ότι οι αλλαγές του κλίματος δεν μπορούν να οφείλονται μόνο σε «φυσικές» επιδράσεις. Η κλιματική αλλαγή, η οποία μερικές φορές αποκαλείται και παγκόσμια υπερθέρμανση έχει λάβει χώρα ταχύτερα από κάθε άλλη κλιματική αλλαγή του παρελθόντος και έτσι προκαλεί τεράστιο ενδιαφέρον αλλά έχει και σημαντικές επιπτώσεις στον ανθρωπινό πληθυσμό και τα οικοσυστήματα.

Η Γη είναι ένα τεράστιο φυσικό θερμοκήπιο. Η μεγάλου κύματος Ηλιακή ακτινοβολία περνάει χωρίς μεγάλες απώλειες από την ατμόσφαιρα της Γης. Μέρος της επανεκπέμπεται από την επιφάνεια της Γης με την μορφή υπέρυθρης ακτινοβολίας προς το διάστημα. Όμως το μεγαλύτερο μέρος αυτής της υπέρυθρης ακτινοβολίας δεσμεύεται από μια ομάδα αερίων, τα «αέρια του θερμοκηπίου», και θερμαίνει την ατμόσφαιρα. Από την εποχή της Βιομηχανικής Επανάστασης, οι ανθρώπινες δραστηριότητες έχουν αυξήσει την ποσότητα αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα. Η αυξημένη ποσότητα αερίων του θερμοκηπίου έχει οδηγήσει στην κατακράτηση περισσότερης θερμότητας από την ατμόσφαιρα με άμεσο αποτέλεσμα την αύξηση της παγκόσμιας μέσης επιφανειακής θερμοκρασίας. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό και ως «παγκόσμια υπερθέρμανση». Η αύξηση της θερμοκρασίας έχει όμως και επιπτώσεις στην κατανομή και την συχνότητα των κλιμα στο κλίμα.

Τα κύρια αέρια του θερμοκηπίου είναι οι υδρατμοί, το διοξείδιο του άνθρακα, το μεθάνιο, το υποξείδιο του αζώτου, οι χλωροφθοράνθρακες και τα αεροζόλ. Κάθε ένα από τα αέρια αυτά επιδρά με διαφορετικό τρόπο στην φυσικοχημικές διεργασίες που συντελούνται στην ατμόσφαιρα και ο βαθμός συμμετοχής τους στο φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής διαφέρει (Εικόνα 2.7).

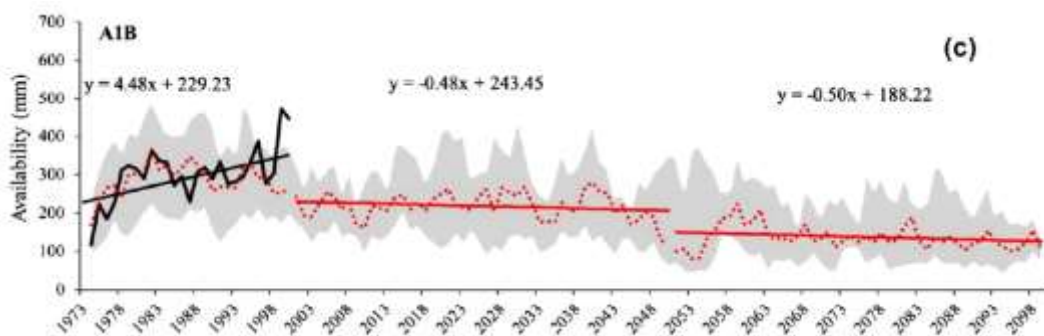


Εικόνα 2.7: (α) Παγκόσμιες ετήσιες εκπομπές ανθρωπογενών αερίων του θερμοκηπίου από το 1970 έως το 2004. (β) Συμμετοχή των διάφορων ανθρωπογενών αερίων του θερμοκηπίου το 2004 εκφρασμένη σε ισοδύναμα διοξειδίου του άνθρακα (CO₂ – eq). (c) Συμμετοχή των διαφορετικών βιομηχανικών δραστηριοτήτων στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου το 2004 εκφρασμένη σε ισοδύναμα διοξειδίου του άνθρακα (CO₂ – eq) (Bernstein et al. 2007).

2.3.3. ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ

Η κύρια αιτία της κλιματικής αλλαγής που έχει παρατηρηθεί τις τελευταίες δεκαετίες του 20^{ου} αιώνα οφείλεται στην αύξηση των συγκεντρώσεων των αερίων του θερμοκηπίου (Greenhouse Gases, GHGs) από ανθρωπογενείς πηγές. Προβλέψεις από διάφορα κλιματικά μοντέλα εκτιμούν μια αύξηση της θερμοκρασίας στο τέλος του 21^{ου} αιώνα (2090-2100) κατά 6.4 °C σε σχέση με την περίοδο 1980-1999. Η Μεσόγειος βρίσκεται στην μεταβατική ζώνη μεταξύ ξηρού ερημικού κλίματος της Βόρειας Αφρικής και του εύκρατου και υγρού κλίματος της Κεντρικής Ευρώπης. Ως αποτέλεσμα, ακόμα και μικρές μεταβολές σε μπορούν να έχουν σημαντικές επιπτώσεις σε διαφορετικές περιοχές της Μεσογείου. Ειδικότερα, η αύξηση της θερμοκρασίας και του φαινομένου της ξηρασίας κατά την θερμή περίοδο αναμένεται να οδηγήσουν σε αύξηση των ερημικών και ημι-ερημικών εκτάσεων της περιοχής. Ιδιαίτερα στις νότιες περιοχές της Μεσογείου, η γεωργία και τα φυσικά οικοσυστήματα αναμένεται να δεχτούν σημαντικές πιέσεις λόγω του περιορισμού των υδάτινων αποθεμάτων και τον κίνδυνο της ερημοποίησης (**Gao & Giorgi 2008**).

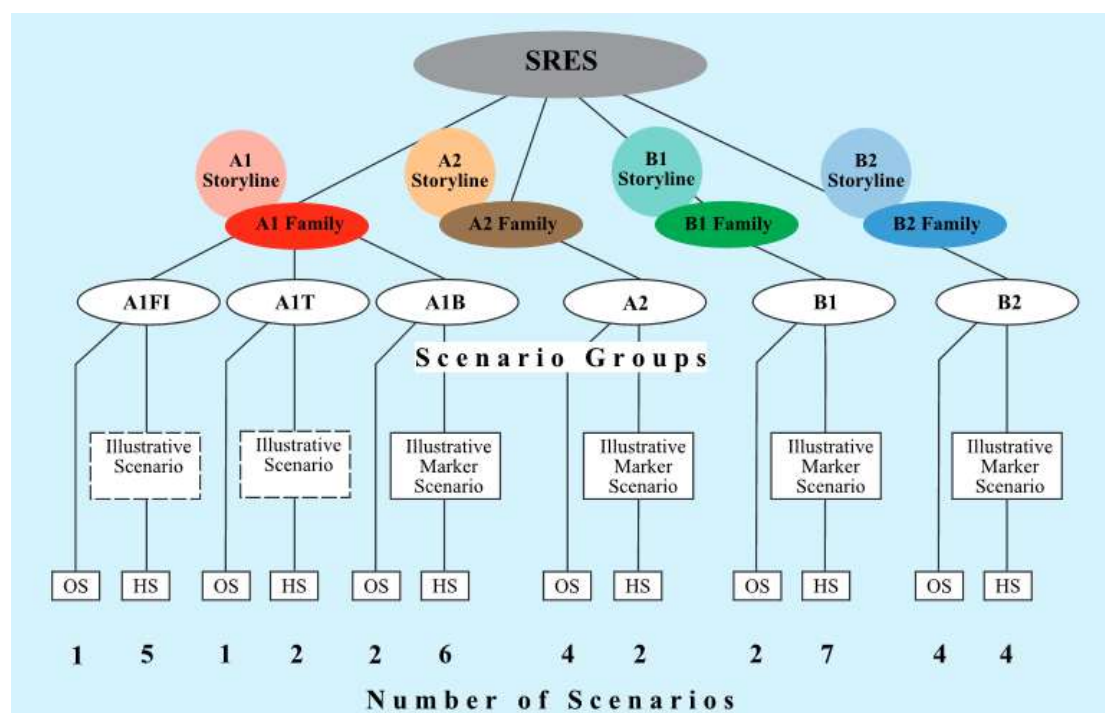
Το κλίμα στην Μεσόγειο αναμένεται να γίνει θερμότερο και ξηρότερο, σύμφωνα με το IPCC (**ipcc 2001**). Έχει περιγράψει σαν μια από τις πιο ευαίσθητες περιοχές στις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, σύμφωνα με μελέτη βασισμένη σε μεταβολές στην μέση και διαχρονική εξέλιξη της βροχόπτωσης και θερμοκρασίας (**Giorgi 2006**). Από προσομοιώσεις της κλιματικής αλλαγής με την χρήση υψηλής ανάλυσης κλιματικών μοντέλων για όλη την Ευρώπη, προκύπτει μια μείωση της βροχόπτωσης της τάξης του 30% στην Νότια Ευρώπη. Αντίστοιχα, η μέση αύξηση της θερμοκρασίας εκτιμάται ότι θα φτάσει τους 6 °C στην Ανατολική Ευρώπη (**Somot et al. 2008**). Οι συνέπειες της κλιματικής αλλαγής έχουν γίνει ήδη ορατές σε πολλές περιοχές της Μεσογείου και ιδιαίτερα στα νησιά. Τα νησιά της Μεσογείου εμφανίζουν εντονότερα προβλήματα λειψυδρίας και οι υδατικοί πόροι είναι από περιορισμένοι έως ανύπαρκτοι, ιδιαίτερα στα μικρότερα νησιά. Η Κρήτης λόγω του μεγέθους του πληθυσμού της και των οικονομικών της δραστηριοτήτων, όπως η γεωργία και ο τουρισμός, εμφανίζεται ιδιαίτερα ευαίσθητη στις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής. Σύμφωνα με τους υπολογισμούς των (**Koutroulis et al. 2013**) για το σενάριο A1B και για την περίοδο 2050 - 2100, η μέση μείωση της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης εκτιμήθηκε σε 26 % και μια μέση αύξηση της μέσης θερμοκρασίας κατά 4.6 °C. Η μείωση της διαθεσιμότητας των υδάτινων αποθεμάτων αναμένεται να είναι της τάξης του 52 % (Εικόνα 2.8).



Εικόνα 2.8: Μεταβολή της διαθεσιμότητας του νερού για το νησί της Κρήτης, σύμφωνα με το σενάριο A1B του IPCC (Koutroulis et al. 2013).

2.3.4. ΣΕΝΑΡΙΑ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΑΕΡΙΩΝ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

Οι μελλοντικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου είναι πολύ δύσκολο να προβλεφθούν με ακρίβεια, καθώς είναι αποτέλεσμα πολύπλοκων και δυναμικών παραγόντων όπως η δημογραφική, κοινωνικοπολιτική και η τεχνολογική ανάπτυξη. Το IPCC έχει αναπτύξει ένα σετ σεναρίων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (**Nakicenovic & Swart 2000**). Τα σενάρια αυτά κατηγοριοποιούνται σε τέσσερες κυρίως κατηγορίες, A1, A2, B1 και B2, καθεμία από τις οποίες λαμβάνει υπόψη διαφορετικές προβλέψεις σε σχέση με την δημογραφική, κοινωνικοπολιτική και οικονομική ανάπτυξη για να εκτιμήσει τις μελλοντικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (**Parry et al. 2004**) (**Nakicenovic & Swart 2000**). Συνοπτικά, τα τέσσερα παραπάνω σενάρια μπορούν να περιγραφούν ως εξής (Εικόνα 2.9): Το σενάριο A1 χρησιμοποιείται για να υπολογίσει τις εκπομπές εκτιμώντας ότι υψηλής οικονομικής και δημογραφικής ανάπτυξης η οποία μεγιστοποιείται κατά τα μέσα του αιώνα και έπειτα ελαχιστοποιείται. Γενικά θεωρείται ότι οι πολιτισμικές και οικονομικές διαφορές μεταξύ των διαφορετικών περιοχών του πλανήτη θα εξομαλυνθούν. Το σενάριο A1 υποδιαιρείται σε A1F (υψηλή χρήση ορυκτών καυσίμων), A1T (μη - χρήση ορυκτών καυσίμων) και A1B (ισορροπία χρήσης μεταξύ ορυκτών και μη-ορυκτών καυσίμων), το οποίο και χρησιμοποιήθηκε σε αυτήν την μελέτη. Στο σενάριο A2 εκτιμάται ότι οι οικονομικές και πολιτισμικές διαφορές θα εξακολουθήσουν να υφίστανται, η πληθυσμιακή αύξηση θα είναι ραγδαία με αποτέλεσμα η οικονομική και τεχνολογική ανάπτυξη να είναι σχετικά περιορισμένες. Στο σενάριο B1 εκτιμάται παρόμοια πληθυσμιακή αύξηση με το σενάριο A1, αλλά με στροφή της τεχνολογίας σε πιο ήπιες τεχνολογίες. Τέλος, στο σενάριο B2 εκτιμάται ότι η πληθυσμιακή και οικονομική ανάπτυξη θα είναι πολύ πιο ήπια από το σενάριο A2, ενώ η τεχνολογική ανάπτυξη θα είναι πιο μετριοπαθής από τα σενάρια A1 και B1.

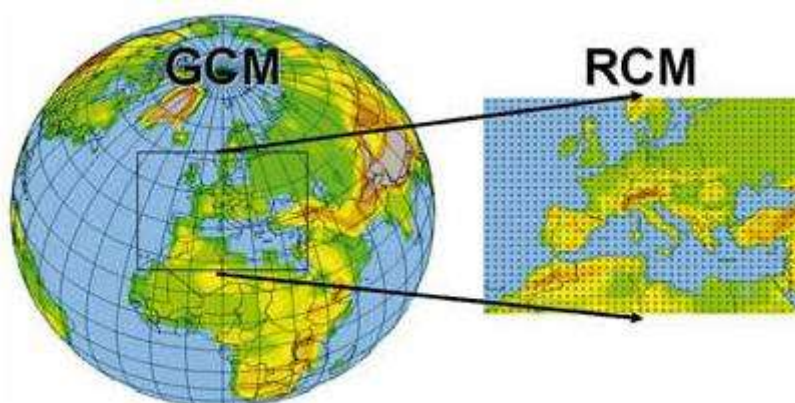


Εικόνα 2.9: Σχηματική απεικόνιση της κατηγοριοποίησης των σεναρίων κλιματικής αλλαγής όπως έχουν προταθεί από την IPCC (**Nakicenovic & Swart 2000**).

2.3.5. ΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

Τα Παγκόσμια Κλιματικά Μοντέλα (GCMs) είναι τα πιο πολύπλοκα των κλιματικών μοντέλων καθώς καλούνται να προσομοιάσουν φυσικές διεργασίες σε τρεις διαστάσεις. Χρησιμοποιούνται ως εργαλεία για την πραγματοποίηση πειραμάτων κλιματικής αλλαγής από τα οποία προκύπτουν τα διάφορα σενάρια κλιματικής αλλαγής. Η δημιουργία και η κατασκευή ενός Παγκόσμιου Κλιματικού Μοντέλου καθορίζει και ποια πειράματα κλιματικής αλλαγής μπορούν να πραγματοποιηθούν. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων αυτών χρησιμοποιούνται ευρέως για την μελέτη της αντίδρασης των οικοσυστημάτων ή των κοινωνικοοικονομικών συστημάτων στην μεταβολή του κλίματος.

Η αύξηση της υπολογιστικής ισχύος, η καλύτερη κατανόηση των διεργασιών που επηρεάζουν το κλίμα και η ανάπτυξη υπολογιστικά αποδοτικότερων αλγορίθμων έκαναν εφικτή την μοντελοποίηση του παγκόσμιου κλίματος σε μεγάλο βάθος χρόνου και με μεγαλύτερη ακρίβεια (Meehl 1990).



Εικόνα 2.10: Σχηματική απεικόνιση ενός Παγκόσμιου Κλιματικού Μοντέλου (GCM) και ενός Περιφερειακού Κλιματικού Μοντέλου (RCM).

Ένα σημαντικό μειονέκτημα των Παγκόσμιων Κλιματικών Μοντέλων είναι η πολύ περιορισμένη ανάλυση που προσφέρουν. Για τον λόγο αυτό δημιουργήθηκαν τα Περιφερειακά Κλιματικά Μοντέλα, τα οποία χρησιμοποιώντας τα δεδομένα από τα παγκόσμια «τρέχουν» για μικρότερη έκταση και προσφέρουν μεγαλύτερη ανάλυση στα δεδομένα εξόδου (Εικόνα 2.10). Το κύριο πλεονέκτημα της χρήσης αποτελεσμάτων των Περιφερειακών Κλιματικών Μοντέλων για την προσομοίωση της απορροής μιας λεκάνης είναι ρεαλιστικότητα τους (Hay et al. 2002). Ειδικότερα για την Μεσόγειο, τα Παγκόσμια Κλιματικά Μοντέλα που χρησιμοποιούνται δεν έχουν την απαιτούμενη χωρική ανάλυση για αναπαραστήσουν το κλίμα της περιοχής. Αυτό οφείλεται στο ότι το κλίμα επηρεάζεται πάρα πολύ από τοπικά γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά, (βουνά, κοιλάδες, τοπικούς ανέμους κ.α.) τα οποία λαμβάνονται υπόψη μόνο σε μοντέλα χωρικής ανάλυσης 50 km ή λιγότερο (Li 2006).

Έρευνες έχουν δείξει πως μια υπερεκτίμηση της παροχής κατά τους θερινούς μήνες και αντίστοιχα μια υποεκτίμηση της παροχής κατά τους χειμερινούς μήνες είναι παρούσα λόγω των γραμμικών συσχετίσεων που πραγματοποιούνται για την προσομοίωση της βροχόπτωσης (Semmler et al. 2003)(Rasmussen et al. 2012). Σε γενικές γραμμές όλα τα Περιφερειακά Μοντέλα παρουσιάζουν παρόμοιες τάσεις αλλά η επιλογή ενός μοντέλου είναι πιθανόν να οδηγήσει σε διαφορετικά υδρολογικά αποτελέσματα σε σύγκριση με κάποιο άλλο (van Roosmalen et al. 2010).

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2.1) φαίνονται μερικά από τα Περιφερειακά Κλιματικά Μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη της κλιματικής αλλαγής.

Πίνακας 2.1: Περιφερειακά κλιματικά μοντέλα (Regional Climate Models) (Koutroulis et al. 2013).

No.	Ινστιτούτο	RCM	GCM	Αναφορά
1	ETH	CLM	HadCM	(Jaeger et al. 2008)
2	ICTP	RegCM	ECHAM5-r3	(Giorgi & Mearns 1999)
3	KNMI	RACHMO2	ECHAM5-r3	(Meijgaard et al. 2008)
4	METOHC	HadRM3Q0	HadRM3Q0	(Collins et al. 2011)
5	METOHC	HadRM3Q3	HadRM3Q3	(Collins et al. 2011)
6	METOHC	HadRM3Q16	HadRM3Q16	(Collins et al. 2011)
7	C4I	RCA3	HadRM3Q16	(Christensen et al. 2010)
8	MPI	REMO	ECHAM5-r3	(Jacob 2001)
9	SMHI	RCA	BCM	(Kjellström 2005)
10	DMI	HIRHAM	ARPEGE	(Christensen et al. 2007)

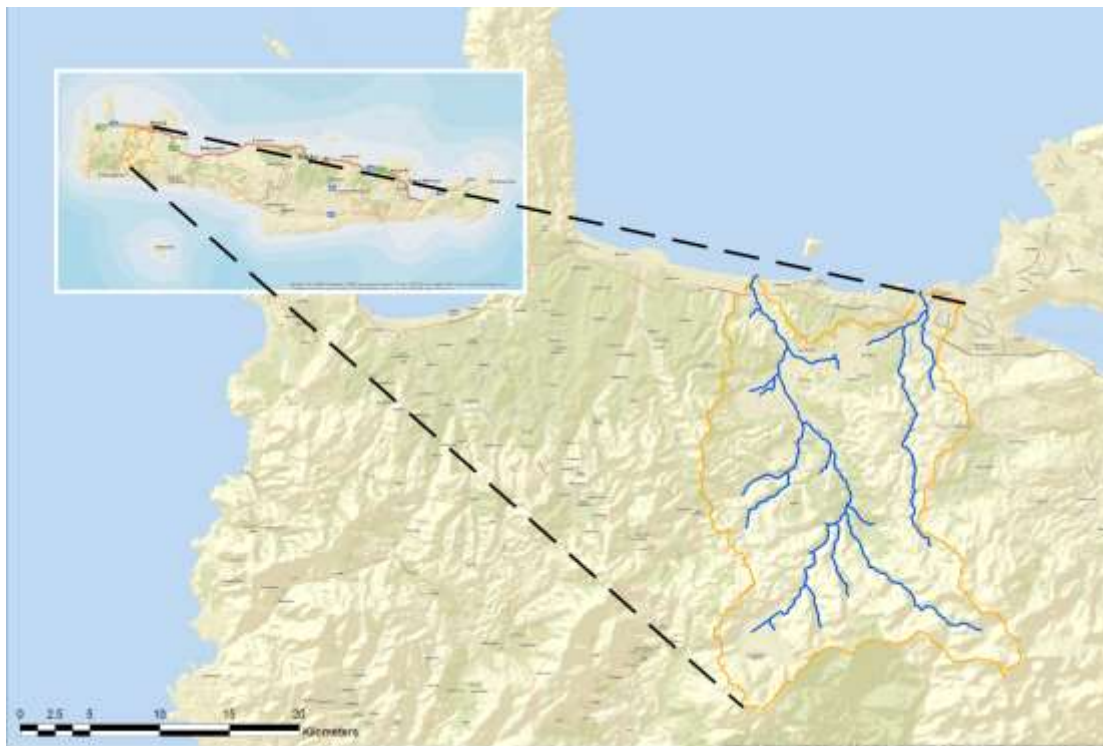
3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

3.1. ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΥΠΑΓΩΓΗ

Το υδατικό διαμέρισμα της Κρήτης είναι το 13^ο από τα συνολικά τα 14 υδατικά διαμερίσματα της Ελλάδας. Έχει συνολική έκταση 8.335 km² και περιλαμβάνει τους νομούς Χανίων, Ρεθύμνου, Ηρακλείου και Λασιθίου (Εικόνα 3.1).

Η λεκάνη απορροής του ποταμού Κερίτη είναι ίσως η σημαντικότερη υδρολογική λεκάνη του Νομού Χανίων. Βρίσκεται στο κέντρο του Νομού Χανίων. Η έκταση της λεκάνης είναι περίπου 210 km² και βρίσκεται σε μια μέση απόσταση 15 km νοτιοδυτικά της πόλης των Χανίων. Το υδρογραφικό δίκτυο του ποταμού ξεκινάει από τα Λευκά Όρη και εκβάλλει στο Κρητικό πέλαγος. Τόσο το δέλτα του ποταμού όσο και η τεχνητή λίμνη της Αγουιάς είναι προστατευόμενες περιοχές από το δίκτυο NATURA 2000.

Η λεκάνη απορροής του Θερίσου απέχει 3 km από την πόλη των Χανίων. Έχει μικρή έκταση, περίπου 60 km². Κύριος ποταμός της λεκάνης είναι ο Κλαδισσός. Ανατολικά του Κλαδισσού βρίσκεται και ο χείμαρρος Μορώνης που ενώνεται με τον πρώτο λίγο πριν τις εκβολές του. Οι πηγές τους εντοπίζονται στον ορεινό όγκο των Λευκών Ορέων ενώ εκβάλλουν δυτικά της πόλης των Χανίων. Η λεκάνη απορροής του Θερίσου λόγω της πολύ μικρής της έκτασης μελετάται ως τμήμα της υδρολογικής λεκάνης του ποταμού Κερίτη, οπότε μιλάμε για την ενιαία λεκάνη Κερίτη - Θερίσου.



Εικόνα 3.1: Γεωγραφική υπαγωγή περιοχής μελέτης.

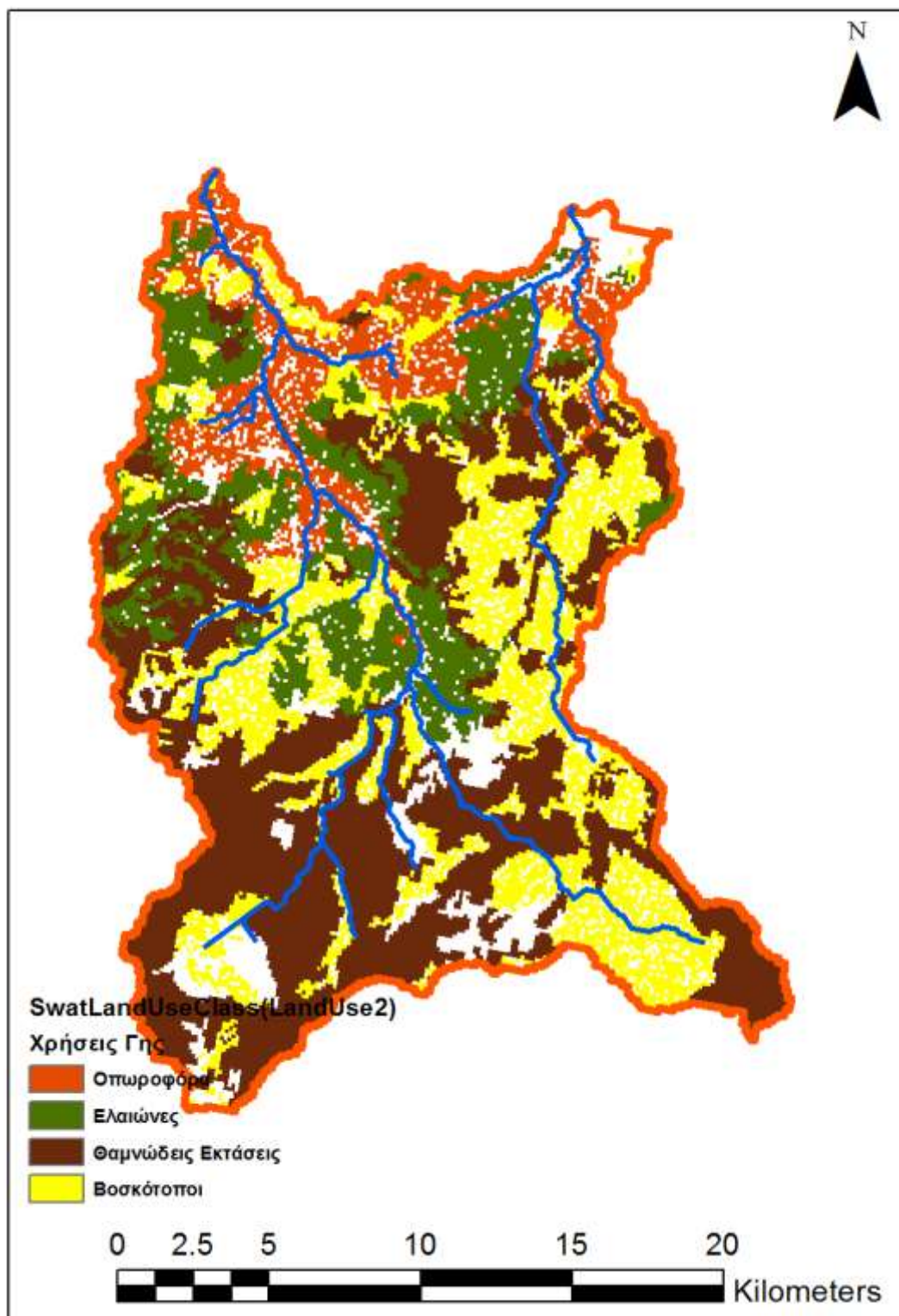
3.2. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ ΚΑΙ ΧΡΗΣΕΩΝ ΓΗΣ

Η περιοχή έχει σημαντικές δυνατότητες συμβολής στην οικονομία της περιοχής, κυρίως στον πρωτογενή, αλλά και στον τριτογενή τομέα. Εκτός δηλαδή από τις καλλιέργειες που είναι η σημαντικότερη οικονομική δραστηριότητα σήμερα, μπορούν να προβλεφθούν δράσεις προσέλκυσης ενός ειδικού τύπου επισκεπτών που ενδιαφέρονται για το φυσικό περιβάλλον.

Η γεωργία αποτελεί την βάση της τοπικής οικονομίας. Οι καλλιέργειες είναι δυναμικές λόγω της ανάπτυξης σύγχρονων αρδευτικών έργων στην περιοχή. Η ανάπτυξη αυτή οδήγησε σε αύξηση της στρεμματικής απόδοσης των καλλιεργειών. Οι καλλιέργειες οπωροφόρων εντοπίζονται στην πεδινή περιοχή της λεκάνης κυρίως βόρεια του χωριού Φουρνέ. Η έκταση των καλλιεργειών αυτών αντιστοιχεί περίπου στο 1/10 της συνολικής έκτασης της λεκάνης.

Οι ελαιώνες, όπως και οι καλλιέργειες οπωροφόρων, εντοπίζονται και αυτοί στο βόρειο τμήμα της λεκάνης αν και καταλαμβάνουν κυρίως τοπογραφικά υψηλότερες περιοχές σε αντίθεση με τις καλλιέργειες οπωροφόρων που ευδοκιμούν κυρίως κατά μήκος του ποταμού Κερίτη και κοντά στις όχθες της λίμνης της Αγυιάς. Οι ελαιώνες καταλαμβάνουν σχεδόν την διπλή έκταση από τις καλλιέργειες οπωροφόρων.

