



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ ΚΑΙ ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ
ΤΗΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ ΣΤΟΥΣ ΥΔΑΤΙΚΟΥΣ ΠΟΡΟΥΣ
ΜΕΣΩ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ»**



Συγγραφέας: Ναταλία Κοτσιάνου

ΑΜ: 18391041

Επιβλέπουσα: Ελισσάβητ Φελώνη

Αθήνα, Μάρτιος 2023



**UNIVERSITY OF WEST ATTICA
SCHOOL OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF SURVEYING & GEOINFORMATICS ENGINEERING**

DIPLOMA THESIS

**«INVESTIGATION OF SCENARIOS FOR ASSESSING THE IMPACT
OF CLIMATE CHANGE ON WATER RESOURCES
THROUGH HYDROLOGICAL SIMULATION»**



Student: Natalia Kotsianou

Registration Number: 18391041

Supervisor: Dr. Elissavet Feloni

Athens, March 2023

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ ΚΑΙ ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ
ΑΛΛΑΓΗΣ ΣΤΟΥΣ ΥΔΑΤΙΚΟΥΣ ΠΟΡΟΥΣ ΜΕΣΩ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή

Η πτυχιακή/διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική
Επιτροπή:

A/α	ΟΝΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ	ΒΑΘΜΙΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ
1	Φελώνη Ελισσάβητ	Διδάσκουσα ΠαΔΑ	
2	Ηλιοπούλου Πολυξένη	Καθηγήτρια	
3	Καραλής Σωτήρης-Θεοφάνης	Λέκτορας Εφαρμογών	

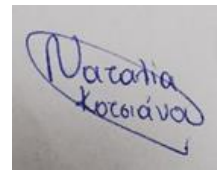
ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Ναταλία Κοτσιάνου του Μιχαήλ, με αριθμό μητρώου 18391041 φοιτήτρια του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανικών Τοπογραφίας & Γεωπληροφορικής, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Η Δηλούσα
Ναταλία Κοτσιάνου

A photograph of a handwritten signature in blue ink on a white background. The signature reads 'Natalia Kotsianou' in a cursive script.

Η επιβλέπουσα
Ελισσάβητ Φελώνη

Περιεχόμενα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	vii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	viii
ABSTRACT	x
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Αντικείμενο εργασίας	1
1.2 Διάρθρωση τεύχους.....	1
1.3 Υδατικοί Πόροι και Κλιματική Αλλαγή.....	2
1.3.1 Γενικά περί υδατικών πόρων	2
1.3.2 Διαχείριση Υδατικών Πόρων σε συνθήκες Κλιματικής Αλλαγής	4
1.3.3 Επιπτώσεις της Κλιματικής Αλλαγής στους Υδατικούς Πόρους	7
2 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ: ΕΥΡΩΤΑΣ ΠΟΤΑΜΟΣ	13
2.1 Γενικές Πληροφορίες - Γεωγραφική τοποθέτηση	13
2.2 Φυσικό περιβάλλον	14
2.3 Υδρολογικά στοιχεία και κλίμα	15
2.3.1 Γενικοί ορισμοί	15
2.3.2 Χαρακτηριστικά περιοχής μελέτης	16
2.4 Γεωλογικά στοιχεία.....	22
2.5 Χρήσεις γης	23
2.6 Ανθρωπογενείς δραστηριότητες	26
3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΔΕΔΟΜΕΝΑ.....	27
3.1 Γενικό πλαίσιο.....	27
3.2 Διαθέσιμα δεδομένα και προεπεξεργασία	28
3.2.1 Χρονοσειρές σταθμών εντός ΛΑΠ.....	28
3.2.2 Πλεγματικά δεδομένα EUROCORDEX	29
3.3 Υδρολογική προσομοίωση.....	34
3.3.1 Γενικά περί μοντέλων	34
3.3.2 Το μοντέλο «Thomas abcd»	36
3.3.3 Βαθμονόμηση μοντέλου	38

3.3.4	Εξατμισοδιαπνοή.....	39
3.3.5	Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων μοντέλου	41
3.3.6	Σενάρια που διερευνώνται	42
4	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ	46
4.1	Αρχική προσομοίωση και βαθμονόμηση μοντέλου.....	46
4.2	Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων μοντέλου.....	48
4.3	Διερεύνηση κλιματικών σεναρίων	54
4.3.1	Παρουσίαση αποτελεσμάτων για τη μέση μηνιαία απορροή.....	54
4.3.2	Παρουσίαση στατιστικών μεγεθών της μέσης μηνιαίας απορροής	61
5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	65
5.1	Σύνοψη.....	65
5.2	Συμπεράσματα.....	66
5.3	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	67
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ	68
	Ελληνικές αναφορές.....	68
	Ξενόγλωσσες αναφορές	70
	Ιστότοποι.....	72

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο «Διερεύνηση σεναρίων για την εκτίμηση της επίδρασης της κλιματικής αλλαγής στους υδατικούς πόρους μέσω υδρολογικής προσομοίωσης», πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο των προπτυχιακών σπουδών μου στο τμήμα Μηχανικών Τοπογραφίας και Γεωπληροφορικής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής. Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την επιβλέπουσα καθηγήτρια μου Ελισσάβητ Φελώνη, για την καθοδήγηση που μου πρόσφερε, τις συμβουλές, την βοήθεια και τον χρόνο που διέθεσε για την ολοκλήρωση της πτυχιακής μου εργασίας. Επίσης, ευχαριστώ τους καθηγητές του Τμήματος, κ. Ηλιοπούλου Πολυξένη και κ. Καραλή Σωτήρη- Θεοφάνη για την υποστήριξη της εξεταστικής διαδικασίας της εν λόγω διπλωματικής εργασίας, ως μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής.

Στο ίδιο πλαίσιο ευγνωμοσύνης, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές του Τμήματος για τη συμβολή τους στην επιστημονική και τεχνολογική μου συγκρότηση στα χρόνια της φοίτησής μου στο Τμήμα Μηχανικών Τοπογραφίας και Γεωπληροφορικής. Οφείλω επίσης ένα μεγάλο ευχαριστώ σε όλους εκείνους που συνέβαλαν ψυχικά στην ολοκλήρωση της εργασίας μου. Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου για την οικονομική τους υποστήριξη, καθώς και τους συγγενείς και τους φίλους για την ηθική υποστήριξη σε όλο το διάστημα των σπουδών μου.

N.K.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως θέμα την διερεύνηση σεναρίων για την εκτίμηση της επίδρασης της κλιματικής αλλαγής στους υδατικούς πόρους μέσω υδρολογικής προσομοίωσης. Η αποτίμηση των επιπτώσεων που έχει η κλιματική αλλαγή στο υδρολογικό καθεστώς σε επίπεδο λεκάνης απορροής (ΛΑΠ) πραγματοποιήθηκε μέσα από την αξιοποίηση επικαιροποιημένων σεναρίων κλιματικής αλλαγής, και ακολούθως πραγματοποιήθηκαν ενδεικτικές προσομοιώσεις ώστε να επιτευχθεί η ποσοτικοποίηση των επιπτώσεων σε μηνιαία βάση.

Για την υπό μελέτη υπολεκάνη απορροής εντός της ΛΑΠ του ποταμού Ευρώτα έγινε η υδρολογική προσομοίωση εφαρμόζοντας το υδρολογικό μοντέλο «Thomas abcd» για την ιστορική περίοδο 1970-2000 και για δύο μελλοντικές περιόδους 2030-2060 και 2060-2090. Στο πλαίσιο της βαθμονόμησης του μοντέλου, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα για την βροχόπτωση, την θερμοκρασία και την απορροή τα οποία πάρθηκαν από μετρήσεις που έγιναν από σταθμούς που βρίσκονται στην περιοχή, και ακολούθως για τη διερεύνηση σεναρίων αξιοποιήθηκαν πλεγματικά δεδομένα που παρέχει το πρόγραμμα EURO-CORDEX για τον Ευρωπαϊκό χώρο.

Πιο συγκεκριμένα επί της ανάλυσης, για να μπορέσουν να βρεθούν οι κατάλληλες για την περιοχή τιμές παραμέτρων του μοντέλου «Thomas abcd», αρχικά έγινε η βαθμονόμηση του μοντέλου με βάση διαθέσιμα μηνιαία δεδομένα που κατεγράφησαν από τον υδρολογικό σταθμό Βιβάρι, ο οποίος βρίσκεται στην έξοδο της ομώνυμης υπολεκάνης απορροής του ποταμού Ευρώτα και τα οποία αφορούσαν αφορούσαν την περίοδο 2005-2009. Τα συγκεκριμένα δεδομένα είχαν επεξεργαστεί καταλλήλως και προήλθαν από την πτυχιακή εργασία της Μαρίνου (2015). Η βαθμονόμηση πραγματοποιήθηκε δυο φορές, μια για το 60% της χρονοσειράς (και επαλήθευση με το 40% αντίστοιχα) και μια για το 70% (30% επαλήθευση), ώστε μέσω αυτής της διαδικασίας να προκύψουν κατάλληλες τιμές των παραμέτρων του μοντέλου: a , b , c , d , $S(0)$. Σαν επακόλουθο βήμα έγινε και η ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων, ώστε να υπάρξει μια ολοκληρωμένη εικόνα όσον αφορά την γενικότερη επιρροή που έχουν αυτές στο μοντέλο. Ακολούθως, οι χρονοσειρές που αφορούν σε κλιματικά σενάρια αξιοποιήθηκαν για τρεις περιόδους: 1970 - 2000 (περίοδος αναφοράς για λόγους σύγκρισης) και 2030 - 2090 (μελλοντική περίοδος για την οποία τα σενάρια παρουσιάζονται ανά επιμέρους τριακονταετία). Χρονοσειρές

βροχόπτωσης και θερμοκρασίας χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή των τελικών αποτελεσμάτων, αφού πρώτα επεξεργάστηκαν καταλλήλως για να μπορέσουν να εισαχθούν στο υδρολογικό μοντέλο. Για τον υπολογισμό της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής, που είναι απαραίτητο δεδομένο για την λειτουργία του υδρολογικού μοντέλου, επιλέχθηκε η μέθοδος Thornthwaite εξαιτίας των χαμηλών απαιτήσεων σε δεδομένα εισόδου, η οποία προστέθηκε στο σύνολο των υπολογισμών που διεξάχθηκαν στην παρούσα εργασία.

Η προσομοίωση του υδρολογικού μοντέλου έγινε για δεδομένα που αφορούσαν την ιστορική περίοδο και στην συνέχεια τα αποτελέσματα αυτής της προσομοίωσης συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή των πειραμάτων της κλιματικής αλλαγής με την χρήση δύο εκ των επικαιροποιημένων κλιματικών σεναρίων (RCP 4.5, RCP8.5). Το ένα είναι πιο ευνοϊκό (μέσο σενάριο, RCP4.5) και το δυσμενέστερο είναι το RCP8.5. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η αύξηση της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της μέσης μηνιαίας δυνητικής εξατμισοδιαπνοής, ως αναμενόταν. Μέσα από την ανάλυση ευαισθησίας που έγινε για τις παραμέτρους του μοντέλου «Thomas abcd» προέκυψε ότι η πιο ευαίσθητη παράμετρος είναι η c. Μέσω της διαδικασίας της προσομοίωσης για διάφορα σενάρια έγινε σαφές ότι η υπερετήσια τιμή για τη μέση μηνιαία απορροή παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις και προβλέπεται η σημαντική μείωση στις δύο μελλοντικές περιόδους που μελετήθηκαν.

Λέξεις - κλειδιά: Ευρώτας, Κλιματικά Σενάρια, Κλιματική Αλλαγή, προσομοίωση, μοντέλο, Thomas abcd, Thornthwaite, Υδατικοί Πόροι, απορροή, θερμοκρασία, βροχόπτωση, εξατμισοδιαπνοή.

ABSTRACT

The objective of this undergraduate thesis is the investigation of scenarios to assess the impact of climate change on water resources through a hydrological simulation. The impact of climate change was assessed through the use of updated climate change scenarios. The hydrological simulation for a subbasin in the Eurotas river basin was carried out by applying the hydrological model «Thomas abcd», for the historical period 1970-2000 and for two future periods 2030-2060 and 2060-2090.

Data on precipitation and temperature were used, which were taken from measurements recorded at stations located in the area (monthly data for 2005-2009) and from gridded datasets provided by the EURO-CORDEX program for the European domain (both for the historic period and for future projections). In order to find the appropriate model parameters' values for «Thomas abcd», the model was first calibrated using the available monthly timeseries of precipitation, temperature and runoff for Vivari, which is a subbasin of the Eurota River, for the period from 2005 to 2009. These data were appropriately processed in the frame of the postgraduate thesis of Marinou (2015).

The calibration was performed twice, once for the 60% and once for the 70% of the timeseries (accordingly, 40% and 30% of the timeseries used for verification process). The aim of this procedure was to obtain the suitable values of parameters a , b , c , d , $S(0)$. As a subsequent step, a sensitivity analysis on the model parameters was carried out in order to have a comprehensive view of their overall influence on the model.

Data relating the periods: (i) 1970-2000 (historic; reference period) and (ii) 2030-2090 (future projections, studied as two subperiods of 30 years each) were used for the hydrological model simulation. Particularly, for the calculation of the potential evapotranspiration (ET), which is a necessary input in the hydrological model, the Thornthwaite method was chosen as it only requires timeseries of temperature, and subsequently ET was added to the set of calculations that carried out in this thesis.

The simulation of the hydrological model was initially performed for a historical period between 2005 and 2009, where available records for the study area were used. Then, results of this simulation were compared with the results obtained by applying the climate change experiments using two of the updated climate scenarios (the moderate one RCP 4.5, and the worst-case scenario RCP8.5).

The results showed that an increase in average monthly temperature results in an increase in average monthly potential evapotranspiration, as expected. Based on a sensitivity analysis that was carried out for the model's parameters, it was found that the most sensitive parameter is c. Through the simulation process, it became clear that the interannual variability in monthly runoff is high, while mean monthly runoff is expected to decrease significantly in the future periods that examined.

Keywords: Eurotas, Climate Scenarios, Climate Change, simulation, model, Thomas abcd model, Thornthwaite, Water Resources, runoff, temperature, precipitation, evapotranspiration.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αντικείμενο εργασίας

Η παρούσα εργασία έχει ως αντικείμενο την ανάπτυξη και εφαρμογή ενός μοντέλου υδατικού ισοζυγίου για την περιοχή της λεκάνης απορροής του ποταμού Ευρώτα, και πιο συγκεκριμένα για την υπολεκάνη ρ. Βιβαρίου, για την οποία υπήρχαν διαθέσιμα μετεωρολογικά και υδρολογικά δεδομένα. Ακόμα εκτιμήθηκαν οι δυνητικές επιπτώσεις που έχει η κλιματική αλλαγή στους υδατικούς πόρους μέσω της διερεύνησης επικαιροποιημένων σεναρίων που αφορούν την κλιματική αλλαγή. Στην περιοχή του ποταμού Ευρώτα έγινε η εφαρμογή του υδρολογικού μοντέλου «Thomas abcd» για χρονικά διαστήματα που αφορούν το παρελθόν και το μέλλον για να προκύψουν αποτελέσματα προς σύγκριση. Για να μπορέσει να εφαρμοστεί το μοντέλο, πρέπει πρώτα να υπολογιστεί η δυνητική εξατμισοδιαπνοή, η οποία υπολογίστηκε μέσω της μεθόδου Thornthwaite, ελλείψει δεδομένων πέραν της θερμοκρασίας. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν παρουσιάζονται συνοπτικά μέσω της μέσης μηνιαίας απορροής για την περιοχή για τις υπόψη περιόδους και για κάθε σενάριο.

1.2 Διάρθρωση τεύχους

Το τεύχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας χωρίζεται στα εξής πέντε κεφάλαια:

- Στο 1^ο κεφάλαιο πραγματοποιείται η εισαγωγή στο αντικείμενο της εργασίας και επιχειρείται μια θεωρητική προσέγγιση του θέματος. Διατυπώνονται οι επιπτώσεις που έχει η κλιματική αλλαγή στους υδατικούς πόρους, παρουσιάζονται συνοπτικά προηγούμενες εργασίες που έχουν γίνει και αφορούν στις συνέπειες που έχει η κλιματική αλλαγή στους υδατικούς πόρους, και τέλος αναφέρονται τρόποι με τους οποίους μπορεί να γίνει η διαχείριση των πόρων σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία. Στο ίδιο κεφάλαιο καθορίζεται ο σκοπός της πτυχιακής εργασίας και περιγράφεται η διάρθρωση της.
- Το 2^ο κεφάλαιο περιλαμβάνει την περιγραφή της περιοχής μελέτης, δηλαδή τον ποταμό Ευρώτα και προσδιορίζεται η γεωγραφική του θέση και κάποιες γενικές πληροφορίες. Ακόμα, παρατίθενται στοιχεία για το φυσικό περιβάλλον, τα υδρολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής και το κλίμα που επικρατεί, περιγράφονται

τα γεωλογικά στοιχεία και οι χρήσεις γης, καθώς και οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες που λαμβάνουν χώρα στην περιοχή.

- Το 3^ο κεφάλαιο περιγράφει τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν και την επεξεργασία που έγινε σε αυτά. Αρχικά αξιολογούνται τα δεδομένα που προήλθαν από σχετική προηγούμενη εργασία για να μπορέσουν να χρησιμοποιηθούν και για τη βαθμονόμηση του υδρολογικού μοντέλου, που πραγματοποιήθηκε με σκοπό να προσδιοριστούν οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων του. Ακόμα περιγράφονται τα πλεγματικά δεδομένα που προήλθαν από την πηγή EURO-CORDEX (www.euro-cordex.net). Αναλύονται τα κλιματικά μοντέλα που υπάρχουν γενικότερα και πιο συγκεκριμένα αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία. Ακόμα περιγράφονται αναλυτικά τα μοντέλα «Thomas abcd»(Thomas et al., 1983), για την προσομοίωση του μηνιαίου υδατικού ισοζυγίου σε επίπεδο ΛΑΠ, και η προσέγγιση Thornthwaite (Thornthwaite, 1948) για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής, καθώς και οι παράμετροι αυτών.

- Στο 4^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την βαθμονόμηση του μοντέλου, στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων του, τα οποία και αναπαρίσταται με κατάλληλα διαγράμματα. Τέλος παρουσιάζονται τα τελικά αποτελέσματα της διαδικασίας της προσομοίωσης, δηλαδή συγκριτικά οι τιμές μηνιαίας απορροής για τα υπό μελέτη σενάρια.

- Στο 5^ο κεφάλαιο γίνεται μια σύνοψη όλων των διαδικασιών που ακολουθήθηκαν, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από το σύνολο των διαδικασιών και διατυπώνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα, σχετικές με τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

Τέλος παρατίθεται ο κατάλογος των βιβλιογραφικών αναφορών. Περιλαμβάνει αναφορές από έρευνες που αξιοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, και πηγές για έννοιες που αφορούν το θεωρητικό υπόβαθρο και τα μοντέλα που εφαρμόστηκαν.

1.3 Υδατικοί Πόροι και Κλιματική Αλλαγή

1.3.1 Γενικά περί υδατικών πόρων

Σύμφωνα με την Έκθεση της Τράπεζας Ελλάδος (www.bankofgreece.gr), οι υδατικοί πόροι αφορούν τις υδατικές ανάγκες που προκύπτουν από τις ανθρώπινες δραστηριότητες και την ικανοποίηση των αναγκών αυτών μέσα από την ροή και τα αποθέματα που υπάρχουν στο φυσικό περιβάλλον και είναι εκμεταλλεύσιμα.

Οι υδατικοί πόροι μπορούν να χαρακτηριστούν ως:

- Ανανεώσιμοι ή δυναμικοί (ροή)
- Μη ανανεώσιμοι (απόθεμα)
- Επιφανειακοί
- Υπόγειοι
- Φυσικοί ή δυνητικοί
- Ερευνήσιμοι

Τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα (βροχή, χιόνι, χαλάζι) αποτελούν την κύρια συνιστώσα στον υδρολογικό κύκλο και διανέμονται στην επιφάνεια της γης με την μορφή της εξάτμισης, της διαπνοής, της απορροής και της κατείσδυσης. Επομένως, από οποιαδήποτε αλλαγή γίνει στις κατακρημνίσεις, επηρεάζεται άμεσα και ο υδρολογικός κύκλος αλλά και το υδρολογικό και υδρογεωλογικό ισοζύγιο. Συνεπώς, οποιαδήποτε μεταβολή στο κλίμα επηρεάζει και μεταβάλλει την υδατική εικόνα στην περιοχή που συμβαίνει.

Στην περίπτωση της κλιματικής αλλαγής προβλέπεται να υπάρξει αύξηση της εξάτμισης και διαπνοής, αύξηση των αναγκών της άρδευσης και των τουριστικών αναγκών καθώς και αύξηση του ρυπαντικού φορτίου λόγω της αύξησης του ρυπαντικού φορτίου σε περιορισμένο όγκο υδατικού σώματος. Η διαφαινόμενη κλιματική αλλαγή έχει σημαντικές συνέπειες και στα υπόγεια υδατικά συστήματα. Αναλυτικότερα αναμένεται μειωμένη τροφοδοσία και ανανέωση του νερού των υδροφόρων οριζόντων από την μείωση των βροχοπτώσεων και την αύξηση της εξατμισοδιαπνοής. Αύξηση της υφαλμύρωσης των παράκτιων και υποθαλάσσιων υδροφόρων οριζόντων ειδικότερα των καρστικών, με προέλαση προς την ενδοχώρα του μετώπου υφαλμύρωσης λόγω του μειωμένου δυναμικού της χερσαίας υδατικής φάσης από τη μειωμένη τροφοδοσία και την υπεράντληση. Αύξηση της συγκέντρωσης ρυπαντικού φορτίου στα παράκτια υδατικά σώματα και στην θάλασσα λόγω της μικρότερης αραιώσης. Εντατικοποίηση της αποδόμησης των δελταϊκών περιοχών, που ήδη έχει ξεκινήσει λόγω της κατασκευής εγκάρσιων φραγμάτων στην ανάντη ζώνη και παραλλήλων αναχωμάτων στην πεδινή ζώνη του δέλτα. Αναμένεται ακόμα να υπάρξει ρύπανση ή αποξήρανση των παράκτιων υγροτόπων και τέλος επιδείνωση του φαινομένου της ερημοποίησης, λόγω του υδατικού ελλείματος και των εδαφικών μεταβολών.

1.3.2 Διαχείριση Υδατικών Πόρων σε συνθήκες Κλιματικής Αλλαγής

Το νερό είναι το κυριότερο συστατικό των οργανισμών του πλανήτη μας και έχει ανεκτίμητη αξία καθώς χωρίς αυτό δεν θα υπήρχε ζωή. Λόγω της ελεγχόμενης χρήσης του θεωρείται ένας ανανεώσιμος αλλά περιορισμένος πόρος.

Η κυριότερη πρόκληση που αναγεννιέται λόγω και της σημαντικότητας του νερού είναι αν θα μπορέσει να επιτευχθεί μια ορθολογική και βιώσιμη διαχείριση του υπό μεταβαλλόμενες συνθήκες. Η διαθέσιμη ποσότητα νερού είναι περιορισμένη και η κατανομή του στο χώρο και το χρόνο είναι άνιση (ΥΠΕΝ, 2022). Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο οι μηχανισμοί για την διαχείριση του έχουν ευρύ φάσμα καθώς σε κάθε χώρα υπάρχουν διαφορετικές κοινωνικοοικονομικές και πολιτικές συνθήκες αλλά και μεταξύ των υδατικών πόρων υπάρχουν διαφορές όσον αφορά τα χαρακτηριστικά τους. Λόγω των διαφορετικών συνθηκών που επικρατούν σε κάθε περιοχή ο τρόπος διαχείρισης των υδατικών πόρων θα πρέπει να προσαρμοστεί σε αυτές.

Όστόσο σε πολλές χώρες υπάρχει τεράστιο χάσμα σε διαφορετικά επίπεδα, με αποτέλεσμα η διαχείριση των υδατικών πόρων να μην ολοκληρώνει τον στόχο της. Κάποια βήματα έχουν γίνει από πολλές χώρες ώστε να μπορέσουν να μειώσουν αυτό το χάσμα προχωρώντας σε μεταρρυθμίσεις όπως είναι η αποκέντρωση και η εδραίωση υπηρεσιών τοπικής αυτοδιοίκησης. Ενώ ένα σύνολο άλλων χωρών έχουν οδηγηθεί προς την ιδιωτικοποίηση με στόχο να αξιοποιήσουν τις δεξιότητες και τους πόρους που υπάρχουν στις ιδιωτικές συμβάσεις. Παρόλα αυτά υπάρχει μεγάλο ποσοστό χωρών που δεν παρουσιάζουν κάποια πρόοδο όσον αφορά την διαχείριση των υδατικών πόρων. Πολλές μελέτες που έχουν γίνει δείχνουν ότι η διαχείριση των υδατικών πόρων δεν είναι κάτι εύκολο και για την επίτευξη αυτή, ως πρώτο βήμα θα πρέπει να επιτευχθεί ένας ισχυρός δεσμός μεταξύ της ενεργής κυβέρνησης, της κοινωνίας των πολιτών και του ιδιωτικού τομέα. Για να μπορέσει να έχει επιτυχία η διαχείριση θα πρέπει να διαρθρώνεται από τις αρχές της βιώσιμης ανάπτυξης. Να υπάρχει δίκαιη χρήση που αφορά την κοινωνική διάσταση, ενώ η αποδοτική χρήση του νερού και ο ρόλος του νερού στην οικονομική ανάπτυξη αφορά την οικονομική διάσταση. Στο επίπεδο της πολιτικής διάστασης υπάρχει ως πρόθεση να δοθούν ίσες ευκαιρίες για να υπάρξει επιρροή αλλά και για να παρακολουθηθούν οι πολιτικές διαδικασίες και τα αποτελέσματα αυτών. Ενώ η περιβαλλοντική διακυβέρνηση αφορά την αειφόρο χρήση του νερού και την ακεραιότητα του οικοσυστήματος τονίζοντας την θεμελιώδη σημασία ενός υγιούς περιβάλλοντος.

Ο Ελλαδικός χώρος διαθέτει ικανοποιητικό αριθμό επιφανειακών και υπόγειων υδατικών πόρων. Ωστόσο το πλεονέκτημα αυτό επισκιάζεται από την ανομοιόμορφη κατανομή των υδατικών πόρων στο χώρο και στο χρόνο, από την ανομοιόμορφη κατανομή της ζήτησης στο χώρο και τον χρόνο, από την γεωμορφολογία της χώρας, από την εξάρτηση της Βόρειας Ελλάδας από επιφανειακές απορροές των ποταμών που προέρχονται από γειτονικά κράτη αλλά και από πολλά άλλα. Έχοντας ως αποτέλεσμα την μείωση της ποσότητας των υδατικών πόρων καθώς και την δύσκολη αξιοποίησή τους. Για τους λόγους αυτούς η διαδικασία διαχείρισης των υδατικών πόρων έχει ως κύριο μέλημα της να μειώσει τους κίνδυνους και τους παράγοντες που βιώνει μια υποβαθμισμένη ποσοτικά ή ποιοτικά περιοχή.

Στην περίπτωση που κάποια περιοχή εμφανίζει έντονη έλλειψη νερού, η διαχείριση των υδάτων έχει ως πλάνο αρχικά να εξασφαλίσει ότι υπάρχουν επαρκή ύδατα για επιβίωση και ύστερα στοχεύει στη μεγιστοποίηση των υδάτων για την παραγωγή τροφίμων, βιομηχανιών προϊόντων καθώς και στη προστασία του φυσικού περιβάλλοντος. Η ποσότητα των υδάτων δεν μπορεί να καλύψει όλες τις ανάγκες των χρηστών καθώς ο καθένας έχει διαφορετικά συμφέροντα και στόχους αλλά όλοι καλύπτονται από μια πηγή. Ο συγκεκριμένος λόγος επιβάλλει την γέννηση ενός νέου σχεδίου το οποίο θα περιλαμβάνει περισσότερες πρακτικές. Αναλυτικότερα η αξιοποίηση των επιφανειακών υδάτων γίνεται με την κατασκευή υδραυλικών έργων όπως είναι οι ταμιευτήρες που έχουν ως στόχο να ελέγχουν και να ρυθμίζουν την παροχή των υδατορευμάτων.

Στην Ελλάδα υπάρχουν φράγματα τα οποία καλύπτουν τις αστικές και βιομηχανικές χρήσεις, εν τούτοις η έλλειψη κατάλληλης υποδομής στους ταμιευτήρες, τα φράγματα, τα εγγειοβελτιωτικά έργα και η ελλιπής συντήρηση στα αρδευτικά δίκτυα δημιουργούν τεράστιο πρόβλημα στην αξιοποίηση των υδατικών πόρων και εμφανίζονται με διαφορετικό τρόπο από τόπο σε τόπο στον χώρο της Ελλάδας. Οι υπόγειοι υδροφορείς είναι εξίσου σημαντικές πηγές και αξιοποιούνται σε περιπτώσεις όπου υπάρχει έλλειψη νερού ή περιόδους ξηρασίας. Υφίστανται περιοχές που έχουν ως κύρια πηγή τους το υπόγειο νερό και αντιμετωπίζουν προβλήματα υπεράντλησης δημιουργώντας έντονο προβληματισμό σχετικά με την βιωσιμότητα των υπόγειων υδάτων. Είναι μείζον ζήτημα να κατανοηθεί η λειτουργία του συστήματος του υδροφόρου ορίζοντα και η αξία του νερού καθώς δεν βρίσκεται σε αφθονία στη φύση ώστε να γίνει μια ορθολογική χρήση. Οι κυριότερες πρακτικές που αξιοποιούνται είναι η παρακολούθηση και ο έλεγχος των υδροφορέων, ο

τεχνητός εμπλουτισμός και η συνδυασμένη χρήση υπόγειου και επιφανειακού νερού. Αξίζει να σημειωθεί ότι η πρακτική του εμπλουτισμού στοχεύει στην αύξηση του δυναμικού των υπόγειων υδάτων με την εισαγωγή αυξημένων ποσοτήτων επιφανειακών υδάτων τα οποία διεισδύουν στο έδαφος και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε περιόδους μεγάλης ζήτησης. Η συνδυασμένη χρήση νερού έχει ως στόχο να αντισταθμίσει το έλλειμμα που υπάρχει κατά την ξηρή περίοδο αποθηκεύοντας περίσσεια νερού κατά την υγρή περίοδο. Η πρακτική αυτή, συνδέοντας πηγές νερών με διαφορετικά υδρολογικά και οικονομικά χαρακτηριστικά στοχεύει στην βελτιστοποίηση της χρήσης του νερού, αυξάνοντας την διάθεση και μειώνοντας το κόστος επένδυσης και λειτουργίας. Στην γεωργία, στην άρδευση των χώρων πρασίνου και στους κήπους αλλά και για το πλύσιμο πεζοδρομίων και σε πολλές ακόμα χρήσεις προβλέπεται από την διαχείριση των υδάτων να χρησιμοποιείται νερό κατώτερης ποιότητας όταν εμφανίζεται το φαινόμενο της έλλειψης νερού καλής ποιότητας. Μια ακόμα τεχνική που εφαρμόζεται είναι η χρήση των αστικών λυμάτων. Τα οποία αν και αποτελούνται από νερό περιλαμβάνουν πολλά τοξικά στοιχεία που μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα στην ανθρώπινη υγεία αλλά και λόγω της τοξικότητας του δεν μπορεί να αξιοποιηθεί ούτε στον τομέα της γεωργίας. Για τους λόγους αυτούς πριν την αξιοποίηση του εξετάζονται διάφοροι παράγοντες που αφορούν τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του εδάφους όπως είναι η διαπερατότητα, η διασπορά σωματιδίων κτλ. Τελευταία αλλά σημαντική τεχνική που χρησιμοποιείται είναι η εξοικονόμηση νερού που έχει ως στόχο της να προστατεύσει και να διατηρήσει τους υδατικούς πόρους και να περιορίσει την υποβάθμιση τους. Πιο συγκεκριμένα αποσκοπεί στο να μειώσει την ζήτηση και την κατανάλωση του νερού και να αυξήσει την αποδοτικότητα της χρήσης του νερού. Η εξοικονόμηση νερού μπορεί να εφαρμοστεί σε διάφορα επίπεδα είτε αφορά τα αστικά συστήματα, είτε την γεωργία, την βιομηχανία, την ενέργεια και πολλά ακόμα. Στο επίπεδο των αστικών συστημάτων γίνεται παρακολούθηση και μέτρηση του συστήματος ύδρευσης, γίνεται ακόμα υδρομέτρηση, τιμολόγηση του νερού, ανίχνευση και επισκευή διαρροών, συντήρηση, και αξιολόγηση της παροχής υπηρεσίας. Στο επίπεδο της βιομηχανίας περιλαμβάνεται η ανακύκλωση και η επαναχρησιμοποίηση του νερού. Όπου για την ανακύκλωση χρησιμοποιείται το νερό που χρησιμοποιήθηκε για την ίδια διαδικασία αφού έχει περάσει από μια απλή επεξεργασία πρώτα. Ενώ στην επαναχρησιμοποίηση αφού έχει γίνει απλή

επεξεργασία του νερού χρησιμοποιείται σε διαφορετική διαδικασία εφόσον δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ίδια (Κατηρτζίδου, 2018).

