



**TECHNICAL UNIVERSITY OF CRETE
SCHOOL OF ENVIRONMENTAL
ENGINEERING**

Διπλωματική Εργασία

**«Μοντελοποίηση της υδρολογίας της λεκάνης απορροής
«φράγματος Ποταμών» και επιπτώσεις της κλιματικής
αλλαγής»**

Επιβλέπων: Καθηγητής κ. Νικολαΐδης Νικόλαος

Εξεταστική Επιτροπή: Καθηγητής κ. Καρατζάς Γεώργιος

Επίκουρος Καθηγητής κ. Παρανυχιανάκης Νικόλαος

Παπαδάκη Σοφία

Χανιά, Ιούνιος 2017

Στους γονείς μου

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αισθάνομαι την υποχρέωση να ευχαριστήσω μερικούς από τους ανθρώπους με τους οποίους συνεργάστηκα και κατείχαν πολύ σημαντικό ρόλο στη διεκπεραίωση της.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Νικόλαο Νικολαΐδη, Καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης και επιβλέποντα στην παρούσα διπλωματική εργασία, τόσο για την συνεχή καθοδήγηση του, την εμπιστοσύνη που μου έδειξε καθώς και την υποστήριξη του σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της.

Επιπλέον θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον Καθηγητή κ. Γεώργιο Καρατζά και τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Νικόλαο Παρανυχιανάκη όπου συμμετείχαν στην αξιολόγηση της παρούσας εργασίας, ως μέλη της εξεταστικής επιτροπής.

Επίσης, ένα μεγάλο ευχαριστώ στην υποψήφια διδάκτορα κ. Σοφία Νερατζάκη για την πολύτιμη βοήθεια της, τις συμβουλές και τη στήριξη της σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Διονύσιο Ευσταθίου για τη βοήθεια που προσέφερε στη συλλογή των απαραίτητων δεδομένων για την παρούσα εργασία καθώς και την υποστήριξη του σε θέματα λογισμικού.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Μαμαγκάκη Βαγγέλη Διευθυντή Διαχείρισης Συγκοινωνιακών και Υδραυλικών Έργων του Οργανισμού Ανάπτυξης Κρήτης για την πολύτιμη βοήθεια του, παρέχοντας μελέτες, δεδομένα και πληροφορίες απαραίτητες, ώστε να αποβεί αξιόπιστη η διπλωματική εργασία και η έρευνα που πραγματοποιήθηκε .

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την απεριόριστη ευγνωμοσύνη μου στους γονείς μου Κωνσταντίνο και Δήμητρα, για την ηθική και οικονομική συμπαράσταση τους όλα αυτά τα χρόνια . Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον αδερφό μου Βασίλη για την πολύτιμη ψυχολογική και ηθική υποστήριξη του όπου ήταν απαραίτητο. Τέλος, ένα ευχαριστώ στους φίλους μου και τους ανθρώπους που ήταν δίπλα μου στο δύσκολο αυτό έργο.

Π.Σ.

Περίληψη

Η περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας είναι η λεκάνη απορροής του «Φράγματος Ποταμών» στην περιοχή του Αμαρίου, η οποία διοικητικά υπάγεται στην Περιφερειακή Ενότητα Ρεθύμνου της Περιφέρειας Κρήτης. Σε αυτήν εφαρμόστηκε το ημι - κατανεμημένο μοντέλο Soil and Water Assessment Tool (SWAT 2012), σε συνδυασμό με περιβάλλον ΓΣΠ, προκειμένου να εξεταστούν οι επιδράσεις των εναλλακτικών διαχειριστικών πρακτικών στο υδατικό ισοζύγιο. Η λεκάνη απορροής έκτασης 94, 2 km², διαιρέθηκε σε 17 υπολεκάνες και 109 υδρολογικές μονάδες απόκρισης (HRUs) με αυτοματοποιημένη διαδικασία. Για την βαθμονόμηση του μοντέλου που πραγματοποιήθηκε την περίοδο 1970 - 1988 καθώς και για την επαλήθευση κατά την περίοδο 1989-1997 χρησιμοποιήθηκαν μηνιαία και συνεχή μετεωρολογικά δεδομένα. Η αποτελεσματικότητα του μοντέλου ελέγχθηκε με τη χρήση διαφόρων στατιστικών δεικτών, όπως NSE, RSR, RMSE, PBIAS.