Εκτός από τις αγροτικές εκτάσεις που αποτελούν περίπου το ¼ της συνολικής έκτασης της λεκάνης άλλο τόσο αποτελούν οι βοσκότοποι. Στην λεκάνη υπάρχει μεγάλος αριθμός αιγοπροβάτων και άλλων ζώων που συνεισφέρουν στην κτηνοτροφική οικονομία της περιοχής. Όλη η υπόλοιπη έκταση της λεκάνης φαίνεται να καλύπτεται από θαμνώδεις εκτάσεις. Η συνολική επιφάνεια που καλύπτουν οι προηγούμενες 4 χρήσεις γης αντιστοιχούν στο 95 % της συνολικής έκτασης της λεκάνης. Το υπόλοιπο 5 % αντιστοιχεί σε κηπευτικά, σκληρόφυλλη βλάστηση, δασικές εκτάσεις και αστικές επιφάνειες (Εικόνα 3.2).



Εικόνα 3.2: Χρήσεις γης στη λεκάνη του Κερίτη - Θερίσου.

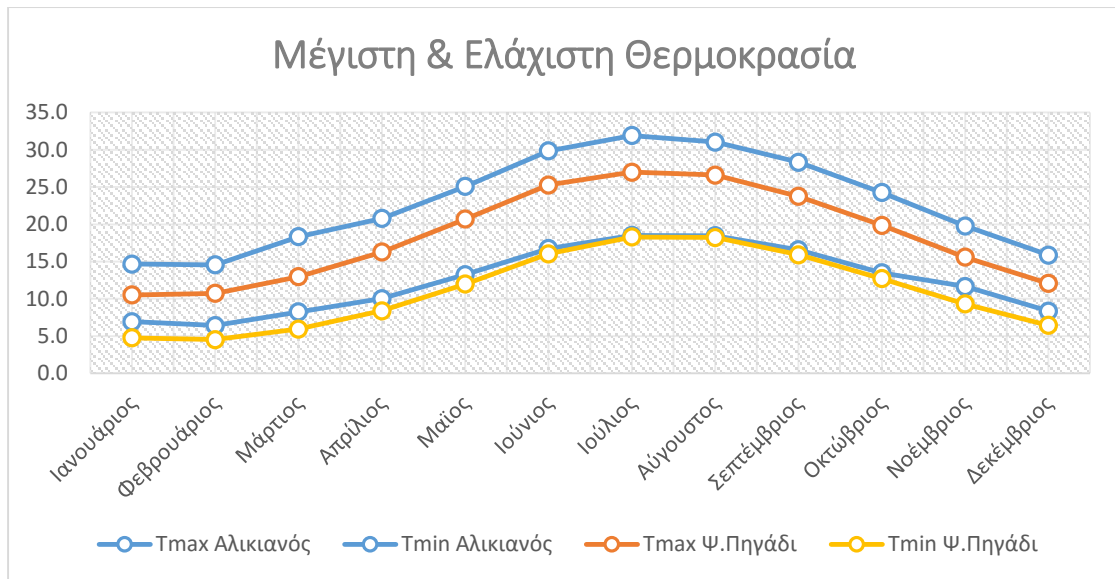
3.3. ΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Το κλίμα της Κρήτη χαρακτηρίζεται ως μεταβατικό ενδιάμεσου τύπου μεταξύ χερσαίου και ερημικού Μεσογειακού. Ειδικότερα στην λεκάνη Κερίτη – Θερίσου το κλίμα είναι Μεσογειακό, χαρακτηρίζεται δηλαδή από ήπιους και υγρούς χειμώνες και από ξηρά και θερμά καλοκαίρια. Στις πολύ ορεινές περιοχές του νομού το κλίμα αποκτά πιο έντονα χαρακτηριστικά και χαρακτηρίζεται από δριμείς χειμώνες με έντονες βροχοπτώσεις. Ο χειμώνας αρχίζει το δεύτερο δεκαήμερο του Νοεμβρίου και παρατείνεται μέχρι το Μάρτιο με πολλές βροχοπτώσεις. Η άνοιξη έχει μικρή διάρκεια, από τον Απρίλιο έως αρχές Μαΐου και παρουσιάζει λίγες και μικρής έντασης βροχοπτώσεις. Το καλοκαίρι διαρκεί από τα μέσα Μαΐου έως τα τέλη Σεπτεμβρίου με ελάχιστες έως καθόλου βροχοπτώσεις. Ολικό παγετοί δεν εμφανίζονται στην περιοχή ενώ οι μερικοί ή λευκοί αποτελούν σπάνιο φαινόμενο. Οι χιονοπτώσεις είναι σπάνιες και δεν δημιουργούν πρόβλημα στα χαμηλά υψόμετρα. Το χαλάζι είναι επίσης σπάνιο φαινόμενο στα χαμηλά υψόμετρα και δεν προκαλεί ζημιές. Η θερμοκρασία ελάχιστες φορές πέφτει κάτω από το μηδέν, με εξαίρεση τα υψηλότερα υψόμετρα. Στην περιοχή επικρατούν δυτικοί και βορειοδυτικοί άνεμοι μέσης έντασης.

Για την μελέτη των κλιματικών συνθηκών της περιοχής χρησιμοποιήθηκαν τα στοιχεία των μετεωρολογικών σταθμών του Αλικιανού και του Ψυχρού Πηγαδιού. Η μέγιστη, μέση και ελάχιστη μηνιαία θερμοκρασία παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.1, ενώ στην Εικόνα 3.3 η διακύμανση της μέγιστης και της ελάχιστης θερμοκρασίας για τον σταθμό στον Αλικιανό και το Ψ. Πηγάδι.

Πίνακας 3.1: Στατιστική επεξεργασία δεδομένων θερμοκρασίας για τους μετεωρολογικούς σταθμούς στον Αλικιανό και στο Ψ. Πηγάδι.

ΜΗΝΕΣ	ΑΛΙΚΙΑΝΟΣ			ΨΥΧΡΟ ΠΗΓΑΔΙ		
	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ			ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ		
	ΜΕΓΙΣΤΗ	ΜΕΣΗ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ	ΜΕΣΗ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ
Ιανουάριος	22.0	10.4	-0.1	10.5	7.6	4.8
Φεβρουάριος	23.0	10.9	0.1	10.7	7.6	4.5
Μάρτιος	25.4	12.4	0.5	13.0	9.5	5.9
Απρίλιος	29.3	15.3	2.8	16.3	12.3	8.4
Μαΐος	32.3	19.4	5.8	20.7	16.3	12.0
Ιούνιος	36.8	23.3	9.6	25.3	20.7	16.0
Ιούλιος	36.0	25.2	11.8	27.0	22.6	18.3
Αύγουστος	36.4	24.3	11.5	26.6	22.4	18.2
Σεπτέμβριος	35.0	21.9	9.7	23.7	19.8	15.9
Οκτώβριος	31.0	18.0	6.7	19.9	16.3	12.7
Νοέμβριος	26.1	14.7	3.8	15.6	12.5	9.3
Δεκέμβριος	22.3	12.0	1.4	12.1	9.2	6.4
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ ΕΤΟΥΣ	29.6	17.3	5.3	18.4	14.7	11.0



Εικόνα 3.3: Μέση μέγιστη και μέση ελάχιστη θερμοκρασία για τους μετεωρολογικούς σταθμούς στον Αλικιανό και στο Ψ. Πηγάδι.

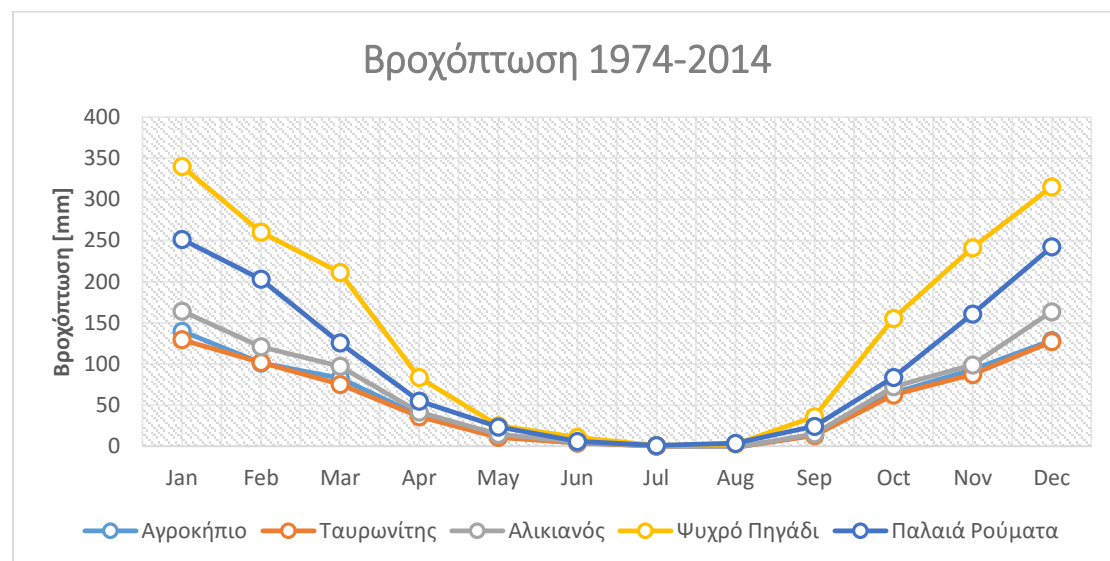
ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ

Η μέση ετήσια βροχόπτωση στην Κρήτη παρουσιάζει αύξηση από τα ανατολικά προς τα δυτικά και από νότια προς τα βόρεια. Η Κρήτη γενικά παρουσιάζει σημαντική ανισοκατανομή του ετήσιου όγκου βροχόπτωσης, τόσο γεωγραφικά όσο και φυσιογραφικά, εμφανίζοντας μια από τις μεγαλύτερες βροχοβαθμίδες στην Ελλάδα. Η μέση μηνιαία βροχόπτωση είναι μέγιστη τον Δεκέμβριο ή τον Ιανουάριο και ελάχιστη τον Ιούλιο και τον Αύγουστο, οι οποίοι είναι σχεδόν άνομβροι σε ολόκληρη την πεδινή Κρήτη. Ο μέσος μηνιαίος αριθμός ημερών βροχής είναι 0,5 για τον Ιούλιο/Αύγουστο και 15,3 ημέρες για τον Δεκέμβριο/Οκτώβριο.

Στην περιοχή μελέτης λειτουργούν πέντε βροχομετρικοί σταθμοί τα δεδομένα των οποίων χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα έρευνα. Πρόκειται για τους σταθμούς στο Αγροκήπιο, στον Ταυρωνίτη, στον Αλικιανό, στο Ψυχρό Πηγάδι και στα Παλαιά Ρούματα. Οι τρεις πρώτοι εντοπίζονται στην πεδινή ζώνη του Νομού Χανίων σε μικρή απόσταση από τη λεκάνη και οι δυο τελευταίοι στα ορεινά. Οι ορεινοί καταγράφουν πολύ μεγαλύτερη βροχόπτωση από τους πεδινούς κατά του μήνες Οκτώβριο έως Μάρτιο ενώ κατά την περίοδο από Απρίλιο έως Σεπτέμβριο η διαφορά ελαχιστοποιείται όπως και η βροχόπτωση. Αναλυτικά, τα μηνιαία δεδομένα βροχόπτωσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2 ενώ στην Εικόνα 3.4 παρουσιάζεται σχηματικά η μηνιαία διακύμανση της βροχόπτωσης.

Πίνακας 3.2: Δεδομένα βροχόπτωσης από τους πέντε βροχομετρικούς σταθμούς της περιοχής μελέτης.

ΜΗΝΑΣ	Αγροκήπιο	Ταυρωνίτης	Αλικιανός	Ψυχρό Πηγάδι	Παλαιά Ρούματα
Jan	139.8	129.5	164.3	340.0	251.4
Feb	101.3	102.0	121.0	260.2	203.0
Mar	82.8	75.2	97.2	211.1	125.7
Apr	37.7	36.0	41.6	83.6	55.1
May	11.6	11.0	14.6	25.2	23.5
Jun	4.3	4.1	5.3	11.0	6.0
Jul	0.4	0.4	0.4	1.0	1.1
Aug	-1.4	-1.2	-1.3	2.8	3.8
Sep	13.8	13.1	15.2	36.0	24.5
Oct	65.0	62.5	72.5	155.3	83.8
Nov	93.2	87.5	98.9	241.4	160.9
Dec	128.7	127.3	163.5	315.2	242.3
ΑΘΡΟΙΣΜΑ ΕΤΟΥΣ	677.3	647.4	793.5	1683.0	1181.0



Εικόνα 3.4: Μεταβολή της βροχόπτωσης κατά την χρονική περίοδο 1974 - 2014 (40 έτη).

ΥΓΡΑΣΙΑ

Η μέση ατμοσφαιρική σχετική υγρασία είναι σε ολόκληρη τη βόρεια Κρήτη ελάχιστη τον Ιούνιο και μέγιστη τον Δεκέμβριο. Μεταξύ των βόρειων σταθμών η μέση ελάχιστη μηνιαία σχετική υγρασία μειώνεται από τα ανατολικά προς τα δυτικά. Οι χαμηλές τιμές υγρασίας κατά τους καλοκαιρινούς μήνες καθιστούν το θέρος ευχάριστο και δεν δημιουργούν συνθήκες δυσφορίας. Στον Πίνακα 3.3 Πίνακας 3.4 παρουσιάζεται η κατανομή της ηλιοφάνειας σε ώρες για κάθε μήνα του έτους αναλυτικά.

Πίνακας 3.3: Κατανομή σχετικής υγρασίας ανά μήνα για την λεκάνη Κερίτη - Θερίσου.

ΜΗΝΕΣ	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠΤ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
ΣΧΕΤΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ	75	72	70.5	66.5	62	56.5	57	60	65	70.5	72.5	74

ΑΝΕΜΟΙ

Οι βόρειοι και βορειοδυτικοί άνεμοι κυρίως επικρατούν καθόλη την διάρκεια του έτους στην Κρήτη. Η νηνεμία καλύπτει το 20% των πεδινών σταθμών και το 30% των ορεινών σταθμών στις περιοχές της Ανατολικής Κρήτης. Η μέγιστη μηνιαία ένταση ανέμων εμφανίζεται κατά τον Φεβρουάριο και Μάρτιο και είναι της τάξης των 4 m/sec.

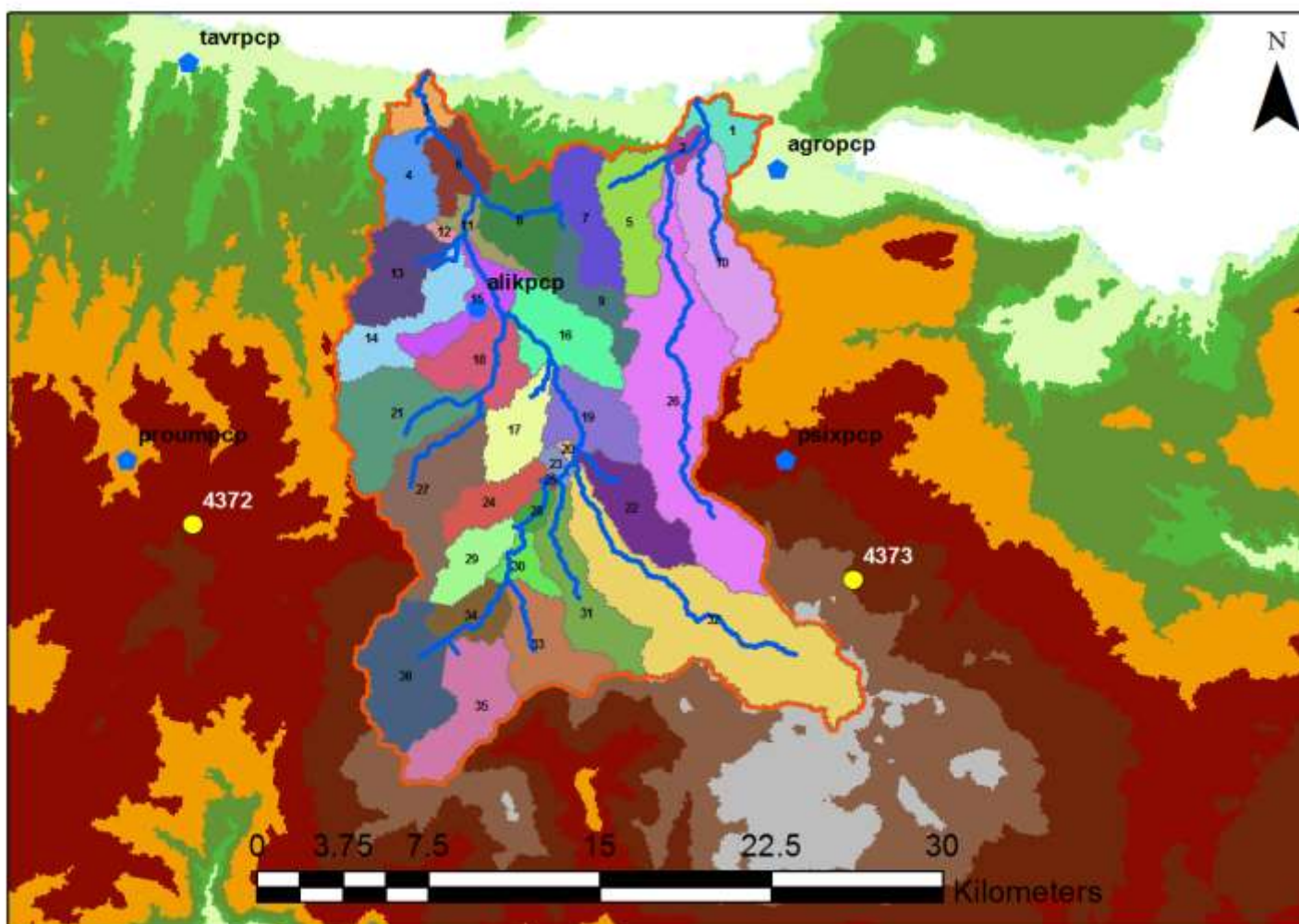
ΗΛΙΟΦΑΝΕΙΑ – ΝΕΦΩΣΗ – ΟΜΙΧΛΗ

Η Κρήτη παρουσιάζει ιδιαίτερα υψηλή ηλιοφάνεια. Στην Κρήτη ο μέσος ετήσιος αριθμός ωρών ηλιοφάνειας ανέρχεται σε περίπου 2700 ώρες στο βόρειο και 3000 στο νότιο τμήμα του νησιού. Η μέση νέφωση τον Ιανουάριο είναι 5/8 ενώ το Ιούλιο 1/8. Ο μέσος αριθμός αίθριων ημερών (νέφωση μεταξύ 0/8 - 1.5/8) είναι 3 τον Ιανουάριο και 28 τον Ιούλιο για τις πεδινές περιοχές του νησιού και κατά 30% μικρότερες για τις ορεινές περιοχές. Η ομίχλη, όπως και η πάχνη είναι σπάνιο φαινόμενο για την Κρήτη. Ο μέσος αριθμός ημερών ομίχλης είναι μικρότερος από μια ημέρα στους χαμηλούς σταθμούς ενώ είναι περίπου 15 για τους ορεινούς. Στον Πίνακα 3.4 παρουσιάζεται η κατανομή της ηλιοφάνειας σε ώρες για κάθε μήνα του έτους αναλυτικά.

Πίνακας 3.4: Κατανομή της ηλιοφάνειας σε ώρες ανά μήνα για την λεκάνη Κερίτη - Θερίσου.

ΜΗΝΕΣ	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠΤ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ	ΕΤΟΣ
ΗΛΙΟΦ. ΣΕ ΩΡΕΣ	104	102	161	202	273	320	325	323	258	182	131	105	2485

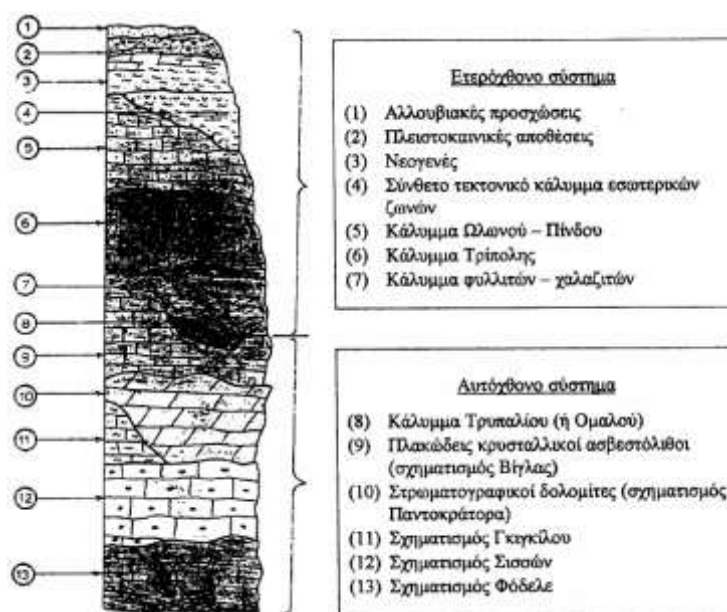
Οι μετεωρολογικοί σταθμοί της περιοχής μελέτης παρουσιάζονται στον παρακάτω χάρτη (Εικόνα 3.5).



Εικόνα 3.5: (α) Μετεωρολογικοί σταθμοί περιοχής μελέτης (με μπλε) και (β) σταθμοί μοντέλων κλιματικής αλλαγής (με κίτρινο).

3.4. ΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΚΡΗΤΗΣ

Η Κρήτη έχει πολύπλοκη γεωλογική δομή που οφείλεται στην σύγκλιση της Αφρικανικής με την Ευρασιατική λιθοσφαιρική πλάκα. Το γεωλογικό υπόβαθρο της Κρήτης αποτελείται από ένα αυτόχθονο σύστημα πετρωμάτων που περιλαμβάνει την ενότητα των πλακωδών ασβεστόλιθων και τους υποκείμενους ασβεστόλιθους, δολομίτες, από ένα αλλόχθονο σύστημα, το οποίο περιλαμβάνει μια σειρά γεωλογικών ενοτήτων διαφορετικής προέλευσης και λιθοστρωματογραφίας, και τέλος από νεότερα Νεογενή και Τεταρτογενή ιζήματα (Εικόνα 3.6). Η ενότητα των Πλακωδών Ασβεστόλιθων θεωρείται το αυτόχθονο σύστημα της Κρήτης και χαρακτηρίζεται από ασθενή μεταμόρφωση. Η ενότητα αυτή υποδιαιρείται σε διάφορες υποενότητες μεταξύ των οποίων βρίσκεται και η ενότητα των καθαρά Πλακωδών Ασβεστόλιθων, που αποτελείται από δολομίτες και ασβεστολιθικά κροκαλοπαγή, διασχιζόμενοι από φυλλιτικές και χαλαζιτικές παρεμβολές. Ακολουθεί η ανθρακική ενότητα του Τρυπαλίου. Αποτελείται από μάρμαρα, δολομιτικούς ασβεστόλιθους και δολομίτες και είναι έντονα καρστικοποιημένη. Το αλλόχθονο σύστημα περιλαμβάνει μια σειρά ενοτήτων διαφορετικής προέλευσης και λιθοστρωματογραφίας οι οποίες αλληλοεπικαλύπτονται τεκτονικά. Επωθημένη πάνω στην ενότητα του Τρυπαλίου είναι η σειρά των Φυλλιτών – Χαλαζιτών. Αποτελείται από σχιστόλιθους και φυλλίτες χαμηλής μεταμόρφωσης. Η αμέσως επόμενη σειρά είναι η σειρά της Τρίπολης. Επικάθεται πάνω στην σειρά των Φυλλιτών – Χαλαζιτών ή απευθείας πάνω στην ενότητα των Πλακωδών Ασβεστόλιθων. Σε ορισμένες τοποθεσίες εμφανίζεται η ενότητα της Πίνδου επωθημένη πάνω σε αυτήν της Τρίπολης ή στην σειρά των Φυλλιτών – Χαλαζιτών. Η ενότητα αυτή αποτελείται από Καινοζωικό – Ηωκαινικό φλύσχη πάνω σε Πελαγικούς λεπτοστρωματώδεις ασβεστόλιθους με ενδιάμεσες στρώσεις κερατολίθων, ραδιολαριτών και αργιλικών ιζημάτων. Οι επόμενες κατά σειρά ενότητες είναι της Άρβης και των Αστερουσίων. Το ανώτερο τεκτονικό κάλυμμά της Κρήτης είναι η ενότητα των Οφιολίθων, η οποία αποτελείται από μεταμορφωμένα πετρώματα διαφορετικής σύστασης, ηλικίας και βαθμού μεταμόρφωσης (οφιόλιθοι, ηφαιστίτες και πλουτώνια πετρώματα).



Εικόνα 3.6: Αναλυτική τομή της γεωλογικής δομής της Κρήτης (ΠΗΓΗ: ΙΓΜΕ).

3.5. ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ

Η λεκάνη απορροής Κερίτη – Θερίσου έχει έντονα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά. Στο βόρειο τμήμα της λεκάνης επικρατεί το έντονο ανάγλυφο των Λευκών Ορέων το οποίο σταδιακά εξομαλύνεται προς τον Νότο όπου επικρατεί το ήπιο ανάγλυφο με επίπεδες καλλιεργήσιμες εκτάσεις (Εικόνα 3.7). Η λεκάνη του Κερίτη – Θερίσου μπορεί να χωριστεί σε τρεις ζώνες, την ζώνη του καρστ, την μεταβατική και την πεδινή ζώνη.

Ζώνη του Καρστ:

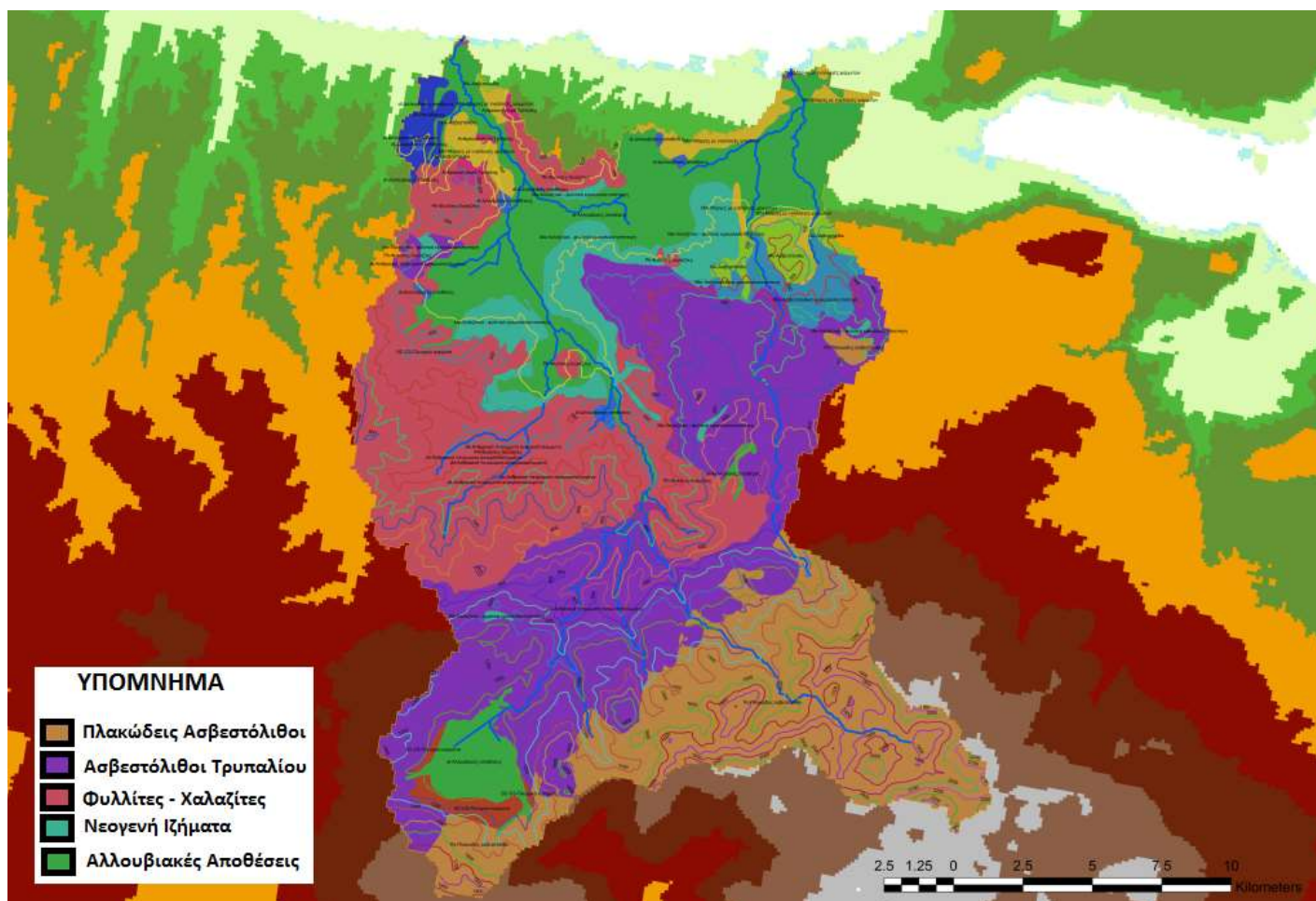
Εντοπίζεται στο νότιο τμήμα της λεκάνης και καταλαμβάνει το βορειοδυτικό τμήμα του ορεινού όγκου των Λευκών Όρων. Το ανάγλυφο χαρακτηρίζεται από έντονες κλίσεις. Τα υψηλότερα τμήματα της ζώνης (υψόμετρο μεγαλύτερο των 1600 m) παρουσιάζουν σχεδόν μόνιμη χιονοκάλυψη με εξαίρεση τους θερμότερους μήνες του έτους. Η τήξη του χιονιού κατά τους θερμότερους μήνες τροφοδοτεί το καρστικό σύστημα με αποτέλεσμα να εμφανίζεται αξιόλογη παροχή νερού στις πηγές της Αγυιάς ακόμα και τους καλοκαιρινούς μήνες. Οι διεργασίες που σχετίζονται με την διάλυση των ανθρακικών πετρωμάτων βρίσκονται σε πλήρη εξέλιξη στην περιοχή με αποτέλεσμα την δημιουργία εντυπωσιακών γεωμορφολογικών δομών. Χαρακτηριστικά παραδείγματα των άνω είναι η ύπαρξη των δύο μεγάλων φαραγγίων, της Σαμαριάς και της Αγίας Ειρήνης και της πόλγης του Ομαλού. Ως πόλγη χαρακτηρίζεται μια επίπεδη επιφάνεια αλλουβιακών αποθέσεων η οποία επικάθεται επί καρστικών σχηματισμών.