1.3.3 Επιπτώσεις της Κλιματικής Αλλαγής στους Υδατικούς Πόρους

1.3.3.1 Γενικά περί κλιματικής αλλαγής

Η κλιματική αλλαγή ορίζεται ως η συστηματική μεταβολή των κλιματολογικών μεταβλητών λόγω των αλλαγών στις περιβαλλοντικές συνθήκες και στις ανθρώπινες δραστηριότητες. Οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής έχουν αντίκτυπο στους υδατικούς πόρους και κατά συνέπεια και στα υδατικά οικοσυστήματα. Οι αλλαγές εντοπίζονται στα κατακρημνίσματα, στην εξατμισοδιαπνοή, στην άνοδο της θερμοκρασίας και μετέπειτα στην απορροή, την εδαφική υγρασία, τα υπόγεια ύδατα και το υδατικό ισοζύγιο.

Σε παγκόσμιο επίπεδο υπάρχει αλλαγή στην βροχόπτωση, αύξηση της έντασης των ακραίων συμβάντων (ξηρασία), αύξηση της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής, μείωση στο ποσοστό των χιονοπτώσεων και μετατόπιση της περιόδου τήξης ως προς την χειμερινή περίοδο και επιμήκυνση της ξηρής περιόδου. Η αύξηση της μέσης στάθμης της θάλασσας έχει ως αποτέλεσμα την εισβολή του θαλασσινού νερό στον υπόγειο υδροφόρα και την αλλαγή στις εκβολές των ποταμών. Η μείωση της βασικής απορροής, η διακοπή της καλής οικολογικής κατάστασης των ποταμών και η επίδραση σε ολόκληρο το οικοσύστημα είναι οι εμφανείς επιπτώσεις που έχει η κλιματική αλλαγή στον υδρολογικό κύκλο (Μάρης και Παπαρρίζος, 2020).

Πιο συγκεκριμένα όσον αφορά την πραγματική και δυνητική εξατμισοδιαπνοή δεν έχουν γίνει πολλές μετρήσεις σχετικά με την τάση που ακολουθούν. Την πορεία που έχουν οι μεταβολές στις βροχοπτώσεις ακολουθεί και η παγκόσμια εξατμισοδιαπνοή της επιφάνειας του εδάφους. Έκτος από την υγρασία, η διαθεσιμότητα της ενέργειας και των ανέμων επηρεάζουν την εξατμισοδιαπνοή. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η δυνητική εξατμισοδιαπνοή θα αυξηθεί παγκοσμίως λόγω της αυξημένης ικανότητας της ατμόσφαιρας να συγκρατεί το νερό εξαιτίας των υψηλών θερμοκρασιών. Γενικότερα οι μεταβολές στην εξατμισοδιαπνοή επηρεάζονται από τις αλλαγές που συμβαίνουν στις βροχοπτώσεις και στον κλιματικό εξαναγκασμό και κατά συνέπεια αυτά επηρεάζουν το ισοζύγιο της απορροής, την εδαφική υγρασία, το νερό των ταμειυτήρων, των υπόγειων υδάτων και στην υφαλμύριση των ρηχών υδροφόρων οριζόντων.

Οι μεταβολές που υπάρχουν στο ύψος και την χρονική περίοδο των κατακρημνισμάτων και αν αυτά είναι χιόνι ή βροχόπτωση είναι οι κυριότεροι

παράγοντες που συμβάλλουν για τις αλλαγές που υπάρχουν στις ροές των ποταμών, στην στάθμη των λιμνών και των υγροτόπων. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα μοντέλων η απορροή θα παρουσιάσει μείωση στη νότια Ευρώπη και αύξηση στην νοτιοανατολική Ασία και στα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη. Σύμφωνα με τα Μοντέλα Γενικής Κυκλοφορίας η ετήσια απορροή των ποταμών στην περιοχή της Ατλαντικής και της βόρειας Ευρώπης θα αυξηθεί ενώ στην Μεσόγειο, την κεντρική και ανατολική Ευρώπη θα μειωθεί (Κουκούλη, 2014)

1.3.3.2 Επιπτώσεις και Κλιματική προσαρμογή

Για την καλύτερη προσέγγιση όσον αφορά τις συνέπειες που θα έχει η κλιματική αλλαγή στους υδατικούς πόρους για την περιοχή της Ελλάδας έγιναν προσεγγίσεις του υδρολογικού ισοζυγίου, για τις περιόδους 2021- 2050 και 2071-2100. Στην συγκεκριμένη έρευνα χρησιμοποιήθηκαν μοντέλα εκτίμησης κλιματικών μεταβολών (βροχόπτωση και εξατμισοδιαπνοή). Στις δύο εκτιμήσεις που έγιναν προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα: για την περίοδο 2021-2050 θα υπάρξει μείωση των τιμών ύψους βροχής κατά 3 με 7% και του συνολικού υδατικού δυναμικού κατά 7 με 20%. Ενώ για την περίοδο 2071-2100 θα υπάρξει μείωση της βροχόπτωσης κατά 14 με 22% και 30 με 54% στο υδατικό δυναμικό. Το συμπέρασμα στο οποίο κατέληξαν οι ερευνητές της Έκθεσης (www.bankofgreece.gr) ήταν το γεγονός ότι το 70 με 80% του συνολικού υδατικού δυναμικού της Ελλάδας αποτελεί μέρος της ζήτησης νερού προς άρδευση, σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα της μελέτης προκύπτει ότι η μεταβολή που θα προκληθεί θα έχει άμεση συνέπεια στο είδος και την έκταση των καλλιεργειών σε συνδυασμό με τις αλλαγές αγροτικών πρακτικών.

Η προσαρμογή στις επερχόμενες μεταβολές του κλίματος είναι απαραίτητη και αναπόφευκτη. Οι χώρες που δεν θα λάβουν κατάλληλα μέτρα προσαρμογής δεν θα μπορέσουν να εφαρμόσουν ένα σχέδιο για την υδατική διαχείριση. Ως συνέπεια στις χώρες αυτές εκτός από την μείωση των βροχοπτώσεων, την αύξηση της θερμοκρασίας, την εξάτμιση και τις ανάγκες των υδατικών καταναλώσεων, θα προστεθεί και η αλόγιστη άρδευση την περίοδο του καλοκαιριού με κανονάκια και κατακλύσεις. Ακόμα θα υπάρξουν απώλειες νερού από τα παλιά τμήματα των υδρευτικών δικτύων των πόλεων, αύξηση στην υδατική κατανάλωση λόγω της αύξησης του πληθυσμού, η βελτίωση του επιπέδου ζωής συνδέεται άμεσα με την υδατική κατανάλωση το οποίο σημαίνει ότι θα υπάρξει επέκταση των εξοχικών κατοικιών, πάρκων κ.α. Αλληλένδετη είναι και η αύξηση της εξατμισοδιαπνοής και η αύξηση της άρδευσης καθώς αγροτικές περιοχές θα μετατραπούν σε τουριστικές.

Η προσαρμογή θα είναι σύνθετη και θα υπάρξουν πολλοί περιορισμοί που θα πρέπει να αντιμετωπιστούν. Στην εφαρμογή πολιτικών προσαρμογής έχουν σημαντικό ρόλο οι κυβερνήσεις οι οποίες θα πρέπει να επινοηθούν και τελικά να εφαρμόσουν πολιτικές και οικονομικές οδηγίες καθώς και να προσφέρουν σχετική υποστήριξη στον ιδιωτικό τομέα και στους πολίτες.

Ωστόσο η προσαρμογή έχει και άλλες πλευρές για τις οποίες θα πρέπει να γίνουν μεγαλύτερες προβλέψεις και σχεδιασμοί αλλά και να υπάρξει γνώση και τεχνολογία που θα αφορά το παγκόσμιο όφελος.

Η προσαρμογή έχει σημαντικό ρόλο για την αντιμετώπιση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής, προσφέροντας παράλληλα υποστήριξη στην βιώσιμη ανάπτυξη και ενίσχυση της οικονομικής δραστηριότητας σε τρωτούς τομείς.

Συγκεκριμένα η Ελλάδα βιώνει ήδη τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής με την αύξηση της θερμοκρασίας και της γενικής υδατικής κατανάλωσης, την μείωση του προσφερόμενου νερού, την αύξηση του κόστους των εισαγόμενων προϊόντων, την εντατικοποίηση των αρδεύσεων κ.λπ. Οι μεταβολές στο καιρό και το κλίμα είναι οι πρώτες ενδείξεις για την εφαρμογή της προσαρμογής. Επόμενο βήμα είναι η προετοιμασία για μελλοντικές επιπτώσεις και ανάληψη πρωτοβουλιών, όπως να χρησιμοποιηθούν πιο ανθεκτικές καλλιέργειες στην ξηρασία ή να βελτιωθούν τα αντιπλημμυρικά έργα. Πολλές θα είναι οι προσαρμογές που θα συμβούν καθώς θα υπάρξουν ακραία καιρικά φαινόμενα όπως θερμά καλοκαίρια με κύματα καταιγίδων τα οποία θα αποτελέσουν σημαντικά σήματα για την κατεύθυνση της διασποράς της γνώσης και της πληροφορίας. Οι μελετητές επισημαίνουν ότι η επαγρύπνηση και η άμεση αντιμετώπιση είναι επιτακτική. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι για το πεδίο των υδατικών συστημάτων θα υπάρξει εκ νέου ένα πλήρες σχέδιο συνδυασμένης υδατικής διαχείρισης και διορθωτικές επεμβάσεις περιορισμού των μεγάλων υδατικών απωλειών.

1.3.3.3 Ενδεικτικές μελέτες περίπτωσης

Ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα που αφορά ολόκληρο τον πλανήτη είναι η κλιματική αλλαγή και οι επιπτώσεις που έχει αυτή σε παγκόσμιο επίπεδο. Η σοβαρότητα του ζητήματος έχει πυροδοτήσει την έναρξη πολλών ερευνών που έχουν ως αντικείμενο μελέτης τους την κλιματική αλλαγή και τις επιπτώσεις που έχει αυτή. Μια από τις εργασίες που δημοσιεύτηκε επί του θέματος (Varanou et al., 2002) είχε ως αντικείμενο της τον αντίκτυπο που έχει η κλιματική αλλαγή στην ποσότητα και την ποιότητα του νερού. Στην εν λόγω εργασία, ως περιοχή μελέτης ορίστηκε η λεκάνη

απορροής Αλή Εφέντη που αποτελεί υπολεκάνη του ποταμού Πηνειού. Το εννοιολογικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση είχε εφαρμοστεί για την προσομοίωση του κύκλου νερού και για την μεταφορά του αζώτου εντός της λεκάνης απορροής. Τα αποτελέσματα από τα έξι μοντέλα γενικής κυκλοφορίας χρησιμοποιήθηκαν για τις χρονοσειρές της θερμοκρασίας και της βροχόπτωσης, ως δεδομένα εισόδου. Για όλα τα σενάρια παρατηρήθηκε μείωση στην απορροή και αύξηση στο μέγεθος των πλημμυρών για ορισμένες περιόδους επαναφοράς. Ακόμα σημειώνεται ότι οι αλλαγές στην απορροή των επιφανειακών υδάτων επηρεάζουν τις απώλειες του αζώτου, με αποτέλεσμα την ετήσια μείωση της τιμής του αζώτου στα υδάτινα σώματα. Από την εν λόγω έρευνα εξήχθησαν αρκετά συμπεράσματα:

- Αν και τα σενάρια της κλιματικής αλλαγής που χρησιμοποιήθηκαν προήλθαν από διαφορετικά μοντέλα γενικής κυκλοφορίας και για διαφορετικές χρονικές περιόδους, όλα παρουσίαζαν ένα θερμότερο και ξηρότερο μέλλον για την περιοχή μελέτης έχοντας ως αποτέλεσμα την μειωμένη μηνιαία απορροή.
- Δεν σημειώνονται σημαντικές αλλαγές στην πραγματική εξατμισοδιαπνοή, με εξαίρεση τους καλοκαιρινούς μήνες στους οποίους οι συνθήκες ξηρού εδάφους οδηγούν στην μείωση της μεταβλητής αυτής.
- Η μεταβολή στο κλίμα είναι σημαντική αλλά δεν επιδρά ιδιαίτερα για την ανάπτυξη των πλημμυρών. Η αβεβαιότητα σε μια πιο λεπτή χρονική κλίμακα (που μελετάται το θέμα των πλημμυρών) εξακολουθεί να είναι μεγάλη, παρόλα αυτά υπάρχουν ενδείξεις για αύξηση του μεγέθους των πλημμυρών.
- Παρατηρούνται απώλειες στο νιτρικό και οργανικό άζωτο για τους μήνες όπου τα σενάρια προβλέπουν μειωμένη βροχόπτωση.
- Οι αλλαγές στην βροχόπτωση θα έχουν αντίκτυπο στην επιφανειακή απορροή και στο ρυθμό της διάβρωσης των εδαφών.

Μια ακόμα έρευνα που προηγήθηκε (Mimikou et al., 2000) είχε ως στόχο την αξιολόγηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στους υδατικούς πόρους, δηλαδή στην επιφανειακή απορροή και στην ποιότητα του νερού. Στην συγκεκριμένη εργασία εξετάστηκαν δύο σενάρια κλιματικής αλλαγής που βασίζονται στα μοντέλα γενικής κυκλοφορίας (GCM) HadCM2 και UKHI. Εφαρμόστηκε το εννοιολογικό υδρολογικό μοντέλο WBUDG για την προηγούμενη λεκάνη απορροής Αλή Εφέντη (υπολεκάνη του ποταμού Πηνειού) στην κεντρική Ελλάδα, προσομοιώνοντας την επίδραση των δύο σεναρίων κλιματικής αλλαγής στην μέση μηνιαία απορροή. Ακόμα χρησιμοποιήθηκε ένα νέο μοντέλο ροής R-Qual για την προσομοίωση της ποιότητας

του νερού κατάντη μιας σημειακής πηγής υπό τρέχουσες και μεταβαλλόμενες κλιματικές συνθήκες. Οι προσομοιωμένες παράμετροι περιλαμβάνουν μηνιαίες συγκεντρώσεις για BOD, DO και NH_4^+ . Μετά την ολοκλήρωση της ερευνητικής εργασίας εξήχθησαν αρκετά συμπεράσματα:

- Και τα δύο κλιματικά σενάρια κατέληξαν σε λογικά και συνεπή αποτελέσματα. Το σενάριο HadCM2 έδινε πιο σημαντικές αλλαγές από το σενάριο ισορροπίας UKHI.
- Οι τιμές για την μέση ετήσια απορροή φαίνεται να μειώνονται.
- Οι τιμές για την μέση χειμερινή απορροή για τους μήνες της υγρής περιόδου, Νοέμβριο - Απρίλιο, φαίνεται να μειώνεται.
- Οι τιμές για την μέση θερινή απορροή για τους μήνες Μάιο - Οκτώβριο αναμένεται να έχουν σημαντική μείωση.
- Συνάγεται επίσης το συμπέρασμα ότι τα αποτελέσματα της έρευνας για την αλλαγή της απορροής είναι σύμφωνα με άλλες έρευνες που έχουν γίνει και σε άλλες λεκάνες απορροής για την Ελλάδα.
- Παρατηρήθηκε υποβάθμιση στην ποιότητα του νερού με αυξημένες τιμές της BOD και NH_4^+ και μειωμένη την τιμή της DO λόγω της απώλειας της ικανότητας για αραίωση και εξαιτίας των μειωμένων απορροών.
- Επιπλέον η υποβάθμιση της ποιότητας του νερού παρατηρείται τους καλοκαιρινούς μήνες, όπου και τα δύο κλιματικά σενάρια προβλέπουν την μεγαλύτερη μείωση των βροχοπτώσεων.

Αξιοσημείωτη είναι μια ακόμα έρευνα που δημοσιεύτηκε για την περιοχή του Ιράν (Abbaspour et al., 2009) και είχε ως στόχο να χρησιμοποιήσει ένα υδρολογικό μοντέλο ώστε να μελετηθούν οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στους υδατικούς πόρους της χώρας. Το υδρολογικό μοντέλο δημιουργήθηκε για την περιοχή εφαρμόζοντας το μοντέλο SWAT (Soil and Water Assessment Tool) και βαθμονομήθηκε για την περίοδο 1980 με 2002 χρησιμοποιώντας τις ημερήσιες απολήψεις των ποταμών και στοιχεία για την ετήσια απόδοση σίτου σε επίπεδο υπολεκάνης. Τα μελλοντικά κλιματικά σενάρια αφορούσαν τις περιόδους 2010 με 2040 και 2070 με 2100 λαμβάνοντας υπόψη το Παγκόσμιο Καναδικό Μοντέλο Σύζευξης CGCM 3.1 για τα σενάρια A1B, B1 και A2 για τα οποία αξιοποιήθηκαν 37 κλιματικοί σταθμοί σε όλη την χώρα. Στην συνέχεια εφαρμόστηκε το υδρολογικό μοντέλο για τις περιόδους αυτές με σκοπό να προσδιοριστεί η επίδραση της κλιματικής αλλαγής στις μελλοντικές βροχοπτώσεις, τους υδατικούς πόρους και

τελικά στην απόδοση καλλιέργειας σιταριού στην χώρα. Μετά την ολοκλήρωση της μελέτης εξήχθησαν αρκετά συμπεράσματα:

- Από τα μελλοντικά σενάρια διαπιστώθηκε ότι οι υγρές περιοχές της χώρας θα δεχθούν περισσότερες βροχοπτώσεις ενώ οι ξηρές περιοχές θα δεχθούν λιγότερες, εντείνοντας περαιτέρω το πρόβλημα της έλλειψης.
- Η ανάλυση των ημερήσιων τιμών έντασης της βροχόπτωσης έδειξαν πιο συχνές και με μεγαλύτερη ένταση πλημμύρες στις υγρές περιοχές, και παρατεταμένη ξηρασία στις ξηρές περιοχές.
- Σε επαρχιακό επίπεδο οι διαφορές των 3 σεναρίων ήταν μικρότερες σε σχέση με την αβεβαιότητα του υδρολογικού μοντέλου.
- Σε επίπεδο υπολεκάνης τα τρία κλιματικά σενάρια παράγαν διαφορετικά αποτελέσματα για τις ξηρές περιοχές της χώρας ενώ τα αποτελέσματα για τις υγρές περιοχές ήταν λίγο πολύ παρόμοια.

2 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ: ΕΥΡΩΤΑΣ ΠΟΤΑΜΟΣ

2.1 Γενικές Πληροφορίες - Γεωγραφική τοποθέτηση

Ο ποταμός της Λακωνίας βρίσκεται στο νότιο τμήμα της Πελοποννήσου, τμήματα του περιλαμβάνονται στον νομό Αρκαδίας, νότια της Μαντινείας και στον Αλφειό (Σχήμα 1). Το μήκος του φτάνει τα 90 χιλιόμετρα. Ο Ταΰγετος και ο Πάρνωνας είναι τα δύο βουνά εκ των οποίων διέρχεται ο ποταμός ενώ στην συνέχεια περνάει από την Σπάρτη καταλήγοντας στον Λακωνικό κόλπο όπου και σχηματίζει ένα δέλτα αποτελώντας έναν από τους σημαντικότερους υδροβιότοπους της Νότιας Ελλάδας. Οι σημαντικότεροι παραπόταμοι, που δημιουργούνται λόγω των δύο βουνών που περιβάλλουν τον ποταμό, είναι ο Γερακάρης και ο Αρδελολάγκαδος από τον Ταΰγετο και η Κελεφίνα, ο Βασιλοπόταμος, το Μεγάλο Ρέμα και ο Μαριόρεμας από τον Πάρωνα. Οι δύο κυριότερες κοιλάδες της περιοχής είναι η κοιλάδα της Σπάρτης και η πεδιάδα της Σκάλας. Η λεκάνη απορροής περιλαμβάνει ένα τμήμα της πεδιάδας των Μολάων, πιο συγκεκριμένα το τμήμα που βρίσκεται δίπλα στην θάλασσα του Γυθείου. Τα νερά του ποταμού Ευρώτα έχουν τεράστια αξία για την ευρύτερη περιοχή καθώς υδρεύονται οικισμοί, αρδεύεται το μεγαλύτερο τμήμα της καλλιεργήσιμης έκτασης και συντηρούνται πολλές οικογένειες (Naturagraeca, 2022). Για τους λόγους που προαναφέρθηκαν από την αρχαιότητα ως και σήμερα ο ποταμός Ευρώτας αποτελεί ένα σύμβολο για την Λακωνία καθώς είναι ένας από τους σημαντικότερους ποταμούς της Ελλάδας.

Όσον αφορά την διοίκηση, το μεγαλύτερο τμήμα της λεκάνη απορροής του Ευρώτα ανήκει στον νομό Λακωνίας, ενώ μικρότερα τμήματα που βρίσκονται βόρεια και βορειοανατολικά ανήκουν στο νομό Αρκαδίας. Στα Νότια οροθετείται από τον Λακωνικό κόλπο. Η λεκάνη απορροής απαρτίζεται από 95 δημοτικά διαμερίσματα εκ των οποίων τα 90 βρίσκονται στο νομό Λακωνίας ενώ τα υπόλοιπα 5 ανήκουν στον νομό Αρκαδίας (Σκουλικίδης κ.ά., 2008).



Σχήμα 1 Χάρτης για την ιστορία της περιοχής, που καταγράφει τη μορφολογία της ευρύτερης περιοχής μελέτης (Πηγή: Karlan et al., 1995).

2.2 Φυσικό περιβάλλον

Ο ποταμός Ευρώτας παρόλο που στη διαδρομή που ακολουθεί έχουν γίνει αρκετές παρεμβάσεις έχει δημιουργήσει όμορφα τοπία και ιδιαίτερους βιότοπους. Το Δέλτα του ποταμού αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους υδροβιότοπους, αυτός είναι και ο λόγος που η συγκεκριμένη περιοχή περιλαμβάνεται στο ευρωπαϊκό δίκτυο Natura.

Λόγω των οικισμών που υπάρχουν κοντά στην περιοχή του ποταμού οι εσπεριδοειδείς καλλιέργειες έχουν αυξηθεί με αποτέλεσμα να μεταβάλλουν την φυσιογνωμία της περιοχής η οποία πλέον εμφανίζεται στο ρου του ποταμού.

Οι αμμοθίνες, οι αλμυρόβαλτοι, οι εποχιακές και μόνιμες λιμνοθάλασσες, οι καλαμιώνες, οι τάφροι και οι θαμνώνες καταλαμβάνουν σημαντικό μέρος της περιοχής του ποταμού. Κοντά στην περιοχή του ποταμού φύονται ιδιαίτερα και

σπάνια φυτά όπως είναι η υδροχαρής κίτρινη ίριδα *Iris pseudacorus*. Άλλα αξιοσημείωτα φυτά είναι το υδροχαρές *Lythrum salicaria*, το ορνιθόγαλο *Ornithogalum divergens*, το *Alisma plantago aquatica* και η ίριδα *Iris unguicularis*.

Η χλωρίδα της περιοχής έχει μεγάλη ποικιλία όπως και η πανίδα καθώς από την Ελληνική Ορνιθολογική Εταιρία έχει χαρακτηριστεί ως μια σημαντική περιοχή για τα πουλιά της Ελλάδας. Έχουν καταγραφεί 210 είδη υδρόβιων και αρπακτικών πουλιών, με κάποια από αυτά να είναι οι σταχτοτσικνιάδες, οι λευκοτσικνιάδες, οι μικροτσικνιάδες, πορφυροτσικνιάδες, οι νυχτοκόρακες και οι μικροτσικνιάδες τα οποία μπορεί να τα συναντήσει κανείς σε όλο το μήκος του ποταμού. Ακόμα στην κατηγορία των ορνιθών ανήκουν τα σταβλοχελιδονα, οι σταχτάρες, οι καρδερίνες, οι αμπελουργοί, οι αετομάχοι, οι κοκκινοκεφαλάδες, οι συκοφάγοι και οι τσιφτάδες.

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο ποταμός Ευρώτας αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους ποταμούς της Ευρώπης λόγω της ιχθυοπανίδας του. Καθώς εμφανίζονται 3 ενδημικά είδη όπως είναι ο λακωνικός πελαργός *Pelagus laconicus*, η καιαδική μενίδα *Squalius keadicus* και η χρυσή μενίδα *Tropidophoxinellus spartiaticus*. Κάποια άλλα είδη είναι το χέλι *Anguilla anguilla*, το κουνουπόψαρο *Gambusia holbrooki* και η ποταμοσαλιάρα *Salaria fluviatilis* (Naturagraeca, 2022).

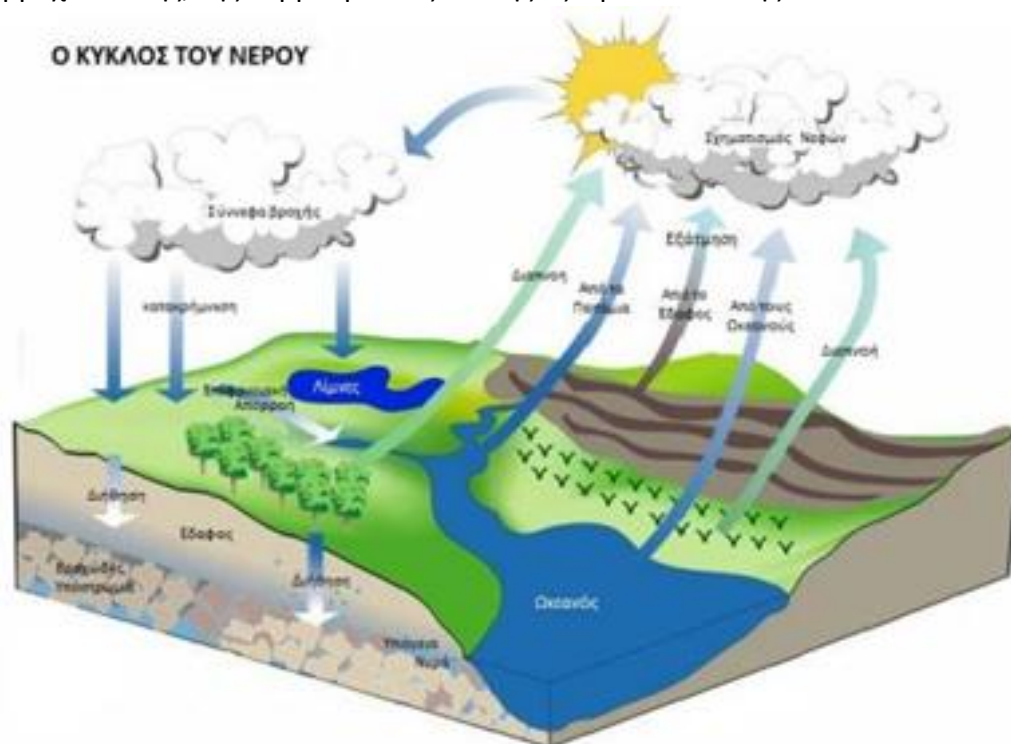
2.3 Υδρολογικά στοιχεία και κλίμα

2.3.1 Γενικοί ορισμοί

Με βάση την ξένη βιβλιογραφία ο όρος λεκάνη απορροής ορίζεται σε σχέση με ένα σημείο (θέση) πάνω σε έναν υδατόρευμα (ποταμό, ρυάκι κ.λπ.) και είναι η γήινη επιφάνεια από την οποία το νερό, ρέοντας επιφανειακά, θα συρρεύσει στη συγκεκριμένη θέση. Κάθε λεκάνη απορροής περιορίζεται και χωρίζεται από τις άλλες που την περιβάλλουν από μια κλειστή γραμμή, καλούμενη υδροκρίτης, η οποία ενώνει τα υψηλότερα σημεία του εδαφικού αναγλύφου (Καραλής, 2019). Τα χαρακτηριστικά της (τοπογραφία, γεωλογία, χρήσεις γης) διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στον προσδιορισμό της ποσότητας, της ποιότητας και του χρόνου της ροής του ρεύματος στην έξοδο, των εκροών των υπόγειων υδάτων καθώς και των περιοχών συσσώρευσης επιφανειακής απορροής. Το νερό φτάνοντας στην επιφάνεια του εδάφους ως κατακρημνίσματα έχει τρεις δυνατότητες. Αρχικά μπορεί να κατεισδύσει στο έδαφος, εμπλουτίζοντας τους υπόγειους υδροφορείς και η ποσότητα αυτή αποτελεί την βαθιά διήθηση. Έπειτα μπορεί να ρεύσει επιφανειακά και μέσου του υδρογραφικού δικτύου να καταλήξει στην θάλασσα ή σε κάποιο άλλο επιφανειακό

αποδέκτη όπως λίμνη, ποταμός και αυτή η ποσότητα αποτελεί την επιφανειακή απορροή. Σημαντικό είναι να τονίσουμε ότι μπορεί να εξατμιστεί από την επιφάνεια του εδάφους, την επιφάνεια του υδρογραφικού δικτύου ή να διαπνευστεί από τα φυτά και σε αυτές τις περιπτώσεις η ποσότητα αυτή ανήκει στην εξατμισοδιαπνοή (Ζαγανά, 2015).

Η σωστή αξιοποίηση και η ορθολογική διαχείριση των υδατικών πόρων προϋποθέτουν την ποσοτική εκτίμηση των διαφόρων φάσεων του υδρολογικού κύκλου (Σχήμα 2), που οδηγεί στην αξιόπιστη αναπαράσταση των σχέσεων βροχής - απορροής. Η διερεύνηση της σχέσης αυτής πραγματοποιείται μέσω κατάλληλων υδρολογικών μοντέλων. Το μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί και στην εν λόγω εργασία αφορά στην αναπαράσταση του υδατικού ισοζυγίου γνωρίζοντας τις τιμές της βροχόπτωσης, της θερμοκρασίας και της εξατμισοδιαπνοής.