Στη συνέχεια δημιουργήθηκε μοντέλο προσομοίωσης φράγματος και με τα αποτελέσματα παροχής, βροχόπτωσης, εξάτμισης που προέκυψαν από το SWAT διερευνήθηκε η αποτελεσματικότητα της λειτουργίας του ταμιευτήρα, ούτως ώστε να παρέχει την απαιτούμενη ποσότητα νερού, ικανοποιώντας στο μέγιστο βαθμό τις ανάγκες άρδευσης αλλά και ύδρευσης. Για τον ταμιευτήρα επιλέχθηκε ως στόχος η ετήσια απόληψη 15 Mm³. Σύμφωνα με αυτό το σενάριο λειτουργίας, το φράγμα όγκου 22.5 Mm³ θα αστοχεί σε ποσοστό της τάξης του 12%, που σημαίνει ότι στα 40 χρόνια λειτουργίας του φράγματος, μόλις τα 5 χρόνια το παρόν έργο δε θα είναι σε θέση να διαθέσει την απαιτούμενη ποσότητα νερού, οδηγώντας στο συμπέρασμα ότι το σενάριο παρουσιάζει μεγάλου βαθμού ευστοχία, ώστε να επιλεγεί ως ο βέλτιστος τρόπος λειτουργίας. Για την πλήρη εξακρίβωση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν όσον αφορά στον τρόπο προσομοίωσης του ταμιευτήρα, χρησιμοποιούνται τα δεδομένα μιας ήδη υπάρχουσας μελέτης η οποία παραχωρήθηκε από την υπηρεσία Ο.Α.ΔΥ.Κ. εμπεριέχοντας στοιχεία για τον όγκο και τη στάθμη του ταμιευτήρα, από ημερήσιες μετρήσεις για τα έτη 2008 - 2009.

Ακόμα, εφαρμόστηκε το ενδιάμεσο μοντέλο κλιματικής αλλαγής RCP4.5 για την πρόβλεψη των επιπτώσεων στο φράγμα. Οι επιπτώσεις των κλιματικών αλλαγών στην λεκάνη απορροής του «Φράγματος Ποταμών» έχουν ως εξής. Όπως παρατηρείται η βροχόπτωση μειώνεται σημαντικά σε ποσοστό 12% μέχρι το 2098, αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του ποσοστού της ξηρασίας, κατά συνέπεια η παροχή του νερού που εισέρχεται στο φράγμα μειώνεται κατά 28% και στην εξατμισοδιαπνοή σε ποσοστό 4%, ενώ η μεταβολή της θερμοκρασίας είναι περίπου 10%, δηλαδή 1. 6⁰C. Αυτό σημαίνει ότι με την προβλεπόμενη κλιματική αλλαγή και τις επερχόμενες ξηρασίες θα υπάρχουν σημαντικές συνέπειες στη λειτουργία του ταμιευτήρα, ώστε δε θα μπορεί να παρέχει την ικανοποιητική ποσότητα νερού για την ενίσχυση του υδρευτικού και αρδευτικού δικτύου, δεδομένου ότι δε θα υπάρχει πλήρωση του φράγματος όσον αφορά στην ποσότητα του ύδατος, στις ξηρές κυρίως περιόδους. Για το λόγο αυτό κρίθηκε επιτακτική η ανάγκη της μελέτης της ξηρασίας της συνολικής περιόδου λειτουργίας του ταμιευτήρα, με τον υπολογισμό του δείκτη ξηρασίας SPI, για 6 καθώς και 12 μήνες. Τόσο στον υπολογισμό του δείκτη ξηρασίας ανά έξι μήνες, όσο και ανά δώδεκα μήνες, γίνεται αντιληπτή η εμφάνιση μίας έντονης περιόδου ξηρασίας τη δεκαετία 2074 - 2083. Σε αυτό το χρονικό διάστημα, ο δείκτης παίρνει τιμές κοντά στο -3, όπου σύμφωνα με τον πίνακα αξιολόγησης της ξηρασίας, η τόσο χαμηλή τιμή του δείκτη οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η περίοδος χαρακτηρίζεται από «υπερβολική ξηρασία». Σε αυτό το διάστημα υπολογίζεται ότι ο μέσος όγκος νερού που μπορεί να γίνει απολήψιμος από τον ταμιευτήρα είναι 4 εκ. κυβικά μέτρα. Η δεκαετία παρατεταμένης ξηρασίας είναι η μόνη περίοδος που θα επηρεάσει τη λειτουργία του ταμιευτήρα, ενώ ταυτόχρονα δε θα καλυφθούν επιτυχώς οι

ανάγκες των κατοίκων των γύρω περιοχών. Επομένως κρίνεται επιτακτική η ανάγκη υδρομάστευσης και πλήρωση του ταμιευτήρα από άλλες λεκάνες πλησίον του φράγματος .