Μεταβατική Ζώνη:

Νοτιότερα της Ζώνης του Καρστ εκτείνεται η μεταβατική ζώνη, η οποία αποτελείται κυρίως από πετρώματα της ενότητας Φυλλιτών – Χαλαζιτών. Το υψόμετρο της περιοχής είναι πολύ χαμηλότερο της Ζώνης του Καρστ, γεγονός που εν μέρει οφείλεται στην παρουσία ρηγμάτων, τα οποία έχουν υποβιβάσει την συγκεκριμένη περιοχή αλλά και της μεγάλης ευαισθησίας των πετρωμάτων στην διάβρωση σε σχέση με τα ανθρακικά πετρώματα της Ζώνης του Καρστ. Το ανάγλυφο της περιοχής είναι πολύ πιο ήπιο. Ταυτόχρονα η ανύπαρκτη διαπερατότητα των φυλλιτών στο νερό επιτρέπει την δημιουργία υδρογραφικού δικτύου ενώ στα σημεία επαφής της μεταβατικής ζώνης με την ζώνη του Καρστ ευνοείται ο σχηματισμός καρστικών πηγών.

Πεδινή Ζώνη:

Στην ζώνη αυτά συναντώνται λόφοι φυλλιτικής σύστασης καθώς και ασβεστολιθικά υψώματα. Τα ιζήματα του Νεογενούς σχηματίζουν μια στενή κοιλάδα (κοιλάδα Πατελαρίου), μήκους 3,5 km και μέσου βάθους 400 m, μέσα από την οποία περνάει ο ποταμός Κερίτης. Στην πεδινή ζώνη κυριαρχούν τα καλλιεργήσιμα εδάφη τα οποία αποφέρουν πάνω από το μισό του συνολικού γεωργικού δυναμικού του Νομού.



Εικόνα 3.7: Γεωλογία λεκάνης Κερίτη – Θερίσου (ψηφιοποίηση από χάρτη το Εργαστήριου Γεωλογίας και Παλαιοντολογίας, ΑΠΘ).

3.6. ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί στην λεκάνη απορροής Κερίτη – Θερύσου μπορούν να ταξινομηθούν με βάση την υδατοπερατότητά τους στις εξής κατηγορίες (Εικόνα 3.8):

Οι καρστικοί σχηματισμοί κατηγοριοποιούνται σε υψηλής έως μέτριας υδροπερατότητας (Κ1), μέτριας έως μικρής (Κ2) και τέλος σε μέτριας έως υψηλής (Κ3). Οι καρστικοί σχηματισμοί της πρώτης κατηγορίας αποτελούνται από ασβεστόλιθους, δολομίτες, κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους και μάρμαρα υψηλής έως μέσης διαπερατότητας. Περιλαμβάνουν τους έντονα καρστικοποιημένους σχηματισμούς της ζώνης της Τρίπολης, την ανθρακική ενότητα του Τρυπαλίου, τους κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους του Τριαδικού και τους δολομίτες της ζώνης του Ιονίου. Οι σχηματισμοί αυτοί αναπτύσσουν υψηλού δυναμικού υπόγειες υδροφορίες που εκφορτίζονται μέσω μεγάλων καρστικών πηγών. Οι καρστικοί σχηματισμοί της δεύτερης κατηγορίας αποτελούνται από ασβεστόλιθους της ζώνης της Πίνδου, κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους Ιουρασικής – Ηωκαινικής ηλικίας (Plattenkalk) της Ιονίου ζώνης και μικρότερες ανθρακικές εμφανίσεις των εσωτερικών καλυμμάτων. Η κυκλοφορία του νερού στους σχηματισμούς αυτός περιορίζεται από παρεμβολές πυριτόλιθων, κερατόλιθων και αργιλικών σχιστόλιθων. Η τρίτη κατηγορία καρστικών σχηματισμών αποτελείται από πετρώματα παρουσιάζουν πρωτογενές και δευτερογενές πορώδες το οποίο επιτρέπει στους σχηματισμούς αυτούς να αναπτύσσουν αξιόλογη υδροφορία και να τροφοδοτούν καρστικές πηγές.

Οι κοκκώδεις σχηματισμοί της λεκάνης αποτελούνται από τις επίσης από τρεις κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία αναφέρεται σε κοκκώδεις προσχωματικές κυρίως αποθέσεις κυμαινόμενης υδροπερατότητας (Π1), οι οποίες αποτελούνται από αλλουβιακές αποθέσεις, ποτάμιας και θαλάσσιας αναβαθμίδες, κροκαλοπαγή ποτάμιας προέλευσης, πλευρικά κορήματα και κώνους κωριμάτων. Αναπτύσσουν φρεάτιες υδροφορίες κατά θέσεις. Οι υδροφορίες παραθαλάσσιων σχηματισμών αυτού του είδους υποβαθμίζονται συχνά λόγω υφαλμύρισης (υφαλμυρίση). Η δεύτερη κατηγορία αναφέρεται σε μειοκαινικές και πλειοκαινικές αποθέσεις μέτριας έως μικρής υδροπερατότητας (Π2), που αποτελούνται από κροκαλοπαγή και μαργαϊκούς ασβεστόλιθους νεογενών σχηματισμών. Οι αποθέσεις αυτές φιλοξενούν υπόγειες υδροφορίες μέσου ή μικρού δυναμικού. Η Τρίτη και τελευταία κατηγορία είναι οι κοκκώδεις μη προσχωματικές αποθέσεις μικρής έως πολύ μικρής υδροπερατότητας (Π3, οι οποίοι αποτελούνται από πλειοκαινικές και μειοκαινικές μάργες καθώς και αδιαίρετων σχηματισμών του νεογενούς. Εμφανίζουν ασθενή υδροφορία μέσα σε παρεμβολές κροκαλοπαγών ή μαργαϊκών ασβεστόλιθων. Κατά θέσεις σε σχηματισμούς νεογενών αποθέσεων αναπτύσσονται στρώματα γύψου που εμφανίζουν αξιόλογη υδροφορία υποβαθμισμένη όμως λόγω θειικών ιόντων.

Οι αδιαπέρατοι σχηματισμοί της λεκάνης περιλαμβάνουν τους πρακτικά αδιαπέρατους σχηματισμούς μικρής έως πολύ μικρής υδροπερατότητας (Α1), οι οποίοι αποτελούνται από σχηματισμούς φλύσχη και ελαφρώς μεταμορφωμένων αργιλικών ιζημάτων διαφόρων ζωνών. Εντός του στρώματος του φλύσχη είναι δυνατόν να εμφανιστεί μικρής ή μέσης δυναμικότητας υδροφορία. Επίσης εντοπίζονται και πρακτικά αδιαπέρατοι ή εκλεκτικής κυκλοφορίας σχηματισμοί μικρής έως πολύ μικρής υδροπερατότητας (Α2). Ο σχηματισμοί αυτοί αποτελούνται από μεταμορφωμένα και πυρογενή πετρώματα διαφόρων ζωνών και

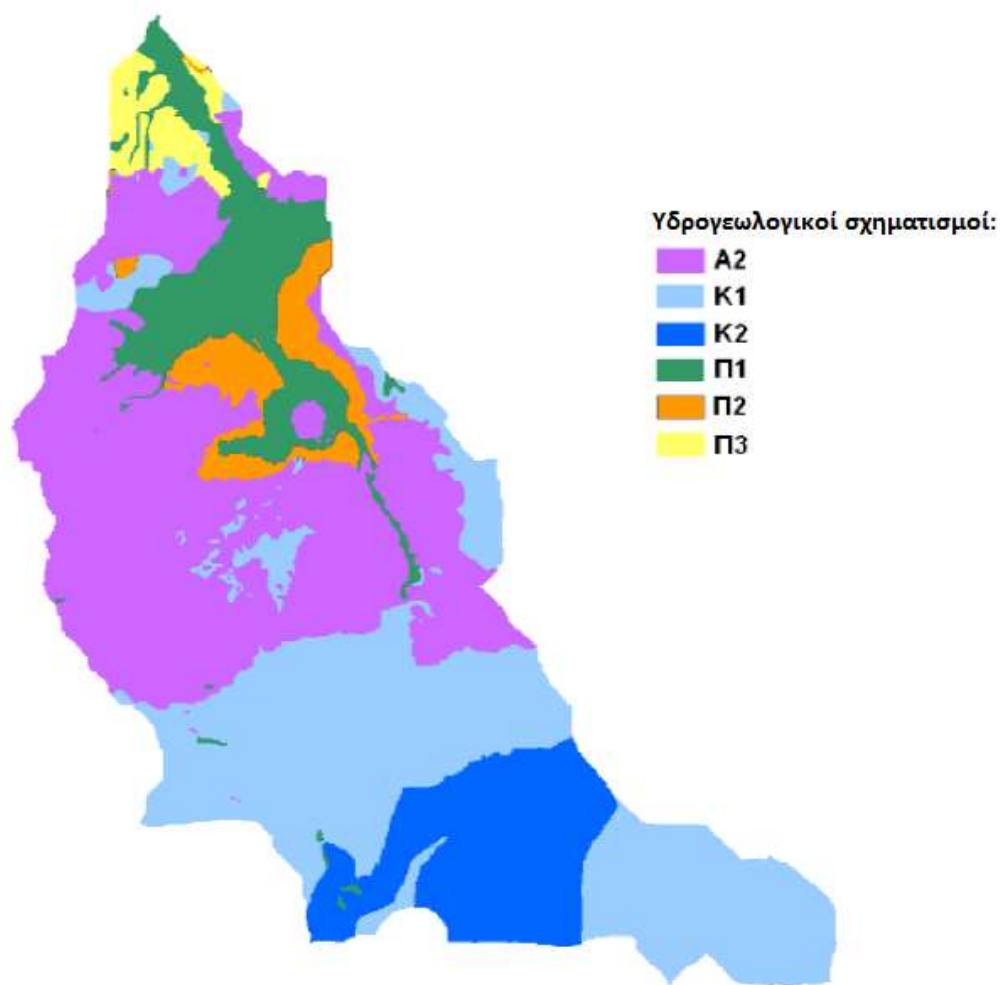
καλυμμάτων. Αναπτύσσουν τοπικού χαρακτήρα υδροφορίες λόγω του κατακερματισμού και της πετρολογικής σύνθεσης των σχηματισμών.

Οι παραπάνω γεωλογικοί σχηματισμοί εμφανίζουν διαφορετικοί συμπεριφορά ανάλογα με την τοποθέτηση τους στον χώρο και την τεκτονική τους. Η λεκάνης απορροής αποτελείται από δύο βασικά υδρολογικά συστήματα και ένα δευτερεύων:

Το καρστικό υδρογεωλογικό σύστημα των περατών ανθρακικών σχηματισμών, που βρίσκεται στην ανατολική πλευρά της λεκάνης (Μυλωνιανά – Φουρνές - Μέσκλα). Το σύστημα αυτό τροφοδοτείται από τους νοτιότερους ασβεστολιθικούς σχηματισμούς που επεκτείνονται έως τον κύριο ορεινό όγκο των Λευκών Όρων. Στο βόρειο τμήμα του ο σχηματισμός αυτός διακόπτεται τεκτονικά από ρήγμα με αποτέλεσμα τη δημιουργία των πηγών υπερπλήρωσης της Αγυιάς σε υψόμετρο 40 m. Εκτός του συνολικού όγκου που απορρέει ετησίως από τις πηγές της Αγυιάς είναι γνωστή η ύπαρξη ενός μόνιμου αποθέματος του οποίου το μέγεθος και τα υδραυλικά χαρακτηριστικά δεν είναι γνωστά.

Το επιφανειακό υδρογεωλογικό σύστημα των φυλλιτών – χαλαζιτών στο κεντρικό τμήμα της λεκάνης, ο οποίος αποτελεί έναν αδιαπέρατο σχηματισμό που συγκεντρώνει την επιφανειακή απορροή από τους χειμάρρους της λεκάνης. Οι χείμαρροι αυτοί συγκλίνουν στον Κερίτη στο ύψος Σκηνέ – Αλικιανού. Στο ΝΑ τμήμα των φυλλιτών, κοντά στο χωριό Μεσκλά και στην τεκτονική επαφή τους με τους καρστικούς ασβεστόλιθους σχηματίζονται οι πηγές των Μεσκλών (Παναγιά – Κεφαλοβρύσια – Νικολιανά) που τροφοδοτούνται από καρστικό σύστημα των Λευκών Όρων και απορρέουν επιφανειακά επί των φυλλιτών του Κερίτη.

Το δευτερεύων υδρογεωλογικό σύστημα των τεταρτογενών αποθέσεων. Αναπτύσσεται βόρεια των φυλλιτών του κεντρικού τμήματος της λεκάνης του Κερίτη και στα χωριά Σκηνές, Αλικιανός, Φουρνές, Βατόλακκος και Κουφός. Η τροφοδοσία του συστήματος πραγματοποιείται απευθείας από την επιφανειακή απορροή των φυλλιτών από τα βόρεια και από υπόγειες πλευρικές μεταγγίσεις των ανθρακικών σχηματισμών από τα ανατολικά.



Εικόνα 3.8: Υδρογεωλογικός χάρτης της λεκάνης του Κερίτη (ΠΗΓΗ: Γιαννακοπούλου Ε., 2014).

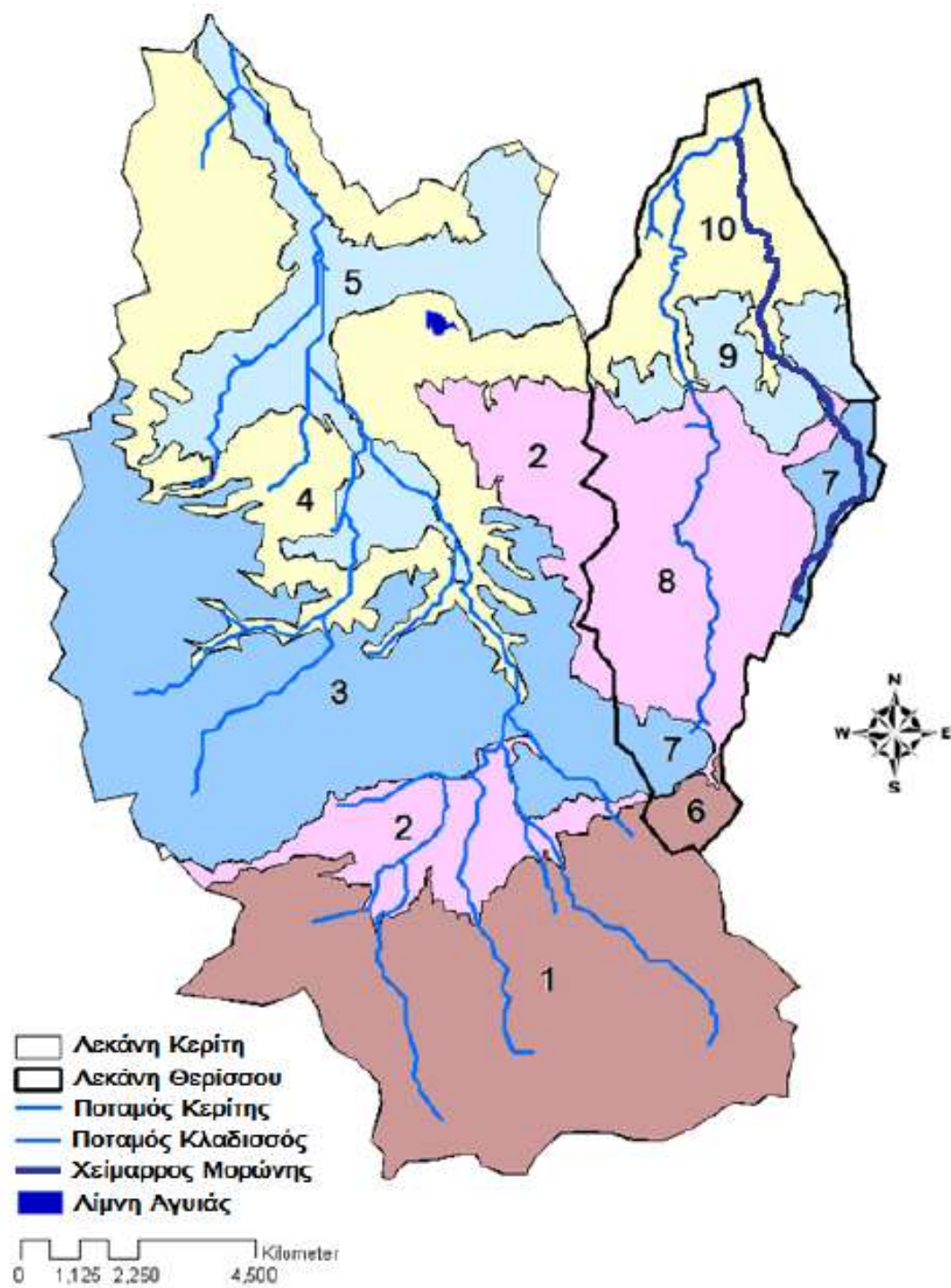
3.7. ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΑ ΥΔΑΤΑ

Το υδρογραφικό δίκτυο του ποταμού Κερίτη εντοπίζεται νότια των πηγών των Μεσκλών. Άναντι των πηγών το νερό χάνεται υπόγεια στο καρστικό σύστημα των Λευκών Ορέων εξαιτίας των έντονα καρστικοποιημένων ανθρακικών πετρωμάτων που επικρατούν στο υπέδαφος της περιοχής. Αρκετά τμήματα, και ιδιαίτερα τα νότια της λεκάνης του Κερίτη ανήκουν σε προστατευόμενες περιοχές του δικτύου Natura 2000.

Ο Κλαδισός είναι ο κύριος ποταμός της λεκάνης του Θερίσου με πηγές στα Λευκά Όρη. Σημαντικότερος παραπόταμος είναι ο Μορώνης ο οποίος ενώνεται με τον Κλαδισό λίγο πριν τις εκβολές του. Και οι δύο είναι ποταμοί είναι χειμαρρώδους μορφής και παρουσιάζουν ροή μόνο κατά τους υγρότερους μήνες του έτους ή κατά ακραία γεγονότα βροχοπτώσεων.

Η περιοχή του υγροτόπου της Αγυιάς εντοπίζεται κοντά στον ομώνυμο οικισμό του Ν.Χανίων, σε απόσταση 9.3 km από την πόλη των Χανίων στον δρόμο προς Ομαλό και Σούγια, 5 km νότια της βόρειας ακτής. Αποτελεί περιοχή της τέως επαρχίας Κυδωνίας και διοικητικά υπάγεται στα όρια του νεοσύστατου Δήμου Θερίσου. Ο υγρότοπος της Αγυιάς αποτελεί τμήμα ενός μεγαλύτερου που περιλαμβάνει τον ποταμό Κερίτη μέχρι της εκβολές του. Η λίμνη της Αγυιάς δημιουργήθηκε το 1927-1928 με την κατασκευή τεχνητού φράγματος στην νότια πλευρά της, για την εκμετάλλευση του αναξιοποίητου υδατικού δυναμικού για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τροφοδοτείται από πηγές που βρίσκονται στις όχθες της, στον πυθμένα της και από τον παραπόταμο Ξεκλωμένου. Από τα νερά της περιοχής εξαρτάται η ύδρευση της πόλης των Χανίων και άλλων οικισμών και η άρδευση μεγάλων περιοχών. Η επιρροή της στην ζωή και την οικονομία της περιοχής είναι μείζονος σημασίας.

Στον παρακάτω χάρτη (Εικόνα 3.9:) παρουσιάζεται η θέση των κυριότερων επιφανειακών υδάτων της περιοχής μελέτης.



Εικόνα 3.9: Επιφανειακά ύδατα στη λεκάνη του Κερίτη – Θερίσου (Τσάιμος Γ., 2009).

3.8. ΥΠΟΓΕΙΑ ΥΔΑΤΑ

Στην λεκάνη απορροής Κερίτη – Θερίσου υπάρχει μια πληθώρα πηγών. Η παρουσία τους οφείλεται στην έντονη καρστικοποίηση των ανθρακικών πετρωμάτων των Λευκών Όρων και στην τεκτονική επαφή τους με το αδιαπέρατο στρώμα των Φυλλιτών – Χαλαζιτών. Οι πιο σημαντικές είναι οι πηγές της Αγυιάς και των Μεσκλών. Οι πηγές της Αγυιάς αποτελούνται από ένα μέτωπο πηγών που περιλαμβάνει τις πηγές Πλατάνου – Βαρύπετρου, Βρυσίδα, Κολύμπα και Καλαμιώνα. Η υδροφορία των πηγών της Αγυιάς τροφοδοτείται από το ανάντι τμήμα των Λευκών Όρων, το οποίο περιλαμβάνει και το οροπέδιο του Ομαλού. Από ιχνηθετήσεις έχει διαπιστωθεί η επικοινωνία του οροπεδίου με τις πηγές της Αγυιάς και των Μεσκλών (ΙΓΜΕ, 1978). Το καρστικό σύστημα των Μεσκλά αποτελείται από τρεις πηγές, Παναγιά, Κεφαλοβρύσια και Νικολιανά. Οι πηγές αυτές τροφοδοτούνται από το ανάντι καρστικό σύστημα των Λευκών Ορέων κυρίως κατά τους χειμερινούς μήνες ενώ κατά τους θερινούς η παροχή τους μηδενίζεται. Οι πηγές των Μεσκλών μπορούν να χαρακτηριστούν ως πηγές ταχείας εκφόρτισης και έχουν μια μέση ετήσια παροχή 3.500 m³/h. Εκτός από το καρστικές πηγές των Μεσκλών και της Αγυιάς υπάρχουν στην λεκάνη και οι πηγές του Κουφού και του Αναβάλλοντα με πολύ μικρότερους όμως όγκους ετήσιας εκφόρτισης. Εκτός από τις πηγές που ως επί το πλείστον παρουσιάζουν καρστικού τύπου υδροφορία, στην βόρεια περιοχή της λεκάνης αναπτύσσεται προσχωματική υδροφορία στα ιζηματογενή πετρώματα του Τεταρτογενούς και του Νεογενούς που εντοπίζονται κατάντι των Φυλλιτών – Χαλαζιτών. Η υδροφορία αυτή είναι συνισταμένη της διήθησης των βροχοπτώσεων και των υπόγειων μεταγγίσεων από τα ανθρακικά πετρώματα (ΙΓΜΕ, 1978). Για τον λόγο αυτό υπάρχει αξιόλογος αριθμός γεωτρήσεων, κυρίως για την άρδευση των καλλιεργήσιμων εκτάσεων της περιοχής.

3.9. ΥΔΡΑΥΛΙΚΕΣ ΑΠΟΛΗΨΕΙΣ

Η λεκάνη Κερίτη – Θερίσου λόγω της πλούσιας υδροφορίας της τροφοδοτεί με μεγάλες ποσότητες νερού τις υδρευτικές και αρδευτικές ανάγκες μεγάλου μέρους του Νομού Χανίων. Το μεγαλύτερο μέρος του υδατικού δυναμικού προέρχεται από την καρστική υδροφορία της Αγυιάς που αποτελεί και τον σημαντικότερο υδατικό πόρο της περιοχής.

Η ΔΕΥΑΧ αντλεί νερό από τις πηγές του Πλατάνου μέσω τριών αντλιών. Έπειτα, μέσω δύο αγωγών μεταφέρεται στην κεντρική δεξαμενή Χανίων απ' όπου διατίθεται για την ύδρευση της πόλης. Η ετήσια ποσότητα άντλησης είναι περίπου 16 Mm³. Κατά το θέρος η ποσότητα του νερού που αντλείται είναι ανεπαρκής. Η ΔΕΥΑΧ αγοράζει επιπλέον νερό από τις γεωτρήσεις των Μυλωνιανών (ΟΑΔΥΚ). Η ποσότητα αυτή εκτιμάται σε 2 Mm³ ετησίως. Η ΤΟΕΒ Βαρυπέτρου αντλεί νερό από την ομώνυμη πηγή, το οποίο χρησιμοποιείται αποκλειστικά για την άρδευση 12.000 στρεμμάτων. Προέρχεται από την ανάβλυση Βρυσίδα ανατολικά της πηγής Κολύμπα. Οι αντλήσεις πραγματοποιούνται κυρίως κατά το διάστημα Απριλίου – Σεπτεμβρίου και η ετήσια ποσότητα άντλησης εκτιμάται σε 8 Mm³. Στο ΟΑΔΥΚ ανήκει ένα αντλιοστάσιο το οποίο βρίσκεται κοντά στον οικισμό Πατελάρι και αντλεί νερό από την λίμνη της Αγυιάς και την πηγή του Καλαμιώνα. Οι αντλήσεις λειτουργούν κυρίως κατά τους μήνες Απρίλιο έως Νοέμβριο και η συνολική ετήσια ποσότητα άντλησης είναι 9.5 Mm³. Η ποσότητα αυτή χρησιμοποιείται για την άρδευση και ύδρευση της περιοχής του Κολυμπαρίου. Οι γεωτρήσεις Μυλωνιανών έχουν διανοιχτεί 2 km νοτίως των πηγών της Αγυιάς και αντλούν από τον ίδιο καρστικό υδροφόρο. Ο λατυποπαγής χαρακτήρας των ασβεστόλιθων σε συνδυασμό με την τεκτονική και τις ιδιότητες του υδροφόρου της περιοχής έχουν ως αποτέλεσμα οι τρεις αυτές γεωτρήσεις να παρουσιάζουν αξιόλογη δυναμικότητα. Η συνολική μέση παροχή των γεωτρήσεων είναι της τάξης των 2.700 m³/h, με πτώση στάθμης λιγότερη από 1 m είναι από τις μεγαλύτερες στον Ελληνικό χώρο. Η κύρια περίοδος λειτουργίας των γεωτρήσεων είναι από τον Μάιο έως τον Νοέμβριο. Ετησίως υπολογίζεται ότι αντλούνται περίπου 12.2 Mm³ νερού από τα οποία το μεγαλύτερο ποσοστό χρησιμοποιείται για αρδεύσεις ενώ ένα ποσοστό αγοράζεται από την ΔΕΥΑΧ για την κάλυψη των υδρευτικών αναγκών κατά τους θερινούς μήνες.

Οι πηγές των Μεσκλών χρησιμοποιούνται για την ύδρευση των Μεσκλών και της πόλης των Χανίων κατά την περίοδο Νοέμβριο έως Απρίλιο και για την άρδευση 5000 στρεμμάτων των περιοχών Μεσκλά, Φουρνέ και Αλικιανού. Επιπλέον ο ΟΑΔΥΚ έχει κατασκευάσει αγωγό βαρύτητας διαμέτρου 1000mm για την μεταφορά νερού στην δεξαμενή 2.Δ1 Μυλωνιανών. Η συνολική εκμεταλλεύσιμη ποσότητα νερού υπολογίζεται σε 5 - 6 Mm³ (ΟΑΔΥΚ & ΥΕΒ) ή 4 - 5 Mm³ (ΤΟΕΒ).

Στον προσχωματικό υδροφόρο του Κερίτη λειτουργεί ένας μεγάλος αριθμός υδρογεωτρήσεων. Από αυτές, 16 ανήκουν στις κοινοτικές ΤΟΕΒ ενώ ο ακριβής αριθμός των ιδιωτικών δεν είναι γνωστός. Η συνολική ποσότητα αντλήσεων από τις ΤΟΕΒ είναι 7.25 Mm³ ετησίως ενώ από τις ιδιωτικές εκτιμάται ότι αντλούνται 2.5 - 3 Mm³ ετησίως.

Οι πηγές του Κουφού είναι πλήρως αναρρυθμισμένες και τα τελευταία χρόνια δεν παρουσιάζουν καθόλου ροή. Οι 9 γεωτρήσεις των πηγών αντλούν ετησίως 3.5 Mm³ κατά την αρδευτική περίοδο.

Η εκμετάλλευση των πηγών του Αναβάλλοντα πραγματοποιείται από υδρογεωτρήσεις συνολικής δυναμικότητας 0.4 Mm³ ετησίως. Χαρακτηριστικό των γεωτρήσεων είναι η ταχεία πτώση της στάθμης λόγω υπόγειας διαφυγής των υδάτων στον κόλπο της Σούδας και των Χανίων.

Οι πηγές του Ζούρμπου χρησιμεύουν ως υδατικός πόρος αιχμής και ασφαλείας για την περιοχή του Ακρωτηρίου. Οι ετήσιες ποσότητες νερού που μεταφέρονται μέσω συνδετήριου αγωγού υπολογίζονται σε 1.1 Mm³ ανά μήνα και κατά το διάστημα Ιούλιο έως Αύγουστο. Η παροχή αυτή είναι η μέγιστη που μπορεί να υποστηρίξει ο συνδετήριος αγωγός.