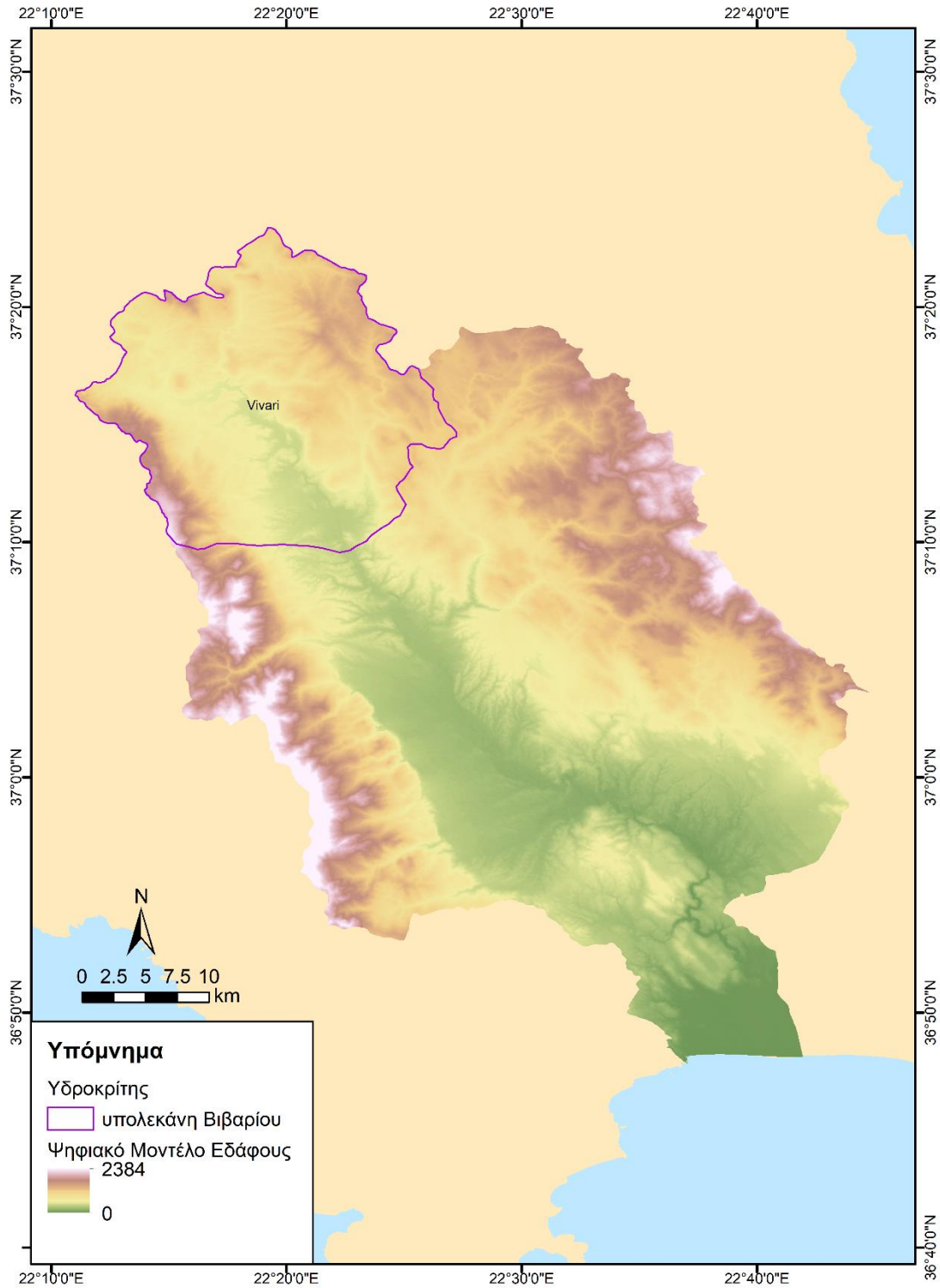
Σχήμα 2 Απλοποιημένη γραφική απεικόνιση του υδρολογικού κύκλου (Πηγή: Μοριανού, 2014).

2.3.2 Χαρακτηριστικά περιοχής μελέτης

Με βάση την έκθεση του Ελληνικού Κέντρου Θαλάσσιων Ερευνών (<http://imbriw.hcmr.gr>) η λεκάνη απορροής του ποταμού έχει έκταση 2.418 τετραγωνικά χιλιόμετρα, εκ των οποίων τα 371,48 km² αντιστοιχούν στην υπό μελέτη

υπολεκάνη ρ. Βιβαρίου στα ΒΔ (Σχήμα 3). Έχει μέσο υψόμετρο 562 μέτρα. Ως μέση κλίση έχει 19% (Σκουλικίδης κ.ά., 2008).

ΨΗΦΙΑΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΔΑΦΟΥΣ ΛΑΠ ΕΥΡΩΤΑ



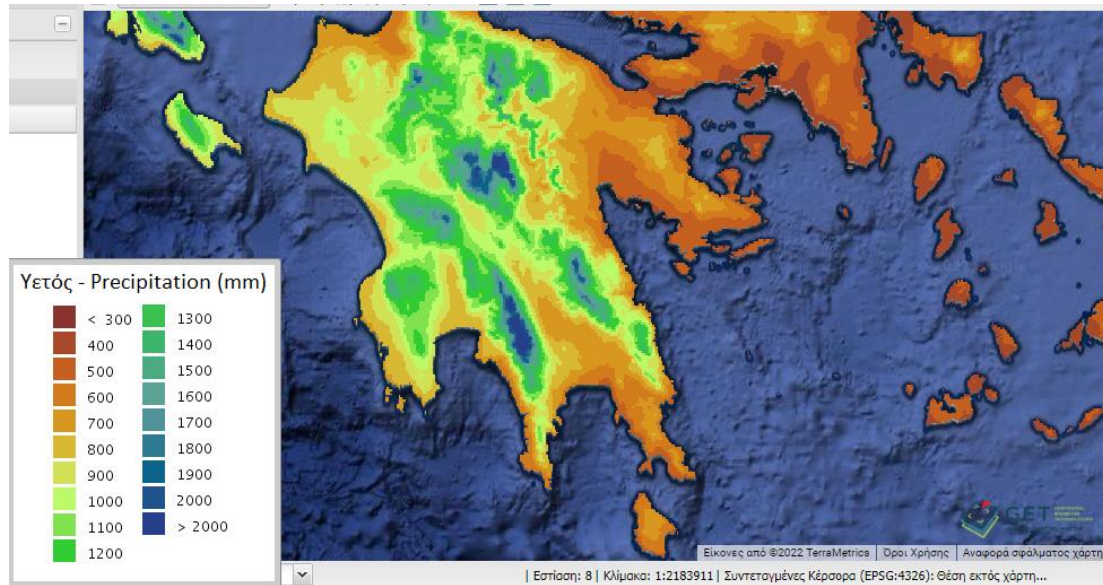
Σχήμα 3 Χάρτης ΨΜΕ ΛΑΠ Ευρώτα (Ιδία επεξεργασία).

Σύμφωνα με τα δεδομένα που δίνει ο Κλιματικός Άτλαντας της Ελλάδας (climatlas.hnms.gr, Σχήματα 4-7) η μέση ετήσια βροχόπτωση στην περιοχή κυμαίνεται από 600 με 900 mm, η ελάχιστη θερμοκρασία κυμαίνεται από 6 με 13 °C ενώ η μέγιστη θερμοκρασία κυμαίνεται από 19 με 22 °C . Τέλος η μέση θερμοκρασία για την περιοχή μελέτης κυμαίνεται από 14 με 19 °C.

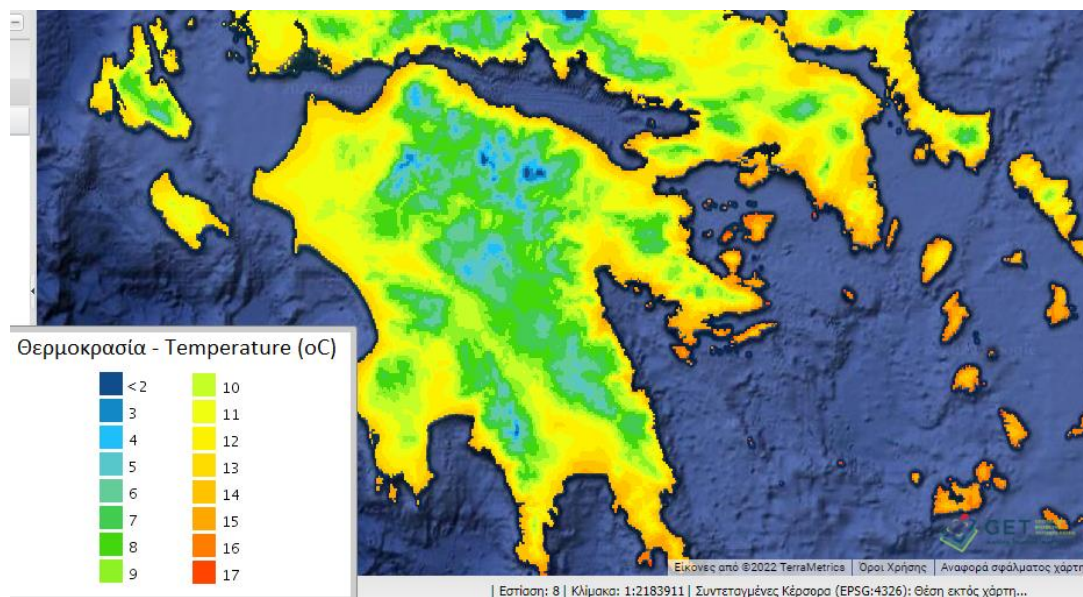
Το κλίμα στην λεκάνη απορροής του ποταμού Ευρώτα χαρακτηρίζεται ως μεσογειακό κλίμα καθώς τα καλοκαίρια είναι πολύ θερμά ενώ οι χειμώνες πολύ ψυχροί, με μέση ετήσια θερμοκρασία να είναι 16 °C. Από τον Οκτώβριο ως και τον Μάρτιο οι βροχοπτώσεις είναι συχνό καιρικό φαινόμενο για την περιοχή, με τον Δεκέμβριο να είναι ο πιο υγρός μήνας ενώ ο Ιούνιος ο πιο ξηρός. Η μέση υπερετήσια δυναμική εξατμισοδιαπνοή εκτιμήθηκε σε 668mm.

Όσον αφορά την ορεινή περιοχή εμφανίζεται βαρύς χειμώνας με μεγάλες διακυμάνσεις στην θερμοκρασία κατά την θερμή και ψυχρή περίοδο αλλά και μεταξύ ημέρες και νύχτας. Οι βροχοπτώσεις είναι κατανεμημένες σε όλη την διάρκεια του έτους ενώ οι παγετώνες παρουσιάζονται από τον Οκτώβριο έως και τον Απρίλιο. Τα φαινόμενα του παγετού και της ομίχλης είναι χαρακτηριστικά για την πεδινή περιοχή κυρίως τους μήνες του φθινοπώρου και του χειμώνα. Παράλληλα βορειοανατολική είναι η κατεύθυνση που ακολουθεί ο αέρας ενώ η νοτιοδυτική κατεύθυνση είναι πιο σπάνια.

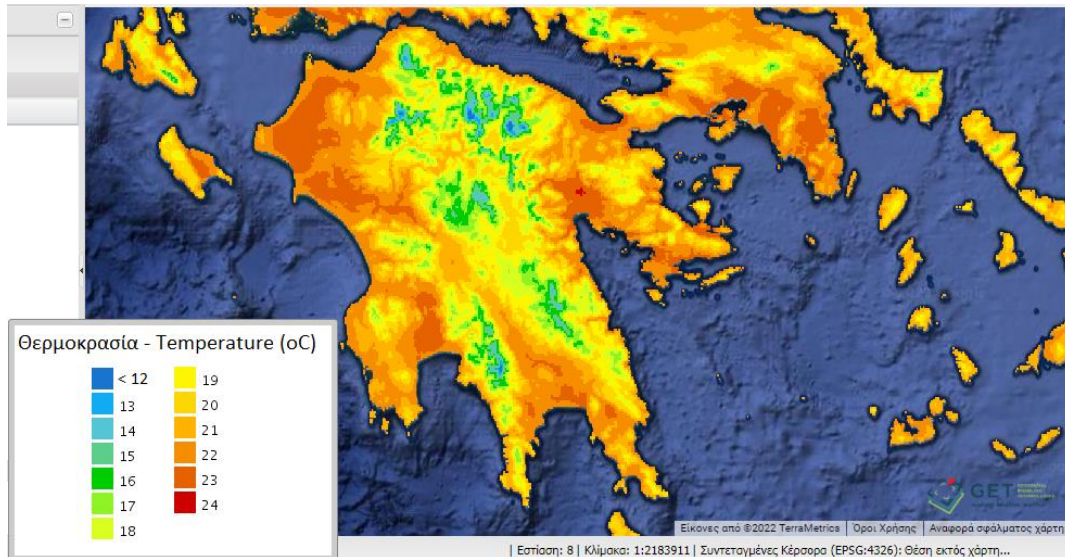
Στην περιοχή λειτουργούν 7 μετεωρολογικοί σταθμοί που παρέχουν καθημερινά δεδομένα. Αναλυτικά σε υψόμετρο 20 μέτρων βρίσκεται ο σταθμός του Έλους, σε υψόμετρο 163,5 μέτρων βρίσκεται ο σταθμός της Ριβιώτισσας, σε υψόμετρο 280 μέτρων βρίσκεται ο σταθμός του Βρονταμά, σε υψόμετρο 490 μέτρων βρίσκεται ο σταθμός των Περιβολιών (Καστόριο), σε υψόμετρο 590 μέτρων βρίσκεται ο σταθμός της Σελλασίας ενώ στο υψόμετρο των 646 μέτρων βρίσκονται ο σταθμός του Βασαρά και της Πετρινάς. Η μέση υπερετήσια βροχόπτωση εκτιμήθηκε στους σταθμούς αυτούς από 1339 mm έως 414 mm. Να σημειωθεί ακόμα ότι το 2007 ήταν από τα ξηρότερα έτη της τελευταίας 35-ετίας (Σκουλικίδης κ.ά., 2008).



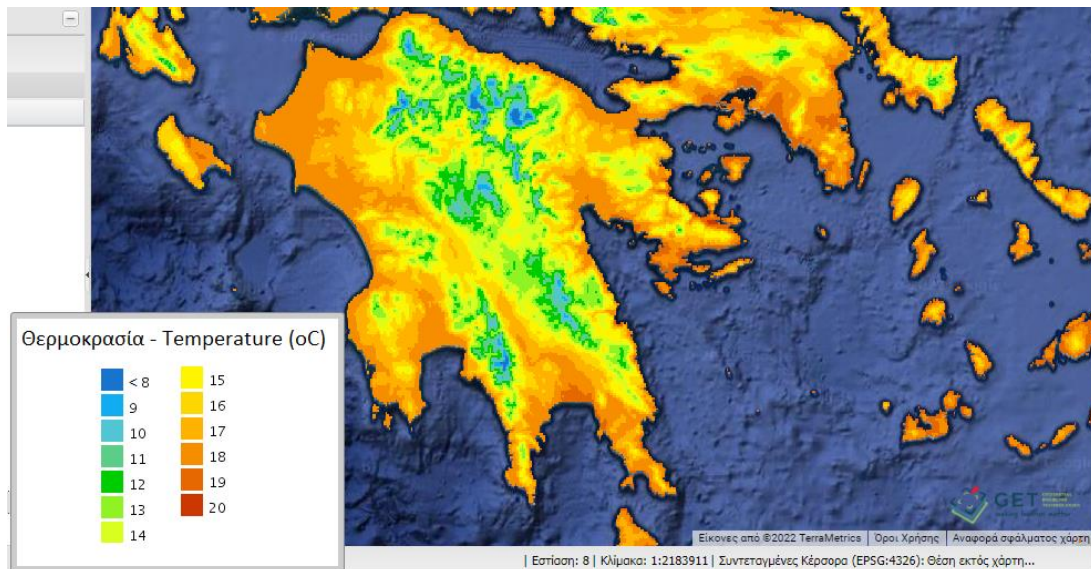
Σχήμα 4 Μέση ετήσια επιφανειακή κατακρήμιση για την περιοχή της Πελοποννήσου (Πηγή: Κλιματικός Άτλαντας Ελλάδος).



Σχήμα 5 Ελάχιστη θερμοκρασία για την περιοχή της Πελοποννήσου (Πηγή: Κλιματικός Άτλαντας Ελλάδος).



*Σχήμα 6 Μέγιστη θερμοκρασία για την περιοχή της Πελοποννήσου
(Πηγή: Κλιματικός Άτλαντας Ελλάδος).*



*Σχήμα 7 Μέση θερμοκρασία για την περιοχή της Πελοποννήσου
(Πηγή: Κλιματικός Άτλαντας Ελλάδος).*

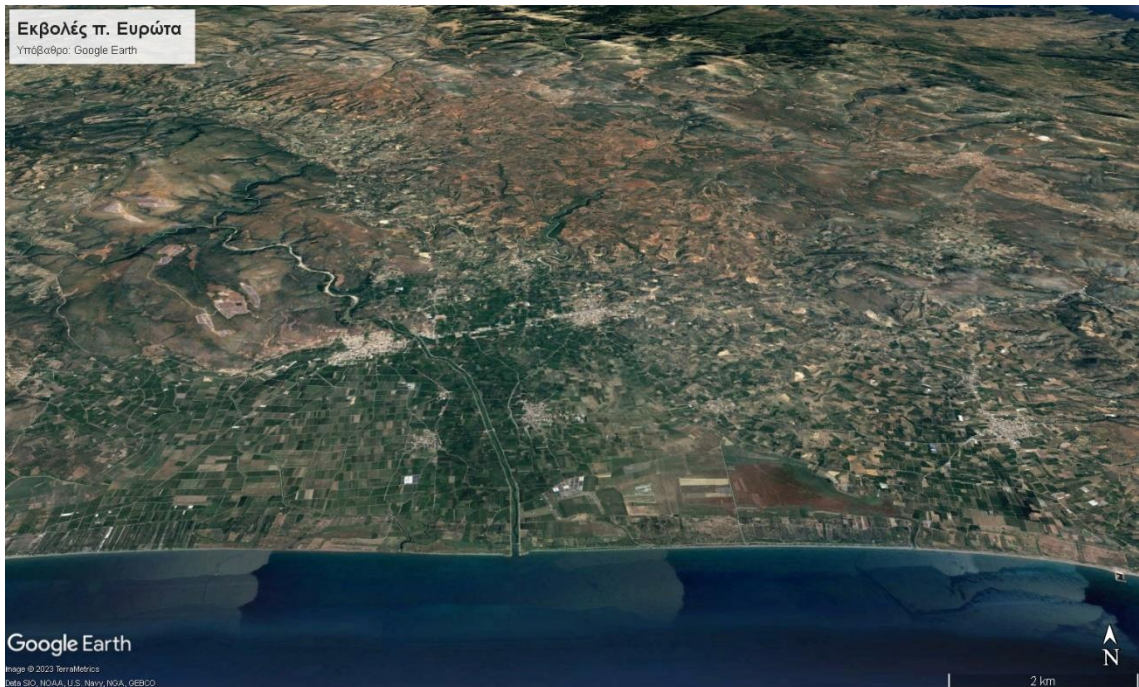
Τέλος, ο ποταμός Ευρώτας τους καλοκαιρινούς μήνες ξεραινεται στην περιοχή του Βρονταμά από την αυξημένη άντληση των υπόγειων υδάτων έχοντας ως αποτέλεσμα την πτώση της στάθμης και δημιουργώντας υδραυλικές κλίσεις από το ποτάμι προς το υπόγειο νερό. Η λεκάνη απορροής του ποταμού Ευρώτα αντιμετωπίζει ποσοτικά προβλήματα που προέρχονται από τις πλημμύρες του ποταμού και προκαλούν την διάβρωση των εδαφών και των παρόχθιων περιοχών (Σχήμα 8). Αλλά και ποιοτικά προβλήματα όπως είναι η κακή ποιότητα του ποταμού και των υπόγειων υδάτων από

σημειακές και διάχυτες πηγές ρύπανσης που προέρχονται από στάσιμη εξέλιξη της περιοχής. Η λεκάνη απορροής του ποταμού Ευρώτα λαμβάνει τις κυριότερες πιέσεις της από τα αστικά υγρά απόβλητα και τα απόβλητα από μικρές βιομηχανικές μονάδες (Νικολαΐδης, 2007).

α)



β)



Σχήμα 8 (α) Εκβολές του ποταμού Ευρώτα (Πηγή: Αϊβαλή,2019), (β) Δορυφορική εικόνα περιοχής ποταμού Ευρώτα (Πηγή: Google maps)

2.4 Γεωλογικά στοιχεία

Τα πετρώματα που παρατηρούνται στην λεκάνη απορροής του ποταμού Ευρώτα ανήκουν στις ενότητες της Πίνδου, της Τρίπολης, της Άρνας και της Μάνης (Σκουλικίδης κ.ά., 2008).

Η ενότητα της Πίνδου που βρίσκεται βορειοδυτικά της λεκάνης απαρτίζεται από λεπτοπλακώδεις, πολυπτυχωμένους, ανωκρητιδικούς ασβεστόλιθους και κλαστικούς σχηματισμούς του «Πρώτου Φλύσχη».

Η ζώνη/ενότητα της Τρίπολης η οποία καταλαμβάνει μικρή έκταση στα βορειοδυτικά της λεκάνης (Ταΰγετος), σε αντίθεση με το ανατολικό τμήμα της λεκάνης (Πάρνωνα) όπου καταλαμβάνει μεγαλύτερη έκταση. Σύμφωνα με μελέτη που έχει γίνει στην βάση της στρωματογραφικής κολώνας βρίσκεται ένα ηφαιστειογενές σύμπλεγμα, πάνω από το οποίο υπάρχουν νηριτικοί ασβεστόλιθοι πάνω από τους οποίους εμφανίζεται ο φλύσχος. Τεκτονικά οι σχηματισμοί που υπάρχουν στην ενότητα της Τρίπολης βρίσκονται πάνω από τους φυλλίτες-χαλαζίτες που υπάρχουν στην ενότητα της Άρτας.

Η ενότητα της Άρνας καλύπτει τμήμα στα βορειοδυτικά του Ταΰγετου, στα νοτιοδυτικά της ίδια της λεκάνης αλλά και στα βορειοανατολικά του Πάρνωνα. Εμφανίζονται φυλλίτες-χαλαζίτες οι οποίοι βρίσκονται τεκτονικά πάνω από τους σχηματισμούς την ενότητας της Μάνης.

Η ενότητα της Μάνης καλύπτει κυρίως τμήμα του Ταΰγετου και του Πάρνωνα και αποτελεί την μονιμότερη ενότητα της περιοχής. Σε αντίθεση με την ζώνη της Τρίπολης η Μάνη στο κατώτερο τμήμα της στρωματογραφικής κολώνας εμφανίζει φυλλίτες-χαλαζίτες οι οποίοι υπέρκεινται σε τεκτονικά ανθρακικά πετρώματα (Παντοκράτορα). Πάνω από τον σχηματισμό αυτόν υπάρχουν σχιστόλιθοι και πυριτικοί κρύσταλλοι ασβεστόλιθου και μετέπειτα ακολουθεί ο σχηματισμός Βίγλας που είναι πλακώδεις ασβεστόλιθοι (Σκουλικίδης κ.ά., 2008).

Οι αλπικοί σχηματισμοί καλύπτουν ένα μεγάλο τμήμα της λεκάνης. Χαρακτηριστικά της περιοχής είναι οι πτυχώσεις, οι λεπιώσεις και τα ρήγματα. Οι μετακαλυμματικές ολισθήσεις και η νεοτεκτονική παραμόρφωση έχουν επηρεάσει την σημερινή εικόνα του τεκτονικού ιστού. Η νεοτεκτονική παραμόρφωση εμφανίζεται με την μορφή ρηγμάτων και την περιστροφή ρηξιτεμάχων.

Η υψηλή διαβρωσιμότητα των πετρωμάτων οφείλεται στον έντονο τεκτονισμό των ορεινών όγκων της λεκάνης, τα οποία πετρώματα κατακερματίζονται δημιουργώντας κώνους κορημάτων τα οποία καταλήγουν στα χαμηλότερα τμήματα του ποταμού και

το ρου. Το υλικό αυτό και οι Πλειστοκαινικές αποθέσεις συνθέτουν την κοίτη του ρου του ποταμού που αποτελείται από μπλοκ, λατύπες, κροκάλες και λεπτόκοκκο υλικό.

Γενικότερα η λεκάνη του Ποταμού Ευρώτα κατατάσσεται στις ανθρακικού τύπου λεκάνες καθώς συνιστάται από 2% ασβεστόλιθους και 28,5% μεταλλικά ιζήματα στα οποία υπερισχύει το ανθρακικό υλικό (Σκουλικίδης κ.ά., 2008).

2.5 Χρήσεις γης

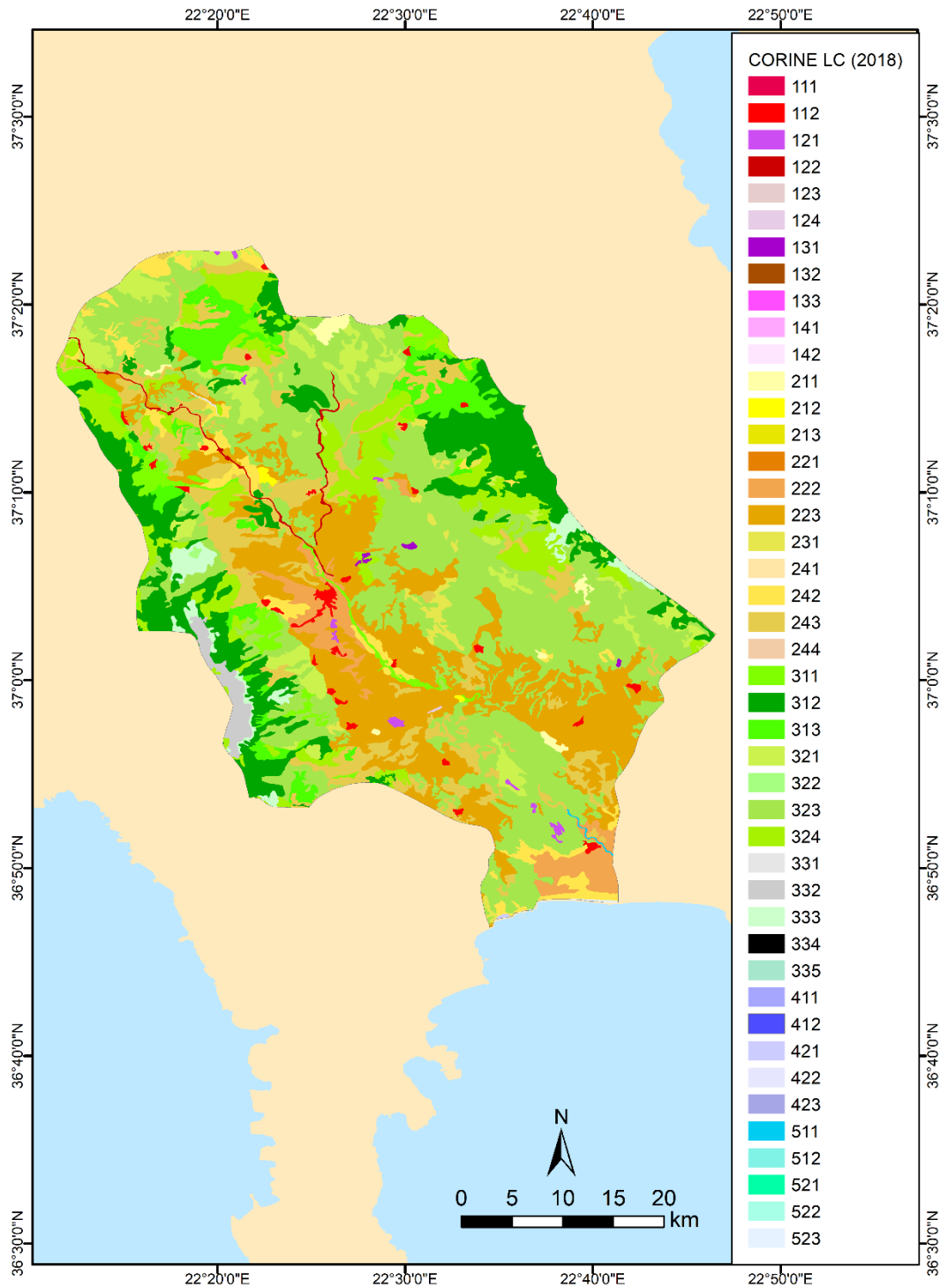
Σύμφωνα με την Ελληνική Στατιστική Υπηρεσία (www.statistics.gr, Σχήμα 9) το μισό τμήμα της περιοχής του δήμου Ευρώτα καλύπτεται από δάση, το 44% καλύπτεται από καλλιεργούμενες εκτάσεις και αγροναπαύσεις ενώ το 1% καλύπτει η αστική οικοδόμηση.

Η γεωγραφική κατανομή των κατηγοριών κάλυψης γης κατά CORINE LC (2018), παρουσιάζεται στον χάρτη του Σχήματος 10.



Σχήμα 9 (α) Χρήσεις γης για τον Δήμο Ευρώτα (Πηγή: Δέδε, 2012), (β) Χάρτης κάλυψης γης εντός ΛΑΠ Ευρώτα (Corine LC (2010), ίδια επεξεργασία)..

ΧΡΗΣΕΙΣ ΓΗΣ (CORINE LC, 2018) ΛΑΠ ΕΥΡΩΤΑ



Σχήμα 10 (συνέχεια)

Παρακάτω υπάρχει αναλυτικός πίνακας που αναγράφονται ποιες είναι οι κατηγορίες στις οποίες ανήκουν οι εκτάσεις του Δήμου Ευρώτα, όπου υπολογίζονται και τα σχετικά ποσοστά.

Πίνακας 1 Χρήσεις γης ανά δημοτική ενότητα (Πηγή: Δέδε, 2012)

Γεωγραφικές περιοχές	Σύνολο εκτάσεων	ΓΕΩΡΓΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ						ΔΑΣΗ ΗΜΙ-ΦΥΣΙΚΕΣ ΕΚΤΑΣΕΙΣ				ΕΚΤΑΣΕΙΣ ΠΟΥ ΚΑΛΥΠΤΟΝΤΑΙ ΑΠΟ ΝΕΡΑ			ΤΕΧΝΗΤΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ				
		Απόδημη γη	Μόνιμες καλλιέργειες	Βοσκότοποι - Μεταβατικές θαμνώδεις / θαμνώδεις εκτάσεις	Βοσκότοποι - Στενδομοιο θαμνώδεις και / ή ποώδεις βλάστηση	Βοσκότοποι - Εκτάσεις με αγριή ή καθαύλη βλάστηση	Επιρρογείς γεωργικές περιοχές	Άσση	Μεταβατικές θαμνώδεις-θαμνώδεις εκτάσεις	Συνομιση θαμνώδεις και / ή ποώδεις βλάστηση	Εκτάσεις με αγριή ή καθαύλη βλάστηση	Χερσάια ύδατα	Εσπερικές γρές ζώνες	Παρθαλάσσεις γρές ζώνες	Άστική οικόδομηση	Βιομηχανικές και εμπορικές ζώνες	Δίκτυα συγκοινωνιών	Ορυχεία, γάροι αόδρηης ερρομιάτα και αορημιάτα	Τεχνητές μη γεωργικές ζώνες κρσάτων, γάροι αόδρηης και κολάπιατων αορημιάτων
Νομός Λακωνίας	3.639,5	15,6	528	0	143,2	61,4	823,9	272,8	199,6	1370,1	178,6	4,9	0	2,9	36,2	0,6	0,8	0,9	0
Δ.Ε. Γρονθρών	236,1	1,2	32,7	0	12,4	0	38,4	14,1	11,6	119,3	5,6	0	0	0	0,8	0	0	0	0
Δ.Ε. Έλους	126,9	4,9	77,3	0	0	0,1	27,3	0	0	10,5	2,2	0,5	0	2,3	1,8	0	0	0	0
Δ.Ε. Κροκεών	161,2	0	12	0	3,3	1,5	60,6	0,5	9,8	72	0,4	0	0	0,2	0,9	0	0	0	0
Δ.Ε. Νάρτων	198	0	23,1	0	10,8	2,5	24,6	10,8	7,1	113,7	4	0	0	0	1,3	0	0	0,1	0
Δ.Ε. Σκόλας	143,6	0	23,7	0	0,7	4,6	58,9	0	0	52,8	0,4	0,8	0	0	1,7	0	0	0	0
Δήμος Ευρώτα	865,8	6,1	168,8	0	27,2	8,7	209,8	25,4	28,5	368,3	12,6	1,3	0	2,5	6,5	0	0	0,1	0
Ποσοστό επί του Νομού (%)	23,8	39,1	32	0	19	14,2	25,5	9,3	14,3	26,9	7,1	26,5	0	86,2	18	0	0	11,1	0

2.6 Ανθρωπογενείς δραστηριότητες

Σύμφωνα με τα δεδομένα που εξάχθηκαν από την Ελληνική Στατιστική Υπηρεσία μετά την απογραφή του 2011 (www.statistics.gr) ο μόνιμος πληθυσμός του δήμου Ευρώτα ανέρχεται στους 17.891 κατοίκους. Η πυκνότητα του πληθυσμού υπολογίστηκε στους 20,85 κατοίκους/km². Ο δήμος θεωρείται ο πιο αραιοκατοικημένος σε σύγκριση με τον υπόλοιπο νομό της Λακωνίας.

Η λεκάνη απορροής του Ευρώτα έχει έκταση 2.418 τετραγωνικά μέτρα στο οποίο αντιστοιχεί 26 κάτοικοι/km², δηλαδή περίπου 63.000 κάτοικοι ωστόσο η λεκάνη θεωρείται αραιοκατοικημένη σε σχέση με άλλες λεκάνες που υπάρχουν στα Βαλκάνια (Σκουλικίδης κ.ά., 2008).