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	4
Περίληψη.....	5
1.Εισαγωγή-Ανάλυση του προβλήματος.....	15
1.1Εισαγωγή.....	15
1.2.Σκοπός της παρούσας διπλωματικής διατριβής	17
2.Βιβλιογραφική ανασκόπηση	19
2.1.Γενικά.....	19
2.2.Εφαρμογή περιβαλλοντικών μοντέλων.....	19
2.3.Υδρολογικά μοντέλα.....	20
2.3.1.Ορισμός υδρολογικού μοντέλου και στάδια δημιουργίας.....	20
2.3.2.Κατηγορίες μοντέλων.....	21
2.4.Βαθμονόμηση και Επαλήθευση Υδρολογικού Μοντέλου	24
2.4.1.Ορισμός βαθμονόμησης	24
2.4.2.Τύποι βαθμονόμησης	25
2.4.3.Ορισμός επαλήθευσης.....	27
2.4.5.Μοντέλο SWAT	27
2.4.6.Δεδομένα Εισόδου του μοντέλου SWAT.....	28
2.4.7.Μεθοδολογία του μοντέλου	28
2.4.8.Δημιουργία υδρολογικού ισοζυγίου	30
2.4.9.Διαχειριστικές πρακτικές στο μοντέλο	31
2.5.Φράγματα	31
2.5.1.Γενικά.....	31
2.5.2.Υδρολογικός σχεδιασμός	33
2.5.3.Επιπτώσεις φραγμάτων	35

2.6.Η κλιματική αλλαγή και ο IPCC	36
2.7.Μοντέλα σεναρίων	40
2.8.Φαινόμενο Ξηρασίας.....	44
2.8.1.Χαρακτηριστικά γνωρίσματα και ιδιότητες	44
2.8.2.Έννοια της ξηρασίας-Ορισμοί.....	45
2.8.3.Αιτίες εκδήλωσης φαινομένου	45
2.8.4.Διαχείριση της ξηρασίας	46
2.8.5.Δείκτης Ξηρασίας.....	46
3.Περιγραφή της περιοχής μελέτης.....	49
3.1.Γενικά	49
3.1.1.Ιστορική αναδρομή λειτουργίας του Ταμιευτήρα	49
3.1.2.Σκοπός κατασκευής-Τεχνικά χαρακτηριστικά φράγματος Ποταμών	50
3.2.Περιγραφή Υδρολογικής Λεκάνης Φράγματος Ποταμών	51
3.2.1.Γεωγραφική τοποθέτηση.....	51
3.2.2.Γεωμορφολογία	52
3.2.3.Υδρογεωλογική συμπεριφορά του ευρύτερου πεδίου.....	54
3.2.4.Γεωλογική δομή και υδρογεωλογική συμπεριφορά της περιοχής	57
3.3.Μετεωρολογικά –Κλιματολογικά στοιχεία της περιοχής	58
3.4.Χρήσεις Γης.....	65
4.Ανάπτυξη Υδρολογικού Μοντέλου.....	67
4.1.Πρόγραμμα –Δεδομένα Εισόδου	67
4.2.Βαθμονόμηση – Επαλήθευση μοντέλου	68
4.3. Αποτελέσματα Μοντελοποίησης	72
4.4. Αποτελέσματα προσομοίωσης ταμιευτήρα με τη χρήση του μοντέλου	82
5.Προσομοίωση ταμιευτήρα	89
5.1.Εισαγωγή.....	89
5.1.Μηνιαίο ισοζύγιο.....	91

5.2.Ανάλυση Παραμέτρων	92
5.3.Εφαρμογή διαχειριστικών πρακτικών στο βαθμονομημένο μοντέλο του φράγματος Ποταμών Αμαρίου.....	93
5.4.Ανάπτυξη Σεναρίων	93
5.4.1.Σενάριο άρδευσης και ύδρευσης (Σενάριο 1)	93
5.4.2.Σενάριο άρδευσης και ύδρευσης (Σενάριο 2)	94
5.4.3.Σενάριο λειτουργίας φράγματος Ποταμών Αμαρίου (Σενάριο 3).....	94
5.5.Αποτελέσματα σεναρίων –Γραφική Απεικόνιση	95
5.6.Ανάπτυξη σεναρίων στο μέλλον	97
5.7.Εφαρμογή Σεναρίου για την κλιματική αλλαγή.....	100
5.7.1.Αποτελέσματα εφαρμογής σεναρίου κλιματικής αλλαγής	100
5.7.2.Μεταβολή της θερμοκρασίας	102
5.7.3. Μεταβολή βροχόπτωσης	102
5.7.4.Μεταβολή παροχής	103
5.7.5Μεταβολή εξατμισοδιαπνοής.....	104
5.8.Μελέτη Ξηρασίας.....	106
Υπολογισμός δείκτη ξηρασίας –Ανάλυση Αποτελεσμάτων	106
6.Συμπεράσματα.....	110
7.Βιβλιογραφία.....	112
7.1.1.Διεθνής Βιβλιογραφία	112
7.1.2.Ελληνική Βιβλιογραφία	115
8. Παράρτημα	117