Στον Πίνακα 3.5 παρουσιάζεται συνοπτικά το σύνολο των υδραυλικών απολήψεων της περιοχής μελέτης.

Πίνακας 3.5: Υδραυλικές απολήψεις στην λεκάνη Κερίτη – Θερίσου.

ΠΗΓΕΣ ΑΓΥΙΑΣ	46.1
-Αντλιοστάσιο ΔΕΥΑΧ	16.4
- Αντλιοστάσιο ΤΟΕΒ Βαρυπέτρου	8.0
- Αντλιοστάσιο ΟΑΔΥΚ	9.5
- Υδρογεωτρήσεις Μυλωνιανών	12.2
ΠΗΓΕΣ ΜΕΣΚΛΩΝ	5-6
ΠΗΓΕΣ ΑΝΑΒΑΛΛΟΝΤΑ	0.4
ΠΗΓΕΣ ΚΟΥΦΟΥ	3.5
ΠΡΟΣΧΩΜΑΤΙΚΟΣ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑΣ	10.25
- ΤΟΕΒ	7.25
- Ιδιωτικές	3.0
ΠΗΓΕΣ ΖΟΥΡΜΠΟΥ	1.1
ΣΥΝΟΛΙΚΕΣ ΑΝΤΛΗΣΕΙΣ	67.35

4. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Η μελέτη της λεκάνης απορροής Κερίτη – Θερίσου ήταν μια σύνθετη εργασία που περιλάμβανε δειγματοληψίες και μετρήσεις πεδίου, εργαστηριακές αναλύσεις και επεξεργασία των δεδομένων και τέλος την βαθμονόμηση και την επαλήθευση του υδρολογικού μοντέλου της λεκάνης.

Δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε σε 4 σημεία της λεκάνης. Δύο σε πηγές της Αγυιάς, ένα στο αντλιοστάσιο της ΔΕΥΑΧ και ένα τελευταίο στο ποταμό Κερίτη στη διατομή των Δρακιανών. Πραγματοποιήθηκαν επίσης φυσικοχημικές μετρήσεις στα σημεία αυτά παράλληλα με τις δειγματοληψίες. Επίσης πάρθηκαν μετρήσεις ροής στην διατομή των Δρακιανών για την κατασκευή καμπύλης στάθμης – παροχής. Η διατομή αυτή αποτελεί και την διατομή ελέγχου όλης της λεκάνης. Η παρουσία αισθητήρα στην διατομή των Δρακιανών έκανε εφικτή τη συλλογή δεδομένων για την στάθμη του ποταμού με μικρό χρονικό. Τα δεδομένα αυτά, κατόπιν στατιστικής επεξεργασίας χρησιμοποιήθηκαν για την βαθμονόμηση και την επαλήθευση του υδρολογικού μοντέλου. Οι εργαστηριακές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο Υδρογεωχημικής Μηχανικής και Αποκατάστασης Εδαφών του Πολυτεχνείου Κρήτης. Υπολογίστηκαν κυρίως συγκεντρώσεις αζώτου και φωσφόρου στα δείγματα που πάρθηκαν από την λεκάνη, με την μέθοδο της φασματοσκοπίας. Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της υδρολογικής λεκάνης ήταν το SWAT (Soil and Water Assessment Tool). Το πρόγραμμα αυτό λειτουργεί ως επέκταση στο σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών ArcMap της ESRI. Για τον υπολογισμό της συνεισφοράς του καρστ στην υδρολογία της λεκάνης, χρησιμοποιήθηκε η τροποποιημένη έκδοση του SWAT που προτάθηκε από τον Νικολαΐδη κατά την μελέτη της γειτονικής λεκάνης του Κουλιάρη (**Nikolaidis et al. 2013**).

4.1. ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΕΔΙΟΥ

Οι τοποθεσίες από τις οποίες συλλέχθηκαν δείγματα νερού ήταν η πηγή του Πλατάνου, η πηγή του Καλαμιώνα, το αντλιοστάσιο της ΔΕΥΑΧ και ο ποταμός Κερίτης στην διατομή των Δρακιανών. Ο όγκος κάθε δείγματος νερού ήταν 250 ml. Η δειγματοληψία γινόταν όσο το δυνατόν πιο κοντά στο κέντρο του υδάτινου σώματος και σε κάποιο βάθος από την επιφάνεια ώστε να εξασφαλιστεί η αντικειμενικότητα του δείγματος. Δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στο να διατηρηθεί το δείγμα αναλλοίωτο κατά το χρονικό διάστημα από την συλλογή έως και την ανάλυση στο εργαστήριο. Για τον λόγο αυτό η μεταφορά γινόταν σε ειδικό φορητό «ψυγείο» για την διατήρηση της θερμοκρασίας σε χαμηλά επίπεδα. Κατά την επιστροφή στο πολυτεχνείο, και μέχρι την πραγματοποίηση των εργαστηριακών αναλύσεων, τα δείγματα φυλάσσονταν στο ψυγείο του εργαστηρίου Υδρογεωχημικής Μηχανικής και Αποκατάστασης Εδαφών του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Το προσωπικό του εργαστηρίου «Υδρογεωχημικής Μηχανικής και Αποκατάστασης Εδαφών» προχώρησε σε ανάλυση των δειγμάτων για τον προσδιορισμό του νιτρικού αζώτου (N-NO_3). Τα αποτελέσματα των αναλύσεων αυτών των παραπάνω αναλύσεων καθώς και αναλύσεων από προηγούμενες μελέτες (**Θ.Αλδάκος, 2014; Γραμματικάκης, 2012**) παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες (Πίνακας 4.1, Πίνακας 4.2 και Πίνακας 4.3) :

Πίνακας 4.1: Μετρήσεις νιτρικού αζώτου στον ποταμό Κερίτη (διατομή Δρακιανών).

a/a	ΗΜ/ΝΙΑ	N-NO ₃ [mg/l]
ΑΛΔΑΚΟΣ	12/13/2012	1.47
	01/22/2013	2.68
	01/29/2013	2.41
	02/14/2013	2.41
	02/25/2013	2.85
	03/11/2013	2.26
	03/27/2013	2.12
	04/11/2013	1.21
	04/26/2013	1.32
ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ	12/03/2014	1.14
	03/02/2015	1.48
	05/03/2015	1.35
	04/30/2015	1.72

Πίνακας 4.2: Συγκέντρωση νιτρικού αζώτου στην λίμνη της Αγυιάς (υπερχείλιση).

a/a	ΗΜ/ΝΙΑ	N-NO ₃ [mg/l]
ΓΡΑΜΜΑΤΙΚΑΚΗΣ	12/01/2009	0.824
	01/27/2010	3.588
	03/23/2010	1.647
	06/22/2010	0.588
	07/26/2010	0.882
	09/07/2010	0.941
	10/12/2010	1.471
	12/27/2010	1.412
	01/26/2011	1.647
ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ	12/03/2014	0.55
	03/02/2015	0.58
	05/03/2015	0.48
	04/30/2015	<DL
HERSLAB	11/06/2014	0.55
	01/27/2015	1.17
	03/19/2015	1.24
	05/25/2015	<DL

Πίνακας 4.3: Συγκέντρωση νιτρικού αζώτου στις πηγές των Μεσκλών.

a/a	HM/NIA	N-NO ₃ [mg/l]
HERSLAB	04/23/2014	1.8
	11/06/2014	0.415
	01/29/2015	0.316
	03/19/2015	0.3
	05/25/2015	0.36

ΥΔΡΟΜΕΤΡΙΚΟΣ ΣΤΑΘΜΟΣ

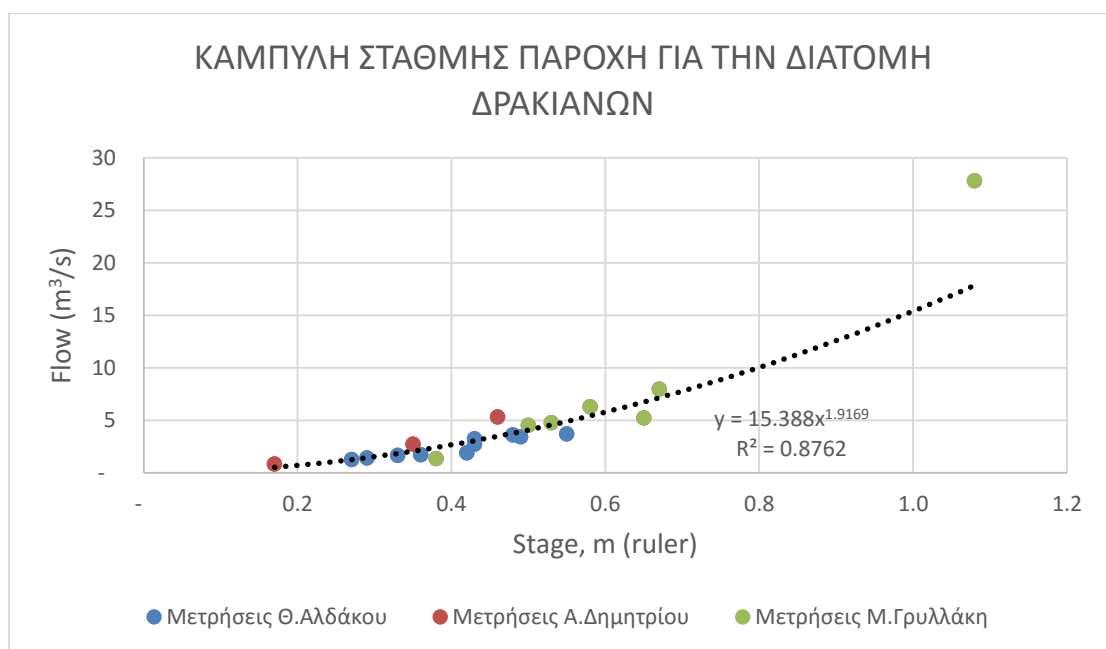
Ο υδρομετρικός σταθμός του εργαστηρίου Υδρογεωχημικής Μηχανικής και Αποκατάστασης Εδαφών βρίσκεται τοποθετημένος στην όχθη του ποταμού Κερίτη στην διατομή των Δρακιανών. Ο σταθμός αυτός είναι συνδεδεμένος με σύστημα αισθητήρων μέσα στο ποτάμι το οποίος είναι ρυθμισμένο παίρνει μετρήσεις με μικρό χρονικό βήμα. Οι μετρήσεις αυτές καταγράφονται σε αρχείο κειμένου (txt) και μεταφέρονται ασύρματα στον κεντρικό διακομιστή (server) του εργαστηρίου. Το σύστημα αισθητήρων που λειτουργούσε στον σταθμό πραγματοποιούσε μετρήσεις για τις εξής φυσικοχημικές παραμέτρους: Θερμοκρασία [°C], ηλεκτρική Αγωγιμότητα [$\mu\text{S}/\text{cm}$], βαρομετρική πίεση [hPa], διαλυμένο οξυγόνο [mg/L], pH και βάθος νερού [m]. Η θέση του σταθμού είναι πολύ σημαντική καθώς βρίσκεται πριν τις εκβολές του Κερίτη και κατάντι του σημείου όπου ενώνονται οι παροχές της επιφανειακής απορροής του Κερίτη και οι εκφορτίσεις των πηγών των Μεσκλών με τις εκφορτίσεις των πηγών της Αγυιάς. Έτσι εξασφαλίζεται η μέτρηση της συνολικής απορροής της λεκάνης και οι μετρήσεις αυτές είναι δυνατόν να προσομοιώσουν με ικανοποιητική ακρίβεια το συνολικό σύστημα της λεκάνης (επιφανειακή απορροή και εκφόρτιση πηγών).

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΕΔΙΟΥ

Κατά την πραγματοποίηση των επισκέψεων στο πεδίο πραγματοποιήθηκε μέτρηση φυσικοχημικών παραμέτρων με φορητή συσκευή. Με την χρήση της συσκευής αυτής, σε συνδυασμό με συγκεκριμένους αισθητήρες, ήταν εφικτή η μέτρηση των ακόλουθων παραμέτρων: διαλυμένο οξυγόνο [mg/L], Θερμοκρασία [°C], Ηλεκτρική Αγωγιμότητα [$\mu\text{S}/\text{cm}$] και pH. Επίσης στην διατομή των Δρακιανών πραγματοποιήθηκε μέτρηση της ταχύτητας του ποταμού με την χρήση μυλίσκου. Οι μετρήσεις αυτές, αφού μετατραπούν σε μετρήσεις παροχής, χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με τις μετρήσεις βάθους του ποταμού για την κατασκευή της καμπύλη στάθμης – παροχής για την διατομή των Δρακιανών (Εικόνα 4.1). Η καμπύλη στάθμης – παροχής είναι πολύ σημαντική γιατί μέσω της οποίας μετατρέπεται η στάθμη του ποταμού που μετρείται τηλεμετρικά από τον υδρομετρικό σταθμό σε ογκομετρική παροχή νερού. Για την κατασκευή της καμπύλης στάθμης παροχής χρησιμοποιούνται δεδομένα από προηγούμενες μετρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί στο ίδιο σημείο (Εμμανουήλ Γ. Γρυλλάκης, 2006; Θεόδωρος Αλδάκος, 2014). Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την καμπύλη παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.4).

Πίνακας 4.4: Μετρήσεις παροχής στην διατομή των Δρακιανών (2005-2015).

α/α	Ημερομηνία	Q [m ³ /s]	H [m]
Μ.ΓΡΥΛΛΑΚΗΣ	25-Oct-05	1.4	0.4
	01-Dec-05	4.5	0.5
	16-Dec-05	4.8	0.5
	02-Feb-06	27.8	1.1
	24-Feb-06	6.3	0.6
	02-Mar-06	5.2	0.7
	13-Mar-06	8.0	0.7
Θ.ΑΛΔΑΚΟΣ	10-Nov-12	1.3	0.3
	13-Dec-12	1.4	0.3
	22-Jan-12	1.7	0.3
	29-Jan-12	1.7	0.4
	14-Feb-12	1.9	0.4
	25-Feb-12	3.3	0.4
	03-Nov-13	2.7	0.4
	27-Mar-13	3.6	0.5
	04-Nov-13	3.4	0.5
	26-Apr-13	3.7	0.6
Α.ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ	03-Dec-14	0.8	0.2
	03-Feb-15	2.7	0.4
	30-Apr-15	5.3	0.5



Εικόνα 4.1: Καμπύλη στάθμης – παροχής για τον ποταμό Κερίτη στην διατομή των Δρακιανών.

Την περίοδο 2012 – 2013 (Εικόνα 4.2) καταγράφηκαν δύο πλημμυρικά φαινόμενα στην λεκάνη του Κερίτη, όπου οι ημερήσιες παροχές έφτασαν σε επίπεδα 2.0 και 2.5 Mm³. Η συγκεκριμένη χρονοσειρά της παροχής χρησιμοποιήθηκε για την βαθμονόμηση του συνδυασμένου μοντέλου SWAT-KARST στην διατομή των Δρακιανών.



Εικόνα 4.2: Μετρήσεις παροχής ποταμού Κερίτη (Διατομή Δρακιανών) για το έτος 2012-2013 (Αλδάκος Θ., 2014).

Κατά την περίοδο 2014-2015 καταγράφηκε ένα πολύ έντονο πλημμυρικό φαινόμενο όπου η ημερήσια παροχή άγγιξε τα 5.0 Mm³ και δύο μικρότερα όπου η παροχή αγγίζει η ξεπερνάει το 1.0 Mm³. Η συγκεκριμένη χρονοσειρά της παροχής χρησιμοποιήθηκε για την επαλήθευση του συνδυασμένου μοντέλου SWAT-KARST στην διατομή των Δρακιανών.



Εικόνα 4.3: Μετρήσεις παροχής ποταμού Κερίτη (Διατομή Δρακιανών).

4.2. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ ΑΖΩΤΟΥ

Η συγκέντρωση των αζώτου στην βροχόπτωση θεωρήθηκε ότι ισούται με 2.11 [mg/L]. Η τιμή προέκυψε από βαθμονόμηση της γειτονικής λεκάνης του Κουλιάρη (**Nikolaidis et al. 2013**). Στην συνέχεια υπολογίστηκαν τα φορτία αζώτου και φωσφόρου από τις κτηνοτροφικές και αγροτικές δραστηριότητες. Στον παρακάτω πίνακα πραγματοποιείται ο υπολογισμός του συνολικού αριθμού και βάρους των αιγοπροβάτων στην λεκάνη (Πίνακας 4.5). Το βάρος κάθε ζώου θεωρήθηκε ίσο με 40 kg.

Πίνακας 4.5: Αριθμός και συνολικό βάρος αιγοπροβάτων στην λεκάνη του Κερίτη – Θερίσου.

ΟΙΚΙΣΜΟΣ	ΕΙΔΗ				ΑΙΓΟΠΡΟΒΑΤΑ	
	ΠΡΟΒΑΤΑ	ΑΙΓΕΣ	ΑΜΝΟΙ	ΚΑΤΣΙΚΙΑ	ΑΡΙΘΜΟΣ	ΣΩΜ. ΜΑΖΑ [tn]
Μουρνιές	630	580	740	900	2850	18240
Αγυιά	225	148	203	148	724	4633.6
Αλικιανός	160	230	200	450	1040	6656
Βατόλακος	200	500	200	780	1680	10752
Βρύσσες	100	100	300	270	770	4928
Θέρισσος	8270	2620	7550	2540	20980	134272
Καρές	1750	550	1750	700	4750	30400
Κουφός			100	230	330	2112
Λάκκοι	1600	1100	1900	1200	5800	37120
Μεσκλά	4450	1950	4350	2100	12850	82240
Ορθώνιο	1500	450	1460	410	3820	24448
Περιβόλια	530	530	470	620	2150	13760
Πλατανιάς						
Σκηνές				170	170	1088
ΣΥΝΟΛΟ	19415	8758	19223	10518	57914	370650

Στον επόμενο πίνακα πραγματοποιείται ο υπολογισμός των τόνων κοπριάς που παράγεται ανά έτος σε κάθε οικισμό (Πίνακας 4.6). Κάθε ζώο θεωρήθηκε ότι παράγει 400 kg κοπριάς ανά έτος.

Πίνακας 4.6: Υπολογισμός ετήσιας ποσότητας κοπριάς σε κάθε οικισμό της περιοχής μελέτης.

ΟΙΚΙΣΜΟΣ	ΑΙΓΟΠΡΟΒΑΤΑ	N 400	
	ΑΡΙΘΜΟΣ	[kg manure/year]	[tn manure/year]
Μουρνιές	2850	1,140,000	1,140
Αγυιά	724	289,600	290
Αλικιανός	1040	416,000	416
Βατόλακος	1680	672,000	672
Βρύσσες	770	308,000	308
Θέρισσος	20980	8,392,000	8,392
Καρές	4750	1,900,000	1,900
Κουφός	330	132,000	132
Λάκκοι	5800	2,320,000	2,320
Μεσκλά	12850	5,140,000	5,140
Ορθώνιο	3820	1,528,000	1,528
Περιβόλια	2150	860,000	860
Πλατανιάς	0	-	-
Σκηνές	170	68,000	68
ΣΥΝΟΛΟ	57914	23,165,600	23,166

Στην συνέχεια υπολογίζεται η ετήσια ποσότητα της κοπριάς σε kg ανά εκτάριο για κάθε υπολεκάνη της περιοχής μελέτης (Πίνακας 4.7). Για κάθε υπολεκάνη η έκταση με την οποία γίνονται οι υπολογισμοί αντιστοιχούν στις χρήσεις γης των βοσκοτόπων. Η διάρκεια της βόσκησης αντιστοιχεί σε 210 μέρες.

Οι φορτίσεις λόγω λίπανσης υπολογίζονται όπως φαίνονται στον Πίνακας 4.8. Ο τύπος του λιπάσματος που χρησιμοποιείται στον συνδυασμένο μοντέλο SWAT-KARST είναι 30-15-0.

Όλα τα παραπάνω εισάγονται στην κατάλληλη καρτέλα του SWAT (management). Η εφαρμογή των λιπασμάτων και της κοπριάς στα εδάφη πραγματοποιείται από το μοντέλο με την μέθοδο των θερμομερών (Heat Units).

Πίνακας 4.7: Ετήσια ποσότητα κοπριάς ανά εκτάριο στη λεκάνη Κερίτη – Θερίσου.

ΟΙΚΙΣΜΟΣ	SUBBASINS				TOTAL AREA	N [kg manure/(ha·year)]	N [kg manure/(ha·day)]
Μουρνιές	10	26					
	807	2953			3760	303	1.44
Αγυιά	8						
	299				299	970	4.62
Αλικιανός	13	14	15				
	215	201	179		595	699	3.33
Βατόλακος	13	14	15				
	215	201	179		595	1129	5.38
Βρύσες	4	5					
	208	0			208	1481	7.05
Θέρισσος	26	19	22				
	2953	435	0		3388	2477	11.80
Καρές	27	17	24				
	980	188	443		1611	1179	5.62
Κουφός	13	14		15			
	215	201		179	595	222	1.06
Λάκκοι	23	26	24				
	42	2953	443		3438	675	3.21
Μεσκλά	17						
	188				188	27340	130.19
Ορθώνιο	27						
	980				980	1559	7.42
Περιβόλια	5	26	10				
	208	2953	807		3968	217	1.03
Πλατανιάς							
Σκηνές	18						
	298				298	228	1.09
ΣΥΝΟΛΟ						38,480	183

Πίνακας 4.8: Ποσότητα λιπάσματος σε [kg/ha] για διαφορετικές χρήσεις γης της λεκάνης απορροής Κερίτη-Θερίσου.

Χρήση Γης	Ποσότητα λιπάσματος ανά εκτάριο
Olives	80
Oranges	70
Vine	70
Other	220

4.3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

Το υδρολογικό μοντέλο SWAT στηρίζει την λειτουργία του στην κατασκευή των Μονάδων Υδρολογικής Απόκρισης (Hydraulic Response Units ή HRUs). Παρόλο που το μοντέλο είναι γραμμένο στην γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN, η εισαγωγή και η επεξεργασία των δεδομένων πραγματοποιείται μέσω του γραφικού περιβάλλοντος ενός Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών (Geographical Information System ή GIS). Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιείται το ArcMap το οποίο αποτελεί κύριο μέρος της σουίτας ArcGIS της ESRI για προβολή, επεξεργασία και ανάλυση χωρικών δεδομένων. Η επέκταση που χρησιμοποιείται για την μετατροπή των δεδομένων από το ArcMap σε κατάλληλη μορφή για το μοντέλο SWAT ονομάζεται ArcSWAT.

Τα δεδομένα εισόδου που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη για την δημιουργία των Μονάδων Υδρολογικής Απόκρισης ήταν οι χρήσεις γης (Land Use Dataset), οι τύποι εδαφών (Soil Dataset) και τέλος το Ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο (Digital Elevation Model ή DEM) της λεκάνης.

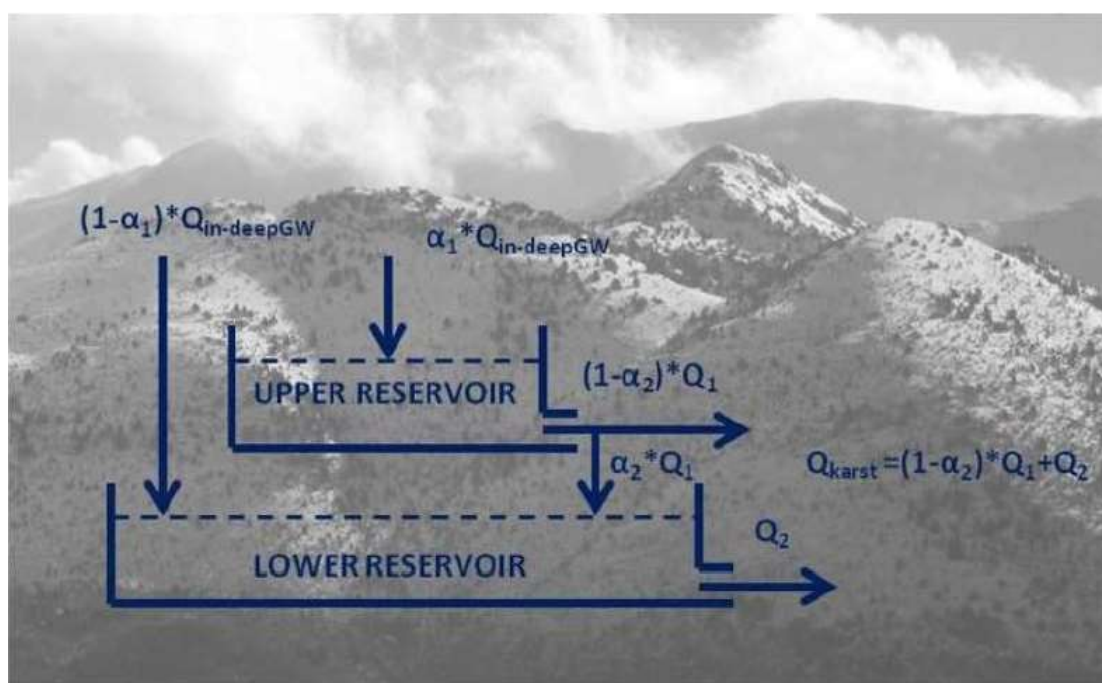
Η επέκταση ArcSWAT χρησιμοποιεί το ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο σε συνδυασμό με το εργαλείο ArcHydro για τον υπολογισμό του υδρογραφικού δικτύου και την κατηγοριοποίηση της λεκάνης απορροής σε υπολεκάνες (subbasins). Μέσω της επέκτασης ArcSWAT προστίθενται χάρτες με δεδομένα χρήσεων γης και εδαφών. έπειτα από τον συνδυασμό των δεδομένων χρήσεων γης, εδαφών και κλίσεων προκύπτουν οι Μονάδες Υδρολογικής Απόκρισης οι οποίες έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά για κάθε υπολεκάνη. Σημειώνεται ότι ο χρήστης μπορεί να καθορίσει τον βαθμό αλληλοεπικάλυψης των δεδομένων. Το ArcSWAT δίνει στη συνέχεια τη δυνατότητα στον χρήστη να εισάγει μετεωρολογικά δεδομένα. Τα μετεωρολογικά δεδομένα που μπορούν να εισαχθούν είναι τα εξής η ημερήσια βροχόπτωση, η μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία, η σχετική υγρασία, η ταχύτητα του ανέμου και η ηλιακή ακτινοβολία.

Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκαν μόνο δεδομένα βροχόπτωσης και θερμοκρασίας. Η βροχόπτωση σε κάθε λεκάνη υπολογίζεται κεντροβαρικά, δηλαδή είναι η βροχόπτωση του κοντινότερου στην λεκάνη βροχομετρικού σταθμού. Δεδομένα θερμοκρασίας εισήχθησαν για έναν μόνο σταθμό (Ψ. Πηγάδι) και υπολογίστηκαν για την υπόλοιπη λεκάνη, αυτόματα, μέσω του ArcSWAT, με την μέθοδο της θερμοβαθμίδας.

Το SWAT χρησιμοποιεί έναν μεγάλο αριθμό μεταβλητών για την προσομοίωση των φυσικοχημικών διεργασιών του υδρολογικού κύκλου. Παρόλο που η επέκταση ArcSWAT δίνει την δυνατότητα απευθείας αλλαγής των μεταβλητών μέσω του ArcMap προτιμήθηκε η επεξεργασία τους σε λογιστικά φύλλα. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου ήταν πως αφού καθορίστηκαν οι υδρογεωλογικές συνθήκες σε κάθε υπολεκάνη μπορούσε να γίνει ομαδοποίηση των λεκανών και αλλαγή των μεταβλητών τους σε ομάδες υπολεκανών αντί σε κάθε μεμονωμένη υπολεκάνη ξεχωριστά. Πρέπει να σημειωθεί ότι κατά την ομαδοποίηση των υπολεκανών λήφθηκε υπόψη η γεωλογία της περιοχής.

Λόγω της πολύπλοκης υδρογεωλογίας της λεκάνης, χρησιμοποιείται στην παρούσα μελέτη το τροποποιημένο μοντέλο του SWAT (Nikolaidis et al. 2013), για να υπολογιστεί η συμμετοχή των καρστικών πηγών στην παροχή του ποταμού Κερίτη (Εικόνα 4.4).

Η παροχή εισόδου στο μοντέλο είναι ο όγκος νερού που διηθείται στον βαθύ υδροφορέα του SWAT σε συγκεκριμένες υπολεκάνες που έχουν χαρακτηριστεί ως καρστικές. Προκύπτει από την βροχόπτωση σε μια Μονάδα Υδρολογικής Απόκρισης (HRU) αφού υπολογιστούν όλες οι επιφανειακές υδρολογικές διεργασίες και οι διεργασίες που αφορούν τον αβαθή υδροφορέα. Το μοντέλο των δύο ταμιευτήρων έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία στην λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη. Η επιτυχής χρήση του και για την προσομοίωση των πηγών της Αγυιάς και των Μεσκλών θα εδραιώσει την θέση του ως ενός ικανού εργαλείου μοντελοποίησης της καρστικής υδροφορίας.