Η ανάπτυξη που υπάρχει στον τομέα της γεωργίας στην περιοχή του Ευρώτα προέρχεται από τα γόνιμα εδάφη, το μεσογειακό κλίμα και την ύπαρξη των υδατικών πόρων. Η γεωργική έκταση που χρησιμοποιείται αντιστοιχεί σε 246.377 στρέμματα στα οποία κυριαρχούν δενδρώδεις καλλιέργειες. Αναλυτικότερα τα ελαιόδεντρα καλύπτουν το μεγαλύτερο μέρος της περιοχής καθώς το ελαιόλαδο και οι βρώσιμες ελιές είναι προϊόντα που χαρακτηρίζουν τον τόπο. Ομοίως η παραγωγή πορτοκαλιών, μανταρινιών αλλά και των οπωροκηπευτικών, σιτηρών και αμπελιών που δραστηριοποιούνται τα όρια του δήμου συμβάλλουν στην σπουδαιότητα του τόπου. Στον τομέα της κτηνοτροφίας 591.000 στρέμματα καταλαμβάνουν δημοτικοί και ιδιωτικοί βοσκότοποι. Τα κουνέλια, τα πουλερικά, οι χοίροι, τα βοοειδή, τα αιγοπρόβατα και τα ιπποειδή είναι τα ζώα που εκτρέφονται, ενώ σημαντική είναι και η μελισσοκομία. Τον δευτερογενή τομέα απαρτίζουν τα ελαιουργία και οι γαλακτοκομικές μονάδες και όχι κάποιου είδους βιομηχανία. Ενώ στον τριτογενή τομέα υπάρχουν επιχειρήσεις οι οποίες αφορούν την παροχή υπηρεσιών, το εμπόριο και σε μικρότερο αλλά αυξανόμενο ποσοστό με τον τουρισμό (Δέδε, 2012).

3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

3.1 Γενικό πλαίσιο

Το μεθοδολογικό πλαίσιο που ακολουθήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας συνοψίζεται επιγραμματικά στα εξής βήματα:

1. Προσδιορισμός περιοχής μελέτης - καθορισμός ΛΑΠ Βιβαρίου.
2. Επιλογή & επεξεργασία ιστορικών χρονοσειρών [P, T, Q].
3. Εκτίμηση εξατμισοδιαπνοής (Thorntwaite) [ET].
4. Επιλογή κλιματικών σεναρίων & επεξεργασία διαθέσιμων μηνιαίων χρονοσειρών [P, T].
5. Αρχική Εφαρμογή μοντέλου «Thomas abcd» με τα δεδομένα του βήματος #2.
6. Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων μοντέλου.
7. Εκτέλεση προσομοιώσεων για κάθε σενάριο.
8. Ανάλυση αποτελεσμάτων.

Για την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας σαν πρώτο βήμα προσδιορίστηκε η περιοχή μελέτης. Ύστερα έγινε η επιλογή των δεδομένων και στην συνέχεια η επεξεργασία τους. Μετά την επεξεργασία έγινε η εφαρμογή της μεθόδου Thorntwaite (Thorntwaite, 1948) για την εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής, η οποία είναι απαραίτητη για να εφαρμοστεί στο μοντέλο «Thomas abcd» για το οποίο πριν την εφαρμογή του έγινε επεξεργασία και επιλογή των υδρολογικών δεδομένων. Τέλος έγινε η ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων, η προσομοίωση για τα υπό μελέτη σενάρια και ακολούθως έγινε η εξαγωγή των αποτελεσμάτων και ύστερα διατυπώθηκαν τα βασικότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από την μελέτη.

Τα αρχικά δεδομένα ελήφθησαν από την πτυχιακή εργασία της Παρασκευής Γ. Μαρίνου (Μαρίνου, 2015). Αφορούν την βροχόπτωση και την θερμοκρασία (βάσει της οποίας προσδιορίστηκε και η εξατμισοδιαπνοή) για την περιοχή του Βιβαρίου στο ΒΔ τμήμα της ΛΑΠ Ευρώτα, για την διαθέσιμη χρονική περίοδο 1 Οκτωβρίου 2005 - 1 Σεπτεμβρίου 2009, τα οποία είχαν επίσης αξιοποιηθεί ήδη στην αναφερόμενη πτυχιακή. Για τη ρύθμιση του μοντέλου «Thomas abcd» χρησιμοποιήθηκαν και οι χρονοσειρές μηνιαίας απορροής Q_{obsi} . Αναλυτικότερα η βαθμονόμηση του μοντέλου «Thomas abcd» πραγματοποιήθηκε για δύο μήκη χρονοσειράς, η πρώτη

λαμβάνοντας υπόψη το 70% αυτής για βαθμονόμηση (Calibration) και το 30% για επαλήθευση (Verification) και η δεύτερη για 60% και 40%, αντίστοιχα, ώστε να γίνει η καταλληλότερη επιλογή των παραμέτρων του μοντέλου (a,b,c,d, S₀,G₀).

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί διερεύνηση κλιματικών σεναρίων, λήφθησαν διαθέσιμες χρονοσειρές από το EURO-CORDEX, που παρέχει χρονοσειρές βροχόπτωσης και θερμοκρασίας για κλιματικά σενάρια για την περίοδο 1950-2100. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, από την συγκεκριμένη χρονική περίοδο χρησιμοποιήθηκαν ως αναδρομική περίοδος το διάστημα 1 Οκτωβρίου 1970 μέχρι 1 Σεπτεμβρίου 2000 (τριακονταετία αναφοράς), και ως μελλοντικές περιόδους οι 2031-2060 και 2061-2090. Για κάθε περίοδο η προσομοίωση γίνεται δύο φορές, για κάθε κλιματικό σενάριο (RCP 4.5 & RCP 8.5). Έτσι, για κάθε σενάριο αξιοποιήθηκε η χρονοσειρά μηνιαίας θερμοκρασίας για να υπολογιστεί η εξατμισοδιαπνοή της εκάστοτε περιόδου με τη μέθοδο Thornthwaite (Thornthwaite, 1948). Ύστερα η εξατμισοδιαπνοή και η αντίστοιχη βροχόπτωση χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο «Thomas abcd» ως δεδομένα εισόδου ώστε να προσδιοριστεί η εκτιμώμενη απορροή. Βάσει αυτού του τελικού μεγέθους πραγματοποιήθηκαν οι τελικές αναλύσεις επί των αποτελεσμάτων.

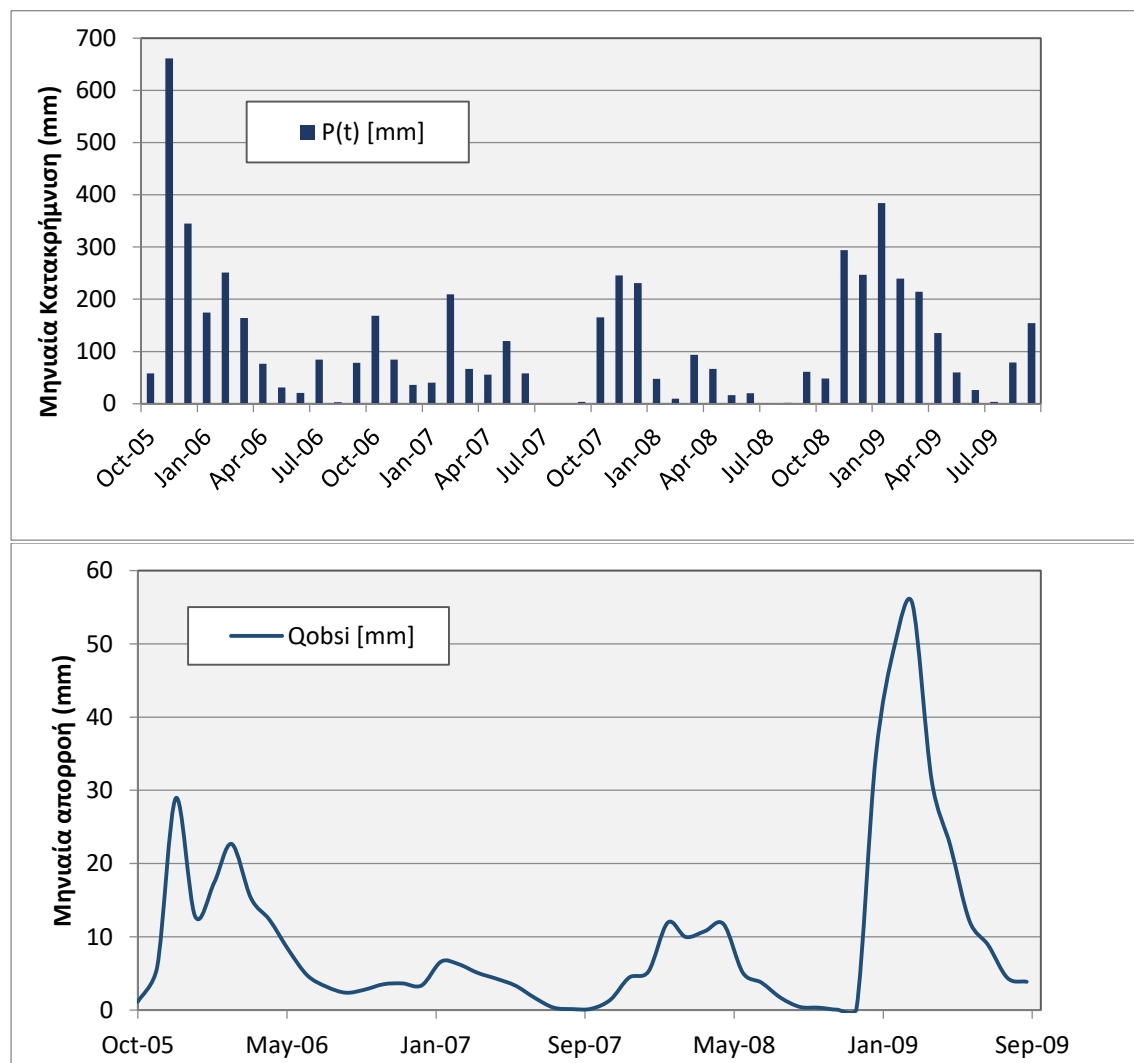
3.2 Διαθέσιμα δεδομένα και προεπεξεργασία

3.2.1 Χρονοσειρές σταθμών εντός ΛΑΠ

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η περιοχή μελέτης είναι η λεκάνη απορροής του Ποταμού Ευρώτα. Στην συγκεκριμένη περιοχή υπάρχουν έξι υδρομετρικοί σταθμοί: στο Βρονταμά, στο Βιβάρι, στον Οινούντα (Κλάδας), στον Οινούντα (Βασαράς), στην Ρασίνα (Κουμουστά) και στην θέση Ρασίνα-Αεροδρόμιο. Ο Βρονταμάς και το Βιβάρι βρίσκονται στον κύριο ποταμό ενώ οι άλλοι τέσσερις είναι στους Οίνους και στην Ρασίνα (Tzoraki et al., 2013).

Για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας αποφασίστηκε να αξιοποιηθούν τα δεδομένα που παρέχει ο σταθμός που βρίσκεται στο Βιβάρι. Στην συγκεκριμένη λεκάνη τα δεδομένα για την βροχόπτωση παρέχονται για χρονική περίοδο 2005-2009 και επίσης διατίθενται οι αντίστοιχες μηνιαίες παροχές (Σχήμα 10). Στην πτυχιακή εργασία της Παρασκευής Γ. Μαρίνου (Μαρίνου, 2015) είχε πραγματοποιηθεί ήδη η αναγκαία διαδικασία ώστε να συγκεκριμένα δεδομένα να μπορούν να αξιοποιηθούν, ενώ είχε επίσης αναπτυχθεί το μοντέλο υδατικού ισοζυγίου «Thomas abcd» (Μαρίνου

et al., 2017). Επομένως, τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την αναφερόμενη εργασία αξιοποιήθηκαν για την έναρξη της παρούσας εργασίας.



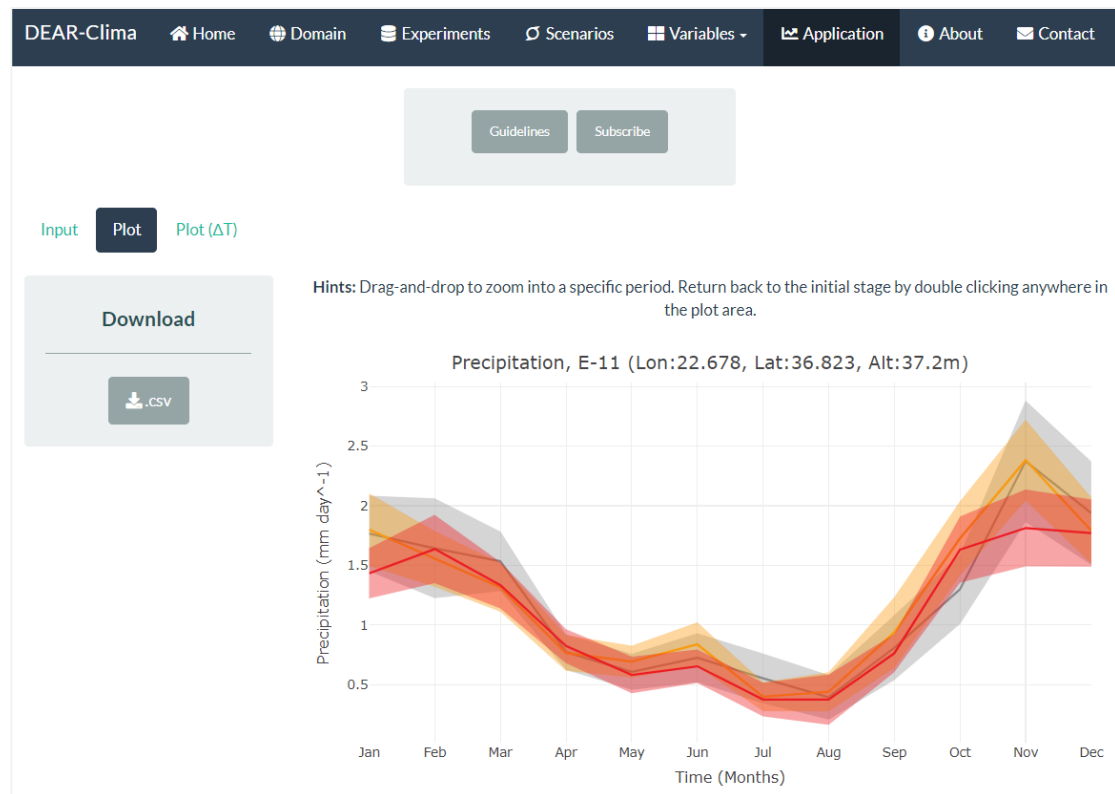
Σχήμα 10 Ιστορικές χρονοσειρές για την υδρολογική λεκάνη ρ. Βιβαρίου

3.2.2 Πλεγματικά δεδομένα EUROCORDEX

3.2.2.1 Γενική περιγραφή έργου

Το έργο GEO-CRADLE στηρίζει την Αρχή Διαμερισμού Δεδομένων. Το όραμα του συγκεκριμένου έργου είναι να διευκολύνει την αφομοίωση και την σωστή εκμετάλλευση των υπηρεσιών γεωσκόπησης στις χώρες των Βαλκανίων, της Μέσης Ανατολής και της Βόρειας Αφρικής. Το βασικό πλεονέκτημα του GEO-CRADLE είναι ότι παρέχει πρόσβαση σε σύνολα δεδομένων και υπηρεσίες που αφορούν την περιοχή τα οποία τροφοδοτούνται από την πύλη GEOSS, η οποία ταυτόχρονα είναι και η κεντρική πύλη στην οποία οι περιφερειακοί πάροχοι μπορούν να συνεισφέρουν τα δεδομένα τους (GEO-CRADLE Initiative, geocradle.eu/en/site).

Το έργο αυτό χρηματοδότησε την ανάπτυξη μιας διαδικτυακής εφαρμογής «DEAR-Clima» ώστε να διευκολύνει την πρόσβαση των ενδιαφερόμενων χρηστών σε δεδομένα που αφορούν την κλιματική αλλαγή. Στην περιοχή της Ελλάδας ο διακομιστής βρίσκεται στο Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο της Θεσσαλονίκης στο τμήμα της Μετεωρολογίας και της Κλιματολογίας (DEAR-Clima) στον ιστότοπο <http://meteo3.geo.auth.gr:3838/>. Η διαδικτυακή εφαρμογή DEAR-Clima παρέχει κλιματικά δεδομένα και χρονοσειρές από προσομοιώσεις που έχουν γίνει από το Coordinated Regional Downscaling Experiment (CORDEX).



Σχήμα 11 Απόσπασμα από το περιβάλλον της εφαρμογής DEAR-CLIMA

Το CORDEX είναι ένα πρόγραμμα που χρηματοδοτείται από το Παγκόσμιο Πρόγραμμα Έρευνας για το Κλίμα (WRCP). Στόχος του είναι να υπάρχει ένα πλαίσιο στο οποίο θα παράγονται περιφερειακές προβλέψεις για την κλιματική αλλαγή που θα αφορούν όλες τις χερσαίες περιοχές του κόσμου (EURO-CORDEX).

Οι προσομοιώσεις είναι προϊόντα που έχουν προκύψει από Τοπικά Κλιματικά Μοντέλα (RCM) που καθοδηγούνται από Παγκόσμια Κλιματικά Μοντέλα (GCM).

Τα Τοπικά Κλιματικά Μοντέλα (RCM) καλύπτουν τις περιοχές της Ευρώπης, έχουν χωρική ανάλυση 0,11° και καλύπτουν την χρονική περίοδο από το 1950 έως το 2100. Τα ιστορικά δεδομένα αναφέρονται στην χρονική περίοδο 1950 με 2004 και τα μελλοντικά δεδομένα στην χρονική περίοδο 2006-2100.

Η μελλοντική πρόβλεψη του κλίματος γίνεται βάσει τριών κλιματικών σεναρίων. Κάθε σενάριο περιγράφει την μελλοντική συγκέντρωση των αερίων του θερμοκηπίου μέχρι την περίοδο του 2100 και την πιθανή ακτινοβολία που θα προκαλέσουν σε σχέση με την προ-βιομηχανική περίοδο.

- Το σενάριο RCP2.6 αντιπροσωπεύει ένα σενάριο με βάση το οποίο θα περιοριστεί η αύξηση της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας στους 2°C μέχρι το τέλος του 21ου αιώνα. Για την επίτευξη αυτού του στόχου θα πρέπει οι εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου να μειωθούν κατά 70% την περίοδο 2010 έως 2100. Για να συμβεί αυτό θα πρέπει να υπάρξουν ουσιαστικές αλλαγές στην χρήση της ενέργειας, κατά την διάρκεια της παραγωγής ενέργειας να μην εκπέμπονται αέρια CO₂ και να εφαρμοστούν τεχνολογίες δέσμευσης και αποθήκευσης του άνθρακα (Vuuren et al., 2011).
- Το σενάριο RCP4.5 αντιπροσωπεύει ένα σενάριο με βάση το οποίο θα σταθεροποιηθεί την παγκόσμια ακτινοβολία στα 4.5 W·m⁻² το οποίο ισοδυναμεί με 650 ppm CO₂, χωρίς να υπερβεί αυτή την τιμή μέχρι το 2100. Οι προβλέψεις έχουν δείξει ότι οι εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου θα κορυφωθούν μέχρι το 2040 και θα αρχίσουν να μειώνονται από εκείνο το σημείο και μετά. Το σενάριο έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να είναι οικονομικά αποδοτικό για να μπορέσει να επιτευχθεί ο στόχος του. Προϋποθέτει την εφαρμογή τεχνολογιών που συνδυάζουν την παραγωγή βιοενέργειας μαζί με την δέσμευση του CO₂ και την γεωλογική αποθήκευση (CCS), οι οποίες θα επιλύσουν σε κάποιο βαθμό τις ενεργειακές απαιτήσεις του πλανήτη (Thomson et al., 2011).
- Το σενάριο RCP8.5 αντιπροσωπεύει ένα σενάριο με βάση το οποίο στο μέλλον θα υπάρχει αρκετά υψηλός πληθυσμός, έλλειψη περιβαλλοντικών πολιτικών και πολιτικών για την κλιματική αλλαγή, σχετικά χαμηλή οικονομική ευημερία σε συνδυασμό με μέτριο ρυθμό τεχνολογικών προόδων που δεν θα επιλύουν αποτελεσματικά τις ενεργειακές απαιτήσεις. Οι εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου θα αυξηθούν ραγδαία καθ' όλη τη διάρκεια του 21ου αιώνα αυξάνοντας την ακτινοβολία αερίων του θερμοκηπίου στο 8,5 Watt/m² σε σχέση με την προβιομηχανική περίοδο (Riahi et al., 2011).

Τα κλιματικά μοντέλα αναπτύσσονται πολλά χρόνια κάτι το οποίο ενισχύει την αξιοπιστία τους. Μεγάλη ακρίβεια παρουσιάζουν για μεταβλητές όπως είναι η θερμοκρασία και μικρότερη για άλλες όπως είναι η βροχόπτωση. Για την εξακρίβωση της ακρίβειας τους γίνεται προσομοίωση των κλιματικών συνθηκών του παρόντος.

Κατά την οποία συγκρίνονται οι προσομοιώσεις που παράγονται με μετρήσεις που έχουν γίνει πειραματικά σε ωκεανούς, την ατμόσφαιρα και την επιφάνεια της γης. Παρόλη την εξέλιξη που έχουν εμφανίζονται σφάλματα και στις προβλέψεις μικρής κλίμακας αλλά και σε μεγάλης. Ωστόσο αν και υπάρχουν διαφορές ανάμεσα στις τιμές που παρουσιάζονται από πολλά μοντέλα όλα συγκλίνουν στην παγκόσμια αύξηση της θερμοκρασίας (Κουκούλη, 2014).

Τα κλιματικά μοντέλα γνωστά και ως μοντέλα γενικής κυκλοφορίας ή GCM, είναι πολυσύνθετα μαθηματικά μοντέλα που αποτελούνται από ένα σύνολο εξισώσεων τα οποία δέχονται διάφορα δεδομένα ως είσοδο, όπως διοξείδιο του άνθρακα, ηλιακή ακτινοβολία, και πολλά άλλα. Στα κλιματικά μοντέλα η γη διαιρείται σε κυψελίδες πλέγματος 3 διαστάσεων και οι εξισώσεις επιλύονται για κάθε κυψελίδα. Τα μοντέλα τρέχουν προσομοιώνοντας την εξέλιξη του κλίματος και τα αποτελέσματα που δίνουν μπορεί να είναι η κίνηση του αέρα, η μεταφορά θερμότητας, το ενεργειακό ισοζύγιο ηλιακής και γήινης ακτινοβολίας, την υγρασία, την εξάτμιση, την βροχόπτωση, την τήξη και την απορροή. Οι βελτιώσεις που έχουν υποστεί περιλαμβάνουν στα αποτελέσματα τους τις αλληλεπιδράσεις της ατμόσφαιρας με τον ωκεανό, την ξηρά και την κρούσφαιρα, υδρολογικές διαδικασίες, τον κύκλο του άνθρακα καθώς και την ατμοσφαιρική χημεία (Φωτιάδη, 2014).

3.2.2.2 Μοντέλα Γενικής Κυκλοφορίας (General Circulation Models - GCM's)

Τα Μοντέλα Γενικής Κυκλοφορίας είναι αριθμητικά μοντέλα τα οποία δημιουργήθηκαν έτσι ώστε με δεδομένα για το κλίμα του παρελθόντος, μετρήσεις που γίνονται στο παρόν και σε συνδυασμό με τιμές από συγκεκριμένα σενάρια εκπομπών να μπορούν να μοντελοποιήσουν το κλίμα σε παγκόσμια κλίμακα και να αποδώσουν τις φυσικές και γεωγραφικές εκτιμήσεις σχετιζόμενες με την τοπική αλλαγή κλίματος. Τα Μοντέλα Γενικής Κυκλοφορίας χρησιμοποιούν για την απεικόνιση τους έναν παγκόσμιας κλίμακας τρισδιάστατο κάρναβο με οριζόντια ανάλυση που κυμαίνεται από 250 έως 600 χιλιόμετρα, με 10 έως 20 κάθετα επίπεδα για την ατμόσφαιρα και έως 30 για τον ωκεανό. Η χωρική ανάλυση που έχουν τα μοντέλα αυτά δεν είναι αρκετά ακριβής, γι' αυτό και η προσαρμογή τους σε Μοντέλα Τοπικού Κλίματος δίνει λεπτομερέστερη κλίμακα. Χωρίς όμως να αντικαθιστούν τα Μοντέλα Γενικής Κυκλοφορίας επεξεργάζονται τα στοιχεία τους και δίνουν μεγαλύτερη αξία στις προσομοιώσεις αυτές (ΠΕΣΠΚΑ, 2019).

Μελέτες που έχουν γίνει αναφέρουν ότι η αξιολόγηση των δεδομένων για την βροχόπτωση στα Μοντέλα Γενικής Κυκλοφορίας για την περιοχή της Ελλάδας είναι

αρκετά σύνθετη λόγω των απρόβλεπτων διακυμάνσεων που υπάρχουν σε χωρική και χρονική κλίμακα. Η χωρική κατανομή της βροχόπτωσης επηρεάζεται από την ατμοσφαιρική κυκλοφορία, τους ορεινούς όγκους στα δυτικά, την κατανομή της θερμοκρασίας στην επιφάνεια της θάλασσας, την περίπλοκη ορειογραφία, οι αέριες μάζες στις κοιλάδες και ο μεγάλος αριθμός των νησιών (Κουκούλη, 2014).

3.2.2.3 Περιοχικά Κλιματικά Μοντέλα (*Regional Climate Models - RCM's*)

Τα Περιοχικά Κλιματικά Μοντέλα χρησιμοποιούνται λόγω της υψηλής χωρικής ανάλυσης που παρέχουν στις προσομοιώσεις του κλίματος της γής και συνδυάζονται με τα Μοντέλα Γενικής Κυκλοφορίας ώστε τα αποτελέσματα που θα προκύψουν να είναι οι τοπικές συνθήκες μιας περιοχής με υψηλό επίπεδο λεπτομέρειας.

Τα Περιοχικά Κλιματικά Μοντέλα έχουν την δυνατότητα να αποδίδουν προϊόντα υψηλής ανάλυσης που κυμαίνονται από 10 έως 20 χιλιόμετρα και προσομοιώσεις παρελθόντος ή μέλλοντος για χρονικό ορίζοντα από έτη έως δεκαετίες χρησιμοποιώντας τις τοπογραφικές λεπτομέρειες της περιοχής. Με την δυνατότητα που έχουν να συνδυάζουν μοντέλα που αφορούν περιορισμένες εκτάσεις με την περιγραφή της θερμοδυναμικής που υπάρχει σε ανώτερα επίπεδα του εδάφους δίνουν ως αποτέλεσμα μια ικανοποιητική περιγραφή για τις ολοκληρωμένες αναδράσεις του κλίματος σε περιφερειακή κλίμακα. Η συνένωση που μπορεί να κάνει ανάμεσα σε ατμοσφαιρικά μοντέλα με υδρολογικά, ωκεάνια και μοντέλα θαλάσσιου πάγου το τοποθετεί σε ένα από τα πιο χρήσιμα μοντέλα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κλιματική έρευνα, την πρόβλεψη του καιρού, για μακροχρόνιες προσομοιώσεις και για την κατασκευή σεναρίων που αφορούν το παρελθόν και το μέλλον (ΠΕΣΠΚΑ, 2019).

Μπορούν να παρέχουν υψηλές χωρικές διακριτοποιήσεις και προσομοιώσεις σε χρονική κλίμακα δεκαετιών και μπορούν να περιγράψουν τους μηχανισμούς ανάδρασης του κλίματος ενεργώντας σε τοπική κλίμακα. Τα μοντέλα τοπικής κλίμακας μπορούν να συνδυαστούν με μοντέλα υδρολογίας, ωκεανού, θαλάσσιου πάγου, χημείας και εδάφους-βιόσφαιρας. Τα μοντέλα τοπικής κλίμακας εμφανίζουν κάποια μειονεκτήματα. Υπάρχουν συστηματικά σφάλματα τα οποία δεν λύνονται με την αύξηση της ανάλυσης τους, και οφείλονται στις παραμετροποιήσεις που γίνονται κατά της μικρής κλίμακας διαδικασίες και που προέρχονται από το μητρικό μεγάλης κλίμακας μοντέλο ή από λάθη λόγω της χαμηλής ανάλυσης των μοντέλων γενικής κυκλοφορίας. Πρωταρχικό μειονέκτημα είναι το μεγάλο υπολογιστικό κόστος και ο μεγάλος υπολογιστικός χρόνος καθώς και η μεγάλη δυσκολία που υπάρχει στην

εφαρμογή σε σχέση με τις εμπειρικές μεθόδους υποβιβασμού της κλίμακας (Κουκούλη, 2014).

3.2.2.4 Διαθέσιμα σενάρια συνδυασμών RCM-GCM

Συγκεκριμένα για τις χρονοσειρές που αφορούν στην θερμοκρασία και την βροχόπτωση δίνονται τα σενάρια των Πινάκων 2 και 3.

Πίνακας 2 Σενάρια Περιφερειακού Μοντέλου Θερμοκρασίας & Βροχόπτωσηση

Regional Climate Model
CLMcom-CCLM4-8-17
CNRM-ALADIN53
SMHI-RCA4
KNMI-RACMO22E
IPSL-INERIS-WRF331F
MPI-CSC-REMO2009

Πίνακας 3 Σενάρια Παγκόσμιου Μοντέλου Θερμοκρασίας & Βροχόπτωσηση

Global Climate Model
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5
MOHC-HadGEM2-ES
MPI-M-MPI-ESM-LR

3.3 Υδρολογική προσομοίωση

3.3.1 Γενικά περί μοντέλων

Με τον όρο υδρολογικό μοντέλο αναφερόμαστε σε ένα φάσμα μαθηματικών μετασχηματισμών που χρησιμοποιούν δεδομένα πεδίου και υποθέσεις σχετικά με τους φυσικούς μηχανισμούς, έχοντας στόχο την ποσοτική εκτίμηση των υδρολογικών μεταβλητών που αφορούν σε εφαρμογές της πράξης. Τα μοντέλα μπορεί να περιγράφουν μεμονωμένα γεγονότα (event-based models) όπως είναι ένα υδρογράφημα ή την αιχμή μιας πλημμύρας, ή μπορεί να περιγράφουν την διαχρονική εξέλιξη του υδρολογικού κύκλου σε μια πεπερασμένη χωρική ενότητα (continuous models) όπως είναι μια λεκάνη απορροής.

Όσον αφορά την αναπαράσταση των μεμονωμένων γεγονότων γίνεται μέσω εμπειρικών ή συστημικών προσεγγίσεων όπως είναι η ορθολογική μέθοδος, το μοναδιαίο υδρογράφημα οι οποίες δεν συμπεριλαμβάνουν τις διενέργειες της

εξατμισοδιαπνοής και της διήθησης. Στην περίπτωση της διαχρονικής εξέλιξης του υδρολογικού κύκλου η αναπαράσταση γίνεται μέσα από κάποιο φυσικό ή εννοιολογικό υπόβαθρο (physical ή conceptual) αναπαρίσταται σε συνεχή χρόνο οι κύριες διενέργειες του υδρολογικού κύκλου, με την χρήση εργαλείων προσομοίωσης.

Η μαθηματική αναπαράσταση ενός μοντέλου υδρολογικής προσομοίωσης είναι το παρακάτω: $y = h(s_0, x, \theta)$

όπου, S_0 : οι αρχικές και οριακές συνθήκες του φυσικού συστήματος (π.χ. ύψη εδαφικής υγρασίας, στάθμες υπόγειου νερού) στην έναρξη της προσομοίωσης, δηλαδή στο χρονικό βήμα $t = 0$

x : οι υδρολογικές μεταβλητές εισόδου ή αλλιώς φορτίσεις (βροχόπτωση, δυνητική εξατμοδιαπνοή)

θ : τα χαρακτηριστικά μεγέθη του συστήματος (ιδιότητες - παράμετροι)

y : οι μεταβλητές εξόδου ή αποκρίσεις του μοντέλου (π.χ. απορροή, εξατμοδιαπνοή, εκφόρτιση υπόγειων νερών).

Η παραπάνω εξίσωση θεωρείται ως ένας μη γραμμικός μετασχηματισμός και βασίζεται στην παραδοχή ότι τα μοντέλα υδρολογικής προσομοίωσης αναπαριστούν φυσικές διεργασίες που περιγράφονται από συστήματα διαφορικών εξισώσεων μέσω μαθηματικών σχέσεων που έχουν καθορισμένη χωρική και χρονική διακριτότητα (Λούκας, 2015).