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1: Ο υδρολογικός κύκλος στο SWAT.....	29
Εικόνα 2: Σκαρίφημα χωμάτινου φράγματος (υλικά-ζώνες) (Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων)	32
Εικόνα 3: Φράγμα και ανάντη ταμιευτήρα (Βαφειάδης Σημειώσεις «Ταμιευτήρες»)	34
Εικόνα 4: Αλλαγή στη μέση ετήσια ποταμική απορροή στις Ευρωπαϊκές λεκάνες απορροής μεταξύ του 2000 και του 2070 με βάση τα κλιματικά μοντέλα ECHAM4 και HadCM3 (Henrichs and Alcamo, 2001)	37
Εικόνα 5: Διαφορά στη, (a) μέγιστη, (b) μέση και (c) ελάχιστη, μέση ετήσια θερμοκρασία μεταξύ 1961-1990 και 2031-2060, κλιματικό μοντέλο HadCM3 A2/B2 (Giannakopoulos et al,2009).....	38
Εικόνα 6: Αύξηση στις, (a) καλοκαιρινές μέρες, (b) θερμές μέρες, (c) μέρες καύσωνα, (d) τροπικές νύχτες και (e) μείωση στις νύχτες πάγου μεταξύ 1961-1990 και 2031-2060, κλιματικό μοντέλο HadCM3 (Giannakopoulos et, al 2009)	38
Εικόνα 7 : Αλλαγή, ποσοστιαία αριστερά και απόλυτη δεξιά, στην ετήσια, (a) χειμερινή, (b) ανοιξιάτικη, (c) καλοκαιρινή, (d) φθινοπωρινή και (e) όλου του χρόνου βροχόπτωση μεταξύ 1961-1990 και 2031-2060, κλιματικό μοντέλο HadCM3 A2/B2 (Giannakopoulos et al, 2009)	39
Εικόνα 8: Οι συνεχείς γραμμές είναι οι παγκόσμιοι μέσοι όροι θερμοκρασίας επιφάνειας (σχετικοί με το διάστημα 1980-1999) για τα σενάρια A2, A1B, B1 σενάρια βασιζόμενα στο SRES, που παρουσιάζονται ως συνέχειες των προσομοιώσεων του 20ου αιώνα (μαύρη γραμμή).Οι σκιασμένες περιοχές και οι μπάρες παρέχουν μια ένδειξη της αβεβαιότητας του μοντέλου .(IPCC WGI, εικόνα SPM.5, 2007).....	42
Εικόνα 9: Η καύση ορυκτών καυσίμων (πετρέλαιο, άνθρακας, λιγνίτης, φυσικό αέριο) ευθύνεται περίπου για τα 2/3 των εκπομπών.	42
Εικόνα 10: Σενάρια Εκπομπών (Επιτροπή Μελέτης της Κλιματικής Αλλαγής, Τράπεζα της Ελλάδος) (IPCC, 2000)	43
Εικόνα 11: Η προσέγγιση του τοπικού κλιματικού μοντέλου RCM ως προς το παγκόσμιας κλίμακας μοντέλο GCM.....	44
Εικόνα 12: Η Κρήτη και η περιοχή μελέτης του φράγματος Ποταμών της περιοχής Αμαρίου (Πηγή: Google Earth)	49
Εικόνα 13: Η θέση της λεκάνης απορροής του φράγματος Ποταμών (Πηγή: Google Earth)	52
Εικόνα 14: Απεικόνιση των κλίσεων στη Λεκάνη Απορροής του φράγματος Ποταμών Αμαρίου, σχεδιασμένος με τη χρήση του μοντέλου SWAT	53