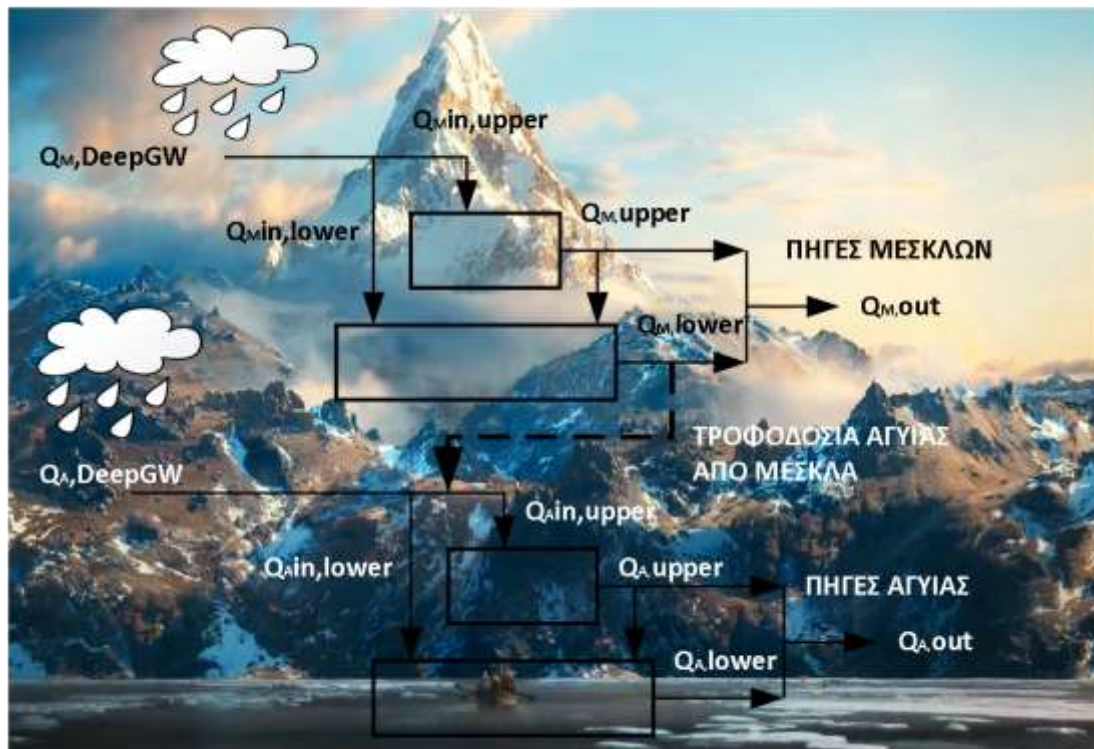


Εικόνα 4.4: Σχηματική απεικόνιση του καρστικού μοντέλου (Nikolaidis et al. 2013).

Στην λεκάνη του Κερίτη – Θερίσου το καρστικό σύστημα είναι αρκετά πολύπλοκο καθώς αποτελείται από δύο συστήματα καρστικών πηγών που επικοινωνούν μεταξύ τους, τις πηγές της Αγυιάς και της πηγές των Μεσκλών. Επίσης διαφέρουν ως προς τα χαρακτηριστικά τους, με τις πηγές της Αγυιάς να εκφορτίζουν μεγάλες ποσότητες νερού όλο το έτος ενώ οι πηγές των Μεσκλών εμφανίζουν παροχή μόνο κατά τους χειμερινούς μήνες και τους πρώτους ανοιξιάτικους μήνες και στερεύουν το καλοκαίρι.

Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε ένα διπλό μοντέλο δύο ταμιευτήρων, έτσι ώστε συνολικά να έχουμε τέσσερις ταμιευτήρες οι οποίοι ανά δύο να αποτελούν σύστημα και το ανώτερο σύστημα (καρστικό σύστημα Μεσκλών) να συμμετέχει στην τροφοδοσία του κατώτερου συστήματος (καρστικό σύστημα Αγυιάς).

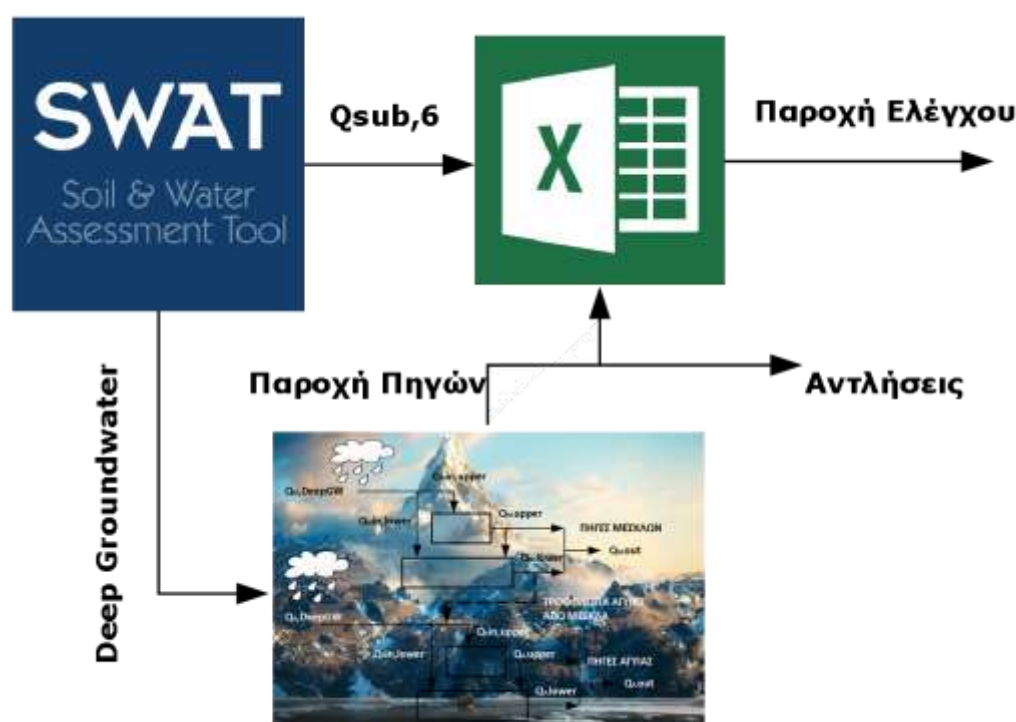
Το άνω σύστημα των δύο ταμιευτήρων χρησιμοποιείται για να προσομοιώσει τις πηγές των Μεσκλών. Μέρος όμως της παροχής εξόδου του συστήματος των Μεσκλών αποτελεί παροχή εισόδου στον σύστημα της Αγυιάς. Σχηματικά, το καρστικό σύστημα αποτυπώνεται στο παρακάτω σχήμα (Εικόνα 4.5):



Εικόνα 4.5: Το διπλό σύστημα των δύο ταμιευτήρων.

Σε πολύπλοκες καρστικές λεκάνες, όπως η λεκάνη Κερίτη – Θερίσου, η παροχή που μετριέται σε κάποιο σημείο της δεν προέρχεται αποκλειστικά από την επιφανειακή απορροή αλλά αποτελεί συνδυασμό της επιφανειακής απορροής με την εκφόρτιση των καρστικών πηγών. Το μοντέλο SWAT δεν είναι ικανό να προβλέψει από μόνο του το σύνολο της παροχής αλλά μόνο το τμήμα αυτής που προέρχεται από την επιφανειακή απορροή. Το κενό αυτό έρχεται να συμπληρώσει το καρστικό μοντέλο το οποίο υπολογίζει την συνεισφορά των καρστικών πηγών στην παροχή του ποταμού. Η συγχώνευση των δύο παραπάνω μοντέλων αποτελεί το συνδυασμένο μοντέλο SWAT – KARST το οποίο έχει την ικανότητα να προσομοιώσει πολύπλοκες καρστικές λεκάνες.

Στην λεκάνη της περιοχής οι πηγές των Μεσκλών και της Αγκιάς συνεισφέρουν στην παροχή του ποταμού Κερίτη. Επίσης στην περιοχή λειτουργούν γεωτρήσεις μεγάλης δυναμικότητας που αφαιρούν σημαντικές ποσότητες νερού από τις πηγές. Η θέση του υδρομετρικού σταθμού, στην διατομή των Δρακιανών, είναι σε σημείο που επιτρέπει την μέτρηση της συνεισφοράς και των πηγών των Μεσκλών και της Αγκιάς στην παροχή του ποταμού Κερίτη. Η επεξεργασία των δεδομένων της επιφανειακής απορροής (Swat) και των εκφορτίσεων των πηγών (Karst) πραγματοποιήθηκε σε πρόγραμμα λογιστικών φύλλων (Excel). Η παροχή εξόδου που προέκυψε από το συνδυασμένο μοντέλο είναι αυτή που θα συγκριθεί με την παροχή που έχει μετρηθεί από τον υδρομετρικό σταθμό. Η σχηματική αναπαράσταση του συνδυασμένου μοντέλου SWAT – KARST για την λεκάνη Κερίτη – Θερίσου δίνεται παρακάτω (Εικόνα 4.6).



Εικόνα 4.6: Σχηματική απεικόνιση του συνδυασμένου μοντέλου SWAT – KARST.

4.4. ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ

Κατά την διάρκεια της βαθμονόμησης έγινε προσπάθεια το μοντέλο να αντιπροσωπεύει όσο το δυνατόν πιο αντικειμενικά την πραγματική κατάσταση που επικρατεί στην λεκάνη Κερίτη. Για τον λόγο αυτό η αλλαγή των μεταβλητών του μοντέλου δεν ήταν τυχαία αλλά στηριζόταν σε επιστημονικές παρατηρήσεις και την προηγούμενη υδρολογική εμπειρία και γνώση.

Ο αριθμός των μεταβλητών που παραμετροποιήθηκαν κρατήθηκε στο ελάχιστο δυνατό ώστε να μην αναιρεθεί η φυσική βάση του μοντέλου και να αποφευχθεί η μετατροπή του σε στοχαστικό μοντέλο. Συνολικά βαθμονομήθηκαν 11 μεταβλητές που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.9.

Από τους γεωλογικούς και υδρογεωλογικούς χάρτες της περιοχής προκύπτει ότι στην περιοχή υπάρχει έντονη καρστική υδροφορία. Με την χρήση των παραπάνω χαρτών και του προγράμματος GIS οι υπολεκάνες της περιοχής κατηγοριοποιήθηκαν σε καρστικές και μη καρστικές. Βάσει αυτής της κατηγοριοποίησης έγινε η βαθμονόμηση όλης της λεκάνης απορροής. Η λογική της βαθμονόμησης στηριζόταν στην υπόθεση της μηδενικής επιφανειακής απορροής των καρστικών υπολεκάνων. Για τον λόγο αυτό τροποποιήθηκαν αρχικά όλες οι μεταβλητές που σχετίζονταν με την επιφανειακή απορροή και τις απώλειες προς τον υδροφορέα. Ελαχιστοποιήθηκε η επιφανειακή απορροή στις καρστικές υπολεκάνες και μεγιστοποιήθηκε η διήθηση προς τον βαθύ υδροφορέα. Αντίθετα στις μη καρστικές υπολεκάνες, λόγω της προσχωματικής υδροφορίας θεωρήθηκε πως δεν υπάρχουν απώλειες προς τον βαθύ υδροφορέα. Η βαθμονόμηση της λεκάνης πραγματοποιήθηκε από τα ανάντι προς τα κατόντι. Αρχικά βαθμονομήθηκαν οι καρστικές πηγές της Αγυιάς και των Μεσκλών. Για τις πηγές των Μεσκλών υπάρχουν δεδομένα μηνιαίας εκφόρτισης για τα έτη 1978 -2005 ενώ για τις πηγές της Αγυιάς αντίστοιχα για τα έτη 1978-1985. Στην συνέχεια έγινε έλεγχος και ελαχιστοποίηση της παροχής στις υπολεκάνες ανάντι των πηγών των Μεσκλών γιατί είναι γνωστή η απουσία υδρογραφικού δικτύου ανάντι των πηγών. Τέλος, έγινε ολοκληρωμένη βαθμονόμηση όλη της λεκάνης απορροής στην διατομή ελέγχου (Δρακιανά) όπου συνυπολογίστηκε η συμμετοχή των πηγών στην παροχή του ποταμού Κερίτη αλλά και οι αντλήσεις που πραγματοποιούνται στην περιοχή.

Πίνακας 4.9: Παραμετροποίηση του μοντέλου SWAT.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΚΑΡΣΤΙΚΕΣ ΥΠΟΛΕΚΑΝΕΣ	ΜΗ ΚΑΡΣΤΙΚΕΣ ΥΠΟΛΕΚΑΝΕΣ
Elevation Bands	Υπολογίστηκαν με το πρόγραμμα elev_band	
TRNSRCH	1	
RCHRG_DP	1	0.05
CH_K2	151 mm/hr	1
ESCO	0.6	
EPCO	0.9	
CANMX	15	
CN	30	default values
GW_REVAP	0.1	default values
REVAPMN	10	default values
GW_DELAY	30(για Μεσκλά)/90(για Αγυιά)	default values

4.5. ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ

Για την επαλήθευση της υδρολογίας και της χημείας που προσομοιώνονται με το συνδυασμένο μοντέλο SWAT – KARST είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν κάποιοι στατιστικοί δείκτες. Για την επαλήθευση της υδρολογίας εξετάζεται κυρίως ο δείκτης NSE, ενώ για την επαλήθευση της χημείας ο δείκτης PBIAS. Τα επιτρεπτά όρια των δεικτών παρουσιάζονται στον πίνακα :

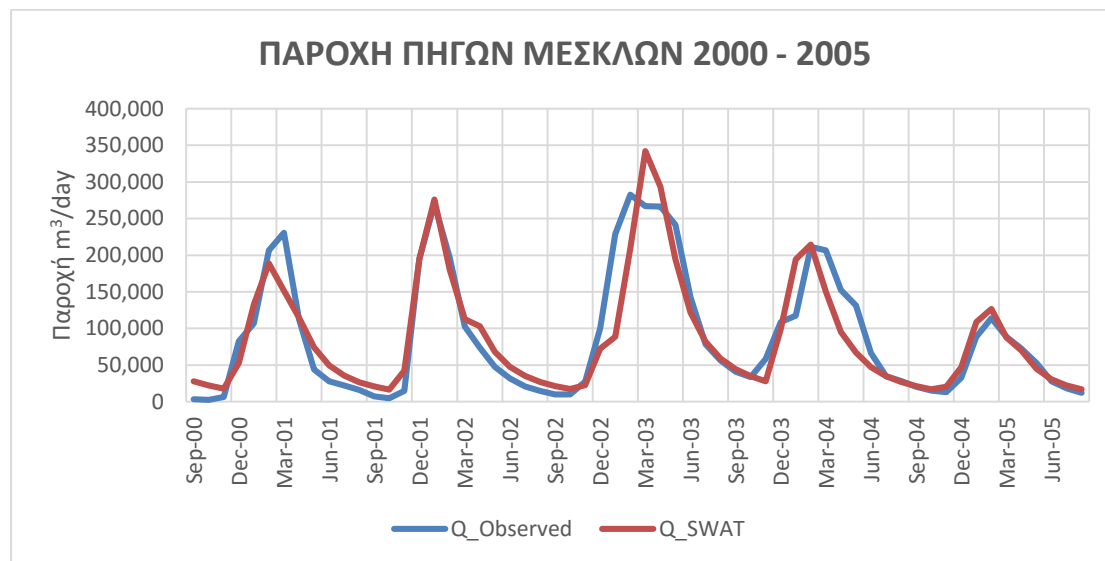
Πίνακας 4.10: Κριτήρια αξιολόγησης της προσομοίωσης βάσει στατιστικών δεικτών (ΠΗΓΗ: (Moriassi & Arnold 2007))

Performance Rating	RSR	NSE	PBIAS (%)	
			Streamflow	N,P
Very good	$0.00 \leq \text{RSR} \leq 0.50$	$0.75 < \text{NSE} \leq 1.00$	$\text{PBIAS} < \pm 10$	$\text{PBIAS} < \pm 25$
Good	$0.50 < \text{RSR} \leq 0.60$	$0.60 < \text{NSE} \leq 0.75$	$\pm 10 \leq \text{PBIAS} < \pm 15$	$\pm 25 \leq \text{PBIAS} < \pm 40$
Satisfactory	$0.60 < \text{RSR} \leq 0.70$	$0.50 < \text{NSE} \leq 0.65$	$\pm 15 \leq \text{PBIAS} < \pm 25$	$\pm 40 \leq \text{PBIAS} < \pm 70$
Unsatisfactory	$0.70 < \text{RSR}$	$\text{NSE} \leq 0.50$	$\pm 25 \leq \text{PBIAS}$	$\pm 70 \leq \text{PBIAS}$

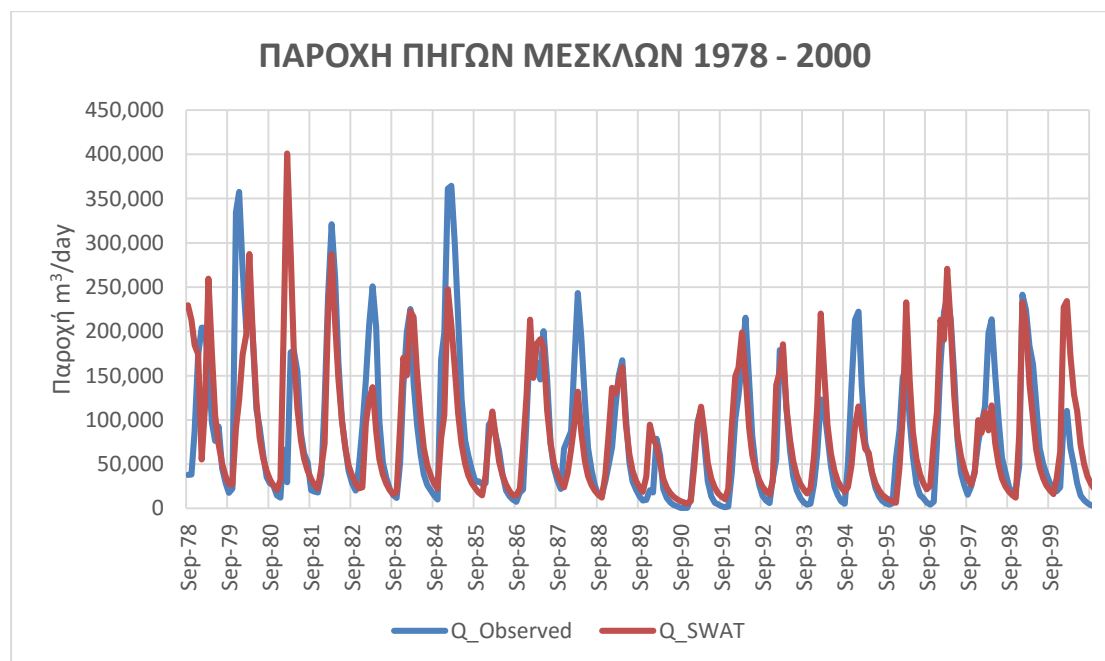
5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.1. ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΚΑΙ ΧΗΜΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΠΗΓΩΝ ΤΩΝ ΜΕΣΚΛΩΝ

Για τις πηγές των Μεσκλών υπάρχουν διαθέσιμα μηνιαία δεδομένα παροχής για την περίοδο 1978 – 2005. Η χρονοσειρά βαθμονόμησης επιλέχθηκε να είναι η περίοδος 2000 – 2005 (Εικόνα 5.1). Τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης ήταν πολύ καλά, όπως φανερώνουν και οι ακόλουθοι στατιστικοί δείκτες, $NSE = 0.83$, $PBias = 119$ και $RSR = 0.41$. Για την επαλήθευση της υδρολογίας των πηγών των Μεσκλών χρησιμοποιήθηκε η χρονοσειρά 1978 – 2000 (Εικόνα 5.2). Οι στατιστικοί δείκτες κρίνονται ικανοποιητικοί, $NSE = 0.55$, $PBias = 164$ και $RSR = 0.67$.



Εικόνα 5.1: Σύγκριση παροχών πεδίου και μοντέλου για τις πηγές των Μεσκλών κατά την περίοδο βαθμονόμησης (Σεπτέμβριος 2000 - Αύγουστος 2005).



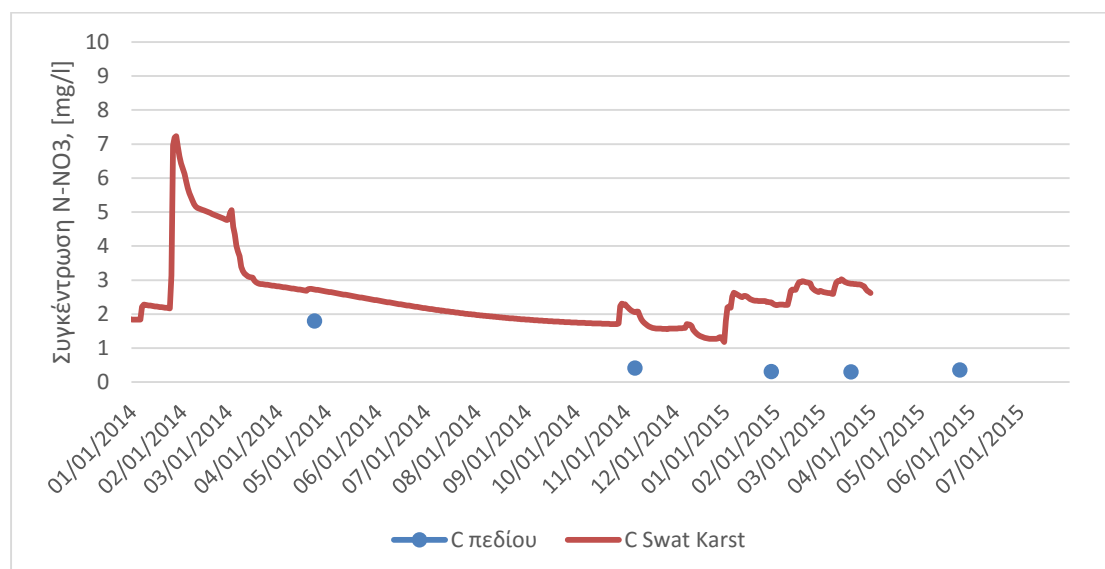
Εικόνα 5.2: Παροχή πηγών Μεσκλών για το συνολικό διάστημα της επαλήθευσης (1978 - 2005).

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές των στατιστικών δεικτών για τις περιόδους βαθμονόμησης και επαλήθευσης καθώς και αξιολόγησή τους κατά Moriasi (Πίνακας 5.1).

Πίνακας 5.1: Στατιστικοί δείκτες βαθμονόμησης (2000-2005) και επαλήθευσης (1978-2000) για τις μηνιαίες παροχές των πηγών των Μεσκλών.

ΠΕΡΙΟΔΟΣ	ΔΕΙΚΤΗΣ	ΤΙΜΗ	ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΤΑ MORIASI
ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ	NSE	0.83	πολύ καλή
	PBIAS	1.98	πολύ καλή
	RMSE	261279	-
	STDEVobs	641442	-
	RSR	0.41	πολύ καλή
ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ	NSE	0.55	ικανοποιητικό
	PBIAS	0.62	πολύ καλή
	RMSE	962398	-
	STDEVobs	1439000	-
	RSR	0.67	ικανοποιητικό

Παρακάτω παρατίθεται η μοντελοποίηση της χημικής απόκρισης των πηγών των Μεσκλών (Εικόνα 5.3). Από την αξιολόγηση του στατιστικού δείκτη PBIAS (Πίνακας 5.2) κατά Moriasi προκύπτει ότι η βαθμονόμηση της χημικής απόκρισης δεν είναι ικανοποιητική.



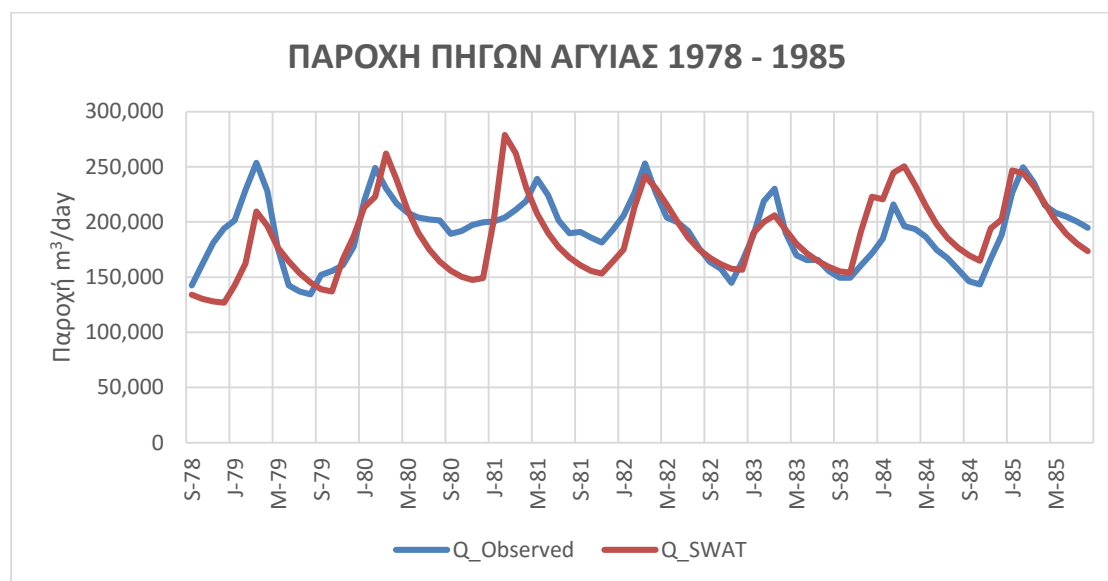
Εικόνα 5.3: Χημική απόκριση των πηγών των Μεσκλών.

Πίνακας 5.2: Στατιστικοί δείκτες βαθμονόμησης της χημικής απόκρισης των πηγών των Μεσκλών.

ΔΕΙΚΤΗΣ	ΤΙΜΗ	ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΤΑ MORIASI
NSE	-2.986	-
PBIAS	127	μη ικανοποιητική
RMSE	4	-
STDEVobs	2	-
RSR	2.00	-

5.2. ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΚΑΙ ΧΗΜΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΠΗΓΩΝ ΤΗΣ ΑΓΥΙΑΣ

Για τις πηγές της Αγυιάς υπάρχουν διαθέσιμα μηνιαία δεδομένα παροχής για την χρονική περίοδο 1978 έως 1985, οπότε και έγιναν έργα αναρρύθμισης των πηγών. Για τις πηγές αυτές πραγματοποιήθηκε μόνο βαθμονόμηση και όχι επαλήθευση καθώς δεν υπήρχε επαρκής όγκος δεδομένων. Οι στατιστικοί δείκτες έχουν γενικά μη αποδεκτή τιμή ($NSE = 0.10$, $PBias = 34$ και $RSR = 0.95$) αλλά το βαθμονομημένο μοντέλο SWAT – KARST κρίνεται επαρκές καθώς κατορθώνει, σε γενικές γραμμές, να προσομοιώσει την εποχική διακύμανση των πηγών (Εικόνα 5.4).



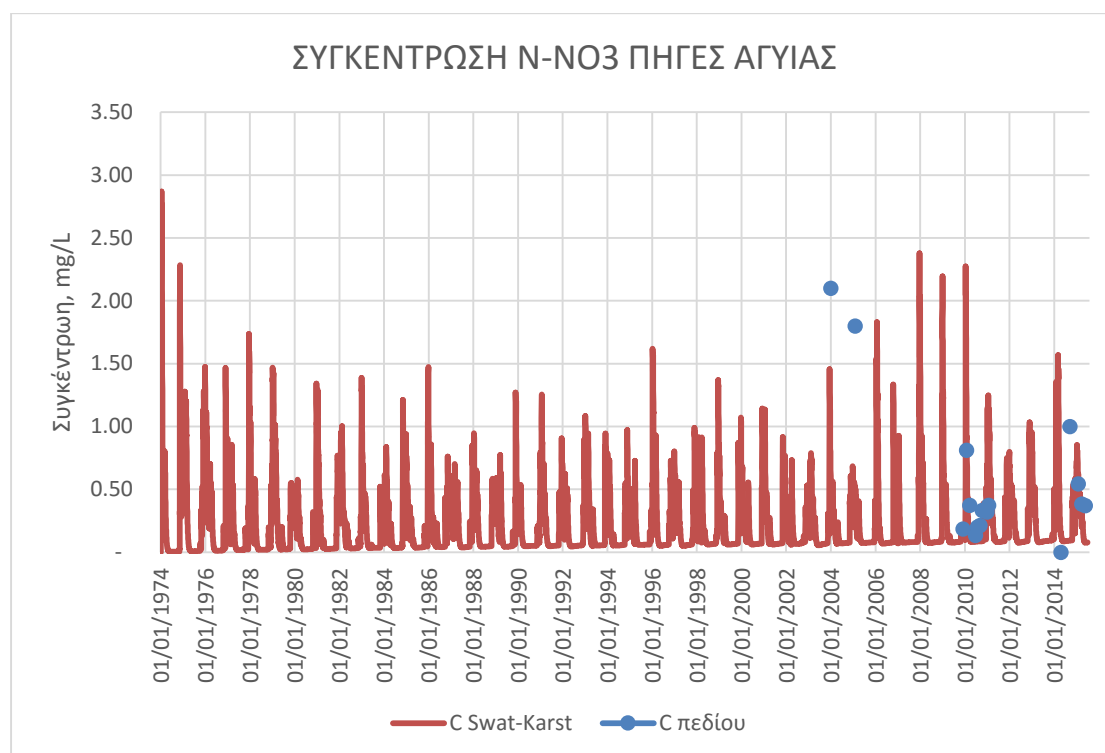
Εικόνα 5.4: Παροχή πηγών Αγυιάς για την χρονική περίοδο 1978 – 1985.