Ακόμα τα μοντέλα μπορούν να διακριθούν, σε ενιαία ή αδρομερή (lumped) τα οποία βασίζονται στην υπόθεση ότι υπάρχει ομοιόμορφη κατανομή των μεγεθών εισόδου (βροχή) και εξόδου (απορροή) στην επιφάνεια της λεκάνης απορροής. Στα κατανεμημένα (distributed) τα οποία βασίζονται στην υπόθεση της χωρικής κατανομής των μεγεθών εισόδου και εξόδου στην λεκάνη απορροής. Στα συγκεκριμένα μοντέλα γίνεται διαχωρισμός της λεκάνης απορροής σε τμήματα με ανομοιόμορφα τοπογραφικά ή άλλα χαρακτηριστικά. Μονάδα αναφοράς τους είναι το HRU (Hydrologic Response Unit). Ενώ υπάρχουν και τα ημι-κατανεμημένα μοντέλα (semi-distributed).

Δύο ακόμα ταξινομήσεις που μπορούν να γίνουν για τα συνεχή μοντέλα βροχής - απορροής μπορεί να είναι με βάση του είδους των εξισώσεων. Αναλυτικότερα μπορεί να είναι φυσικής βάσης να χρησιμοποιούν δηλαδή απευθείας τις εξισώσεις που διέπουν το φυσικό φαινόμενο, μπορεί να είναι εννοιολογικά δηλαδή ο υδρολογικός κύκλος να αναπαρίσταται με την βοήθεια ιδεατών στοιχείων όπου το

κάθε ένα από αυτά να προσομοιώνει μια στοιχειώδη διαδικασία του φυσικού φαινομένου και τα μοντέλα του μαύρου κουτιού όπου χρησιμοποιούν παραμέτρους που δεν έχουν φυσική σημασία.

Τέλος είναι τα μοντέλα που βασίζονται στην τυχαιότητα των φαινομένων, και μπορεί να είναι προσδιοριστικά (determinative) να χρησιμοποιούν δηλαδή πολλά δεδομένα εισόδου και να δίνουν σαφή και μονοσήμαντα αποτελέσματα ή να είναι στοχαστικά (stochastic) τα οποία βασίζονται στα στατιστικά χαρακτηριστικά των μεγεθών (Παναγιώτου, 2018).

Στην συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο βροχής - απορροής «Thomas abcd», το οποίο είναι ενιαίο και συνεχές, προσδιοριστικό και φυσικής βάσης.

3.3.2 Το μοντέλο «Thomas abcd»

Ένα υδρολογικό μοντέλο ορίζεται σαν ένα σύνολο μαθηματικών εξισώσεων, οι οποίες απεικονίζουν κατά προσέγγιση το σύνολο των αλληλοσυσχετιζόμενων φαινομένων που υπεισέρχονται στην διαδικασία μετατροπής της βροχής σε απορροή.

Το Υδρολογικό Μοντέλο «Thomas abcd» αξιοποιήθηκε για την εκπόνηση της συγκεκριμένης εργασίας, το οποίο έχει καταστεί κατάλληλο για την προσομοίωση της λεκάνης απορροής σε μηνιαία βάση μέσω της χρήσης εξισώσεων συνέχειας που βασίζονται κύρια στις τέσσερις παραμέτρους a , b , c , d , όπου η καθεμία έχει μια ειδική φυσική ερμηνεία.

Πιο συγκεκριμένα οι εξισώσεις του βασίζονται σε τέσσερις παραμέτρους:

- a: Ελέγχει την ποσότητα της απορροής και της τροφοδοσίας που εμφανίζεται όταν τα εδάφη είναι υπό-κορεσμένα.
- b: Ελέγχει το επίπεδο κορεσμού των εδαφών.
- c: Καθορίζει το ποσοστό τροφοδοσίας της επιφανειακής απορροής από τα υπόγεια ύδατα.
- d: Ελέγχει το ρυθμό της αναπλήρωσης των υπογείων υδάτων.

Ειδικότερα (Thomas et al., 1983):

- Η παράμετρος a ($0 \leq a \leq 1$) αντανακλά την τάση της απορροής να συμβεί πριν το έδαφος είναι πλήρως κορεσμένο.
- Η παράμετρος b είναι το ανώτατο όριο για το ποσό της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής και αποθήκευσης της υγρασίας του εδάφους σε ένα συγκεκριμένο χρονικό βήμα. Προφανώς αυτή η παράμετρος εξαρτάται από την ικανότητα της λεκάνης να κρατήσει το νερό μέσα στον ανώτερο ορίζοντα του εδάφους.

- Η παράμετρος c είναι ίση με το κλάσμα της ροής των υδατορευμάτων που προκύπτουν από την απορροή των υπόγειων υδάτων σε ένα δεδομένο χρονικό βήμα. Μακροπρόθεσμα ορίζεται ως ο δείκτης βασικής ροής (BFI), ένας δείκτης που χρησιμοποιείται συνήθως σε μελέτες που αναπτύσσουν σχέσεις μεταξύ των χαρακτηριστικών της λεκάνης απορροής και την απορροή των υπόγειων υδάτων σε ένα υδατόρευμα.
- Το αντίστροφο της παραμέτρου d είναι ίσο με το μέσο χρόνο παραμονής των υπόγειων υδάτων.

Το μοντέλο ορίζει δύο μεταβλητές κατάστασης:

- W_t , που ονομάζεται «διαθέσιμο νερό» και
- Y_t , που ονομάζεται «δυναμική εξατμισοδιαπνοή».

Μέσω του παραπάνω μοντέλου στοχεύουμε να φτάσουμε στην εκτιμώμενη ημερήσια/μηνιαία απορροή QE . Ισχύει: $QE(t) = DR(t) + OG(t)$

Για να φτάσουμε ωστόσο σε αυτή χρειάζεται να υπολογιστούν τα επιμέρους μεγέθη που αφορούν την άμεση επιφανειακή απορροή $DR(t)$, την υπόγεια απορροή $QG(t)$, την υπόγεια αποθηκευτικότητα στο τέλος της περιόδου t $G(t)$, την τροφοδοσία του υπόγειου υδροφορέα $GR(t)$, το διαθέσιμο νερό $W(t)$ και την δυναμική εξατμισοδιαπνοή $Y(t)$.

Η υπόγεια απορροή είναι ίση με: $QG(t) = dG(t)$

Η υπόγεια αποθηκευτικότητα στο τέλος της περιόδου t είναι: $G(t) = (GR(t) + G(t-1))/(d+1)$

Όπου: $GR(t)$: η τροφοδοσία του υπόγειου υδροφορέα, δίνεται από τη σχέση: $GR(t) = c(W(t) - Y(t))$.

$W(t)$ & $Y(t)$: οι δύο μεταβλητές κατάστασης που δίνονται αντίστοιχα από τις παρακάτω σχέσεις: $W(t) = P(t) + SN(t) + S(t-1)$

Όπου: $P(t)$: η βροχόπτωση κατά τη χρονική περίοδο t , $SN(t)$: η χιονόπτωση κατά τη χρονική περίοδο t , $S(t-1)$: η υγρασία του εδάφους κατά το προηγούμενο χρονικό βήμα $t-1$, $Y(t) = E(t) + S(t)$, Όπου $E(t)$: η εξατμισοδιαπνοή και $S(t)$: η υγρασία του εδάφους κατά τη χρονική περίοδο t .

Η άμεση επιφανειακή απορροή είναι ίση με: $DR(t) = (1-c)(W(t) - Y(t))$

Οι δύο μεταβλητές κατάστασης συνδέονται με την παρακάτω μη γραμμική σχέση (Thomas, 1981): $Y(t) = (W(t) + b)/2a - (((W(t) + b)/2a)^2 - W(t)b/a)^{0.5}$

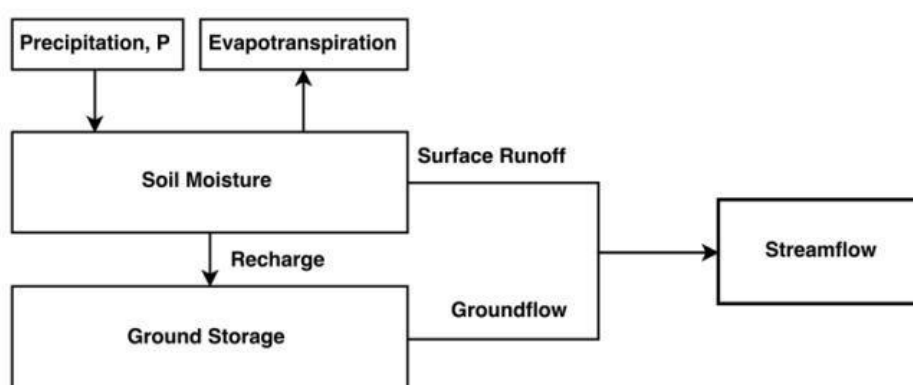
Η υγρασία του εδάφους δίνεται από τη σχέση: $S(t) = Y(t)exp(-PE(t)/b)$, όπου: $PE(t)$: η δυναμική εξατμισοδιαπνοή.

Παρακάτω απεικονίζεται ένα μέρος του πίνακα με τις εξισώσεις που εφαρμόστηκαν για τον υπολογισμό της απορροής καθώς και ένα διάγραμμα με την δομή του μοντέλου.

α)

Date	m	y	P(t) [mm]	PE(t) [mm]	W(t) [mm]	Y(t) [mm]	S(t) [mm]	E(t) [mm]	GR(t) [mm]	DR(t) [mm]	G(t) [mm]	QG(t) [mm]	QE(t) [mm]	Q _{obsi} [mm]	S _{obsi}	S _i
Οκτ-05	10	2005	58,24	55,30	158,28	156,20	149,75	6,45	1,88	0,20	41,88	0,00	0,20	1,173	30,53	0,95
Νοε-05	11	2005	661,81	29,37	811,57	723,81	707,78	16,03	79,31	8,45	121,19	0,00	8,45	5,875	0,68	6,62
Δεκ-05	12	2005	344,77	20,51	1052,55	877,70	864,09	13,62	158,02	16,83	279,20	0,00	16,83	28,925	494,02	146,26
Ιαν-06	1	2006	174,70	21,54	1038,79	870,00	855,82	14,17	152,54	16,25	431,74	0,00	16,25	12,832	37,62	11,67
Φεβ-06	2	2006	251,39	31,50	1107,21	906,98	885,45	21,53	180,95	19,27	612,70	0,00	19,27	17,446	115,51	3,34
Μαρ-06	3	2006	164,22	55,66	1049,67	876,10	839,70	36,41	156,86	16,71	769,56	0,00	16,71	22,680	255,40	35,66
Απρ-06	4	2006	76,51	85,49	916,20	795,48	745,27	50,21	109,10	11,62	878,66	0,00	11,62	15,298	73,95	13,52
Μαϊ-06	5	2006	31,06	121,05	776,33	698,12	636,56	61,56	70,69	7,53	949,35	0,00	7,53	12,314	31,53	22,89
Ιουν-06	6	2006	20,76	151,47	657,31	606,06	539,94	66,12	46,32	4,93	995,67	0,00	4,93	8,157	2,13	10,39

β)



Σχήμα 12 (α) Δείγμα του πίνακα μοντέλου υδατικού ισοζυγίου «Thomas abcd», (β)

Δομή μοντέλου υδατικού ισοζυγίου «Thomas abcd» (Πηγή: Bournas et al., 2017)

3.3.3 Βαθμονόμηση μοντέλου

Ως επακόλουθο έγινε η βαθμονόμηση του μοντέλου, αξιοποιώντας τις διαθέσιμες χρονοσειρές από τον υδρομετρικό σταθμό Βιβάρι, δύο φορές ώστε στο τέλος να επιλεγθούν οι καλύτεροι παράμετροι. Η πρώτη βαθμονόμηση έγινε για το 70% των δεδομένων δηλαδή για χρονική περίοδο από 1^η Οκτωβρίου 2005 μέχρι 1^η Ιουνίου 2008 και με επαλήθευση το 30% των δεδομένων, δηλαδή για περίοδο 1^η Ιουλίου 2008 με 1^η Σεπτεμβρίου 2009. Και η δεύτερη βαθμονόμηση έγινε για το 60% των δεδομένων δηλαδή για χρονική περίοδο από 1^η Οκτωβρίου 2005 μέχρι 1^η Ιανουαρίου 2008 και με επαλήθευση το 40% των δεδομένων, δηλαδή για 1^η Φεβρουαρίου 2008 με 1^η Σεπτεμβρίου 2009. Για την ολοκλήρωση αυτής της διαδικασίας είναι απαραίτητο το υπολογιστεί ο συντελεστής EC ξεχωριστά για κάθε υποπερίοδο, ως μέτρο επίδοσης.

Ο συντελεστής EC δίνεται από τον εξής τύπο:

$$EC = \frac{S_{obs} - S_i}{S_{obs}}$$

Ο συντελεστής αυτός είναι πολύ σημαντικός καθώς η συστηματική διαδικασία προσαρμογής των τιμών των παραμέτρων ενός υδρολογικού μοντέλου που επιθυμούμε να γίνει (στην περίπτωση μας για τις μεταβλητές Q_{obs} και QE , παρατηρούμενη και υπολογισμένη μηνιαία απορροή, αντίστοιχα), απαιτεί την προσομοιωμένη απόκριση τους ώστε να προσεγγίζουν όσο το δυνατό περισσότερο τις αντίστοιχες παρατηρούμενες τιμές. Η διαδικασία της βαθμονόμησης πραγματοποιήθηκε με στόχο τη μεγιστοποίηση της τιμής του παραπάνω συντελεστή («βέλτιστη τιμή» η στοχική συνάρτηση ίση με τη μονάδα), αξιοποιώντας το πρόσθετο Επίλυσης (Solver) του Microsoft Office Excel.

3.3.4 Εξατμισοδιαπνοή

Ο όρος εξατμισοδιαπνοή συνδέεται με δύο έννοιες: η δυνητική εξατμισοδιαπνοή EPT ή PET που ορίζεται από τον Penman ως το ποσό του νερού που διαπνέεται και εξατμίζεται σε έναν δεδομένο χρόνο από μια χαμηλή πράσινη βλάστηση, που καλύπτει εντελώς το έδαφος, ομοιόμορφου ύψους και με επάρκεια εδαφικού νερού (Αλεξανδρής, 2016), και η πραγματική εξατμισοδιαπνοή που ορίζεται ως η ταυτόχρονη διαδικασία του νερού που τελικά εξατμίζεται από το έδαφος και μέσω της διαπνοής, κατά τις οποίες είναι δύσκολος ο διαχωρισμός των υδρατμών που παράγονται. Η πραγματική εξατμισοδιαπνοή είναι πάντα μικρότερη ή το πολύ ίση με την δυνητική εξατμισοδιαπνοή (Μπαλτάς, 2012).

Το όργανο που χρησιμοποιείται για την μέτρηση της φυσικής εξάτμισης είναι το εξατμισόμετρο, το οποίο υπολογίζει την απώλεια νερού από μια μικρή λεκάνη. Η έκταση και ο όγκος του νερού μια λεκάνης σε σχέση με τα αντίστοιχα μεγέθη ενός ταμιευτήρα διαφέρουν πολύ έχοντας ως συνέπεια την υπερεκτίμηση της πραγματικής τιμής της εξάτμισης. Λόγω των διάφορων προβλημάτων που προκύπτουν, προτιμάτε ο τρόπος εκτίμησης της εξάτμισης και της εξατμισοδιαπνοής να γίνεται σε συνάρτηση άλλων μετεωρολογικών μεταβλητών που την επηρεάζουν. Η πιο συχνή και εύκολα μετρήσιμη μετεωρολογική μεταβλητή είναι η θερμοκρασία, η οποία και χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής (Ζωγόπουλος, 2012).

Η απλούστερη μέθοδος για την εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής είναι η μέθοδος Thornthwaite, με την οποία υπολογίζεται η μηνιαία εξατμισοδιαπνοή με μοναδικό

δεδομένο την μέση μηνιαία θερμοκρασία, και η οποία εφαρμόστηκε και στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας ελλείπει περισσότερων δεδομένων.

Η εξίσωση της είναι η εξής: $E_p = 16\left(\frac{10t_i}{J}\right)^a \frac{\mu N}{360}$

Όπου το E_p είναι η δυνητική εξατμισοδιαπνοή σε mm ανά μήνα, το t_i είναι η μέση μηνιαία θερμοκρασία σε °C. Το μ είναι ο αριθμός των ημερών, το N είναι η μέση αστρονομική διάρκεια της ημέρας, το J είναι ο ετήσιος δείκτης θερμοκρασίας και το a μια εμπειρική παράμετρος που εξαρτάται από τον δείκτη J (Λουκάς, 2015).

Ο δείκτης θερμοκρασίας J , δίνεται από την παρακάτω σχέση: $J = \sum_{i=1}^{12} j_i$

Ο μηνιαίος δείκτης της θερμοκρασίας υπολογίζεται σε συνάρτηση της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας από την παρακάτω εξίσωση: $j_i = 0.09t_i^{3/2}$

Με την μέθοδο Thornthwaite (Thornthwaite, 1948) μπορεί να γίνει η εκτίμηση της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής με την παρακάτω εξίσωση:

$$PET=16 L_d(10 T/ I)^a \text{ (σε mm)}$$

Το T στην παραπάνω εξίσωση είναι η μηνιαία θερμοκρασία της λεκάνης απορροής σε °C, το I είναι ο δείκτης θερμότητας που δίνεται από την παρακάτω σχέση: $I = \sum_{n=1}^{12} \left(\frac{T_n}{5}\right)^{1.514}$

Για τον υπολογισμό του δείκτη θερμότητας είναι απαραίτητο το T_n όπου είναι η κανονική θερμοκρασία κάθε μήνα, το L_d είναι ένας διορθωτικός συντελεστής που υπολογίζεται από μετεωρολογικούς πίνακες ως συνάρτηση του μήνα και του γεωγραφικού πλάτους και το a είναι ο συντελεστής που υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$a = 0.0000000675 * I^3 - 0.000077 * I^2 + 0.01792 * I + 0.49239$$

Πίνακας 4 Μετεωρολογικός πίνακας / συνάρτηση με μήνα & γεωγραφικό πλάτος
(Πηγή: Teegavararu, 2012).

Latitude	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
0	1.04	0.94	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04
10 N	1.00	0.91	1.03	1.03	1.08	1.06	1.08	1.07	1.02	1.02	0.98	0.99
20 N	0.95	0.90	1.03	1.05	1.13	1.11	1.14	1.11	1.02	1.00	0.93	0.94
30 N	0.90	0.87	1.03	1.08	1.18	1.17	1.20	1.14	1.03	0.98	0.89	0.88
40 N	0.84	0.83	1.03	1.11	1.24	1.25	1.27	1.18	1.04	0.96	0.83	0.81
50 N	0.74	0.78	1.02	1.15	1.33	1.36	1.37	1.25	1.06	0.92	0.76	0.70
10 S	1.08	0.97	1.05	0.99	1.01	0.96	1.00	1.01	1.00	1.06	1.05	1.10
20 S	1.14	1.00	1.05	0.97	0.96	0.91	0.95	0.99	1.00	1.08	1.09	1.15
30 S	1.20	1.03	1.06	0.95	0.92	0.85	0.90	0.96	1.00	1.12	1.14	1.21
40 S	1.27	1.06	1.07	0.93	0.86	0.78	0.84	0.92	1.00	1.15	1.20	1.29
50 S	1.37	1.12	1.08	0.89	0.77	0.67	0.74	0.88	0.99	1.19	1.29	1.41

month	DATE	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ A (T)	j_i	j	α	μ	Γεωγραφικό Πλάτος Ηρακλείου $\phi(^{\circ})$	Μηνιαία Ποσοστά Ωρών Ημέρας P για $\phi=36^{\circ}$	Μηνιαία Ποσοστά Ωρών Ημέρας P για $\phi=38^{\circ}$	Μηνιαία Ποσοστά Ωρών Ημέρας P για $\phi=36,823^{\circ}$	N	Er (ΜΕΘΟΔΟΣ Thornthwaite) mm/μήνα
1							36,82	6,99	6,87	6,82	9,96	#ΔΙΑΙΡ./0!
2								6,86	6,79	6,76	9,87	#ΔΙΑΙΡ./0!
1								8,35	8,34	8,34	12,17	#ΔΙΑΙΡ./0!
3								8,85	8,90	8,92	13,02	#ΔΙΑΙΡ./0!
1								9,81	9,92	9,97	14,55	#ΔΙΑΙΡ./0!
4								9,83	9,95	10,00	14,60	#ΔΙΑΙΡ./0!
1								9,99	10,10	10,15	14,81	#ΔΙΑΙΡ./0!
5								9,4	9,47	9,50	13,87	#ΔΙΑΙΡ./0!
1								8,36	8,38	8,39	12,25	#ΔΙΑΙΡ./0!
10	1/10/1970	21,36	8,89	113,05	2,31	31,00		7,85	7,90	7,92	11,56	69,24
11	1/11/1970	17,72	6,71	113,05	2,31	28,00		6,92	6,82	6,78	9,90	34,77
12	1/12/1970	13,98	4,70	113,05	2,31	31,00		6,79	6,66	6,61	9,65	21,69
1	1/1/1971	13,67	4,55	113,05	2,31	30,00		6,99	6,87	6,82	9,96	20,57
2	1/2/1971	12,89	4,16	113,05	2,31	31,00		6,86	6,79	6,76	9,87	18,41
3	1/3/1971	14,14	4,78	113,05	2,31	30,00		8,35	8,34	8,34	12,17	27,19
4	1/4/1971	18,69	7,27	113,05	2,31	31,00		8,85	8,90	8,92	13,02	57,27
5	1/5/1971	23,82	10,46	113,05	2,31	31,00		9,81	9,92	9,97	14,55	112,03
6	1/6/1971	30,39	15,08	113,05	2,31	30,00		9,83	9,95	10,00	14,60	190,88
7	1/7/1971	31,91	16,22	113,05	2,31	31,00		9,99	10,10	10,15	14,81	223,96

Σχήμα 13 Δείγμα του πίνακα εφαρμογής της μεθόδου Thornthwaite

3.3.5 Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων μοντέλου

Η διαδικασία της ανάλυσης ευαισθησίας των παραμέτρων (sensitivity analysis) του μοντέλου γίνεται για να ελεγχθεί αν το μοντέλο είναι σωστά ρυθμισμένο και πόσο επηρεάζεται από τις μεταβολές που μπορεί να γίνουν στις παραμέτρους. Πιο αναλυτικά υπολογίζεται το ποσοστό της μεταβολής του μέσου όρου των προσομοιωμένων τιμών της απορροής για τα έτη που έχει ρυθμιστεί το μοντέλο σε συμφωνία με το ποσοστό της μεταβολής των βέλτιστων τιμών των παραμέτρων a , b , c , d (Παναγιώτου, 2018).

Στην παρούσα ερευνητική εργασία εφαρμόστηκε η μέθοδος ανάλυσης ευαισθησίας «one [factor] at a time» (O[F]AT). Στόχος της διαδικασίας αυτής είναι να καθορισθεί ο βαθμός με τον οποίο κάθε μεταβλητή ξεχωριστά επηρεάζει τα αποτελέσματα.

3.3.6 Σενάρια που διερευνώνται

Για να προχωρήσουμε στην εφαρμογή των μοντέλων θα πρέπει να αξιοποιηθούν δεδομένα που παρέχονται όπως αναφέρθηκε και παραπάνω από την εφαρμογή DEAR-CLIMA (<https://meteo3.geo.auth.gr:3838/>). Ως πρώτο βήμα προσδιορίστηκε ένα σημείο κεντρικά στην περιοχή ενδιαφέροντος με συντεταγμένες Longitude: 22,678 και Latitude: 36,823, ώστε να ληφθούν οι χρονοσειρές του αντίστοιχου φατνίου. Αναζητήθηκαν οι χρονοσειρές για την βροχόπτωση και την θερμοκρασία για ιστορικές και μελλοντικές προσομοιώσεις σε μηνιαία βάση (βλ. παράδειγμα Σχήματος 10). Πρέπει να αναφερθεί ότι επειδή τα δεδομένα που παρέχονται από το EURO-CORDEX, δίνουν τις μηνιαίες τιμές της βροχόπτωσης σε μονάδες *χιλιοστά ανά μέρα*, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 10. Επομένως, σε ανάλογες εφαρμογές θα πρέπει οι τιμές να πολλαπλασιαστούν με τις ημέρες που αντιστοιχούν στον κάθε μήνα που ανήκει η τιμή.

Γενικότερα τα σενάρια που αξιοποιήθηκαν διέθεταν δεδομένα για ιστορικές χρονοσειρές και για μελλοντικές προβλέψεις υπό την επίδραση τριών σεναρίων συγκέντρωσης ρύπων. Η εκτίμηση της απορροής για τα μελλοντικά σενάρια έγινε σε εννέα από αυτά καθώς σε ένα εκ των διαθέσιμων μέσω της εφαρμογής δεν ήταν διαθέσιμη η θερμοκρασία.

Τα δεδομένα που διατίθενται αφορούν χρονοσειρές από την 1^η Ιανουαρίου του 1950 μέχρι 1^η Δεκεμβρίου του 2100.

- Στο πλαίσιο της εργασίας, για την ιστορική περίοδο επιλέχθηκε η χρονική περίοδος από 1^η Οκτωβρίου του 1970 μέχρι 1^η Σεπτεμβρίου του 2000, ως τριακονταετία αναφοράς.
- Η μελλοντική περίοδος χωρίστηκε σε δύο τμήματα:
 - το 1^ο αφορά την χρονική περίοδο 1^η Οκτωβρίου του 2030 μέχρι 1^η Σεπτεμβρίου του 2060 και
 - το 2^ο ξεκινά από 1^η Οκτωβρίου του 2060 μέχρι 1^η Σεπτεμβρίου του 2090.

Το κάθε τμήμα αντιστοιχεί σε 30 υδρολογικά έτη.

Για το κάθε τμήμα έγινε ο υπολογισμός της απορροής για δύο σενάρια εκπομπών αερίων:

- το RCP4.5 όπου είναι το πιο «ελπιδοφόρο» σενάριο και
- το RCP8.5 όπου είναι το πλέον αρνητικό, «δυσμενές».

Το σενάριο RCP4.5 αντιπροσωπεύει ένα σενάριο με βάση το οποίο θα σταθεροποιηθεί την παγκόσμια ακτινοβολία στα $4.5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ το οποίο ισοδυναμεί με

650 ppm CO₂, χωρίς να υπερβεί αυτή την τιμή μέχρι το 2100. Οι προβλέψεις έχουν δείξει ότι η εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου θα κορυφωθούν μέχρι το 2040 και θα αρχίσουν να μειώνονται από εκείνο το σημείο και μετά. Το σενάριο έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να είναι οικονομικά αποδοτικό για να μπορέσει να επιτευχθεί ο στόχος του. Προϋποθέτει την εφαρμογή τεχνολογιών που συνδυάζουν την παραγωγή βιοενέργειας μαζί με την δέσμευση του CO₂ και την γεωλογική αποθήκευση (CCS) , οι οποίες θα επιλύσουν σε κάποιο βαθμό τις ενεργειακές απαιτήσεις του πλανήτη (Thomson et al., 2011).

Το σενάριο RCP8.5 αντιπροσωπεύει ένα σενάριο με βάση το οποίο στο μέλλον θα υπάρχει αρκετά υψηλός πληθυσμός, έλλειψη περιβαλλοντικών πολιτικών και πολιτικών για την κλιματική αλλαγή, σχετικά χαμηλή οικονομική ευημερία σε συνδυασμό με μέτριο ρυθμό τεχνολογικών προόδων που δεν θα επιλύουν αποτελεσματικά τις ενεργειακές απαιτήσεις. Οι εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου θα αυξηθούν ραγδαία καθ' όλη τη διάρκεια του 21ου αιώνα αυξάνοντας την ακτινοβολία αερίων του θερμοκηπίου στο 8,5 Watt/m² σε σχέση με την προβιομηχανική περίοδο (Riahi et al., 2011).

Στους Πίνακες 5 και 6 συνοψίζονται οι διαθέσιμοι συνδυασμοί σεναρίων που παρέχονται για τις μεταβλητές μηνιαίας θερμοκρασίας και μηνιαίας βροχόπτωσης.

Πίνακας 5 Συνδυασμοί κλιματικών σεναρίων θερμοκρασίας

Variable : Temperature					
Regional Climate Model	Global Climate Model	historical	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
CLMcom-CCLM4-8-17	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	•		•	•
CLMcom-CCLM4-8-17	MOHC-HadGEM2-ES	•		•	•
CLMcom-CCLM4-8-17	MPI-M-MPI-ESM-LR	•		•	•
CNRM-ALADIN53	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	•	•	•	•
SMHI-RCA4	IPSL-IPSL-CM5A-MR	•		•	•
SMHI-RCA4	MOHC-HadGEM2-ES	•		•	•
KNMI-RACMO22E	ICHEC-EC-EARTH	•		•	•
IPSL-INNERIS-WRF331F	IPSL-IPSL-CM5A-MR	•		•	•
MPI-CSC-REMO2009	MPI-M-MPI-ESM-LR	•	•	•	•

Πίνακας 6 Συνδυασμοί κλιματικών σεναρίων βροχόπτωσης

Variable : Precipitation					
Regional Climate Model	Global Climate Model	historical	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
CLMcom-CCLM4-8-17	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	•		•	•
CLMcom-CCLM4-8-17	MOHC-HadGEM2-ES	•		•	•
CLMcom-CCLM4-8-17	MPI-M-MPI-ESM-LR	•		•	•
CNRM-ALADIN53	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	•	•	•	•
SMHI-RCA4	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	•		•	•
SMHI-RCA4	IPSL-IPSL-CM5A-MR	•		•	•
SMHI-RCA4	MOHC-HadGEM2-ES	•		•	•
KNMI-RACMO22E	ICHEC-EC-EARTH	•		•	•
IPSL-INERIS-WRF331F	IPSL-IPSL-CM5A-MR	•		•	•
MPI-CSC-REMO2009	MPI-M-MPI-ESM-LR	•	•	•	•

4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

4.1 Αρχική προσομοίωση και βαθμονόμηση μοντέλου

Για την εφαρμογή του μοντέλου υδατικού ισοζυγίου «Thomas abcd» στην περιοχή της υπολεκάνης του Βιβαρίου, που ανήκει στη λεκάνης απορροής του ποταμού Ευρώτα όπως αναλύθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο χρησιμοποιήθηκαν σαν πρώτο βήμα διαθέσιμα ιστορικά δεδομένα μηνιαίων τιμών βροχόπτωσης, θερμοκρασίας και απορροής που αφορούν την χρονική περίοδο 2005 μέχρι 2009.

Πραγματοποιήθηκε διερεύνηση στο 60-70% του μήκους της διαθέσιμης χρονοσειράς, βάσει του οποίου γίνεται η ρύθμιση του μοντέλου. Ομοίως, η επαλήθευση πραγματοποιείται με το υπόλοιπο της χρονοσειράς (40-30%, αντίστοιχα). Από φυσικής άποψης, για την βαθμονόμηση καθορίστηκαν πρόσθετα και οι περιορισμοί του Πίνακα 7.

Στους Πίνακες 8-11 που ακολουθούν συνοψίζονται τα ευρήματα, δηλαδή τα μέτρα της διαδικασίας βαθμονόμησης, όπως και οι αντίστοιχες τιμές των παραμέτρων. Μικρή διαφοροποίηση παρατηρείται, και σχετικά ικανοποιητική η τιμή του δείκτη επίδοσης, ο οποίος κυμαίνεται κοντά στο 0.7. Μετά το πέρας της διαδικασίας της βαθμονόμησης, οι τιμές των παραμέτρων αξιοποιήθηκαν για την προσομοίωση των υπό διερεύνηση σεναρίων.

Πίνακας 7 Περιορισμοί βαθμονόμησης

Περιορισμοί με βάση τους οποίους εργαστήκαμε
$a \leq 1$
$b \leq 1500$
$c \leq 1$
$d \leq 1$
$0.5 \leq EC \leq 1$

Πίνακας 8 Αποτέλεσμα βαθμονόμηση 70%

	Q_{obs}	S_{obs}	S	EC
Calibration 70% :	7,19	1401,67	427,92	0,695
Verification 30% :	15,31	6012,96	2450,16	0,593

Πίνακας 9 Παράμετροι για βαθμονόμηση 70%

a :	0,92538492
b :	1241,09362
c :	0,89142906
d :	0,00016239
S0 :	104,963662
G0 :	40

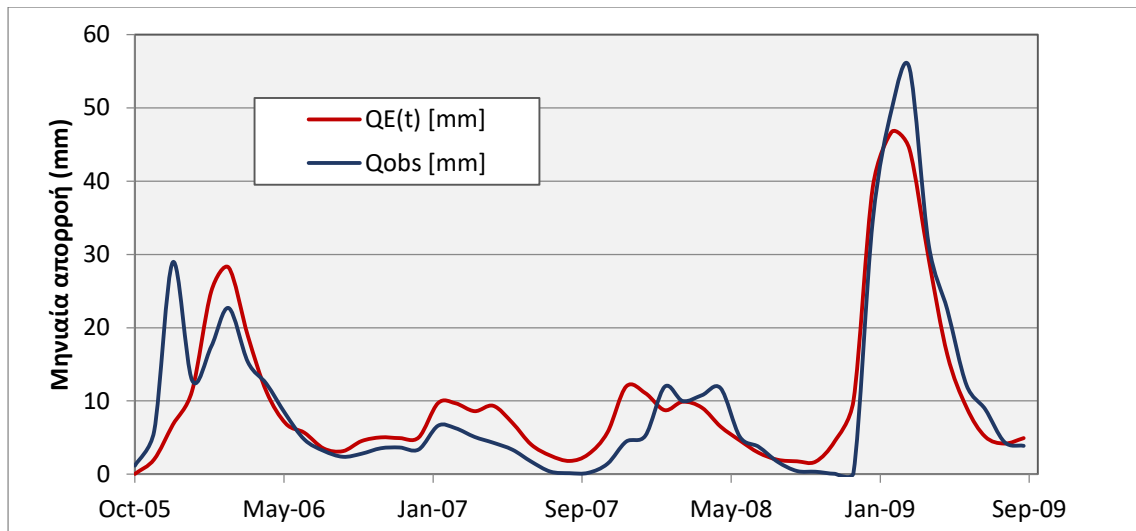
Πίνακας 10 Αποτέλεσμα βαθμονόμηση 60%

	Q_{obs}	S_{obs}	S	EC
Calibration 60% :	6,70	1326,60	326,67	0,754
Verification 40% :	13,96	6218,12	3110,51	0,500

Πίνακας 11 Παράμετροι για βαθμονόμηση 60%

a :	0,9015954
b :	1311,2702
c :	0,9037352
d :	0
S0 :	100,04206
G0 :	40

Με βάση τις τιμές των παραμέτρων του μοντέλου που παρουσιάζονται στον προηγούμενο πίνακα, παρουσιάζονται συγκριτικά οι τιμές της παρατηρημένης μηνιαίας απορροής (Q_{obs}) και της αντίστοιχης εκτιμημένης (Q_{est}) με βάση το μοντέλο «Thomas abcd», για την συνολική ιστορική περίοδο για την οποία διατίθενται δεδομένα (Σχήμα 14).



Σχήμα 14 Παρατηρημένη και εκτιμημένη μηνιαία απορροή (υπολεκάνη Βιβαρίου)

4.2 Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων μοντέλου

Η ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων του μοντέλου πραγματοποιείται προκειμένου να διαμορφωθεί μια ολοκληρωμένη εικόνα για την επίδραση των τιμών των παραμέτρων που καθορίστηκαν ως «βέλτιστες» στο τελικό αποτέλεσμα. Με άλλα λόγια, έχοντας υπολογίσει τις βέλτιστες τιμές των συντελεστών a , b , c , d μπορεί να πραγματοποιηθεί η ανάλυση ευαισθησίας, σκοπός της οποίας είναι να εστιάσει πως επηρεάζει το μοντέλο και τι αλλαγές προκαλεί η μεταβολή κάποιου συντελεστή. Δηλαδή, κάθε φορά αλλάζει μια μεταβλητή διατηρώντας τις υπόλοιπες βέλτιστες τιμές σταθερές και υπολογίζεται η επί τοις εκατό μεταβολή του συντελεστή απόδοσης (EC) που προκύπτει από την συγκεκριμένη αλλαγή της παραμέτρου. Όσο πιο μεγάλη είναι η επίδραση που έχει η αλλαγή της παραμέτρου στον συντελεστή, τόσο πιο ευαίσθητη θεωρείται. Η μέθοδος αυτή καλείται one at a time (OAT) ή one factor at a time (OFAT), ακριβώς επειδή η επίδραση εξετάζεται μεμονωμένα ανά παράμετρο. Στόχος της διαδικασίας αυτής είναι να καθοριστεί ο βαθμός με τον οποίο κάθε μεταβλητή επηρεάζει τα αποτελέσματα.

Για την υλοποίηση της διαδικασίας αρχικά μεταβάλλουμε μια μεταβλητή εισόδου (a , b , c , $S(0)$) κάθε φορά και με σταθερό βήμα εντός των ορίων των περιορισμών που έχουμε θέσει για τις τιμές που μπορεί να λάβει η παράμετρος, διατηρώντας σταθερές όλες τις άλλες παραμέτρους στην αρχική («βέλτιστη») τιμή τους. Στην συνέχεια επιστρέφουμε την μεταβλητή στην αρχική της τιμή («βέλτιστη») και επαναλαμβάνουμε την διαδικασία για την επόμενη μεταβλητή εισόδου/παράμετρο μοντέλου, με τον ίδιο τρόπο. Σημειώνεται ότι εξετάστηκαν οι παράμετροι a , b , c και

S(0) και όχι η παράμετρος d (εφόσον η τιμή του είναι μηδενική κατά τη βαθμονόμηση, η οποία ερμηνεύεται ως μη άμεση συνεισφορά του υπόγειου υδροφορέα στη συνολική απορροή της λεκάνης). Επίσης, η μεταβλητή G(0) κατ' επέκταση δεν επηρεάζει το μοντέλο αφού η τιμή του d είναι μηδενική. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση ευαισθησίας υπό μορφή πινάκων.

Πίνακας 12 Πίνακας παραμέτρου a

Μέση τιμή QE				
	% Μεταβολή	a Βιβάρι	Τελική	Μεταβολή (%)
100	1,00	1,98	N/A	N/A
95	0,95	1,93	N/A	N/A
90	0,90	1,88	N/A	N/A
85	0,85	1,83	N/A	N/A
80	0,80	1,78	N/A	N/A
75	0,75	1,73	N/A	N/A
70	0,70	1,68	N/A	N/A
65	0,65	1,63	N/A	N/A
60	0,60	1,59	N/A	N/A
55	0,55	1,54	N/A	N/A
50	0,50	1,49	N/A	N/A
45	0,45	1,44	N/A	N/A
40	0,40	1,39	N/A	N/A
35	0,35	1,34	N/A	N/A
30	0,30	1,29	N/A	N/A
25	0,25	1,24	N/A	N/A
20	0,20	1,19	N/A	N/A
15	0,15	1,14	N/A	N/A
10	0,10	1,09	N/A	N/A
0,95	0,01	1,00	6,03	40,59
0	0,00	0,99	10,16	0,00
-5	-0,05	0,94	15,21	56,35
-10	-0,10	0,89	17,15	76,32
-15	-0,15	0,84	18,32	88,42
-20	-0,20	0,79	19,15	96,90
-25	-0,25	0,74	19,77	103,33
-30	-0,30	0,69	20,27	108,43
-35	-0,35	0,64	20,68	112,62
-40	-0,40	0,59	21,02	116,15
-45	-0,45	0,54	21,32	119,18
-50	-0,50	0,50	21,57	121,82
-55	-0,55	0,45	21,80	124,15
-60	-0,60	0,40	22,00	126,23
-65	-0,65	0,35	22,18	128,09
-70	-0,70	0,30	22,35	129,78
-75	-0,75	0,25	22,50	131,32
-80	-0,80	0,20	22,63	132,73
-85	-0,85	0,15	22,76	134,04
-90	-0,90	0,10	22,88	135,24
-95	-0,95	0,05	22,99	136,36
-100	-1,00	0,00	7,05	30,56

Πίνακας 13 Πίνακας παραμέτρου *b*

	% Μεταβολή	<i>b</i> Βιβάρι	Τελική	Μεταβολή (%)
100	1,00	3000	7,06	30,52
90	0,90	2850	7,28	28,29
80	0,80	2700	7,52	25,95
70	0,70	2550	7,77	23,49
60	0,60	2400	8,03	20,90
50	0,50	2250	8,31	18,14
40	0,40	2100	8,61	15,19
30	0,30	1950	8,94	11,98
20	0,20	1800	9,30	8,44
10	0,10	1650	9,70	4,47
0	0,00	1500	10,16	0,00
-10	-0,10	1350	10,66	4,96
-20	-0,20	1200	11,21	10,36
-30	-0,30	1050	11,81	16,23
-40	-0,40	900	12,46	22,70
-50	-0,50	750	13,21	30,04
-60	-0,60	600	14,08	38,65
-70	-0,70	450	15,14	49,06
-80	-0,80	300	16,50	62,41
-90	-0,90	150	18,55	82,60
-100	-1,00	0	7,05	30,56

Πίνακας 14 Πίνακας παραμέτρου *c*

Μέση τιμή QE				
	% Μεταβολή	<i>c</i> Βιβάρι	Τελική	Μεταβολή (%)
100	1	1,54	-23,41	330,51
90	0,9	1,46	-20,06	297,46
80	0,8	1,38	-16,70	264,41
70	0,7	1,31	-13,34	231,36
60	0,6	1,23	-9,99	198,31
50	0,5	1,15	-6,63	165,26
40	0,4	1,07	-3,27	132,21
30	0,3	1,00	0,09	99,15
20	0,2	0,92	3,44	66,10
10	0,1	0,84	6,80	33,05
0	0	0,77	10,16	0,00
-10	-0,1	0,69	13,51	33,05
-20	-0,2	0,61	16,87	66,10
-30	-0,3	0,54	20,23	99,15
-40	-0,4	0,46	23,59	132,21
-50	-0,5	0,38	26,94	165,26

-60	-0,6	0,31	30,30	198,31
-70	-0,7	0,23	33,66	231,36
-80	-0,8	0,15	37,01	264,41
-90	-0,9	0,08	40,37	297,46
-100	-1	0,00	7,05	30,56

Πίνακας 15 Πίνακας παραμέτρου $S(0)$

Μέση τιμή QE				
	% Μεταβολή	$S(0)$ Βιβάρι	Τελική	Μεταβολή (%)
100	1	200	10,59	4,23
90	0,9	190	10,54	3,80
80	0,8	180	10,50	3,37
70	0,7	170	10,46	2,95
60	0,6	160	10,41	2,52
50	0,5	150	10,37	2,10
40	0,4	140	10,33	1,68
30	0,3	130	10,28	1,26
20	0,2	120	10,24	0,84
10	0,1	110	10,20	0,42
0	0	100	10,16	0,00
-10	-0,1	90	10,11	0,42
-20	-0,2	80	10,07	0,83
-30	-0,3	70	10,03	1,24
-40	-0,4	60	9,99	1,66
-50	-0,5	50	9,95	2,07
-60	-0,6	40	9,91	2,47
-70	-0,7	30	9,86	2,88
-80	-0,8	20	9,82	3,29
-90	-0,9	10	9,78	3,69
-100	-1	0	7,05	30,56

Η ανάλυση ευαισθησίας για τις παραμέτρους του μοντέλου «Thomas abcd» που πραγματοποιήθηκε οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ως πιο ευαίσθητη κρίνεται η παράμετρος c , ακολουθούμενη διαδοχικά από τις a , b και $S(0)$, η οποία πρακτικά δεν επηρεάζει την επίδοση του μοντέλου.

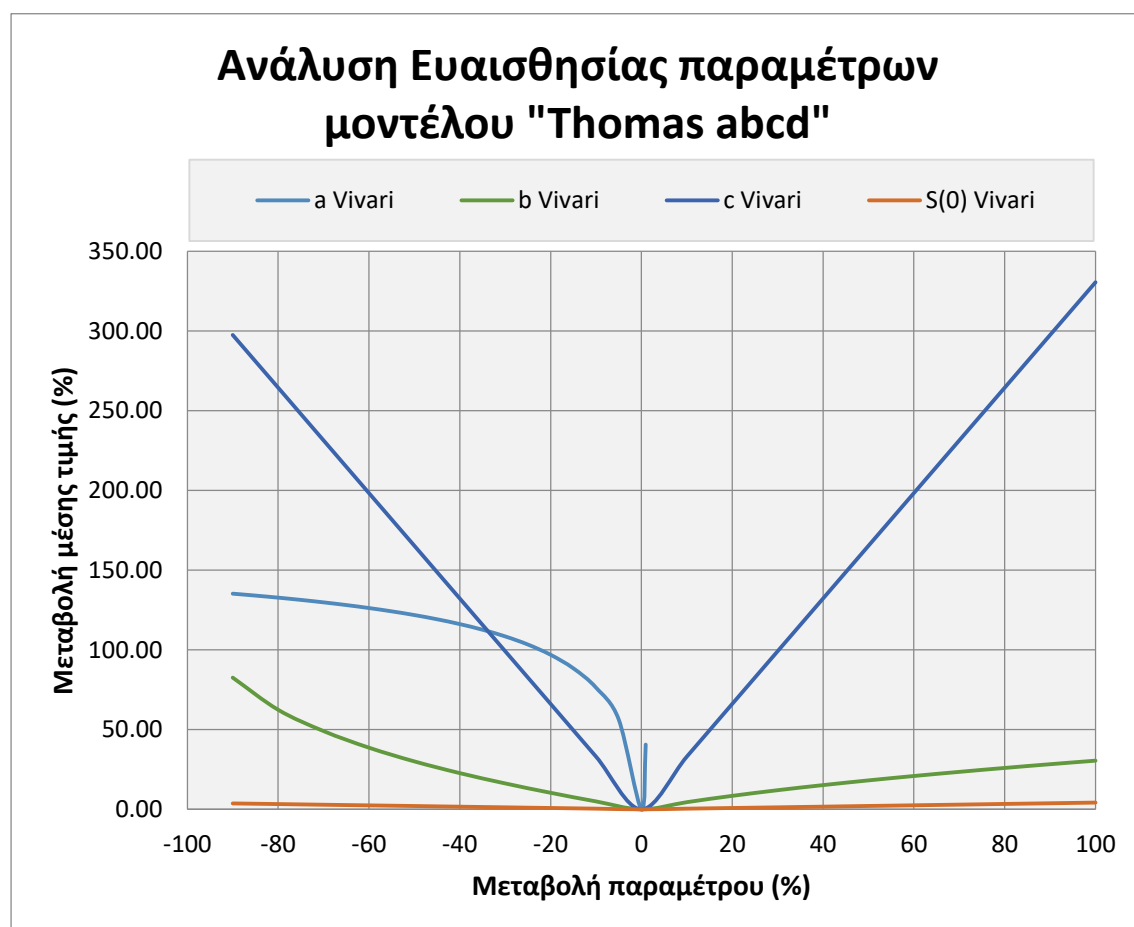
Πιο αναλυτικά η ευαισθησία της παραμέτρου c δείχνει ότι υπάρχει δευτερογενής τροφοδοσία από το υπόγειο σύστημα προς το ποτάμι.

Για τις παραμέτρους a , b προκύπτει ότι το εδαφικό νερό συμμετέχει σε μικρότερο βαθμό στην επιφανειακή απορροή. Ενώ η υπόγεια αποθηκευτικότητα $G(t)$ δεν τροφοδοτεί την απορροή (κατά την ρύθμιση έμεινε σταθερή και χαμηλή τιμή).

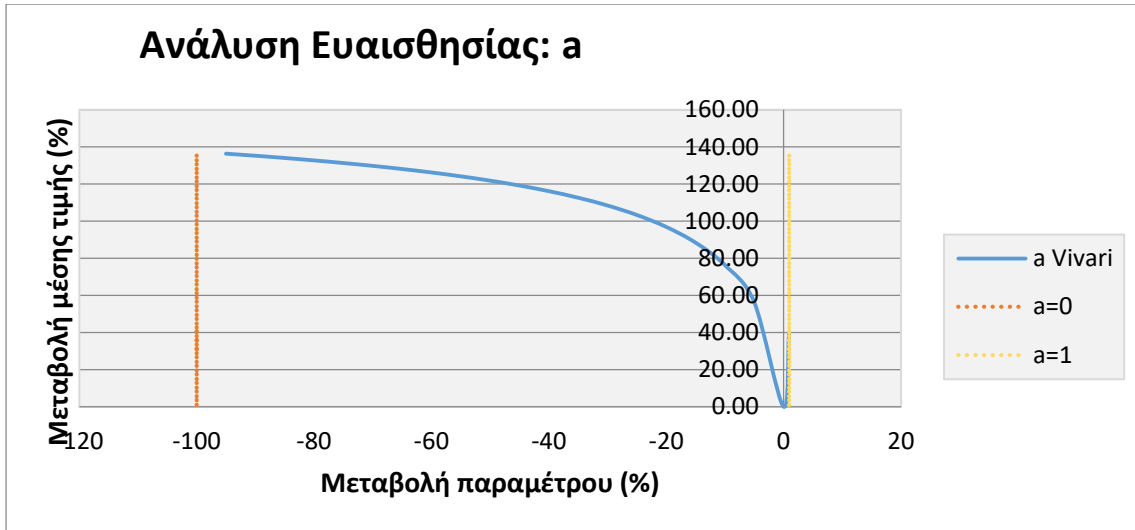
Η αρχική κατάσταση υγρασίας του εδάφους $S(0)$ είναι η λιγότερο ευαίσθητη παράμετρος του μοντέλου.

Για την καλύτερη κατανόηση, κατασκευάστηκαν και τα σχήματα που ακολουθούν.

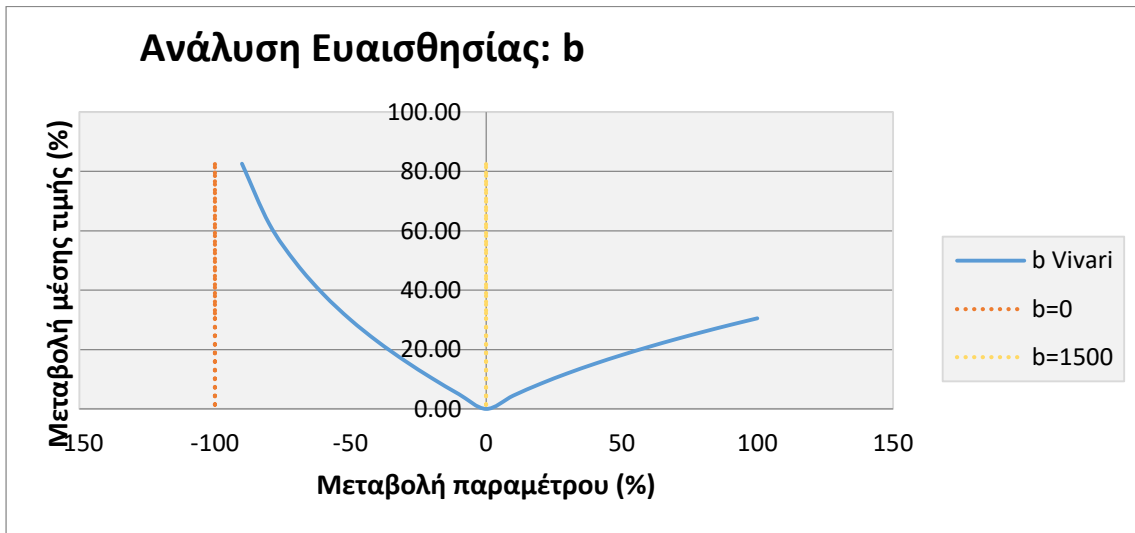
- Στο Σχήμα 15 παρουσιάζονται συγκριτικά τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας για όλες τις παραμέτρους, όπου όπως φαίνεται από την συμπεριφορά της c , οδηγεί στη μεγαλύτερη μεταβολή της τιμής του δείκτη της απόκλισης από τη μέση τιμή της απορροής.
- Τέλος, στα Σχήματα 16-19 παρουσιάζεται η συμπεριφορά κάθε παραμέτρου χωριστά, ενώ σημειώνονται και τα όρια τιμών που τίθενται ως φυσικοί περιορισμοί κατά την ανάλυση.



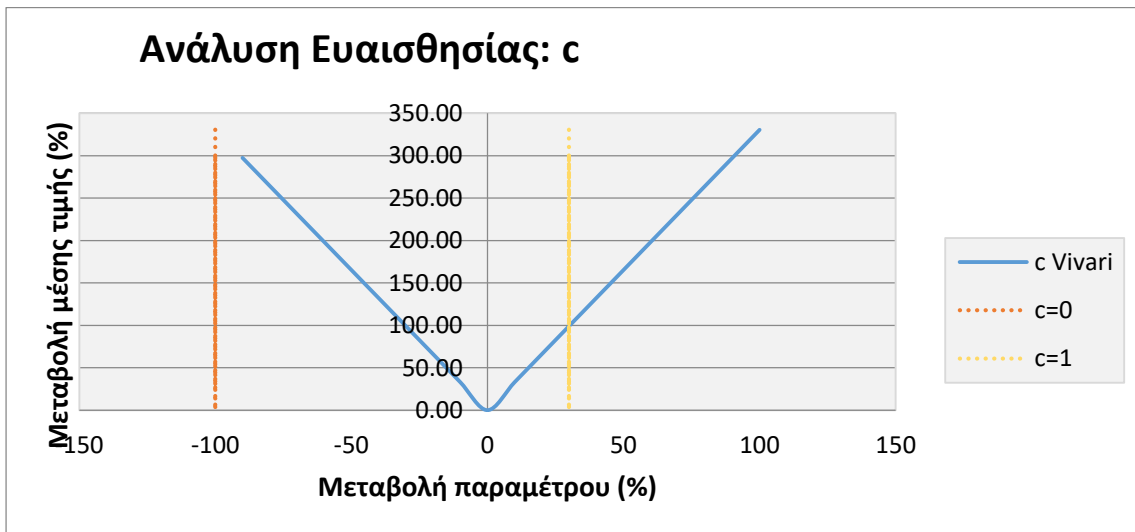
Σχήμα 15 Διάγραμμα μεταβολής μέσης τιμής απορροών



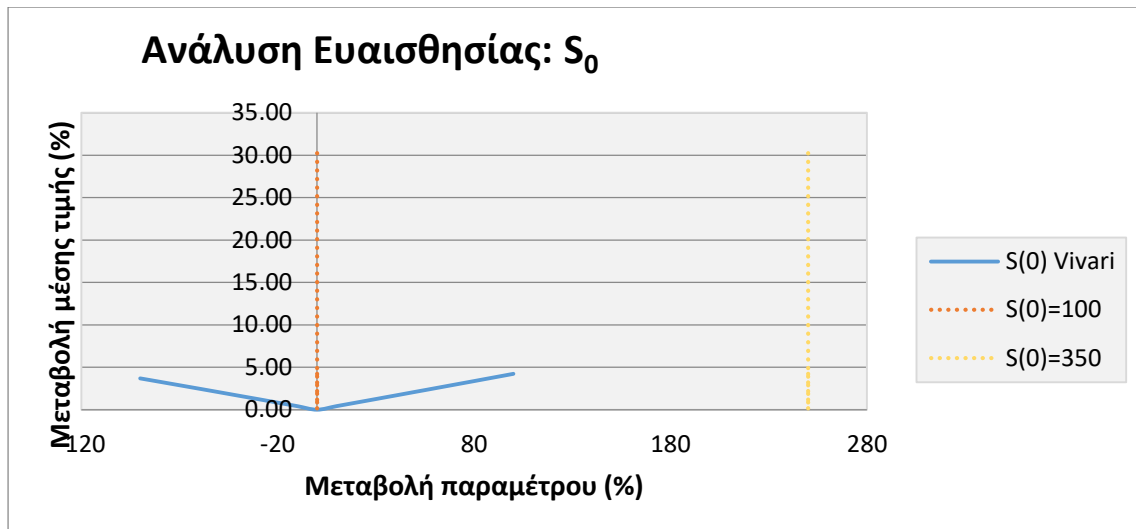
Σχήμα 16 Παράμετρος a



Σχήμα 17 Παράμετρος b



Σχήμα 18 Παράμετρος c



Σχήμα 19 Παράμετρος $S(0)$

4.3 Διερεύνηση κλιματικών σεναρίων

4.3.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων για τη μέση μηνιαία απορροή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν για τις χρονικές περιόδους 1970 με 2000 και για τις μελλοντικές περιόδους 2030 - 2060 και 2060- 2090 , για τα δύο σενάρια εκπομπών RCP4.5 και RCP8.5. Σημειώνεται ότι η περίοδος 1970-2000 διερευνήθηκε επίσης ανά σενάριο, ώστε να αξιοποιηθεί ως περίοδος αναφοράς (ιστορική) για τις συγκρίσεις με τις επιμέρους μελλοντικές εκτιμήσεις, καθώς οι τελευταίες βασίστηκαν σε μοντελοποιημένες χρονοσειρές υπό μορφή πλεγματικών δεδομένων, και με αυτό τον τρόπο τα αποτελέσματα κρίνονται κατάλληλα προς σύγκριση (σ.σ., «ανάλογα» ως προς την χωρική κλίμακα), κάτι που δεν θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί σε σχέση με τις ιστορικές χρονοσειρές της περιορισμένης περιόδου 2005-2009, οι οποίες και βασίζονται σε καταγραφές επί σταθμών εντός της υπολεκάνης Βιβαρίου.

Πραγματοποιήθηκαν τελικά οι ακόλουθες 45 ανεξάρτητες προσομοιώσεις με βάση το μοντέλο «Thomas abcd» σε μηνιαία βάση:

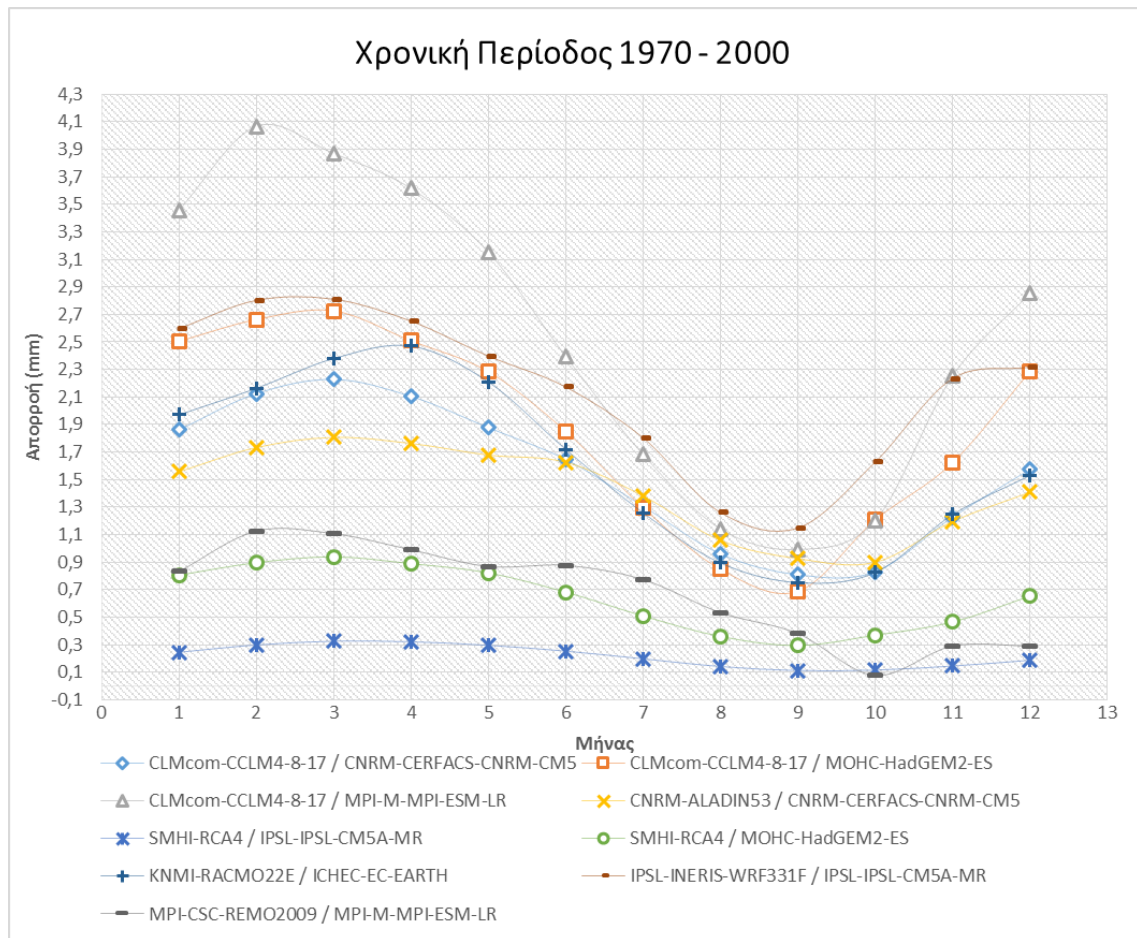
- Για τους διαθέσιμους εννέα (9) συνδυασμούς RCM-GCM, όπως παρουσιάζονται και στα υπομνήματα των διαγραμμάτων που ακολουθούν
- Για τις τρεις (3) υπό μελέτη περιόδους (μια ιστορική, και δύο μελλοντικές)
- Για τα δύο (2) κλιματικά σενάρια (RCP4.5, RCP8.5).

Καθώς το πλήθος των αποτελεσμάτων είναι μεγάλο, επιλέχθηκε ως βάση σύγκρισης να διερευνηθεί τελικά η μέση μηνιαία τιμή της απορροής (δοσμένη σε ισοδύναμα mm). Έτσι, για κάθε περίοδο παρουσιάζεται σε γράφημα η μέση μηνιαία τιμή για τα

τριάντα χρόνια και για 9 διαφορετικά σενάρια που προκύπτουν από τους επιμέρους συνδυασμούς RCM-GCM. Τέτοια γραφήματα παρέχονται ξεχωριστά όσον αφορά την ιστορική περίοδο και τις δύο μελλοντικές περιόδους, και επίσης σε διαφορετικά γραφήματα απεικονίζονται τα ευρήματα για τις δύο μελλοντικές περιόδους, με βάση τα δύο σενάρια (RCP4.5, RCP8.5).

Στα γραφήματα των Σχημάτων 20-25 απεικονίζονται τελικά τα όρια διακύμανσης της απορροής συγκριτικά για τα εννέα σενάρια. Παρατηρώντας τα γραφήματα βλέπουμε ότι:

- Για την περίοδο 1970 - 2000 (Σχήμα 20) το σενάριο CLMcom-CCLM4-8-17 / MPI-M-MPI-ESM-LR εμφανίζει την μέγιστη τιμή απορροής κοντά στο 4,1 mm σε σύγκριση με τα υπόλοιπα σενάρια.
- Το σενάριο SMHI-RCA4 / IPSL-IPSL-CM5A-MR φαίνεται καθ' όλη την χρονική περίοδο 1970-2000 να εμφανίζει πολύ μικρές τιμές απορροής, σχεδόν μηδενικές.
- Το σενάριο MPI-CSC-REMO2009 / MPI-M-MPI-ESM-LR είναι αυτό που δίνει την ελάχιστη τιμή απορροής για τον μήνα Οκτώβριο.
- Σε μια γενικότερη ανάλυση του γραφήματος παρατηρείται ότι από τον Ιανουάριο μέχρι και τον Ιούνιο οι τιμές της απορροής είναι σχετικά υψηλές, ενώ από τον Ιούλιο μέχρι και τον Οκτώβριο οι τιμές έχουν μειωθεί και τον Νοέμβριο - Δεκέμβριο αυξάνονται ξανά. Ακόμα είναι φανερό ότι αν και κανένα σενάριο δεν φέρει τα ίδια αποτελέσματα η πορεία που ακολουθούν οι καμπύλες είναι σχετικά παρόμοια, με την αναμενόμενη εποχική κύμανση, καθώς εμφανίζουν στους ίδιους μήνες τις ίδιες διακυμάνσεις.