Η προσομοίωση των μηνιαίων παροχών της Αγυιάς παρόλο που κατορθώνει να προσομοιώσει την εποχική διακύμανση των πηγών, κρίνεται ως μη ικανοποιητική σε δύο από τους τρεις δείκτες που εξετάζονται (Πίνακας 5.3). Πιο συγκεκριμένα, οι δείκτες NSE και RSR έχουν μη αποδεκτή ενώ μόνο ο δείκτης PBIAS εμφανίζει αποδεκτή τιμή.

Πίνακας 5.3: Στατιστικοί δείκτες βαθμονόμησης (1978-1985) για τις μηνιαίες παροχές των πηγών της Αγυιάς.

ΠΕΡΙΟΔΟΣ	ΔΕΙΚΤΗΣ	ΤΙΜΗ	ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΤΑ MORIASI
ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ	NSE	0.08	μη ικανοποιητική
	PBIAS	2.01	πολύ καλή
	RMSE	258507.47	-
	STDEVobs	269194.48	-
	RSR	0.96	μη ικανοποιητική

Οι πηγές της Αγκιάς εμφανίζουν μικρότερες συγκεντρώσεις νιτρικού αζώτου (Εικόνα 5.5), γεγονός που οφείλεται στο μεγάλο ρυθμιστικό απόθεμα του καρστικού συστήματος. Οι συγκεντρώσεις σπάνια ξεπερνούν το 1.5 [mg/l].



Εικόνα 5.5: Χημική απόκριση των πηγών της Αγκιάς.

Η αξιολόγηση των στατιστικών δεικτών υποδεικνύει μια καλή μοντελοποίηση της χημικής απόκρισης των πηγών της Αγκιάς, καθώς ο δείκτης PBIAS λαμβάνει τιμή 33% (Πίνακας 5.4).

Πίνακας 5.4: Στατιστικοί δείκτες βαθμονόμησης της χημικής απόκρισης των πηγών της Αγκιάς.

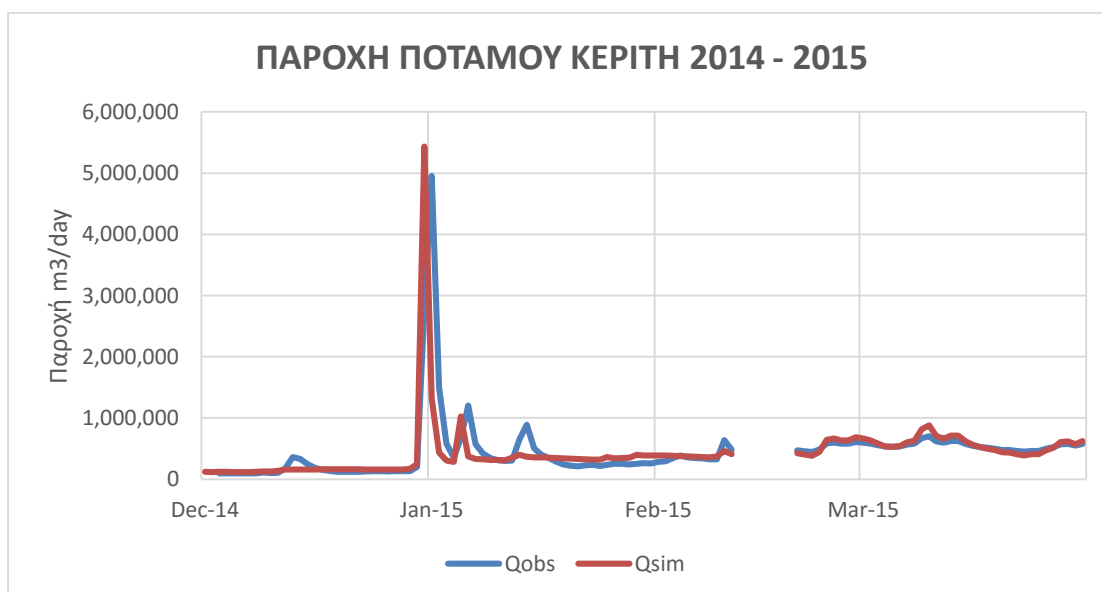
ΔΕΙΚΤΗΣ	ΤΙΜΗ	ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΤΑ ΜΟΡΙΑΣΙ
NSE	-5.026	-
PBIAS	33	καλή
RMSE	4	-
STDEVobs	2	-
RSR	2.45	-

5.3. ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΚΑΙ ΧΗΜΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ ΚΕΡΙΤΗ

Στην διατομή των Δρακιανών είναι εγκατεστημένος ο υδρομετρικός σταθμός του Εργαστηρίου Υδρογεωχημικής Μηχανικής και Αποκατάστασης Εδαφών του Πολυτεχνείου Κρήτης. Για την συγκεκριμένη διατομή υπάρχουν διαθέσιμα ημερήσια δεδομένα για τις περιόδους 2012 – 2013 και 2014 – 2015. Η πρώτη περίοδος χρησιμοποιήθηκε για την βαθμονόμηση του μοντέλου (Εικόνα 5.6) ενώ η δεύτερη για την επαλήθευση του (Εικόνα 5.7). Οι στατιστικοί δείκτες είναι αποδεκτοί για την περίοδο βαθμονόμησης ενώ για την περίοδο επαλήθευσης έχουν χαμηλότερη αξιοπιστία (Πίνακας 5.5). Παρόλα αυτά, το συνδυασμένο μοντέλο SWAT – KARST επιτυγχάνει να προσομοιώσει ικανοποιητικά τα πλημμυρικά φαινόμενα (flush floods) και των δύο χρονοσειρών.



Εικόνα 5.6: Παροχή ποταμού Κερίτη (διατομή Δρακιανών) για το χρονικό διάστημα 2012 – 2013.



Εικόνα 5.7: Παροχή ποταμού Κερίτη (διατομή Δρακιανών) για την χρονική περίοδο 2014 – 2015.

Πίνακας 5.5: : Στατιστικοί δείκτες βαθμονόμησης (2012-2013) και επαλήθευσης (2014-2015) για την ημερήσια παροχή του ποταμού Κερίτη.

ΠΕΡΙΟΔΟΣ	ΔΕΙΚΤΗΣ	ΤΙΜΗ	ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΤΑ MORIASI
ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ	NSE	0.70	καλή
	PBIAS	19	ικανοποιητική
	RMSE	2073193	-
	STDEVobs	3424263	-
	RSR	0.55	καλή
ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ	NSE	0.28	μη ικανοποιητική
	PBIAS	13	καλή
	RMSE	4791332	-
	STDEVobs	5649605	-
	RSR	0.85	μη ικανοποιητική

Στην λεκάνη του Κερίτη υπάρχει υψηλή γεωργική και κτηνοτροφική παραγωγή. Οι δύο αυτές οικονομικές δραστηριότητες φορτίζουν την λεκάνη με υψηλά φορτία αζώτου και φωσφόρου μεγάλο μέρος των οποίων καταλήγει στα επιφανειακά και υπόγεια νερά. Για την βαθμονόμηση της συγκέντρωσης των νιτρικών δεν υπάρχουν παρά ελάχιστα δεδομένα από προηγούμενες μελέτες και έρευνες (Θ.Αλδάκος, 2014, HERSLAB). Τα δεδομένα αυτά προέρχονται από εργαστηριακές αναλύσεις δειγμάτων που λήφθηκαν από το συγκεκριμένο σημείο, ενώ δεν υπήρχε σύστημα παρακολούθησης της συγκέντρωσης του νιτρικού αζώτου με τηλεμέτρηση. Οι συγκεντρώσεις του μοντέλου καθώς και οι συγκεντρώσεις που προέκυψαν από τις εργαστηριακές αναλύσεις παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα(Εικόνα 5.8).



Εικόνα 5.8: Χημική απόκριση του ποταμού Κερίτη.

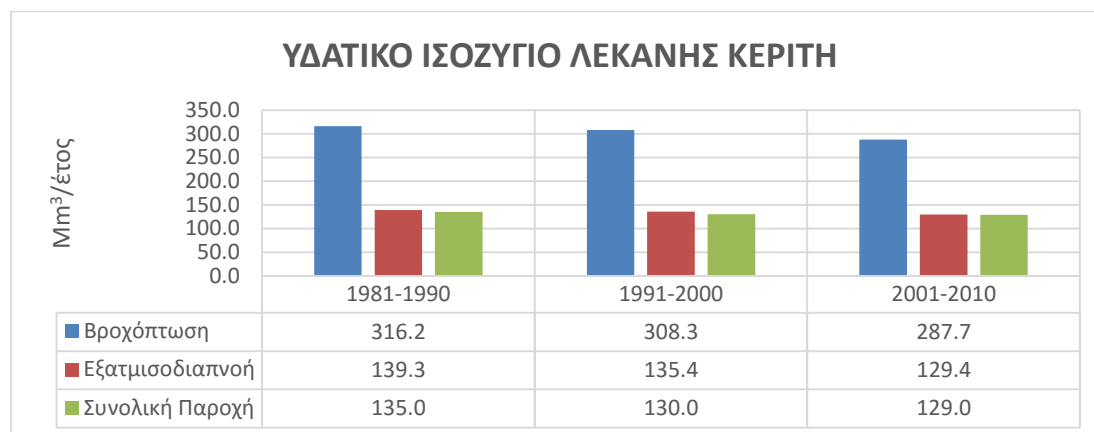
Το συνδυασμένο μοντέλο SWAT-KARST κατόρθωσε να προσομοιώσει πολύ ρεαλιστικά την χημική απόκριση του ποταμού Κερίτη. Ο στατιστικός δείκτης PBIAS παίρνει τιμή 19% (Πίνακας 5.6).

Πίνακας 5.6: Στατιστικοί δείκτες βαθμονόμησης της χημικής απόκρισης του ποταμού Κερίτη.

ΔΕΙΚΤΗΣ	ΤΙΜΗ	ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΤΑ MORIASI
NSE	-2.536	-
PBIAS	19	πολύ καλή
RMSE	4	-
STDEVobs	2	-
RSR	1.88	-

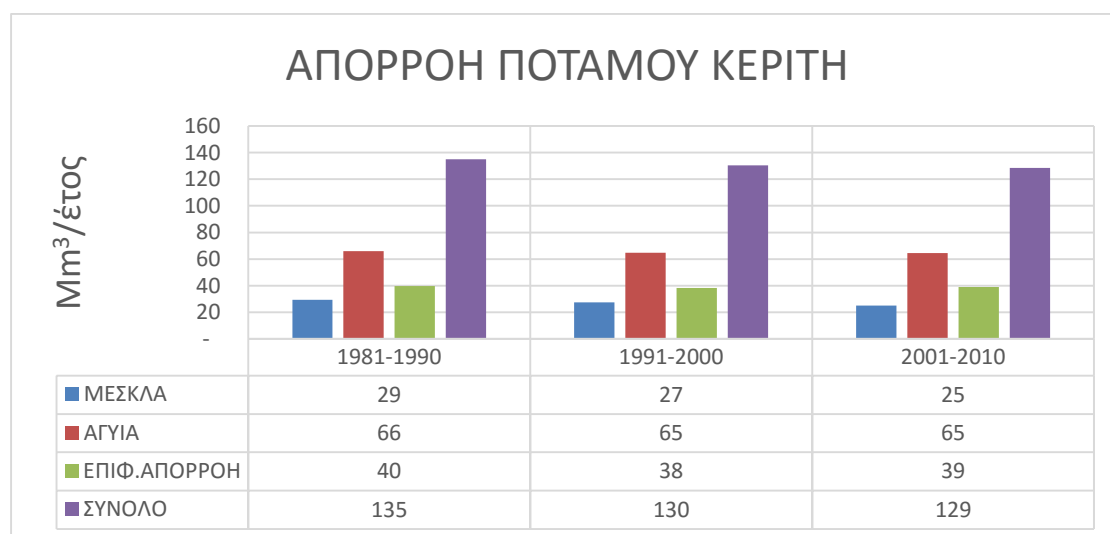
5.4. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΛΕΚΑΝΗΣ ΚΕΡΙΤΗ - ΘΕΡΙΣΟΥ

Η ετήσια βροχόπτωση στην λεκάνη απορροής του Κερίτη αντιστοιχεί σε περίπου 300 Mm³. Από αυτά, περίπου τα 130 Mm³ απομακρύνονται ως εξατμοδιαπνοή ενώ άλλα 130 Mm³ περίπου αποτελούν την απορροή του ποταμού Κερίτη (Εικόνα 5.9). Το έλλειμα το 40 Mm³ αποτελεί μέρος των διήθησης της επιφανειακής απορροής και των υπόγειων μεταγγίσεων του καρστικού συστήματος στον προσχωματικό υδροφορέα.

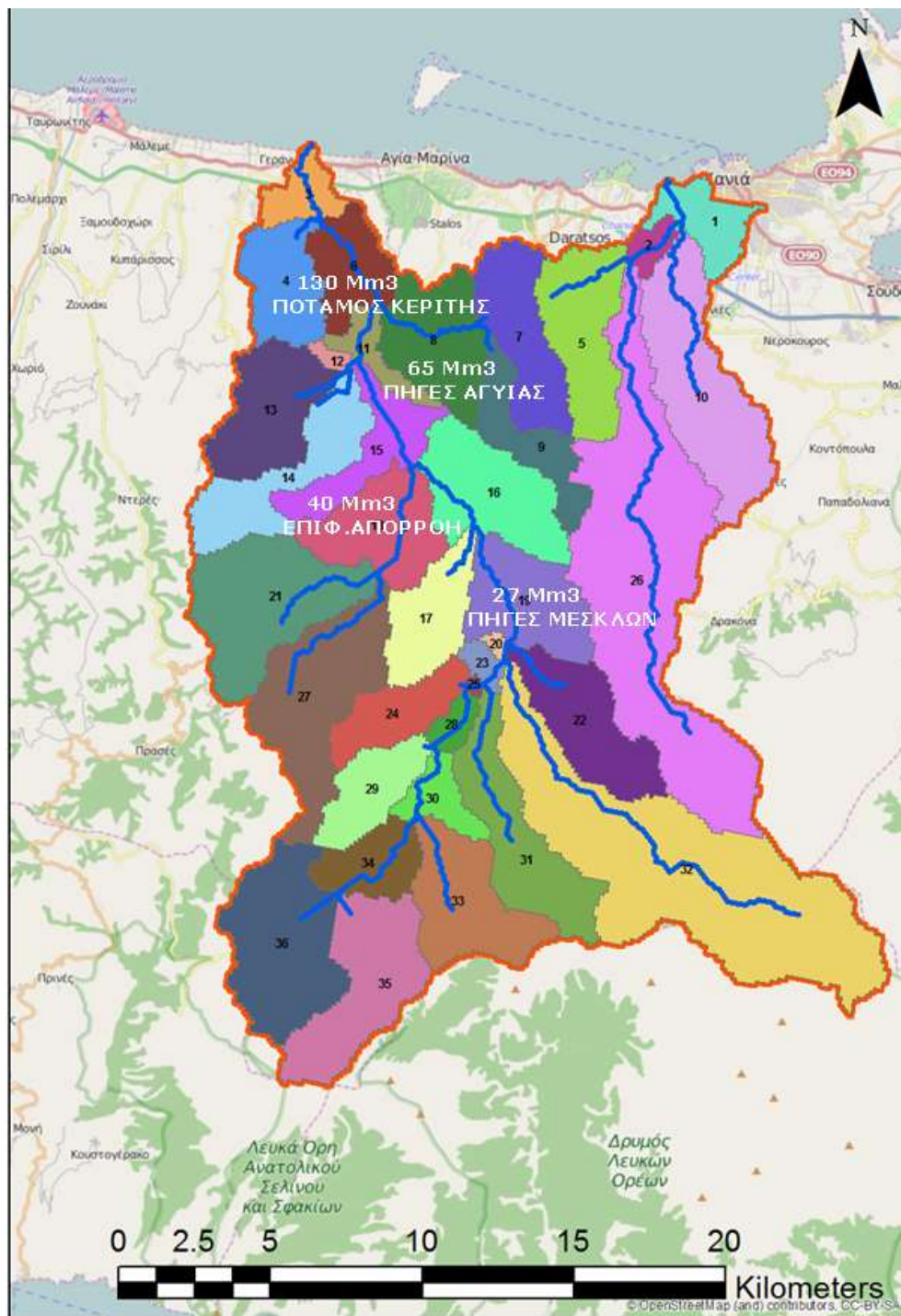


Εικόνα 5.9: Υδατικό ισοζύγιο της λεκάνης του Κερίτη για τις δεκαετίες 1981-1990, 1991-2000 και 2001-2010.

Η παροχή του ποταμού Κερίτη είναι το άθροισμα της επιφανειακής απορροής του πεδινού τμήματος της λεκάνης του Κερίτη και της παροχής των πηγών της Αγυιάς και των Μεσκλών. Στις τιμές αυτές δεν έχει ληφθεί υπόψη η επίδραση των αντλήσεων γιατί ο κύριος σκοπός του γραφήματος είναι να παρουσιαστεί η μεταβολή των παροχών λόγω φυσικών αιτιών (π.χ. θερμοκρασία, βροχόπτωση). Συνολικά έχουμε μια ετήσια παροχή 65 Mm³ από τις πηγές της Αγυιάς, 25 Mm³ από τις πηγές των Μεσκλών και 40 Mm³ λόγω της επιφανειακής απορροής της λεκάνης (Εικόνα 5.10).

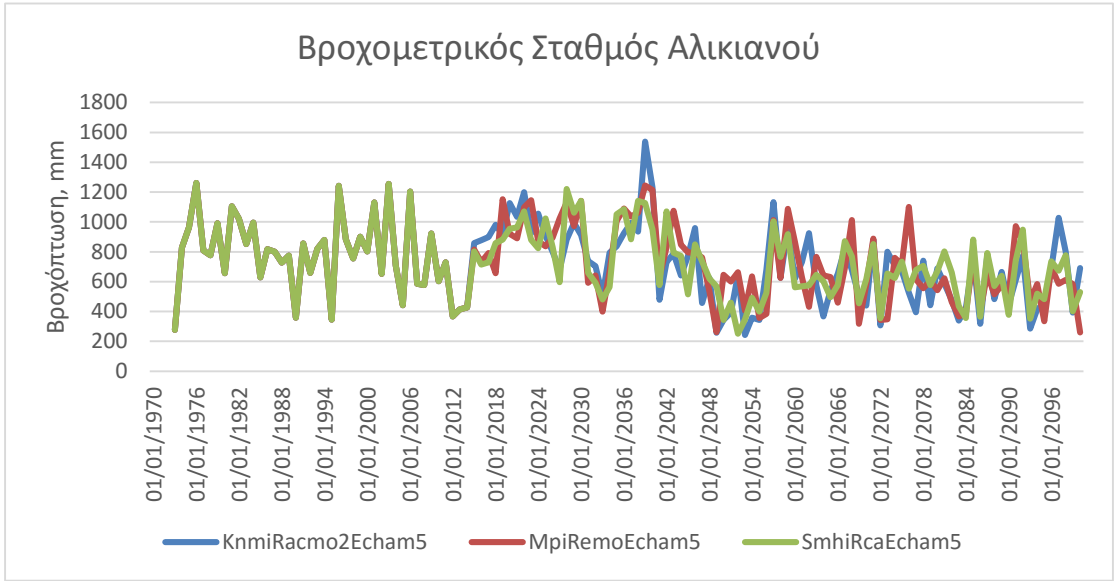


Εικόνα 5.10: Συμμετοχή των πηγών της Αγυιάς, των Μεσκλών και της επιφανειακής απορροής στην συνολική παροχή του ποταμού Κερίτη.

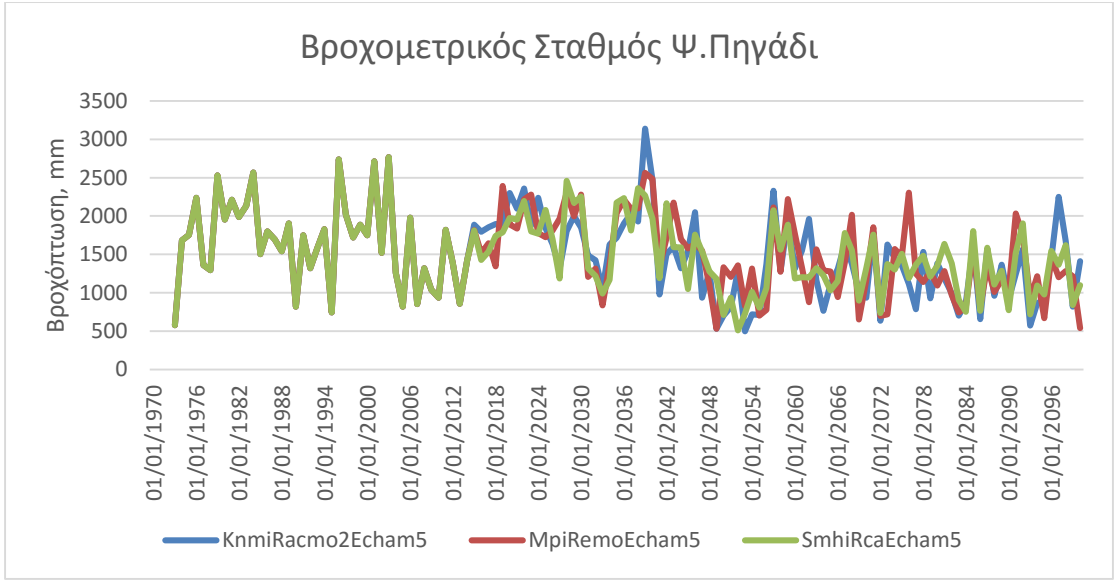


Εικόνα 5.11: Εκτιμώμενο υδατικό ισοζύγιο της λεκάνης απορροής του ποταμού Κερίτη.

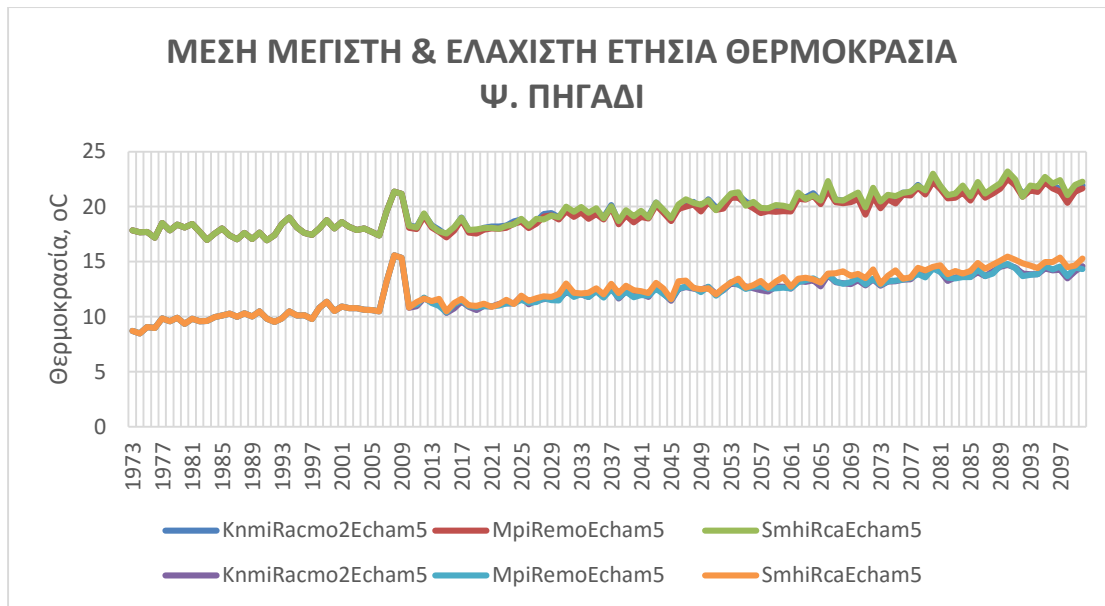
5.5. ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΛΟΓΩ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ



Εικόνα 5.12: Μέσος όρος βροχόπτωσης ανά δεκαετία για τον σταθμό Αλικιανό (1974-2015) και πρόβλεψη βάσει σεναρίων κλιματικής αλλαγής έως 2100.



Εικόνα 5.13: Μέσος όρος βροχόπτωσης ανά δεκαετία για τον σταθμό Ψ. Πηγάδι (1974-2015) και πρόβλεψη βάσει σεναρίων κλιματικής αλλαγής έως 2100.



Εικόνα 5.14: Μέση ετήσια ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία για τον σταθμό Ψ.Πηγάδι (1974 -2015) και πρόβλεψη έως το 2100.

Η βροχόπτωση αναμένεται να μειωθεί σημαντικά στην λεκάνη του Κερίτη βάσει των τριών μοντέλων κλιματικής αλλαγής. Συγκεκριμένα στο σταθμό Αλικιανό (Εικόνα 5.12Εικόνα 2.6) η πτώση εκτιμάται σε 25% από τα 800 mm στα 600 mm ετήσιας βροχόπτωσης. Στον σταθμό Ψ.Πηγάδι (Εικόνα 5.13) η πτώση εκτιμήθηκε σε 20% περίπου, από τα 1500 mm στα 1200 mm.

Η μέση ετήσια μέγιστη θερμοκρασία αναμένεται να αυξηθεί από τους 18 °C στους 22 °C, ενώ η μέση ελάχιστη θερμοκρασία από τους 10 °C στους 15 °C (Εικόνα 5.14).

5.6. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑΣ ΒΑΣΕΙ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ

Το συνδυασμένο μοντέλο SWAT – KARST χρησιμοποιήθηκε για να μελετηθούν οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στην λεκάνη του Κερίτη. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν προήλθαν από τρία μοντέλα κλιματικής αλλαγής (KnmiRacmoEcham5, MpiRemoEcham5 και SmhiRcaEcham5). Και τα τρία σενάρια προβλέπουν σημαντική μείωση στην διαθεσιμότητα των υδατικών πόρων έως το 2100. Για την ποσοτικοποίηση των αποτελεσμάτων έγινε σύγκριση των μέσων όρων των παροχών ανά 20-ετία και υπολογίστηκε η ποσοστιαία μεταβολή της ογκομετρικής παροχής τους σε σχέση με την περίοδο 2001-2020 (Πίνακας 5.7, Πίνακας 5.8, Πίνακας 5.9 και Πίνακας 5.10).

Πίνακας 5.7: Αναμενόμενη ποσοτική και ποσοστιαία μεταβολή της παροχής των πηγών των Μεσκλών βάσει των τριών μοντέλων κλιματικής αλλαγής.

ΠΗΓΕΣ ΜΕΣΚΛΑ			
Εικοσαετία	KnmiRacmoEcham5 (Mm ³)	MpiRemoEcham5 (Mm ³)	SmhiRcaEcham5 (Mm ³)
1981-2000	29	29	29
2001-2020	28	26	26
2021-2040	37 (+33%)	35 (+37%)	36 (+42%)
2041-2060	19 (-30%)	21 (-17%)	20 (-22%)
2061-2080	18 (-36%)	17 (-32%)	18 (-30%)
2081-2100	17 (-40%)	16 (-37%)	18 (-29%)

Πίνακας 5.8: Αναμενόμενη ποσοτική και ποσοστιαία μεταβολή της παροχής των πηγών της Αγυιάς βάσει των τριών μοντέλων κλιματικής αλλαγής.

ΠΗΓΕΣ ΑΓΥΙΑΣ			
Εικοσαετία	KnmiRacmoEcham5 (Mm ³)	MpiRemoEcham5 (Mm ³)	SmhiRcaEcham5 (Mm ³)
1981-2000	57	57	57
2001-2020	51	49	49
2021-2040	67 (+30%)	63 (+30%)	66 (+36%)
2041-2060	42 (-19%)	43 (-11%)	41 (-15%)
2061-2080	37 (-28%)	37 (-24%)	37 (-23%)
2081-2100	33 (-35%)	32 (-34%)	37 (-24%)

Πίνακας 5.9: Αναμενόμενη ποσοτική και ποσοστιαία μεταβολή της επιφανειακής απορροής του ποταμού Κερίτη βάσει των τριών μοντέλων κλιματικής αλλαγής.

ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΑΠΟΡΡΟΗ ΠΟΤΑΜΟΥ ΚΕΡΙΤΗ			
Εικοσαετία	KnmiRacmoEcham5 (Mm³)	MpiRemoEcham5 (Mm³)	SmhiRcaEcham5 (Mm³)
1981-2000	39	39	39
2001-2020	38	35	33
2021-2040	52 (+37%)	54 (+55%)	46 (+41%)
2041-2060	16 (-59%)	22 (-36%)	16 (-50%)
2061-2080	17 (-54%)	17 (-52%)	12 (-64%)
2081-2100	11 (-72%)	12 (-67%)	11 (-67%)

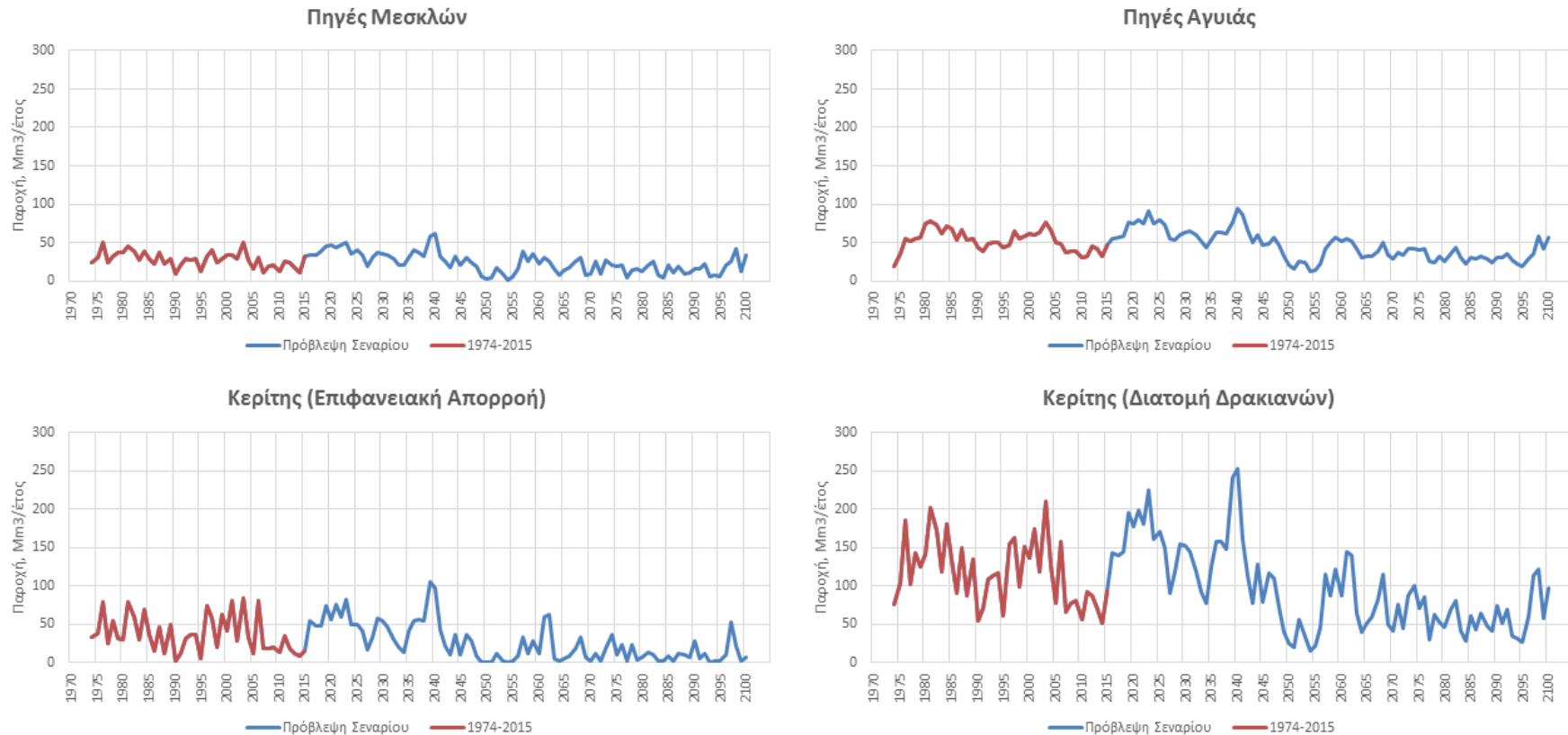
Πίνακας 5.10: Αναμενόμενη ποσοτική και ποσοστιαία μεταβολή της παροχής του ποταμού Κερίτη (διατομή Δρακιανών) βάσει των τριών μοντέλων κλιματικής αλλαγής.

ΠΟΤΑΜΟΣ ΚΕΡΙΤΗΣ (ΔΙΑΤΟΜΗ ΔΡΑΚΙΑΝΩΝ)			
Εικοσαετία	KnmiRacmoEcham5 (Mm³)	MpiRemoEcham5 (Mm³)	SmhiRcaEcham5 (Mm³)
1981-2000	125	125	125
2001-2020	117	109	107
2021-2040	156 (+33%)	152 (+40%)	148 (+39%)
2041-2060	77 (-35%)	87 (-20%)	77 (-27%)
2061-2080	72 (-38%)	71 (-35%)	67 (-37%)
2081-2100	61 (-48%)	60 (-45%)	66 (-38%)

Το συνδυασμένο μοντέλο SWAT – KARST, βάσει των τριών μοντέλων κλιματικής αλλαγής, προβλέπει σημαντική μείωση των υδατικών αποθεμάτων της λεκάνης του Κερίτη. Για τις πηγές των Μεσκλών εκτιμάται ότι η μείωση της ογκομετρικής παροχής θα είναι της τάξεως του 30 % με 40 % ενώ στις πηγές της Αγυιάς η μείωση θα είναι λίγο μικρότερη, μεταξύ 25 % και 35 %. Η μείωση θα είναι πολύ μεγαλύτερη στην επιφανειακή απορροή της λεκάνης του Κερίτη που θα εκτιμάται περίπου στο 70 %.

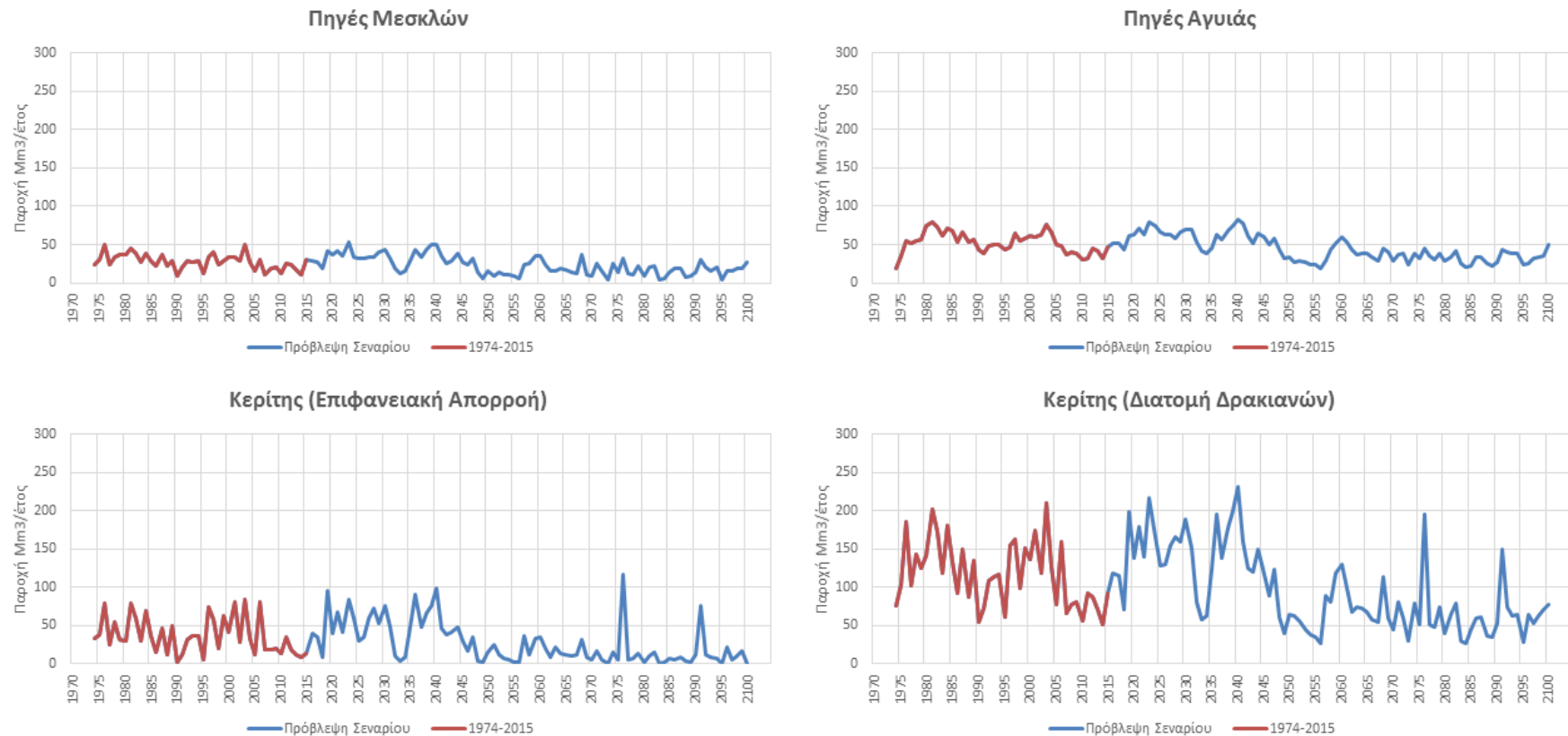
Οι ετήσιες παροχές και για τα τρία μοντέλα κλιματικής αλλαγής, όπως υπολογίστηκαν από το συνδυασμένο μοντέλο SWAT – KARST, δίνονται στα παρακάτω διαγράμματα (Εικόνα 5.15, Εικόνα 5.16, Εικόνα 5.17):

KnmiRacmo2Echam5



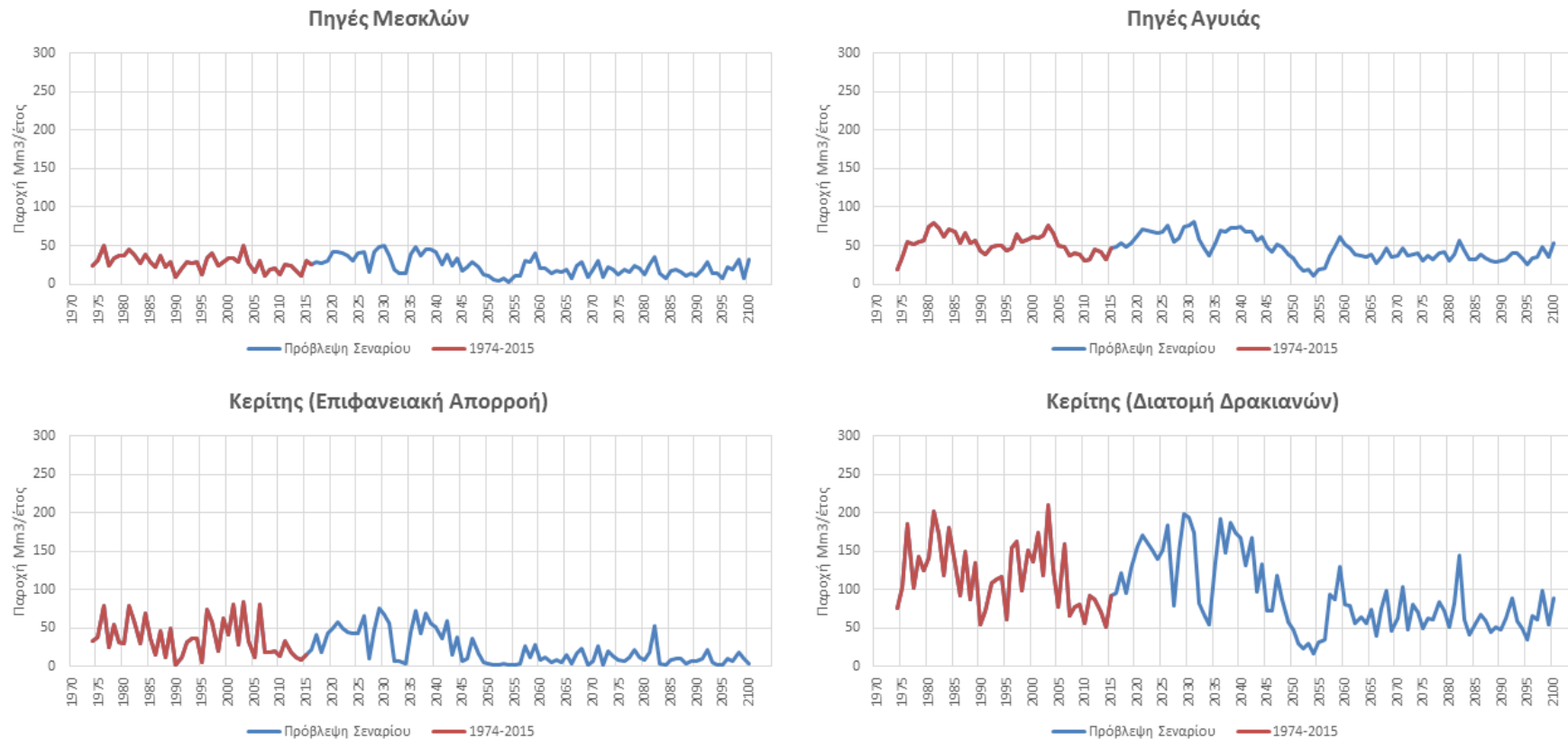
Εικόνα 5.15: Μεταβολή παροχής σύμφωνα με το μοντέλο κλιματικής αλλαγής KnmiRacmoEcham5.

MpiRemoEcham5



Εικόνα 5.16: Μεταβολή παροχής σύμφωνα με το μοντέλο κλιματικής αλλαγής MpiRemoEcham5.

SmhiRcaEcham5



Εικόνα 5.17: Μεταβολή παροχής σύμφωνα με το μοντέλο κλιματικής αλλαγής SmhiRcaEcham5.

ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΝΙΤΡΙΚΟΥ ΑΖΩΤΟΥ N-NO₃

Το συνδυασμένο μοντέλο SWAT – KARST χρησιμοποιήθηκε για να προσομοιώσει την συγκέντρωση νιτρικού αζώτου N-NO₃ στις καρστικές πηγές και στον ποταμό Κερίτη (Εικόνα 5.18, Εικόνα 5.19, Εικόνα 5.20). Οι προσομοιώσεις δίνουν ως αποτέλεσμα αυξημένες συγκεντρώσεις νιτρικών με εξαίρεση την δεκαετία 2021-2040, γεγονός που εν μέρη οφείλεται και στην μείωση της παροχής. Για τις πηγές των Μεσκλών η αύξηση της συγκέντρωσης των νιτρικών αναμένεται να φτάσει και το 25%, για τις πηγές της Αγυιάς 37% και για τον ποταμό Κερίτη 36%. Η συγκέντρωση των νιτρικών στην επιφανειακή απορροή του ποταμού Κερίτη αναμένεται να αυξηθεί κατά 50% ή ακόμα και να διπλασιαστεί. Παρακάτω δίνεται η μεταβολή της συγκέντρωσης των νιτρικών σε μέσους όρους 20ετίας για κάθε σενάριο (Πίνακας 5.11, Πίνακας 5.12).

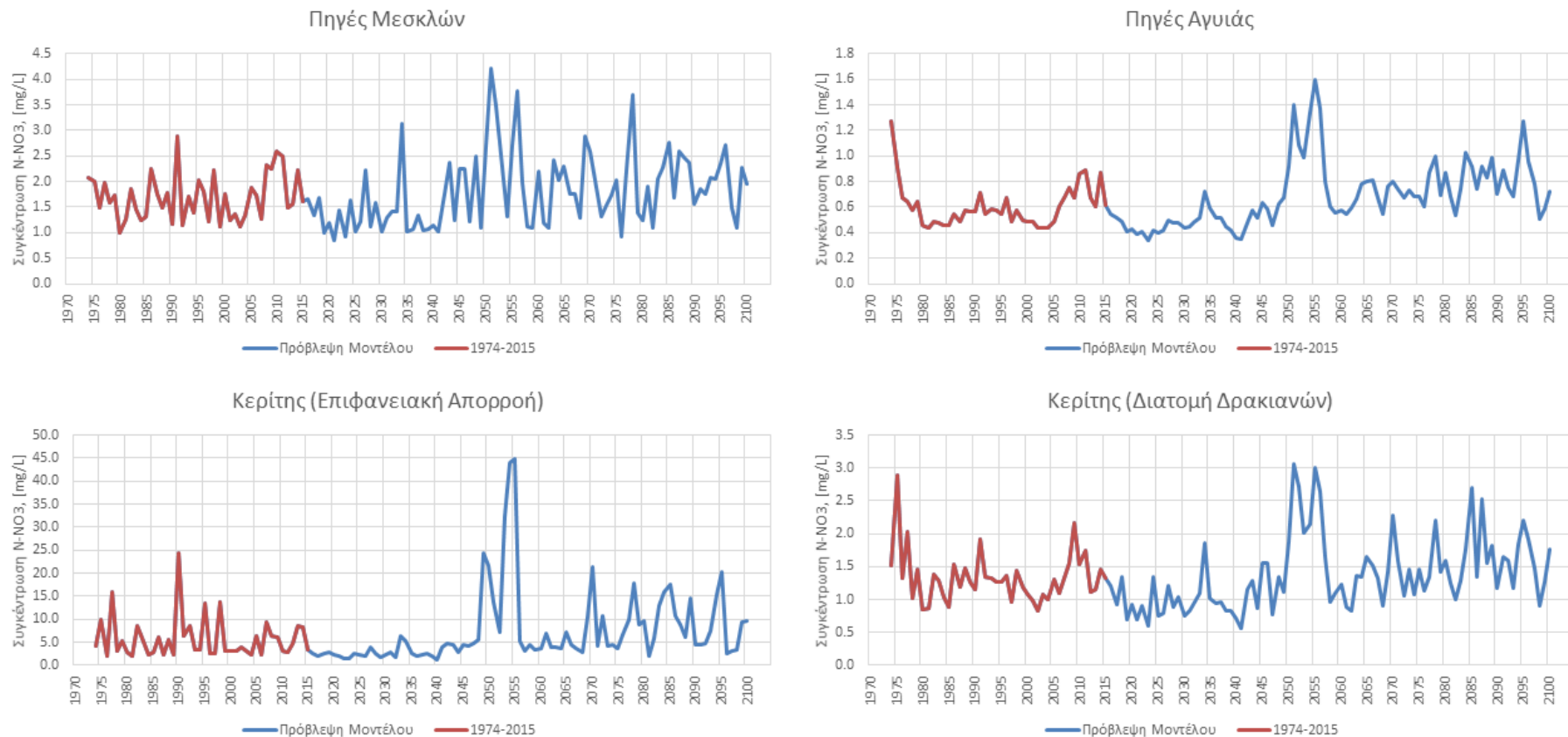
Πίνακας 5.11: Μεταβολή συγκέντρωσης νιτρικού αζώτου (N-NO₃) στις καρστικές πηγές της Αγυιάς και των Μεσκλών.

20-ΕΤΙΑ	ΠΗΓΕΣ ΜΕΣΚΛΩΝ			ΠΗΓΕΣ ΑΓΥΙΑΣ		
	KnmiRacmo 2Echam5	MpiRemo Echam5	SmhiRca Echam5	KnmiRacmo 2Echam5	MpiRemo Echam5	SmhiRca Echam5
1981- 2000	1.6	1.6	1.6	0.5	0.5	0.5
2001- 2020	1.7	1.7	1.7	0.6	0.6	0.6
2021- 2040	1.3	1.4	1.3	0.5	0.5	0.5
2041- 2060	2.1	2.0	2.0	0.8	0.7	0.8
2061- 2080	1.9	2.0	1.8	0.7	0.7	0.7
2081- 2100	2.0	2.1	1.7	0.8	0.8	0.7

Πίνακας 5.12: Μεταβολή συγκέντρωσης νιτρικού αζώτου (N-NO₃) στην επιφανειακή και συνολική απορροή του ποταμού Κερίτη.

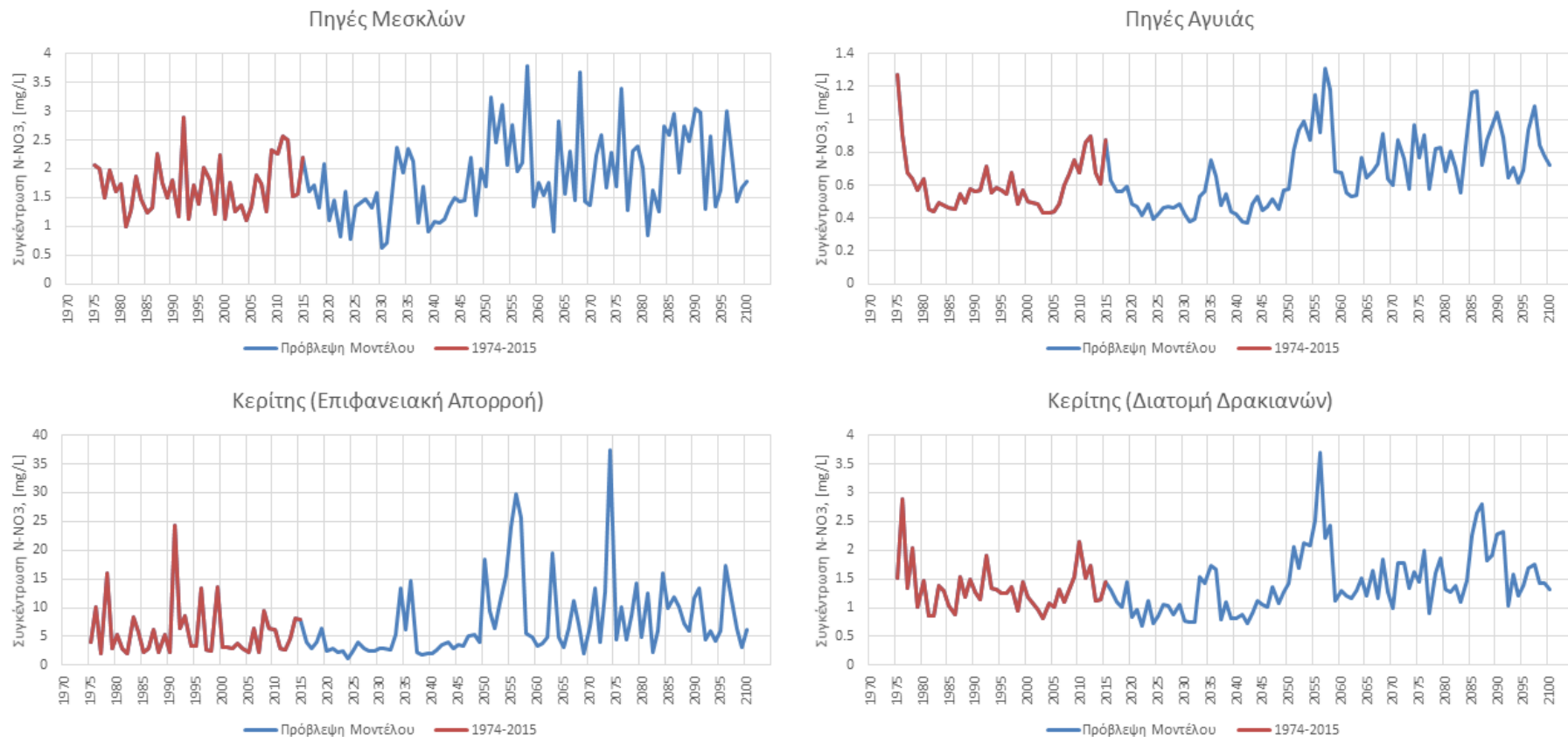
20-ΕΤΙΑ	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΑΠΟΡΡΟΗ ΠΟΤΑΜΟΥ ΚΕΡΙΤΗ			ΠΟΤΑΜΟΣ ΚΕΡΙΤΗΣ (ΔΙΑΤΟΜΗ ΔΡΑΚΙΑΝΩΝ)		
	KnmiRacmo 2Echam5	MpiRemo Echam5	SmhiRca Echam5	KnmiRacmo 2Echam5	MpiRemo Echam5	SmhiRca Echam5
1981- 2000	6.1	6.1	6.1	1.3	1.3	1.3
2001- 2020	4.3	4.6	4.7	1.2	1.2	1.3
2021- 2040	2.6	4.0	4.0	1.0	1.0	1.0
2041- 2060	12.2	9.5	11.0	1.6	1.6	1.7
2061- 2080	7.4	9.6	6.8	1.4	1.5	1.3
2081- 2100	9.0	8.5	7.3	1.6	1.7	1.3

ΚηmiRacmo2Echam5



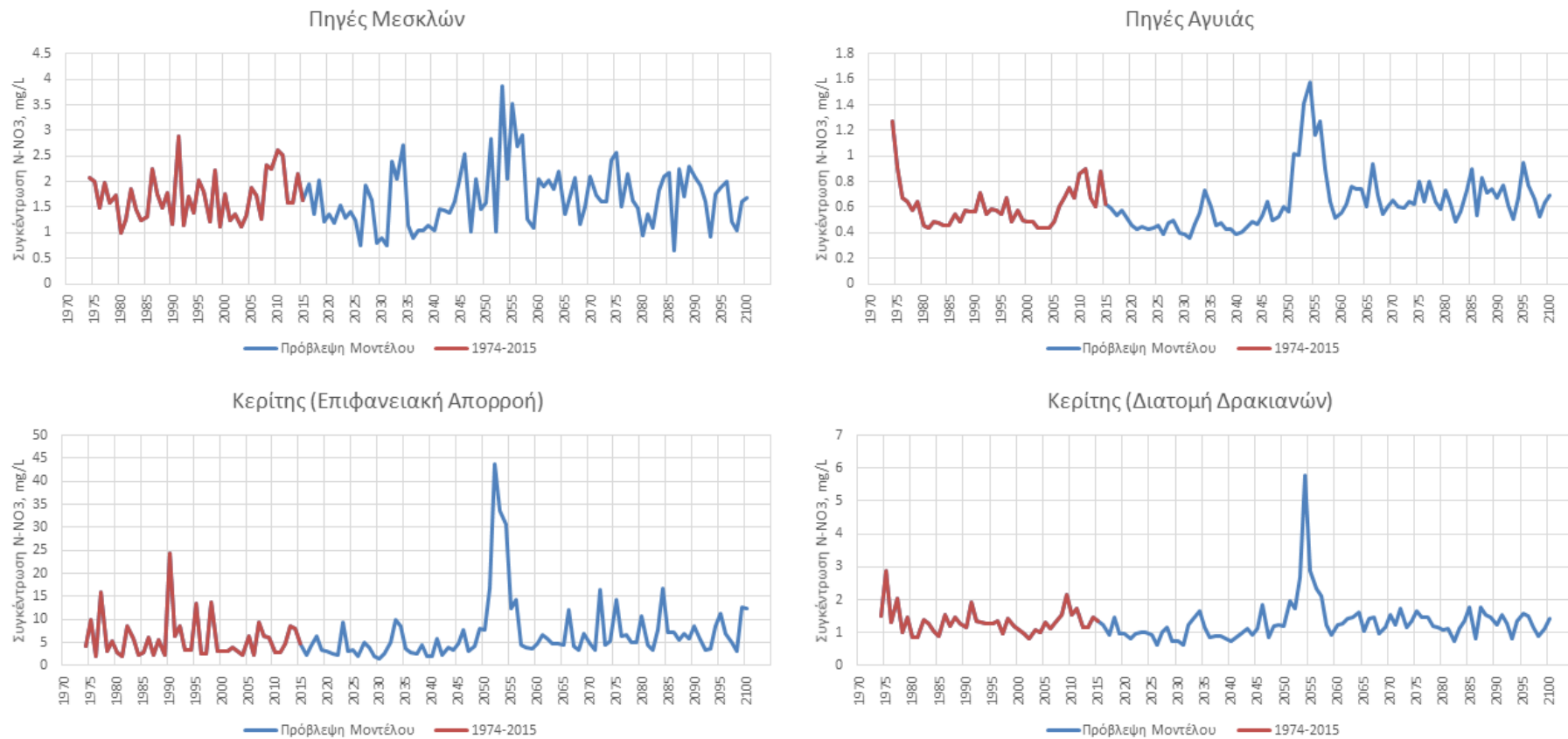
Εικόνα 5.18: Μεταβολή της συγκέντρωσης νιτρικού αζώτου σύμφωνα με το μοντέλο ΚηmiRacmo2Echam5.

MpiRemoEcham5



Εικόνα 5.19: Μεταβολή της συγκέντρωσης νιτρικού αζώτου σύμφωνα με το μοντέλο MpiRemoEcham5.