Σχήμα 20 Αποτελέσματα προσομοιώσεων - διακύμανση μέσης μηνιαίας απορροής για την ιστορική περίοδο τριάντα υδρολογικών ετών (1970 - 2000)

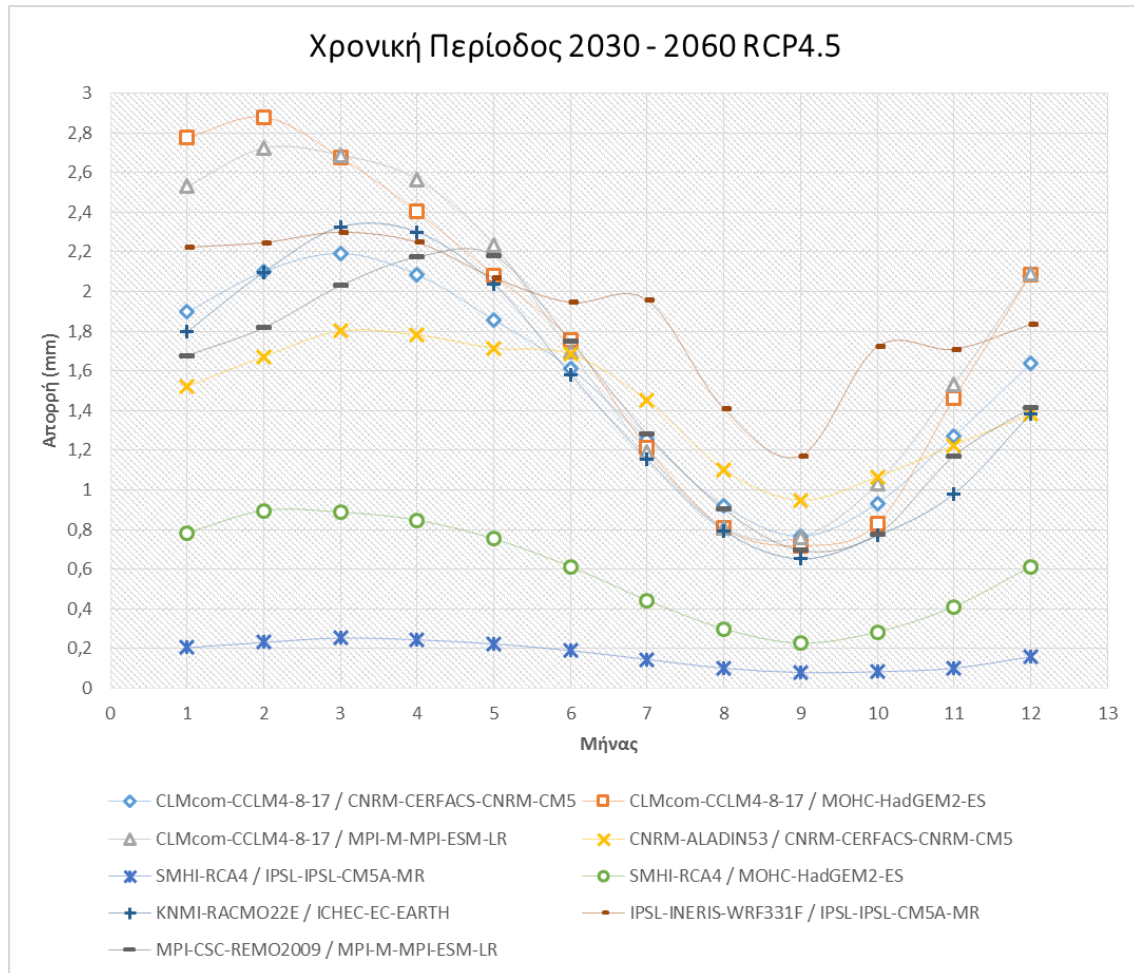
Για την περίοδο 2030 - 2060 (Σχήματα 21&23) παρατηρούμε από το γράφημα ότι υπάρχει μια *μείωση* στις υψηλότερες τιμές της απορροής και στα δύο σενάρια εκπομπών αερίων σε σχέση με την ιστορική περίοδο, κάτι το οποίο ήταν αναμενόμενο να συμβεί καθώς η μειωμένη απορροή είναι το αποτέλεσμα της αυξημένης εξατμισοδιαπνοής που προκύπτει λόγω της αυξητικής τάσης της θερμοκρασίας, αλλά και λόγω των συγκριτικά χαμηλότερων βροχοπτώσεων σε ορισμένες περιπτώσεις. Ωστόσο για το δυσμενέστερο σενάριο (RCP8.5) ήταν προσδοκώμενο ότι οι τιμές του θα ήταν χαμηλότερες σε σχέση με το σενάριο RCP4.5 που ήταν ευνοϊκότερο σενάριο, κάτι που δεν προκύπτει συστηματικά λόγω της μη συστηματικής μελλοντικής μείωσης των βροχοπτώσεων για την περιοχή στα υπόψη σενάρια. Ειδικότερα:

- Για το σενάριο RCP4.5 και την περίοδο 2030-2060 (Σχήμα 22), το σενάριο CLMcom-CCLM4-8-17/MOHC-HadGEM2-ES εμφανίζει την μεγαλύτερη τιμή της απορροής λίγο μεγαλύτερη από το 2,8mm.
- Για το σενάριο RCP8.5 και την περίοδο 2030-2060 (Σχήμα 23), το σενάριο CLMcom-CCLM4-8-17/MPI-M-MPI-ESM-LR, όπως και στην ιστορική περίοδο εμφανίζει την μεγαλύτερη τιμή απορροής κοντά στο 3mm.

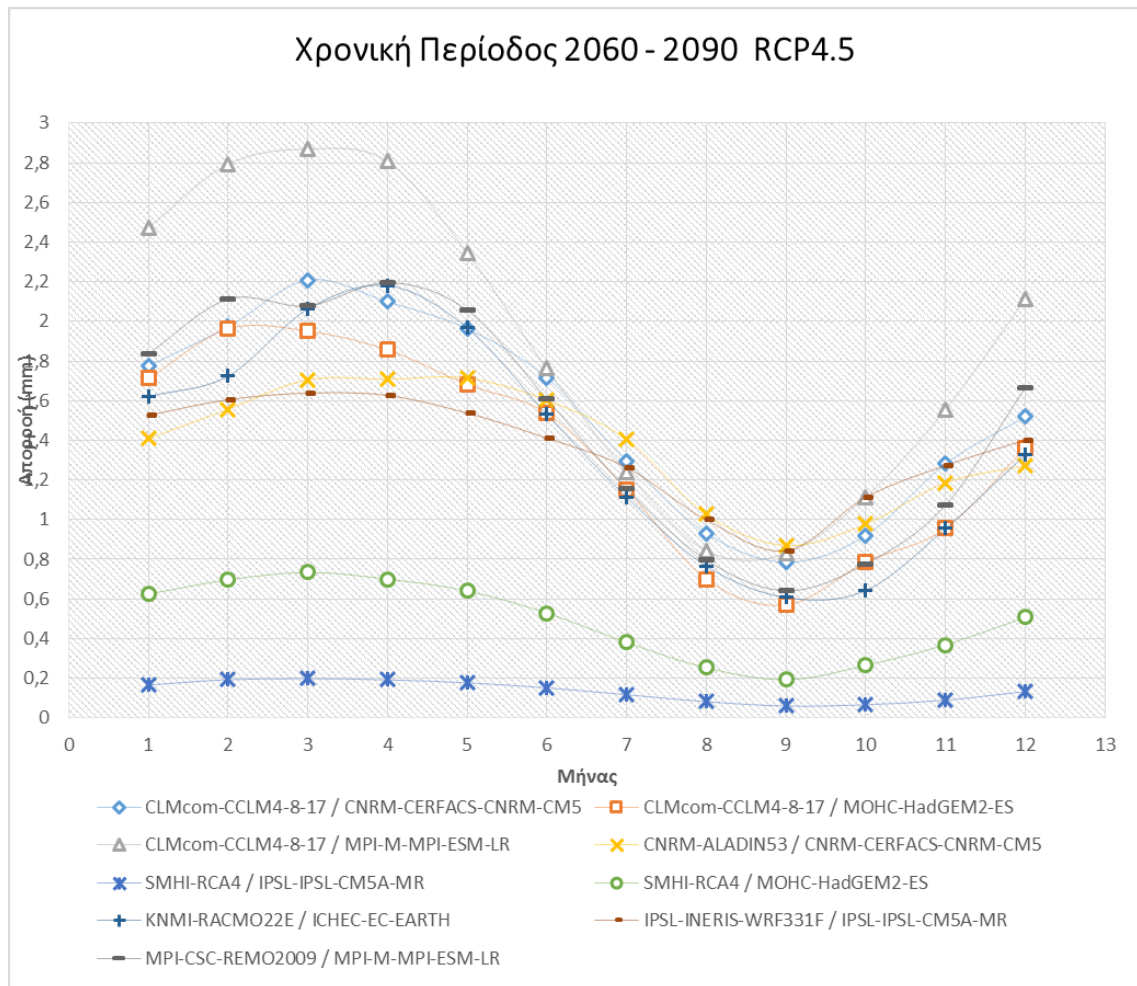
Για την περίοδο 2060 - 2090 (Σχήματα 22&24) παρατηρούμε ότι οι τιμές και για τα δύο σενάρια εκπομπών ρύπων σημειώνουν *μείωση* σε σχέση με την ιστορική περίοδο, αλλά και με την περίοδο 2030 – 2060, κάτι το οποίο και σε αυτή την περίπτωση ήταν γενικά αναμενόμενο. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως το προσδοκώμενο είναι το ευνοϊκότερο σενάριο που είναι το RCP4.5 2060-2090 να φέρει τιμές υψηλότερες σε σχέση με το δυσμενέστερο σενάριο RCP8.5 2060-2090, κάτι το οποίο επιβεβαιώνεται από τα δύο σχετικά γραφήματα (Σχήματα 22&24). Ειδικότερα:

- Για το σενάριο εκπομπών ρύπων RCP4.5 και για την περίοδο 2060-2090, το σενάριο CLMcom-CCLM4-8-17 / MPI-M-MPI-ESM-LR συνεχίζει να δίνει τις υψηλότερες τιμές για την απορροή με μέγιστη τιμή κοντά στο 2,8mm.
- Για το σενάριο εκπομπών ρύπων RCP8.5 και για την περίοδο 2060-2090 (Σχήμα 24), το σενάριο IPSL-INERIS-WRF331F / IPSL-IPSL-CM5A-MR δίνει τις υψηλότερες τιμές για την μέση μηνιαία απορροή με μέγιστη τιμή κοντά στο 1,8mm, έχοντας απόκλιση κατά 1 μονάδα με το ευνοϊκότερο σενάριο.

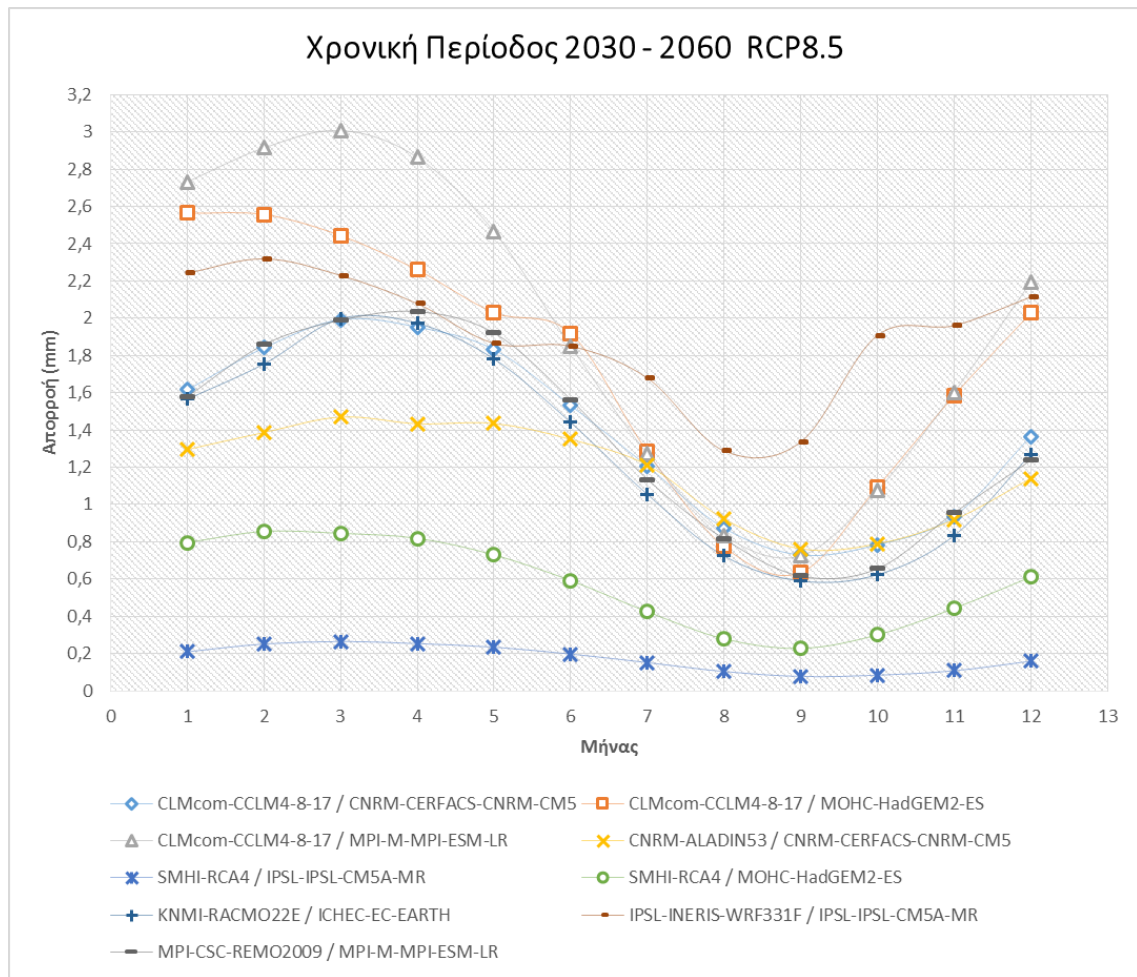
- Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το σενάριο SMHI-RCA4 / IPSL-IPSL-CM5A-MR, όπως και για την ιστορική περίοδο, έτσι και για τις μελλοντικές (2030-2060 & 2060-2090) εμφανίζει πολύ μικρές τιμές μέσης μηνιαίας απορροής, κοντά στο μηδέν.



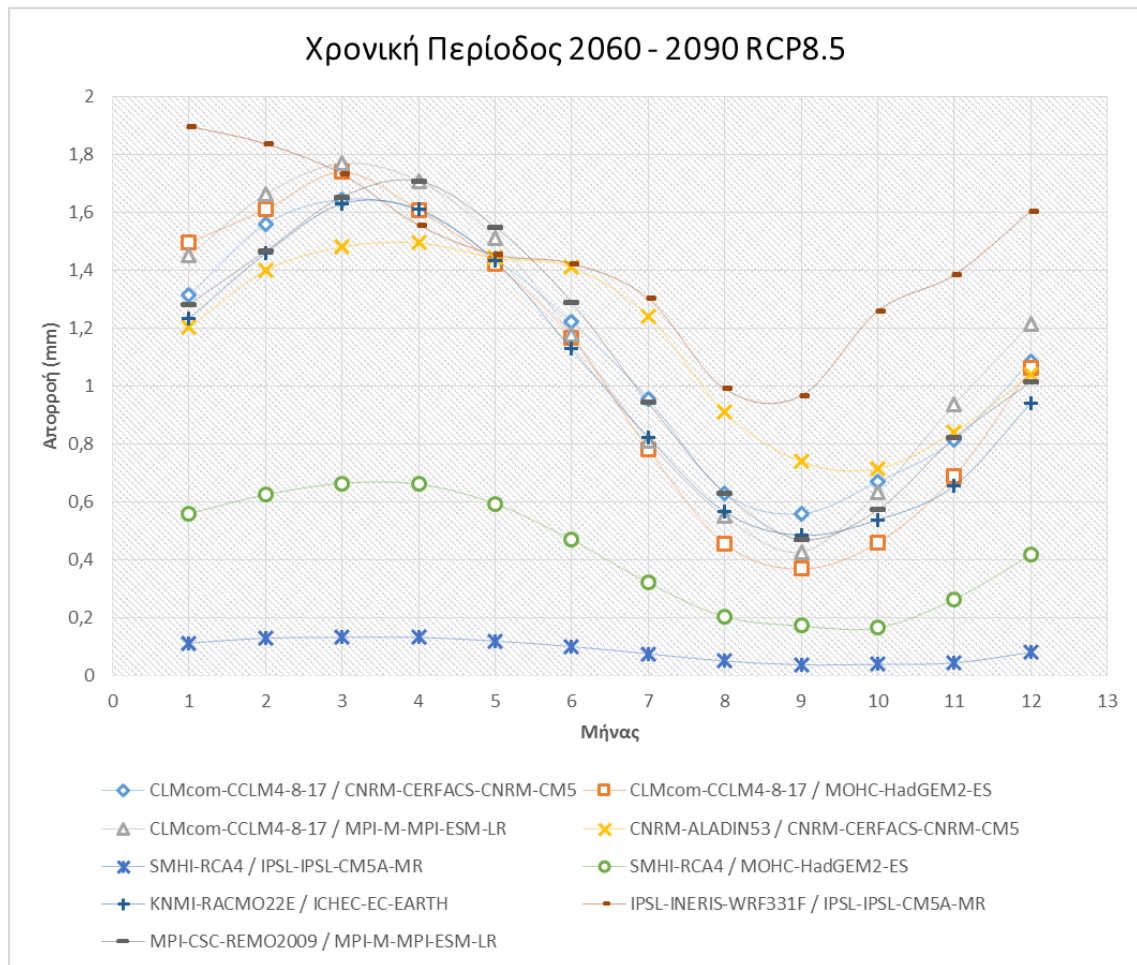
Σχήμα 21 Αποτελέσματα προσομοιώσεων - διακύμανση μέσης μηνιαίας απορροής για την μελλοντική περίοδο τριάντα υδρολογικών ετών (2030 – 2060) [RCP4.5]



Σχήμα 22 Αποτελέσματα προσομοιώσεων - διακύμανση μέσης μηνιαίας απορροής για την μελλοντική περίοδο τριάντα υδρολογικών ετών (2060 – 2090) [RCP4.5]



Σχήμα 23 Αποτελέσματα προσομοιώσεων - διακύμανση μέσης μηνιαίας απορροής για την μελλοντική περίοδο τριάντα υδρολογικών ετών (2030 – 2060) [RCP8.5]



Σχήμα 24 Αποτελέσματα προσομοιώσεων - διακύμανση μέσης μηνιαίας αποροφής για την μελλοντική περίοδο τριάντα υδρολογικών ετών (2060 – 2090) [RCP8.5]

Ως μια γενικότερη παρατήρηση, σημειώνεται πως με την πάροδο των χρόνων η μέγιστη τιμή της μέσης μηνιαίας αποροφής σταδιακά μειώνεται επίσης. Ξεκινώντας από την ιστορική περίοδο με τιμή ίση με 4,1mm, η μέγιστη τιμή φτάνει για την μελλοντική περίοδο στα 1,8mm, που αντιστοιχεί στο δυσμενέστερο σενάριο.

4.3.2 Παρουσίαση στατιστικών μεγεθών της μέσης μηνιαίας αποροφής

Για λόγους πληρότητας, στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται ορισμένα χαρακτηριστικά στατιστικά μεγέθη των χρονοσειρών μηνιαίας αποροφής που παρήχθησαν από τις σχετικές προσομοιώσεις.

Συγκεκριμένα στους Πίνακες 16-23 που ακολουθούν, καταγράφονται: η μέση τιμή (Πίνακες 16 & 20), η τυπική απόκλιση (Πίνακες 17 & 21), η μέση τιμή (Πίνακες 18 & 22) και η τυπική απόκλιση (Πίνακες 19 & 23) για καθένα από τα εννέα σενάρια (συνδυασμούς RCM-GCM) και τα επιμέρους δύο (RCP 4.5, RCP8.5), και για τις δύο μελλοντικές περιόδους (2030-2060, 2060-2090), όπου αξίζει να σημειωθούν (i) η

μεγάλη διασπορά που εμφανίζει το μέγεθος, αλλά και (ii) οι αποκλίσεις στις εκτιμήσεις μεταξύ των σεναρίων και των δύο περιόδων, όπως επίσης αναλύθηκε στην προηγούμενη παράγραφο.

Πίνακας 16 Μέση τιμή μηνιαίας απορροής ανά σενάριο (2030-2060)

Μέση Τιμή	Μήνας	1ος	2ος	3ος	4ος	5ος	6ος	7ος	8ος	9ος	10ος	11ος	12ος
Σενάριο													
1	4.5	1.90	2.10	2.19	2.09	1.86	1.61	1.26	0.92	0.77	0.93	1.27	1.64
	8.5	1.62	1.84	1.99	1.95	1.83	1.53	1.21	0.87	0.73	0.78	0.94	1.37
2	4.5	2.78	2.88	2.68	2.40	2.08	1.75	1.21	0.81	0.72	0.83	1.46	2.09
	8.5	2.56	2.56	2.44	2.26	2.03	1.92	1.28	0.77	0.64	1.09	1.59	2.03
3	4.5	2.53	2.72	2.69	2.57	2.23	1.70	1.19	0.81	0.76	1.03	1.53	2.09
	8.5	2.73	2.91	3.01	2.86	2.47	1.85	1.27	0.84	0.72	1.08	1.60	2.19
4	4.5	1.52	1.67	1.80	1.78	1.71	1.68	1.45	1.10	0.95	1.07	1.23	1.38
	8.5	1.30	1.39	1.47	1.43	1.43	1.35	1.21	0.92	0.76	0.79	0.92	1.14
5	4.5	0.20	0.23	0.25	0.24	0.22	0.19	0.15	0.10	0.08	0.08	0.10	0.16
	8.5	0.21	0.25	0.26	0.25	0.23	0.20	0.15	0.10	0.08	0.08	0.11	0.16
6	4.5	0.78	0.90	0.89	0.85	0.75	0.61	0.44	0.30	0.23	0.28	0.41	0.61
	8.5	0.80	0.86	0.85	0.82	0.73	0.59	0.42	0.28	0.23	0.30	0.44	0.61
7	4.5	1.80	2.10	2.33	2.30	2.04	1.58	1.15	0.79	0.65	0.77	0.98	1.38
	8.5	1.57	1.75	2.00	1.97	1.78	1.44	1.05	0.72	0.59	0.62	0.83	1.27
8	4.5	2.22	2.25	2.30	2.25	2.07	1.95	1.96	1.41	1.17	1.72	1.71	1.83
	8.5	2.24	2.32	2.23	2.08	1.87	1.85	1.68	1.29	1.34	1.91	1.96	2.11
9	4.5	1.68	1.82	2.03	2.17	2.18	1.75	1.28	0.90	0.69	0.78	1.17	1.41
	8.5	1.58	1.86	1.99	2.04	1.92	1.56	1.13	0.82	0.62	0.66	0.96	1.24

Πίνακας 17 Τυπική απόκλιση μηνιαίας απορροής ανά σενάριο (2030-2060)

Τυπική Απόκλιση	Μήνας	1ος	2ος	3ος	4ος	5ος	6ος	7ος	8ος	9ος	10ος	11ος	12ος
Σενάριο													
1	4.5	1.26	1.18	1.22	1.09	0.92	0.63	0.45	0.46	0.35	0.53	0.92	1.31
	8.5	0.78	0.87	0.80	0.72	0.88	0.61	0.45	0.35	0.28	0.31	0.35	0.67
2	4.5	1.82	1.41	1.19	0.89	0.72	0.56	0.39	0.30	0.46	0.39	0.78	1.22
	8.5	1.69	1.44	1.21	1.07	0.88	1.35	0.79	0.42	0.35	1.15	1.11	1.38
3	4.5	1.55	1.40	1.25	1.08	0.87	0.60	0.40	0.28	0.36	0.60	0.93	1.50
	8.5	1.37	1.17	1.19	1.17	1.03	0.70	0.45	0.27	0.35	0.61	1.06	1.19
4	4.5	0.50	0.58	0.60	0.54	0.47	0.41	0.35	0.27	0.28	0.41	0.47	0.53
	8.5	0.53	0.57	0.54	0.44	0.46	0.41	0.27	0.19	0.16	0.27	0.31	0.42
5	4.5	0.13	0.13	0.15	0.14	0.12	0.10	0.08	0.05	0.05	0.06	0.07	0.13
	8.5	0.11	0.15	0.15	0.15	0.14	0.11	0.08	0.05	0.04	0.05	0.06	0.09
6	4.5	0.34	0.47	0.44	0.38	0.31	0.23	0.16	0.11	0.08	0.12	0.19	0.29
	8.5	0.51	0.48	0.43	0.38	0.30	0.24	0.17	0.11	0.11	0.22	0.29	0.43
7	4.5	0.80	0.73	0.72	0.76	0.67	0.49	0.34	0.21	0.18	0.38	0.52	0.69
	8.5	0.81	0.77	0.78	0.68	0.59	0.48	0.33	0.22	0.19	0.23	0.35	0.71
8	4.5	1.11	1.09	1.00	0.95	0.81	0.81	1.21	0.75	0.58	1.21	1.03	0.84
	8.5	1.17	0.89	0.84	0.86	0.64	0.78	0.70	0.46	0.62	2.70	1.67	1.36
9	4.5	0.91	0.77	0.82	0.92	0.99	0.72	0.52	0.35	0.26	0.36	0.83	0.88
	8.5	0.83	0.83	0.80	0.84	0.75	0.62	0.44	0.30	0.23	0.28	0.55	0.60

Πίνακας 18 Μέγιστη τιμή μηνιαίας απορροής ανά σενάριο (2030-2060)

Μέγιστη τιμή	Μήνας	1ος	2ος	3ος	4ος	5ος	6ος	7ος	8ος	9ος	10ος	11ος	12ος
Σενάριο													
1	4.5	6.71	6.40	7.06	5.63	4.99	3.59	2.46	2.47	1.63	2.61	4.93	7.19
	8.5	3.59	4.30	3.91	3.71	5.59	3.88	2.58	1.91	1.47	1.39	1.57	2.88
2	4.5	7.25	5.83	5.25	4.20	3.88	2.77	2.06	1.65	2.58	2.22	3.63	5.43
	8.5	7.08	6.78	6.16	4.94	4.08	7.95	4.63	2.46	1.60	5.35	4.42	6.39
3	4.5	7.15	6.17	5.41	5.76	4.82	3.41	2.31	1.51	1.64	2.56	4.02	7.78
	8.5	6.38	5.59	5.55	6.01	6.03	4.01	2.55	1.63	1.87	2.45	5.01	5.52
4	4.5	3.09	3.22	3.35	3.08	2.55	2.64	2.28	1.82	1.57	2.12	2.30	3.23
	8.5	2.58	2.92	2.69	2.32	2.24	2.04	1.65	1.29	1.05	1.29	1.68	2.15
5	4.5	0.73	0.72	0.71	0.65	0.56	0.46	0.35	0.23	0.22	0.34	0.37	0.77
	8.5	0.55	0.61	0.67	0.65	0.60	0.49	0.37	0.24	0.18	0.23	0.28	0.49
6	4.5	2.13	2.86	2.86	2.43	1.98	1.47	1.01	0.68	0.48	0.54	1.05	1.75
	8.5	2.35	2.13	1.97	1.74	1.47	1.16	0.80	0.57	0.50	1.14	1.11	2.14
7	4.5	4.37	4.23	4.09	4.37	3.60	2.67	1.85	1.20	1.17	2.25	2.67	3.05
	8.5	3.72	3.78	4.34	3.74	3.69	2.73	1.89	1.22	1.16	1.09	2.05	3.39
8	4.5	4.80	5.79	4.95	4.49	3.89	4.49	7.30	4.30	3.21	6.64	5.91	4.42
	8.5	6.21	4.91	4.40	4.79	3.73	4.68	3.17	2.49	3.24	15.70	9.23	7.54
9	4.5	5.17	4.57	4.49	4.42	5.18	3.73	2.66	1.76	1.55	1.89	4.14	4.36
	8.5	3.90	3.56	3.60	4.57	3.90	3.69	2.53	1.53	1.08	1.21	2.99	2.77

Πίνακας 19 Ελάχιστη τιμή μηνιαίας απορροής ανά σενάριο (2030-2060)

Ελάχιστη τιμή	Μήνας	1ος	2ος	3ος	4ος	5ος	6ος	7ος	8ος	9ος	10ος	11ος	12ος
Σενάριο													
1	4.5	0.67	0.71	0.70	0.64	0.72	0.85	0.62	0.46	0.36	0.33	0.38	0.41
	8.5	0.47	0.58	0.59	0.69	0.65	0.76	0.57	0.39	0.32	0.29	0.36	0.39
2	4.5	0.94	1.10	1.11	1.09	0.96	0.76	0.54	0.35	0.28	0.14	0.40	0.68
	8.5	0.29	0.36	0.48	0.50	0.50	0.52	0.38	0.23	0.19	0.12	0.21	0.26
3	4.5	1.01	1.19	1.17	1.07	1.00	0.77	0.53	0.36	0.33	0.37	0.68	0.72
	8.5	0.84	1.18	1.12	1.08	0.93	0.74	0.53	0.37	0.30	0.11	0.27	0.38
4	4.5	0.78	0.91	0.88	0.92	0.90	1.03	0.88	0.61	0.44	0.36	0.61	0.57
	8.5	0.47	0.45	0.58	0.57	0.64	0.57	0.72	0.59	0.46	0.10	0.17	0.26
5	4.5	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.04	0.04	0.02	0.02	0.03	0.05
	8.5	0.06	0.07	0.06	0.06	0.05	0.04	0.03	0.03	0.02	0.03	0.04	0.05
6	4.5	0.33	0.39	0.40	0.40	0.37	0.32	0.23	0.15	0.11	0.11	0.14	0.20
	8.5	0.22	0.27	0.27	0.25	0.27	0.27	0.19	0.13	0.09	0.10	0.12	0.19
7	4.5	0.73	1.14	1.19	1.14	0.97	0.75	0.56	0.40	0.38	0.16	0.18	0.62
	8.5	0.25	0.33	1.11	1.02	0.95	0.80	0.61	0.44	0.32	0.12	0.18	0.23
8	4.5	0.46	0.45	0.46	0.46	0.54	0.49	0.45	0.33	0.33	0.48	0.45	0.42
	8.5	0.70	1.01	0.92	0.81	0.69	0.91	0.74	0.69	0.49	0.46	0.56	0.55
9	4.5	0.76	0.84	1.03	0.98	0.87	0.66	0.45	0.31	0.33	0.17	0.22	0.25
	8.5	0.36	0.49	0.49	0.59	0.51	0.41	0.28	0.20	0.26	0.08	0.26	0.35

Πίνακας 20 Μέση τιμή μηνιαίας απορροής ανά σενάριο (2060-2090)

Μέση Τιμή	Μήνας	1ος	2ος	3ος	4ος	5ος	6ος	7ος	8ος	9ος	10ος	11ος	12ος
Σενάριο													
1	4.5	1.77	1.97	2.21	2.10	1.96	1.72	1.29	0.93	0.79	0.92	1.28	1.52
	8.5	1.31	1.56	1.65	1.61	1.44	1.22	0.96	0.63	0.56	0.67	0.81	1.09
2	4.5	1.71	1.96	1.95	1.86	1.68	1.54	1.15	0.70	0.57	0.79	0.96	1.36
	8.5	1.50	1.61	1.74	1.61	1.42	1.17	0.78	0.46	0.37	0.46	0.69	1.06
3	4.5	2.47	2.79	2.87	2.81	2.35	1.76	1.24	0.84	0.83	1.11	1.56	2.11
	8.5	1.45	1.66	1.77	1.71	1.51	1.18	0.81	0.55	0.43	0.63	0.94	1.22
4	4.5	1.41	1.56	1.71	1.71	1.71	1.60	1.40	1.03	0.87	0.98	1.19	1.27
	8.5	1.20	1.40	1.48	1.50	1.44	1.41	1.24	0.91	0.74	0.71	0.84	1.04
5	4.5	0.17	0.19	0.20	0.19	0.18	0.15	0.12	0.08	0.06	0.07	0.09	0.13
	8.5	0.11	0.13	0.13	0.13	0.12	0.10	0.08	0.05	0.04	0.04	0.04	0.08
6	4.5	0.62	0.70	0.73	0.70	0.64	0.53	0.38	0.25	0.19	0.26	0.37	0.51
	8.5	0.56	0.63	0.66	0.66	0.59	0.47	0.32	0.20	0.17	0.16	0.26	0.42
7	4.5	1.62	1.72	2.06	2.18	1.97	1.53	1.11	0.77	0.61	0.64	0.96	1.33
	8.5	1.23	1.46	1.63	1.61	1.43	1.13	0.82	0.57	0.48	0.54	0.66	0.94
8	4.5	1.53	1.60	1.64	1.63	1.54	1.41	1.26	1.00	0.84	1.11	1.27	1.40
	8.5	1.90	1.84	1.73	1.56	1.45	1.42	1.30	0.99	0.97	1.26	1.38	1.61
9	4.5	1.84	2.11	2.08	2.20	2.06	1.61	1.15	0.80	0.64	0.78	1.07	1.66
	8.5	1.28	1.47	1.65	1.71	1.55	1.29	0.94	0.63	0.47	0.57	0.82	1.01

Πίνακας 21 Τυπική απόκλιση μηνιαίας απορροής ανά σενάριο (2060-2090)

Τυπική Απόκλιση	Μήνας	1ος	2ος	3ος	4ος	5ος	6ος	7ος	8ος	9ος	10ος	11ος	12ος
Σενάριο													
1	4.5	0.75	0.83	0.92	0.82	0.68	0.57	0.43	0.32	0.30	0.52	0.71	0.74
	8.5	0.72	0.78	0.70	0.63	0.50	0.38	0.31	0.20	0.26	0.43	0.49	0.60
2	4.5	0.94	0.99	0.92	0.84	0.68	0.64	0.58	0.33	0.27	0.58	0.62	0.76
	8.5	1.16	1.13	1.34	1.20	0.99	0.81	0.51	0.28	0.24	0.38	0.62	0.85
3	4.5	1.12	1.10	1.14	1.09	0.87	0.61	0.44	0.28	0.53	0.84	0.93	1.06
	8.5	0.71	0.87	0.95	0.92	0.78	0.57	0.38	0.27	0.21	0.30	0.40	0.79
4	4.5	0.56	0.59	0.65	0.64	0.60	0.47	0.39	0.29	0.38	0.63	0.54	0.50
	8.5	0.59	0.76	0.63	0.64	0.53	0.46	0.37	0.26	0.22	0.31	0.30	0.48
5	4.5	0.08	0.09	0.09	0.08	0.07	0.06	0.04	0.03	0.02	0.03	0.04	0.07
	8.5	0.09	0.09	0.08	0.08	0.07	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02	0.03	0.06
6	4.5	0.44	0.41	0.43	0.38	0.32	0.27	0.19	0.12	0.09	0.21	0.33	0.42
	8.5	0.32	0.35	0.40	0.39	0.35	0.26	0.17	0.10	0.13	0.09	0.21	0.28
7	4.5	0.92	0.74	0.75	0.89	0.80	0.59	0.39	0.25	0.20	0.33	0.69	0.79
	8.5	0.70	0.96	0.93	0.75	0.57	0.41	0.29	0.20	0.22	0.25	0.30	0.47
8	4.5	1.03	0.97	0.88	0.82	0.68	0.57	0.53	0.49	0.35	1.15	1.21	1.11
	8.5	1.41	1.14	0.94	0.78	0.77	0.76	0.66	0.50	0.48	0.75	0.82	0.81
9	4.5	1.37	1.33	1.16	1.20	1.13	0.81	0.52	0.32	0.32	0.72	0.87	1.37
	8.5	0.90	0.90	0.95	0.94	0.77	0.61	0.46	0.29	0.21	0.30	0.47	0.73

Πίνακας 22 Μέγιστη τιμή μηνιαίας απορροής ανά σενάριο (2060-2090)

Μέγιστη τιμή	Μήνας	1ος	2ος	3ος	4ος	5ος	6ος	7ος	8ος	9ος	10ος	11ος	12ος
Σενάριο													
1	4.5	3.91	4.10	4.53	3.89	3.42	3.08	2.33	1.57	1.70	2.89	3.61	3.43
	8.5	2.82	3.37	2.87	2.86	2.34	1.79	1.79	1.24	1.37	2.17	2.17	2.37
2	4.5	3.69	3.99	3.76	3.69	3.03	2.89	2.87	1.71	1.14	3.15	2.54	2.89
	8.5	4.78	5.06	5.55	5.86	4.89	4.34	2.81	1.56	1.23	1.37	2.67	3.38
3	4.5	5.33	5.70	5.03	5.41	4.23	2.99	2.37	1.54	2.65	3.59	4.02	5.17
	8.5	3.26	3.95	4.07	4.56	3.64	2.65	1.77	1.12	1.09	1.57	1.71	3.61
4	4.5	3.51	3.26	3.28	3.11	3.11	2.44	2.45	1.68	2.60	3.94	3.30	3.07
	8.5	3.18	4.42	3.60	3.14	2.68	2.60	2.04	1.47	1.39	1.71	1.63	2.37
5	4.5	0.34	0.37	0.36	0.36	0.33	0.28	0.21	0.14	0.10	0.13	0.17	0.29
	8.5	0.42	0.44	0.44	0.41	0.35	0.29	0.21	0.14	0.11	0.10	0.11	0.32
6	4.5	2.07	1.90	1.83	1.64	1.40	1.20	0.81	0.55	0.37	0.97	1.43	1.98
	8.5	1.24	1.41	1.76	1.81	1.52	1.14	0.78	0.48	0.74	0.39	1.13	1.36
7	4.5	4.10	3.46	4.23	3.93	3.98	2.97	2.09	1.38	1.05	1.82	3.32	4.01
	8.5	3.22	4.95	4.91	4.04	3.15	2.28	1.61	1.10	1.07	1.14	1.48	2.08
8	4.5	4.89	4.15	3.40	3.20	2.89	2.70	2.55	2.45	1.79	6.48	6.97	5.88
	8.5	7.11	5.68	4.68	3.83	4.00	3.62	2.85	2.40	2.12	3.42	3.60	3.76
9	4.5	5.97	5.76	5.60	5.99	5.48	4.02	2.64	1.64	1.43	4.08	3.81	6.28
	8.5	3.51	3.37	3.90	3.83	3.17	2.34	1.85	1.24	0.91	1.33	2.25	3.36

Πίνακας 23 Ελάχιστη τιμή μηνιαίας απορροής ανά σενάριο (2060-2090)

Ελάχιστη τιμή	Μήνας	1ος	2ος	3ος	4ος	5ος	6ος	7ος	8ος	9ος	10ος	11ος	12ος
Σενάριο													
1	4.5	0.55	0.70	0.77	0.70	0.71	0.73	0.59	0.44	0.39	0.11	0.25	0.42
	8.5	0.17	0.45	0.55	0.55	0.56	0.51	0.40	0.28	0.27	0.11	0.14	0.16
2	4.5	0.40	0.67	0.71	0.64	0.57	0.59	0.43	0.26	0.22	0.21	0.23	0.34
	8.5	0.26	0.35	0.41	0.40	0.38	0.30	0.21	0.14	0.09	0.08	0.15	0.16
3	4.5	0.72	0.67	0.70	1.03	0.88	0.69	0.54	0.37	0.34	0.32	0.36	0.62
	8.5	0.49	0.55	0.56	0.51	0.56	0.43	0.31	0.19	0.15	0.20	0.29	0.47
4	4.5	0.49	0.52	0.58	0.64	0.75	0.79	0.80	0.59	0.41	0.16	0.27	0.40
	8.5	0.17	0.34	0.39	0.42	0.47	0.45	0.45	0.42	0.39	0.10	0.10	0.12
5	4.5	0.04	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.04	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03
	8.5	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02
6	4.5	0.12	0.22	0.25	0.24	0.28	0.23	0.17	0.11	0.08	0.08	0.11	0.11
	8.5	0.13	0.20	0.20	0.20	0.19	0.15	0.11	0.07	0.06	0.07	0.09	0.10
7	4.5	0.59	0.80	1.10	1.04	1.00	0.82	0.62	0.43	0.32	0.10	0.38	0.48
	8.5	0.31	0.46	0.56	0.60	0.51	0.40	0.29	0.21	0.16	0.10	0.16	0.33
8	4.5	0.48	0.46	0.44	0.40	0.36	0.43	0.36	0.26	0.23	0.23	0.30	0.45
	8.5	0.32	0.37	0.41	0.40	0.37	0.41	0.40	0.27	0.19	0.21	0.21	0.35
9	4.5	0.53	0.52	0.49	0.54	0.54	0.55	0.47	0.39	0.27	0.17	0.22	0.50
	8.5	0.19	0.22	0.26	0.28	0.25	0.21	0.16	0.12	0.15	0.15	0.20	0.20

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1 Σύνοψη

Στην παρούσα εργασία έγινε η ανάπτυξη και η εφαρμογή ενός μοντέλου υδατικού ισοζυγίου λεκάνης απορροής σε μηνιαία βάση, με περιοχή εφαρμογής την υπολεκάνη ρέματος Βιβαρίου στα ΒΔ της λεκάνης απορροής του ποταμού Ευρώτα, και η εκτέλεση ενδεικτικών προσομοιώσεων για την αποτίμηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στους υδατικούς πόρους της περιοχής. Αυτή η πρώτη προσέγγιση του ζητήματος για την περιοχή βασίστηκε στην αξιοποίηση διαθέσιμων επικαιροποιημένων σεναρίων κλιματικής αλλαγής, που ήταν χρονοσειρές θερμοκρασίας και χρονόπτωσης υπό μορφή πλεγματικών δεδομένων.

Αρχικά, για την υπό μελέτη λεκάνη απορροής του ποταμού Ευρώτα έγινε η υδρολογική προσομοίωση εφαρμόζοντας το υδρολογικό μοντέλο «Thomas abcd» για μια μικρή ιστορική περίοδο όπου υπήρχαν μετρήσεις απορροής στην περιοχή, ώστε να πραγματοποιηθεί και η ρύθμιση του μοντέλου. Ακολούθως, για την ιστορική περίοδο 1970-2000 και για δύο μελλοντικές περιόδους 2030-2060 και 2060-2090 πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για έναν αριθμό σεναρίων.

Για το πρώτο βήμα της ανάλυσης χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα για την βροχόπτωση και την θερμοκρασία τα οποία πάρθηκαν από μετρήσεις που έγιναν από σταθμούς που βρίσκονται στην περιοχή την περίοδο 2005-2009 και για το δεύτερο βήμα από πλεγματικά δεδομένα που παρέχει το πρόγραμμα EURO-CORDEX.

Στο πλαίσιο της ανάπτυξης και εφαρμογής του μοντέλου, κατόπιν της ρύθμισης αυτού έγινε και ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων του, ώστε να υπάρξει μια ολοκληρωμένη άποψη όσον αφορά την γενικότερη επιρροή που έχουν στο μοντέλο κι έτσι αναδείχτηκε η καθοριστική σημασία της τιμής της παραμέτρου c .

Τα δεδομένα που αφορούσαν τις περιόδους 1970 μέχρι 2090 και χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή των τελικών αποτελεσμάτων επεξεργάστηκαν καταλλήλως για να μπορέσουν να εισαχθούν στο υδρολογικό μοντέλο. Για τον υπολογισμό της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής που είναι απαραίτητο δεδομένο για την λειτουργία του υδρολογικού μοντέλου επιλέχθηκε η μέθοδος Thornthwaite, η οποία προστέθηκε στο σύνολο των υπολογισμών που διεξάχθηκαν στην παρούσα εργασία. Η προσομοίωση του υδρολογικού μοντέλου έγινε για δεδομένα που αφορούσαν την ιστορική περίοδο και στην συνέχεια τα αποτελέσματα αυτής της προσομοίωσης συγκρίθηκαν με τα

αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή των πειραμάτων της κλιματικής αλλαγής με την χρήση δύο εκ των επικαιροποιημένων κλιματικών σεναρίων. Το ένα είναι το πιο ευνοϊκό RCP4.5 και το δυσμενέστερο είναι το RCP8.5 και για τις μελλοντικές περιόδους 2030-2060 και 2060-2090.

5.2 Συμπεράσματα

Από την εφαρμογή του μοντέλου «Thomas abcd» στην περιοχή μελέτης συνάχθηκαν κάποια συμπεράσματα που αφορούν την επίδραση της κλιματικής αλλαγής στους υδατικούς πόρους, και συγκεκριμένα κυρίως συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα που προκύπτουν για τη μέση μηνιαία απορροή (υπερετήσια τιμή) για κάθε σενάριο. Αναλυτικότερα:

- Για την περιοχή του Βιβάρι ύστερα από την ρύθμιση που έγινε για το 60% και 70% της χρονοσειράς προέκυψε ότι οι τιμές για 60% δίνουν έναν καλύτερο συντελεστή EC, και ακολούθως με βάση αυτή την προσέγγιση πραγματοποιήθηκαν οι επόμενοι υπολογισμοί.
- Η αύξηση της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας έχει ως αντίκτυπο την αύξηση της μέσης μηνιαίας δυνητικής εξατμισοδιαπνοής, που υπολογίστηκε με βάση τις μηνιαίες χρονοσειρές θερμοκρασίας που παρέχονται από το πρόγραμμα EURO-CORDEX.
- Με την διαδικασία της ανάλυσης ευαισθησίας κρίθηκε ότι πιο ευαίσθητη παράμετρος είναι η παράμετρος c , ακολουθούμενη διαδοχικά από τις a , b και $S(0)$, η οποία πρακτικά δεν επηρεάζει την επίδοση του μοντέλου. Ανάλυση δεν έγινε για την παράμετρο d καθώς είναι μηδενική. Πιο αναλυτικά η μεταβολή της απορροής των υπόγειων υδάτων που αναπαρίστανται με την μορφή της παραμέτρου c φαίνεται ότι επηρεάζει σημαντικά την υδρολογική απόκριση της λεκάνης. Μετέπειτα ακολουθεί η παράμετρος a που αντιπροσωπεύει τον πλήρη κορεσμό του εδάφους. Επακόλουθη στο ποσοστό επιρροής είναι η παράμετρος b που αντιπροσωπεύει το ποσό της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής και αποθήκευσης της υγρασίας του εδάφους. Ενώ η τιμή της παραμέτρου $S(0)$ που αντιπροσωπεύει την αρχική κατάσταση της υγρασίας του εδάφους δεν επηρεάζει σχεδόν καθόλου το μοντέλο, όπως προέκυψε από την ανάλυση ευαισθησίας. Κατά την βαθμονόμηση η παράμετρος d προέκυψε μηδενική, η οποία επηρεάζει το ποσοστό συνεισφοράς του υπόγειου αποθηκευτικού νερού $G(t)$. Το οποίο σημαίνει ότι η υπόγεια αποθηκευτικότητα δεν ενισχύει την απορροή,

συνεπώς η οποιαδήποτε μεταβολή υπάρξει στην τιμή της δεν επηρεάζει την βελτιστοποίηση.

- Ως προς τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, σημειώνεται ότι η μέση μηνιαία απορροή παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις κατά την διάρκεια ενός διαστήματος δώδεκα (12) μηνών, αλλά και σε ό,τι αφορά την κύμανση της μέσης μηνιαίας τιμής από σενάριο σε σενάριο. Παρόμοια υψηλή μεταβλητότητα παρουσιάζουν και τα υπόλοιπα στατιστικά μεγέθη που εξετάστηκαν.
- Ως γενικότερο συμπέρασμα, συγκρινόμενες οι τιμές για τις υπό μελέτη περιόδους, προκύπτει ότι η μέση ετήσια απορροή θα εμφανίσει σημαντική μείωση στην μελλοντική περίοδο σε σχέση με τις τιμές που σημειώνονται στην ιστορική περίοδο.

5.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Με βάση τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα εργασία, γίνεται παρακάτω μια αναφορά σε προτάσεις που θα μπορούσαν να βασιστούν κάποιες μελλοντικές έρευνες.

- Συνίσταται να γίνει μελέτη περισσότερων υπολεκανών του ποταμού Ευρώτα με πιο αναλυτικά δεδομένα και για μεγαλύτερη περίοδο, όπως ημερήσιες μετρήσεις για πιο λεπτομερή αποτελέσματα στο χώρο και στο χρόνο. Ακολούθως, η νέα βαθμονόμηση του υδρολογικού μοντέλου να βασιστεί στη χρήση μεγαλύτερης χρονοσειράς για μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα.
- Προτείνεται να μελετηθούν οι επιπτώσεις που έχει η κλιματική αλλαγή στους υδατικούς πόρους και να γίνει μια διερεύνηση για την περιοχή, για το πως μπορούν να αποφευχθούν οι αρνητικές επιπτώσεις που υποδεικνύουν οι εν λόγω μελλοντικές προσομοιώσεις.
- Διερεύνηση των τάσεων των μελλοντικών χρονοσειρών απορροής για διαφορές χρονικές κλίμακες (10 έτη, 30 έτη κλπ.)
- Τέλος, ένα σημαντικό βήμα θα αποτελέσει η στατιστική υποκλιμάκωση των πλεγματικών δεδομένων που παρέχονται για τα σενάρια κλιματικής αλλαγής, ώστε να παραχθούν πιο αξιόπιστα και αντιπροσωπευτικά για την περιοχή ευρήματα, για τα οποία θα άξιζε και μια λεπτομερέστερη στατιστική ανάλυση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Ελληνικές αναφορές

- Αϊβαλή, Ν., 2019. «Ευρώτας το αρχαίο ποτάμι», Άρθρο. (https://enastrongr.blogspot.com/2019/02/blog-post_86.html) [Τελευταία προσπέλαση: 5/9/2022].
- Αλεξανδρή, Σ., 2016. «Εξατμισοδιαπνοή - Evapotranspiration», Γεωπονικό Πανεπιστήμιο, Αθήνα (https://www.aua.gr/stalex/EDU/PDF/Lecture_3_ETo.pdf) [Τελευταία προσπέλαση: 7/9/2022]
- Δέδε, Φ., 2012. «Ανάπτυξη προσχεδίου δράσης για την αιεφόρο ενέργεια για το Δήμο Ευρώτα», Διπλωματική Εργασία, Τομέας Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων κα Συστημάτων Αποφάσεων, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα (<http://artemis.cslab.ece.ntua.gr:8080/jspui/bitstream/123456789/16437/1/DT2012-0229.pdf>) [Τελευταία Προσπέλαση: 29/9/2022]
- Ζαγανά, Ε., 2015. «Υδροχημεία, Εισαγωγή στην υδροχημεία.», Σημειώσεις, Σχολή Γεωλογίας, Πανεπιστήμιο Πατρών, Ελλάς (<https://eclass.upatras.gr/modules/units/?course=GEO360&id=6896>) [Τελευταία προσπέλαση: 4/9/2022]
- Ζωγόπουλος, Ε., 2012. «Υδρολογική μελέτη της λεκάνης απορροής του Ευρώτα ποταμού με την χρήση του μοντέλου MIKE SHE», Μεταπτυχιακή διατριβή, Δ.Π.Μ.Σ.: «Συστήματα παραγωγής ενέργειας και προστασίας περιβάλλοντος. », Πανεπιστήμιο Πειραιάς - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (<https://dione.lib.unipi.gr/xmlui/handle/unipi/5612>) [Τελευταία προσπέλαση: 7/9/2022]
- Καραλής, Σ., 2019. «Στοιχεία Φυσικής Υδρολογίας», 2^η Ελληνική Έκδοση, Εκδόσεις Δίσιγμα
- Κατηρτζίδου, Μ., 2018. « Διαχείριση υδατικών πόρων υπό συνθήκες κλιματικής αλλαγής με τη χρήση πολυκριτηριακής ανάλυσης», Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Υδραυλικής και Τεχνικής Περιβάλλοντος, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (<https://ikee.lib.auth.gr/record/300648/files/GRI-2018-22868.pdf>) [Τελευταία προσπέλαση: 24/10/2022]

- Κουκούλη, Π., 2014. «Κλιματική αλλαγή και επιπτώσεις στις ανάγκες σε νερό, στην απόδοση των καλλιεργειών και στην διαθεσιμότητα των υδατικών πόρων», Μεταπτυχιακή Διατριβή, Δ.Π.Μ.Σ: «Ειδίκευση γεωργικής μηχανικής και υδατικών πόρων», Σχολή Γεωπονίας, Δασολογίας και Φυσικού Περιβάλλοντος, Τμήμα Γεωπονίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
(<http://ikee.lib.auth.gr/record/284816/files/GRI-2016-17304.pdf>) [Τελευταία προσπέλαση: 22/9/2022]
- Λουκάς, Α., 2015. «Εξατμισοδιαπνοή», Ενότητα 5, Σημειώσεις, Εργαστήριο Υδρολογίας και Ανάλυσης Υδατικών Συστημάτων, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
(http://archive.eclass.uth.gr/eclass/modules/document/file.php/MHXC160/%CE%98%CE%B5%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%AE%CE%95%CE%BD%CF%8C%CF%84%CE%B7%CF%84%CE%B1_5.pdf) [Τελευταία προσπέλαση: 14/9/2022]
- Λούκας, Α., 2015. «Υδρολογική προσομοίωση», Ενότητα 1, Σημειώσεις, Εργαστήριο Υδρολογίας και Ανάλυσης Υδατικών Συστημάτων, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
(http://archive.eclass.uth.gr/eclass/modules/document/file.php/MHXC172/%CE%98%CE%B5%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%AE%CE%95%CE%BD%CF%8C%CF%84%CE%B7%CF%84%CE%B1_1_1.pdf) [Τελευταία προσπέλαση: 17/9/2022]
- Μάρης, Φ., Παπαρρίζος, Σ., 2020. «Κλιματική αλλαγή και υδατικοί πόροι στην Ελλάδα», 8^η διάλεξη, Σημειώσεις, Εργαστήριο Υδρολογίας και Υδραυλικών Έργων, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης
(<https://eclass.duth.gr/modules/document/>) [Τελευταία προσπέλαση: 22/9/2022]
- Μοριανού, Γ., 2014. «Προσδιορισμός των περιοχών συσσώρευσης επιφανειακής απορροής στη λεκάνη του Ποταμού Ταυρωνίτη (Ν. Χανίων) με τη χρήση του μοντέλου MIKE SHE», Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, Ελλάς
(<https://dias.library.tuc.gr/view/22837>) [Τελευταία προσπέλαση: 4/9/2022]
- Μπαλτάς, Ε., 2012. «Εξατμισοδιαπνοή» Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα
(<http://users.ntua.gr/dkoutso/courses/hydrometeo/2012BaltasEvap.pdf>) [Τελευταία προσπέλαση: 7/9/2022]
- Νικολαΐδης, Ν., Τζωράκη, Ο., Ανδριανάκη, Μ., Σταμάτη, Φ., Σκουλικίδης, Ν., Καλογεράκης, Ν., Τσακίρης, Κ. και Κουσούρης, Θ., 2007. « Σχέδιο διαχείρισης της

λεκάνης απορροής του ποταμού Ευρώτα: πρώτη φάση», Δημοσίευση σε Συνέδριο της Ελληνικής Επιτροπής Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, Χανιά, Κρήτη
(<https://dias.library.tuc.gr/view/58951>) [Τελευταία προσπέλαση: 5/9/2022]

- Παναγιώτου, Μ., 2018. «Υδρολογική προσομοίωση σε μηνιαία βάση λεκάνης απορροής και λειτουργίας του ταμιεύτηρα Κούρη», Μεταπτυχιακή Εργασία, Δ.Π.Μ.Σ: «Επιστήμη και τεχνολογία υδατικών πόρων.», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα (<https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/handle/123456789/47447>) [Τελευταία προσπέλαση: 7/9/2022]
- ΠΕΣΠΚΑ, 2019. Περιφερειακό Σχέδιο για την προσαρμογή στην Κλιματική Αλλαγή Περιφέρειας Δυτικής Ελλάδας (https://www.pde.gov.gr/gr/images/stories/pespka/2_klimatikes_metavoles_pde.pdf) [Τελευταία προσπέλαση: 7/9/2022]
- Σκουλικίδης, Ν., Οικονόμου, Α., Καραούζας, Ι., Βάρδακας, Λ., Γκριτζαλης, Κ., Ζόγκαρης, Σ., Δημητρίου, Η. και Τάχος, Β. 2008. «Υδρολογική και Βιογεωχημική Παρακολούθηση», Τελική Τεχνική Έκθεση, Ελληνικό Κέντρο Θαλάσσιων Ερευνών Ινστιτούτο Εσωτερικών Υδάτων, Αθήνα
(http://imbriw.hcmr.gr/wp-content/uploads/2014/01/FINAL-EcoQuality-EVROTAS-REPORT-HCMR-FINAL_FINAL.pdf) [Τελευταία προσπέλαση: 4/9/2022]
- Φελώνη, Ε., 2022. «Διαχείριση Υδατικών Πόρων, Υδρολογικός σχεδιασμός υδροσυστημάτων», Σημειώσεις, Σχολή Μηχανικών Τοπογραφίας και Γεωπληροφορικής, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής
- Φωτιάδη, Α., 2014. «Φαινόμενο του Θερμοκηπίου και Κλιματικές Μεταβολές.9^η ενότητα.» , Σημειώσεις, Τμήμα Διαχείρισης Περιβάλλοντος και Φυσικών Πόρων Αγρίνιο, Πανεπιστήμιο Πατρών
(<https://eclass.upatras.gr/courses/ENV119/>) [Τελευταία προσπέλαση: 7/9/2022]

Ξενόγλωσσες αναφορές

- Abbaspour, K.C., Faramarzi, M., Ghasemi, S.S., & Yang, H., 2009 «Assessing the impact of climate change on water resources in Iran», Paper, part of the Water Resources Research
(<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2008WR007615>)
[Τελευταία προσπέλαση: 6/10/2022]

- Bournas, A., Feloni, E. and Baltas, E., 2017. «Hydrological and geomorphological analysis in the Municipality of Florina. In Proceedings of the Sixth International Conference on Environment», Engineering, Planning & Economics (pp. 25-30).
- Kaplan, M., Richer, N., 1995. «Le Monde grec», p. 93, Paris (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sparta_Territory.svg) [Τελευταία προσπέλαση: 15/9/2022]
- Marinou, P.G., Feloni, E.G., Tzoraki, O. and Baltas, E.A., 2017. An implementation of a water balance model in the Evrotas basin. Eur. Water, 57, pp.147-154.
- Mimikou, M., Baltas, E., Varanou, E., Pantazis, K., 2000. «Regional impacts of climate change on water resources quantity and quality indicators», Paper, part of the Journal of Hydrology (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169400002444?via%3Dihub>) [Τελευταία προσπέλαση 6/10/2022]
- Riahi, K., Rao, S., Krey, V., Cho, C., Chirkov, V., Fischer, G., Kindermann, G., Nakicenovic N., & Rafaj, P., 2011. «A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions» (<https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-011-0149-y>) [Τελευταία προσπέλαση: 15/9/2022]
- Teegavarapu, R.,S., V., 2012. «Floods in a Changing Climate» (https://static.cambridge.org/binary/version/id/urn:cambridge.org:id:binary:40784:20160504085736663-0507:01878tbl8_4.png?pub-status=live) [Τελευταία προσπέλαση: 14/9/2022]
- Thornthwaite, C., W., 1948. «An approach toward a rational classification of climate», Geographical Review, 38, 55
- Thomas Z. A., Marin C. M., Brown M. J. & Fiering M. B., 1983, «Methodology for water resource assessment», Report NTIS 84-124163, to US Geological Survey, National. Tech. Info. Serv., Springfield, Virginia, USA
- Thomson, A., Calvin, K., Smith, S., Kyle, P., Volke, A., Patel, P., Delgado-Arias, S., Bond-Lamberty, B., Wise, M., Clarke, L., & Edmonds, J., 2011. «A pathway for stabilization of radiative forcing by 2100» (<https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-011-0151-4>) [Τελευταία προσπέλαση: 15/9/2022]

- Tzoraki, O., Cooper, D., Kjeldsen, T., Nikolaidis, N.,P., Gamvroydis, C., Froebrich, J., Querner, E., Gallart, F., & Karalemas, N., 2013. «Flood generation and classification of a semi-arid intermittent flow watershed: Evrotas river» (<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15715124.2013.768623?scroll=top&needAccess=true&role=tab>) [Τελευταία προσπέλαση: 27/12/2022]
- Varanou, E., Gkouvatsou, E., Baltas, E., & Mimikou, M., 2002. « Quantity and Quality Integrated Catchment Modeling under Climate Change with use of Soil and Water Assessment Tool Model», Paper, part of the Journal of Hydrologic Engineering ([https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/32596709/\(asce\)1084-0699\(2002\)7_3\(228\)-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1665061700&Signature=G3Y-7AQK-oc6OJShekvIUnqfOC6OS1XaQ2BWFEdBwREu~wWJGCyHkUm~slqXYS9OHHFVahgCUocvPuVGC0-kaDmF~0tB78-Of-aq19QaHr0aqWflqm01ta~jbRB21~0mWy5H0nYnGgy5bREichm~O9H8WbuFBy4M6clP6YA2ZszPL345WChaGSrb5Q9WXyOeHu70Bvh73cvLm~jumOry9BF5NmQwHuekHqMmyprmlaY87H7KXDe4v4RjaO1VeY8K-X8iDplWYhGLwjNlw2q4gEz-OmTJO1jKpHHclQSCVCTr6SIHlnHyiuauNxQ2fh3URCUGyU1liZGAZg8UlpMLg_&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/32596709/(asce)1084-0699(2002)7_3(228)-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1665061700&Signature=G3Y-7AQK-oc6OJShekvIUnqfOC6OS1XaQ2BWFEdBwREu~wWJGCyHkUm~slqXYS9OHHFVahgCUocvPuVGC0-kaDmF~0tB78-Of-aq19QaHr0aqWflqm01ta~jbRB21~0mWy5H0nYnGgy5bREichm~O9H8WbuFBy4M6clP6YA2ZszPL345WChaGSrb5Q9WXyOeHu70Bvh73cvLm~jumOry9BF5NmQwHuekHqMmyprmlaY87H7KXDe4v4RjaO1VeY8K-X8iDplWYhGLwjNlw2q4gEz-OmTJO1jKpHHclQSCVCTr6SIHlnHyiuauNxQ2fh3URCUGyU1liZGAZg8UlpMLg_&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA)) [Τελευταία προσπέλαση: 6/10/2022]
- Vuuren, D., Stehfest, E., Elzen, M., Kram, T., Vliet, J., Deetman, S., Isaac, M., Goldewijk, K., Hof, A., Beltran, A., Oostenrijk, R., & Ruijven, B., 2011. «Exploring the possibility to keep global mean temperature increase below 2°C» (<https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-011-0152-3>) [Τελευταία προσπέλαση: 15/9/2022]

Ιστότοποι

- Τράπεζας Ελλάδος - Έκθεση της Τράπεζας Ελλάδος (https://www.bankofgreece.gr/RelatedDocuments/%CE%95%CF%80%CE%B9%CF%80%CF%84%CF%8E%CF%83%CE%B5%CE%B9%CF%82_%CE%9A%CE%BB%CE%B9%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%AE%CF%82_%CE%91%CE%BB%CE%BB%CE%B1%CE%B3%CE%AE%CF%82_%CF%83%CF%84%CE%B1_%CE%95%CF%80%CE%B9%CF%86%CE%B1%CE%BD%CE%B5%CE%B9%CE%B1%CE%BA%CE%AC_%CE%BA%CE%B1%CE%B9_%CE%A5%CF%80%CF%8C%CE%B3%CE%B5%CE%B9%CE%B1_%CE%A5%CE%B4%CE%B1%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%AC_%CE%A3%CF%8E%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B1_Rev.pdf?mode=preview) [τελευταία προσπέλαση: 6/10/2022]

- ΥΠΕΝ - Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας (<https://ypen.gov.gr/perivallon/ydatikoi-poroι/>) [Τελευταία προσπέλαση: 24/10/2022]
- Κλιματικός Άτλαντας Ελλάδος (<http://climatlas.hnms.gr/sdi/>) [Τελευταία προσπέλαση: 5/9/2022]
- Ελληνική Στατιστική Υπηρεσία (<https://www.statistics.gr/>)
- Naturagraeca - Ένας οδηγός για την άγρια φύση της Ελλάδας (<https://www.naturagraeca.com/ws/214,278,249,1,1,%CE%95%CF%85%CF%81%CF%8E%CF%84%CE%B1%CF%82>) [Τελευταία προσπέλαση: 7/9/2022]
- DEAR-CLIMA (<http://meteo3.geo.auth.gr:3838/>) [Τελευταία προσπέλαση: 7/12/2022]
- EURO-CORDEX (<https://www.euro-cordex.net/index.php.en>) [Τελευταία προσπέλαση: 7/12/2022]
- GEO-CRABLE Initiative (<http://geocradle.eu/en/>) [Τελευταία προσπέλαση: 7/12/2022]