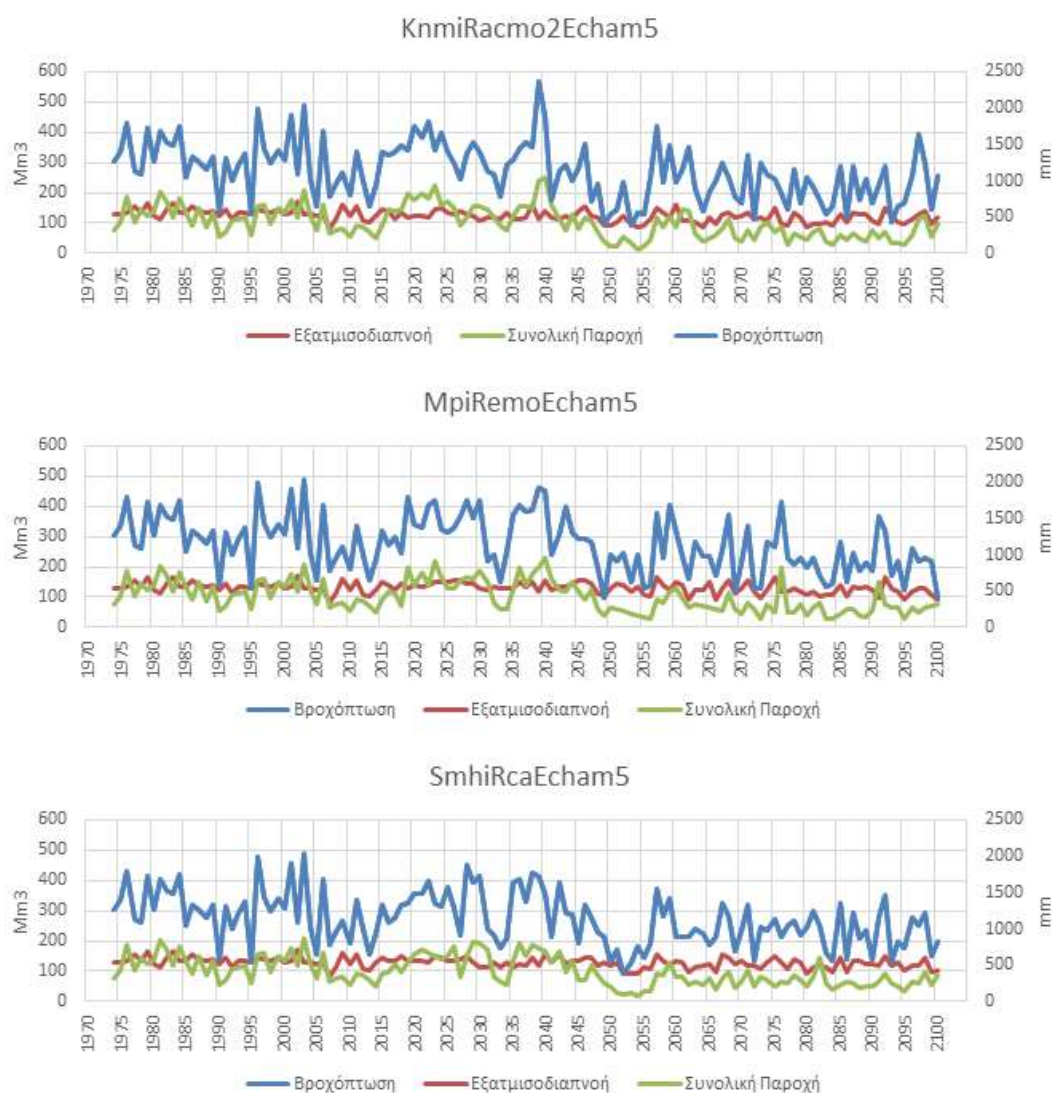
SmhiRcaEcham5



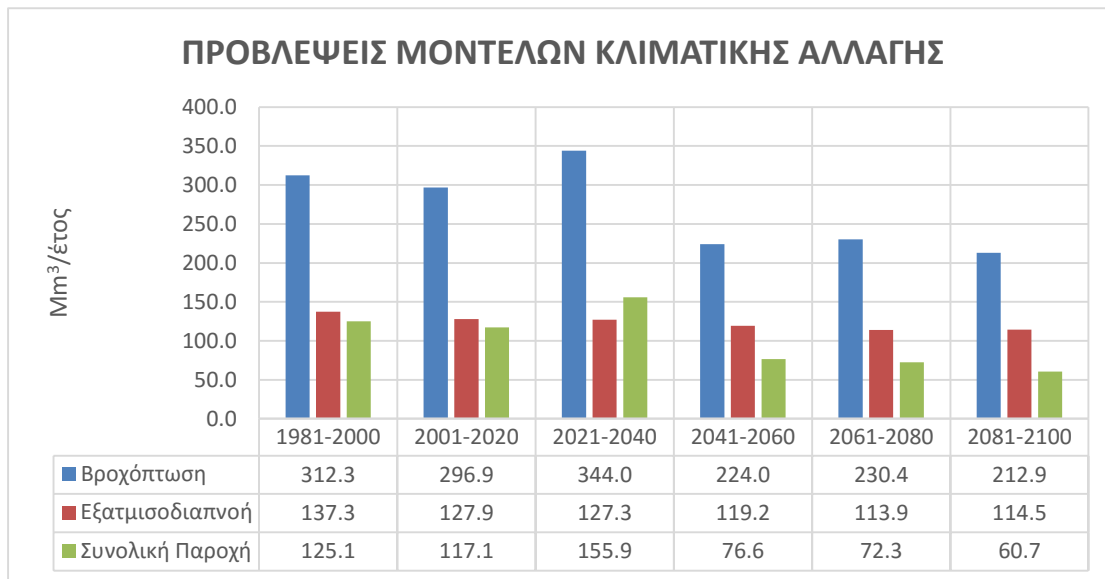
Εικόνα 5.20: Μεταβολή της συγκέντρωσης νιτρικού αζώτου σύμφωνα με το μοντέλο SmhiRcaEcham5.

5.7. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ ΣΤΟ ΥΔΑΤΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ

Στα παρακάτω γραφήματα (Εικόνα 5.21) παρουσιάζεται η μεταβολή της βροχόπτωσης, της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής και της συνολικής παροχής (άθροισμα της εκφόρτισης των καρστικών πηγών και της επιφανειακής απορροής) για την λεκάνη του Κερίτη. Η προσομοίωση της υδρολογίας δίνει παρόμοια αποτελέσματα και για τα τρία κλιματικά μοντέλα. Τα αποτελέσματα δίνονται σε Mm^3 και mm .



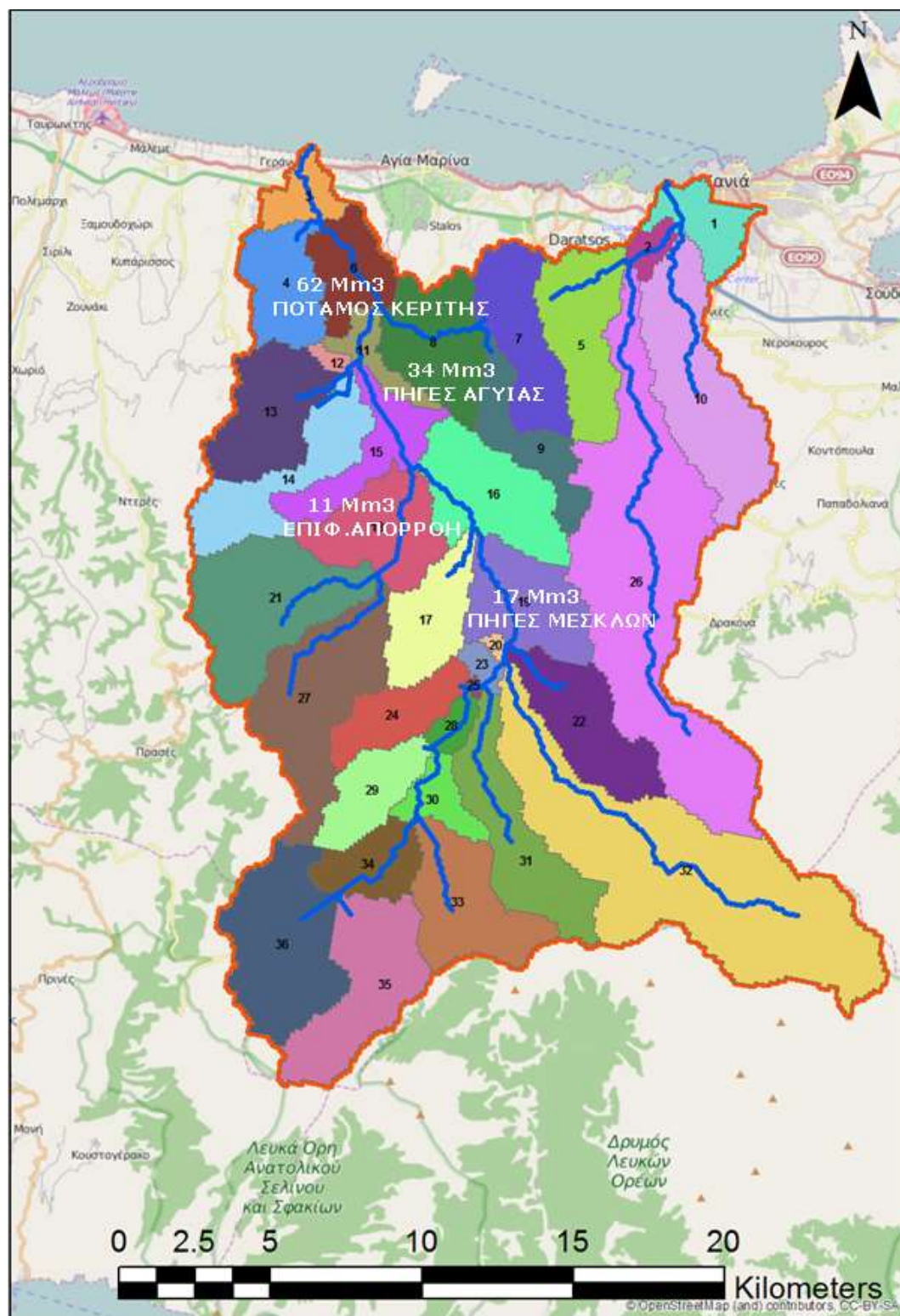
Εικόνα 5.21: Μεταβολή βροχόπτωσης, εξατμισοδιαπνοής και παροχής ποταμού Κερίτη υπό τρία μοντέλα κλιματικής αλλαγής (σε Mm^3 και mm).



Εικόνα 5.22: Προβλέψεις μέσω 20-ετίας βροχόπτωσης, εξατμισοδιαπνοής και συνολικής παροχής για την λεκάνη του Κερίτη.

Εκτός από τα απόλυτα μεγέθη, αναμένεται να μεταβληθεί επίσης και η ποσοστιαία συμμετοχή της εξατμισοδιαπνοής και της συνολικής παροχής στο συνολικό υδατικό ισοζύγιο (Εικόνα 5.22). Η εξατμισοδιαπνοή αναμένεται να αυξηθεί όχι ως απόλυτο μέγεθος αλλά ως ποσοστό της βροχόπτωσης από το 44% στο 53%, λόγω κυρίως της αύξησης της θερμοκρασίας. Αντίθετα, η συνολική παροχή του ποταμού αναμένεται να μειωθεί ως ποσοστό της βροχόπτωσης αποτελώντας μόλις το 30% της ετήσιας ποσότητάς της.

Το εκτιμώμενο υδατικό ισοζύγιο όπως αναμένεται να διαμορφωθεί προς το τέλος του αιώνα παρουσιάζεται στο παρακάτω χάρτη (Εικόνα 5.23). Οι παροχές των πηγών της Αγυιάς και των Μεσκλών αναμένεται να μειωθούν στο μισό, δηλαδή στα 34 Mm³ και 14 Mm³ από τα 62 Mm³ και 27 Mm³ που είναι σήμερα. Η επιφανειακή απορροή στην λεκάνη αναμένεται να μειωθεί στα 11 Mm³ από τα 40 Mm³ που είναι σήμερα. Το συνολικό διαθέσιμο υδατικό δυναμικό της λεκάνης αναμένεται να μειωθεί στο μισό, από τα 130 Mm³ στα 62 Mm³.



Εικόνα 5.23: Εκτιμώμενο υδατικό ισοζύγιο λεκάνης Κερίτη για την δεκαετία 2091-2100.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Το συνδυασμένο μοντέλο SWAT – KARST κατόρθωσε να προσομοιώσει με επιτυχία την υδρολογική απόκριση του ποταμού Κερίτη καθώς και των πηγών της Αγυιάς και των Μεσκλών. Τα αποτελέσματα της μελέτης μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

1. Βάσει του συνολικού υδατικού ισοζυγίου της λεκάνης υπολογίστηκε ότι η εξατμισοδιαπνοή αποτελεί περίπου το 44% της συνολικής βροχόπτωσης ενώ η συνολική απορροή της λεκάνης περίπου το 40%. Το υπόλοιπο 16% αναφέρεται σε απώλειες νερού στον ρηχό, προσχωματικό υδροφορέα της λεκάνης του Κερίτη.
2. Η προσομοίωση της συγκέντρωσης του νιτρικού αζώτου, απέδειξε τις επιπτώσεις των γεωργικών και κτηνοτροφικών πρακτικών στην ποιότητα του επιφανειακού νερού και του νερού των καρστικών πηγών. Την συσσώρευση των ρυπαντών, από τα εναποτιθέμενα λιπάσματα και κοπριά, στο έδαφος ακολουθεί μια αύξηση της συγκέντρωσης των ρυπαντών στα επιφανειακά και υπόγεια νερά λόγω των πρώτων Φθινοπωρινών βροχών.
3. Οι βροχομετρικές παρατηρήσεις που συλλέχτηκαν υποδεικνύουν μια τάση μείωσης της ετήσιας βροχόπτωσης. Αντίστοιχα, οι θερμοκρασιακές μετρήσεις υποδεικνύουν ότι η μέση μέγιστη και η μέση ελάχιστη θερμοκρασία έχουν αυξηθεί. Η αύξηση της θερμοκρασίας έχει αρνητικές επιπτώσεις διότι προκαλεί πρόωρη τήξη της χιονοκάλυψης των Λευκών Ορέων με αποτέλεσμα να αποτρέπεται η τροφοδοσία του καρστ κατά τους θερινούς μήνες του έτους, περίοδο κατά την οποία οι υδατικές ανάγκες είναι ιδιαίτερα αυξημένες.
4. Οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής έχουν γίνει ήδη αισθητές στην λεκάνη του Κερίτη. Οι υδάτινοι πόροι την δεκαετία 2000-2010 εμφανίζονται μειωμένοι κατά περίπου 20 Mm³ σε σχέση με μόλις 20 χρόνια πριν. Πρόκειται για μια ποσοστιαία μείωση της τάξης του 13%.
5. Οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής αναμένεται να ενταθούν, ιδιαίτερα μετά τα μέσα του αιώνα. Μάλιστα, την εικοσαετία 2081-2100 εκτιμάται ότι η διαθεσιμότητα των υδάτινων πόρων θα μειωθεί κατά το ήμισυ. Με μια τέτοια μείωση είναι αμφίβολο αν οι διαθέσιμοι υδάτινοι πόροι της λεκάνης του Κερίτη επαρκούν για την κάλυψη των μελλοντικών αναγκών σε υδρευτικό και αρδευτικό νερό.
6. Η αύξηση της θερμοκρασίας αναμένεται να αυξήσει την ποσοστιαία συμμετοχή της εξατμισοδιαπνοής στο υδατικό ισοζύγιο της λεκάνης του Κερίτη, μειώνοντας αντίστοιχα την συμμετοχή της συνολικής απορροής στο ισοζύγιο.
7. Η μείωση της ογκομετρικής παροχής στις πηγές της Αγυιάς, των Μεσκλών και του ποταμού Κερίτη αναμένεται να προκαλέσει αύξηση της συγκέντρωσης των ρυπαντών στα νερά, προερχόμενη από αγροτικές και κτηνοτροφικές δραστηριότητες. Η αύξηση αναμένεται να είναι μικρή στις καρστικές πηγές, ενώ ιδιαίτερα θα επηρεαστεί το νερό προερχόμενο από την επιφανειακή απορροή της λεκάνης.

Η λεκάνη του Κερίτη, είναι ίσως η σημαντικότερη λεκάνη του νομού καθώς εξασφαλίζει την υδρευση του Ν.Χανίων καθώς και την άρδευση μεγάλης έκτασης γεωργικών εκτάσεων. Για τον λόγο αυτό η μελέτη της λεκάνης πρέπει να συνεχιστεί με αμείωτους ρυθμούς. Η μελέτη και η κατανόηση της υδρολογίας της λεκάνης θα επιτρέψει στους αρμόδιους φορείς την λήψη συγκεκριμένων πρωτοβουλιών για την βέλτιστη και αΐφορική διαχείριση των υδάτων της περιοχής. Παρακάτω εκτίθεται μια σειρά προτάσεων που θα συντελέσουν στα παραπάνω:

1. Δημιουργία μιας καλύτερης καμπύλης στάθμης παροχής για την διατομή των Δρακιανών. Αυτή πρέπει να περιλαμβάνει τιμές για μεγάλος εύρος στάθμης του ποταμού (0.1m έως 1.0m)
2. Παρακολούθηση της στάθμης με τηλεμετρικό εξοπλισμό και στις ακόλουθες διατομές: έξοδος πηγών Αγυιάς (διατομή Πατελάρη), έξοδος Μεσκλών και στην διατομή του Κυρτώμαδου. Αυτές οι πληροφορίες θα επιτρέψουν την ορθότερη εκτίμηση του υδατικού ισοζυγίου της λεκάνης.
3. Παρακολούθησης των αντλήσεων που πραγματοποιούν η ΔΕΥΑΧ, ο ΟΑΚ (πρώην ΟΑΔΥΚ) και οι ΤΟΕΒ από τις καρστικές πηγές και τον προσχωματικό υδροφορέα.

Παρακολούθηση της στάθμης των γεωτρήσεων στον προσχωματικό υδροφορέα του Κερίτη. Τα δεδομένα αυτά θα επιτρέψουν την εκτίμηση του όγκου του νερού που κατεισδύει στον προσχωματικό υδροφορέα.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

7.1. ΔΙΕΘΝΕΙΣ ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ

- Arnold, J.G., Allen, P.M. & Bernhardt, G., 1993. A comprehensive surface-groundwater flow model. *Journal of Hydrology*, 142(1-4), pp.47–69.
- Arnold, J.G. & Fohrer, N., 2005. SWAT2000: Current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling. *Hydrological Processes*, 19(3), pp.563–572.
- Bernstein, L. et al., 2007. Climate Change 2007 : Summary for Policymakers. *Hemisphere*, 335(November), pp.12–17. Available at: <http://www.mendeley.com/research/climate-change-2007-synthesis-report/>.
- Beven, K., 2006. A manifesto for the equifinality thesis. In *Journal of Hydrology*. pp. 18–36.
- Beven, K., 2001. *Rainfall-Runoff Modelling*,
- Beven, K., 2004. Robert E. Horton’s perceptual model of infiltration processes. *Hydrological Processes*, 18(17), pp.3447–3460.
- Boyle, D.P., Gupta, H. V. & Sorooshian, S., 2000. Toward improved calibration of hydrologic models: Combining the strengths of manual and automatic methods. *Water Resources Research*, 36(12), pp.3663–3674.
- Christensen, J.H. et al., 2010. Weight assignment in regional climate models. *Climate Research*, 44(2-3), pp.179–194.
- Christensen, O.B., Drews, M. & Christensen, J.H., 2007. The HIRHAM Regional Climate Model. Version 5 (beta). , 5, pp.1–22. Available at: http://orbit.dtu.dk/fedora/objects/orbit:118724/datastreams/file_8c69af6e-acfb-4d1a-aa53-73188c001d36/content.
- Collins, M. et al., 2011. Climate model errors, feedbacks and forcings: a comparison of perturbed physics and multi-model ensembles. *Climate Dynamics*, 36(9-10), pp.1737–1766.
- Dawson, C.W. et al., 2006. Flood estimation at ungauged sites using artificial neural networks. *Journal of Hydrology*, 319(1-4), pp.391–409.
- DUNN, S.M. et al., Conceptualization in catchment modelling : simply learning? *Hydrological processes*, 22(13), pp.2389–2393. Available at: <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=20410872> [Accessed September 20, 2015].
- Ewen, J. & Parkin, G., 1996. Validation of catchment models for predicting land-use and climate change impacts. 1. Method. *Journal of Hydrology*, 175(1-4), pp.583–594.
- FENICIA, F. et al., Understanding catchment behavior through stepwise model concept improvement. *Water resources research*, 44(1). Available at:

- <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=20115175> [Accessed September 20, 2015].
- Filippelli, G.M., 2008. The global phosphorus cycle: Past, present, and future. *Elements*, 4(2), pp.89–95. Available at: <http://elements.geoscienceworld.org/cgi/doi/10.2113/GSELEMENTS.4.2.89>.
- Gao, X. & Giorgi, F., 2008. Increased aridity in the Mediterranean region under greenhouse gas forcing estimated from high resolution simulations with a regional climate model. *Global and Planetary Change*, 62(3-4), pp.195–209.
- Gassman, P.W. et al., 2005. SWAT Peer-Reviewed Literature : A Review. *Hydrological Processes*, 13, pp.1–17.
- Giorgi, F., 2006. Climate change hot-spots. *Geophysical Research Letters*, 33(8).
- Giorgi, F. & Mearns, L.O., 1999. Introduction to special section: Regional Climate Modeling Revisited. *Journal of Geophysical Research*, 104(D6), p.6335.
- Gupta, H. V. et al., 2009. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1-2), pp.80–91. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>.
- Hay, L.E. et al., 2002. Use of Regional Climate Model Output for Hydrologic Simulations. *Journal of Hydrometeorology*, 3(5), pp.571–590.
- Heber Green, W. & Ampt, G.A., 1911. Studies on Soil Physics. *The Journal of Agricultural Science*, 4(01), p.1.
- Howarth, R.W., 2008. Coastal nitrogen pollution: A review of sources and trends globally and regionally. *Harmful Algae*, 8(1), pp.14–20.
- Ippcc, 2001. Climate Change 2001: The Scientific Basis. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*, p.881.
- 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. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 77(1-4), pp.61–73.
- Jaeger, E.B. et al., 2008. Analysis of ERA40-driven CLM simulations for Europe. *Meteorologische Zeitschrift*, 17(4), pp.349–367.
- Jain, A., Sudheer, K.P. & Srinivasulu, S., 2004. Identification of physical processes inherent in artificial neural network rainfall runoff models. *Hydrological Processes*, 18(3), pp.571–581.
- Kjellström, E., 2005. A 140-year simulation of European climate with the new version of the Rossby Centre regional atmospheric climate model (RCA3), Available at: [http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:A+140-year+simulation+of+European+climate+with+the+new+version+of+the+Rossby+Centre+regional+atmospheric+climate+model+\(+RCA3+\)#0](http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:A+140-year+simulation+of+European+climate+with+the+new+version+of+the+Rossby+Centre+regional+atmospheric+climate+model+(+RCA3+)#0).

- Könneke, M. et al., 2005. Isolation of an autotrophic ammonia-oxidizing marine archaeon. *Nature*, 437(7058), pp.543–546.
- Kourgialas, N.N., Karatzas, G.P. & Nikolaidis, N.P., 2010. An integrated framework for the hydrologic simulation of a complex geomorphological river basin. *Journal of Hydrology*, 381(3-4), pp.308–321.
- Koutroulis, A.G. et al., 2013. Impact of climate change on water resources status: A case study for Crete Island, Greece. *Journal of Hydrology*, 479, pp.146–158. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.11.055>.
- Lange, N.T., 1999. New Mathematical Approaches in Hydrological An Application of Artificial Neural Networks Modeling-. *Science*, 24(l), pp.31–35.
- Lekkas, D.F., 2008. Using complementary methods for improved flow forecasting. *Hydrological Sciences Journal*, 53(4), pp.696–705.
- Li, L.Z.X., 2006. Atmospheric GCM response to an idealized anomaly of the Mediterranean sea surface temperature. *Climate Dynamics*, 27(5), pp.543–552.
- McIntyre, N. & Al-Qurashi, A., 2009. Performance of ten rainfall-runoff models applied to an arid catchment in Oman. *Environmental Modelling and Software*, 24(6), pp.726–738. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2008.11.001>.
- Meehl, G. a, 1990. DyHmia Development of global coupled ocean-atmosphere general circulation models *. , (September 1989), pp.19–33.
- Meijgaard, E. Van et al., 2008. The KNMI regional atmospheric climate model RACMO version 2.1. *Technical report; TR - 302*, p.43.
- Mein, R.G. & Larson, C.L., 1973. Modeling infiltration during a steady rain. *Water Resources Research*, 9(2), p.384.
- Moore, C. & Doherty, J., 2005. Role of the calibration process in reducing model predictive error. *Water Resources Research*, 41(5), pp.1–14.
- Moriasi, D. & Arnold, J., 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ...*, 50(3), pp.885–900. Available at: <http://swat.tamu.edu/media/1312/moriasimodeval.pdf>.
- Nakicenovic, N. & Swart, R., 2000. *IPCC Special Report on Emissions Scenarios: A special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*,
- Nash, J.E. & Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), pp.282–290.
- Nemani, R.R. et al., 2003. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. *Science (New York, N.Y.)*, 300(5625), pp.1560–1563.
- Nikolaidis, N.P., Bouraoui, F. & Bidoglio, G., 2013. Hydrologic and geochemical modeling of a karstic Mediterranean watershed. *Journal of Hydrology*, 477, pp.129–138.

- Oelkers, E.H. & Valsami-Jones, E., 2008. Phosphate mineral reactivity and global sustainability. *Elements*, 4(2), pp.83–87.
- Orellana, B. et al., 2008. A Toolbox for the Identification of Parsimonious Semi-Distributed Rainfall-Runoff Models : Application to the Upper Lee Catchment. *Integrating Sciences and Information Technology for Environmental Assessment and Decision Making*, pp.670–677.
- Parry, M.L. et al., 2004. Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios. *Global Environmental Change*, 14(1), pp.53–67.
- Pechlivanidis, I.G. et al., 2011. Catchment Scale Hydrological Modelling : a Review of Model Types , Calibration Approaches and Uncertainty Analysis Methods in the Context of Recent Developments in Technology and. *Global NEST*, 13(3), pp.193–214.
- Petit, R.J. et al., 1999. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*, 399, pp.429–413.
- Rasmussen, S.H. et al., 2012. Spatial scale characteristics of precipitation simulated by regional climate models and the implications for hydrological modelling. *Journal of Hydrometeorology*, p.120710053152005.
- Risgaard-Petersen, N. et al., 2006. Evidence for complete denitrification in a benthic foraminifer. *Nature*, 443(7107), pp.93–96.
- Van Roosmalen, L. et al., 2010. An intercomparison of regional climate model data for hydrological impact studies in Denmark. *Journal of Hydrology*, 380(3-4), pp.406–419. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.11.014>.
- Santer, B.D. et al., 2013. Human and natural influences on the changing thermal structure of the atmosphere. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110(43), pp.17235–40. Available at: <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=3808612&tool=pmcentrez&rendertype=abstract>.
- Schaefli, B. & Gupta, H. V., 2007. Do Nash values have value? *Hydrological Processes*, 21(15), pp.2075–2080.
- Semmler, T. et al., 2003. Regional Climate Ensemble Simulations for Ireland. *Seminar*, (2002), pp.27–37.
- Singh, V.P., 1995. *Computer models of watershed hydrology*, Available at: <http://www.cababstractsplus.org/abstracts/Abstract.aspx?AcNo=19961904762>.
- Singh, V.P. & Frevert, D.K., 2006. *Watershed Models*, Available at: <http://link.aip.org/link/?ASC/126/16/1>.
- Singh, V.P. & Woolhiser, D.A., 2002. Mathematical Modeling of Watershed Hydrology. *Journal of Hydrologic Engineering*, 7(4), pp.270–292.

- Somot, S. et al., 2008. 21st century climate change scenario for the Mediterranean using a coupled atmosphere-ocean regional climate model. *Global and Planetary Change*, 63(2-3), pp.112–126.
- Strous, M. et al., 1999. Missing lithotroph identified as new planctomycete. *Nature*, 400(6743), pp.446–449.
- Vitousek, P.M. et al., 1997. Human alteration of the global nitrogen cycle: Sources and consequences. *Ecological Applications*, 7(3), pp.737–750.
- Vitousek, P.M. et al., 2002. Towards an ecological understanding of biological nitrogen fixation. In *Biogeochemistry*. pp. 1–45.
- Wagener, T. et al., 2007. Catchment Classification and Hydrologic Similarity. *Geography Compass*, 1, pp.1–31.
- Van Werkhoven, K. et al., 2009. Sensitivity-guided reduction of parametric dimensionality for multi-objective calibration of watershed models. *Advances in Water Resources*, 32(8), pp.1154–1169. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2009.03.002>.
- Wheater, H.S., 2002. Progress in and prospects for fluvial flood modelling. *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences*, 360(1796), pp.1409–1431.
- Young, a R., Keller, V. & Griffiths, J., 2006. Predicting low flows in ungauged basins: a hydrological response unit approach to continuous simulation. *Iahs Publication*, (November), pp.134–138.

7.2. ΜΕΛΕΤΕΣ

- ΝΙΚΟΛΑΙΔΗΣ Ν, ΚΑΡΑΤΖΑΣ Γ., 2010, Ειδικό σχέδιο διαχείρισης των υδατικών πόρων για τις λεκάνες των ποταμών Κερίτη-Θερίσου και Κοιλιάρη
- ΚΝΙΘΑΚΗΣ Μ., ΒΙΑΔΑΚΗ Μ., ΚΑΛΟΥΜΕΝΟΥ Κ., 1978, ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΑΓΥΙΑΣ-ΜΟΥΡΝΙΩΝ-ΣΟΥΔΑΣ ΤΟΥ Ν.ΧΑΝΙΩΝ, ΙΓΜΕ

7.3. ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ

- Αλδάκος Θ., 2014, Μοντελοποίηση της υδρολογίας και γεωχημείας της λεκάνης απορροής του ποταμού Κερίτη με χρήση του μοντέλου SWAT.
- Γιαννακοπούλου Ε., 2014, Μοντελοποίηση ροής και μεταφοράς αγροχημικών στην κορεσμένη εδαφική ζώνη με χρήση του μοντέλου MIKESHE. Εφαρμογή στη λεκάνη απορροής του ποταμού Κερίτη.
- Γραμματικάκης Γ., 2012, Αξιολόγηση και μοντελοποίηση της κατάστασης ευτροφισμού της λίμνης της Αγυιάς.
- Γρυλλάκης Ε., 2006, ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΤΗΣ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΤΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ ΚΕΡΙΤΗ, ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΕΔΙΟΥ.

Τσάιμος Γ., 2009, Διαχειριστική Μελέτη Υδατικών Πόρων στις λεκάνες απορροής Κερίτη-Θερίσου.

Αλδάκος Θ., 2014, Μοντελοποίηση της υδρολογίας και γεωχημείας της λεκάνης απορροής του ποταμού Κερίτη με χρήση του μοντέλου SWAT.

7.4. WEB

<http://www.worldometers.info/world-population/>

https://en.wikipedia.org/wiki/Properties_of_water

<http://www.gracelinks.org/blog/1143/beef-the-king-of-the-big-water-footprints>

<http://www.who.int/topics/water/en/>

<http://www.greenpeace.org/international/Global/international/planet-2/report/2006/3/climate-change-and-the-mediter.pdf>

https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ch11s11-3.html

<http://www.fao.org/3/a-i3084e/i3084e16.pdf>