Εικόνα 15: Το τοπογραφικό ανάγλυφο της λεκάνης απορροής του φράγματος Ποταμών (Πηγή: Περιγραφή υδατικού διαμερίσματος, 1 ^η ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΗ ΣΔΛΑΠ, ΥΔ ΚΡΗΤΗΣ)	54
Εικόνα 16: Εδαφικός χάρτης της λεκάνης απορροής του φράγματος Ποταμών Αμαρίου, σχεδιασμένος με τη χρήση του μοντέλου SWAT	56
Εικόνα 17: Υδρολιθολογικός χάρτης της Κρήτης, σημειώνεται η λεκάνη απορροής του φράγματος Ποταμών.....	57
Εικόνα 18: Χρήσεις γης στη λεκάνη απορροής του φράγματος Ποταμών	65
Εικόνα 19:Απεικόνιση χρήσεων γης (landuse) της λεκάνης απορροής του ταμιευτήρα, όπως αποτυπώθηκε από το SWAT	66
Εικόνα 20:Προσδιορισμός των υπολεκανών της λεκάνης απορροής	67
Εικόνα 21: Η πλήρης κατανομή των HRUs μετά την κατηγοριοποίηση του SWAT	68
Εικόνα 22: Απεικόνιση του υδατικού ισοζυγίου του φράγματος ποταμών Αμαρίου όπως αποτυπώνεται από το SWAT	80

Ευρετήριο Γραφημάτων

Διάγραμμα 1: Μέση Μηνιαία Θερμοκρασία για το 2010(Πηγή: Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών)58	
Διάγραμμα 2: Μέση μηνιαία θερμοκρασία του φράγματος Ποταμών για το έτος 2016	59
Διάγραμμα 3: Συνολική Μηνιαία Βροχόπτωση για το 2010 (Πηγή: Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών)	59
Διάγραμμα 4 : Μέση ταχύτητα ανέμου για το 2010 (Πηγή,; Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών)	60
Διάγραμμα 5: Σύγκριση Βροχομετρικών δεδομένων, Καβούσι-Βολεώνες	61
Διάγραμμα 6: Σύγκριση Αθροιστικών Ετήσιων Βροχοπτώσεων, Καβούσι-Βολεώνες.....	62
Διάγραμμα 7: Σύγκριση Βροχομετρικών δεδομένων, Καβούσι - Σπήλι.....	63
Διάγραμμα 8: Σύγκριση Αθροιστικών Ετήσιων Βροχοπτώσεων, Καβούσι-Σπήλι	63
Διάγραμμα 9: Σύγκριση Βροχομετρικών δεδομένων, Καβούσι - Σπήλι.....	64
Διάγραμμα 10: Σύγκριση Αθροιστικών Ετήσιων Βροχοπτώσεων, Καβούσι-Σπήλι	64
Διάγραμμα 11: Προσομοιωμένες και παρατηρημένες παροχές για την πρώτη χρονοσειρά την οποία μελετάμε με διαθέσιμα δεδομένα	74
Διάγραμμα 12: Προσομοιωμένες και παρατηρημένες παροχές για το Φράγμα Ποταμών, , περίοδος επαλήθευσης (1989-1997).....	76
Διάγραμμα 13: Προσομοιωμένες και παρατηρημένες παροχές για το Φράγμα Ποταμών, , περίοδος (1970-1997).....	77

Διάγραμμα 14: Συσχέτιση παρατηρούμενων τιμών παροχής με τις τιμές που προκύπτουν μέσω του μοντέλου	78
Διάγραμμα 15: Τιμές παροχής μοντέλου, Παροχή παρατηρούμενων τιμών ως προς το χρόνο	78
Διάγραμμα 16: Γράφημα απεικόνισης πιθανοτήτων μη πλήρωσης της εκάστοτε τιμής της παροχής του φράγματος.....	81
Διάγραμμα 17: Στάθμη ταμιευτήρα συναρτήσει του χρόνου (Πηγή: Ο.Α.ΔΥ.Κ.).....	83
Διάγραμμα 18: Χωρητικότητα/όγκος ταμιευτήρα συναρτήσει της στάθμης του (Πηγή: Ο.Α.ΔΥ.Κ)	83
Διάγραμμα 19: Σχέση όγκου ταμιευτήρα του μοντέλου, όγκου ταμιευτήρα από πηγή Ο.Α.ΔΥ.Κ. συναρτήσει του χρόνου	85
Διάγραμμα 20: Σχέση όγκου ταμιευτήρα από πηγή Ο.Α.ΔΥ.Κ. συναρτήσει του όγκου του ταμιευτήρα του μοντέλου	86
Διάγραμμα 21: Σχέση όγκου νερού του μοντέλου – στάθμης ταμιευτήρα.....	86
Διάγραμμα 22: Όγκος ταμιευτήρα συναρτήσει του χρόνου	87
Διάγραμμα 23: Γράφημα σύγκρισης όγκων των τριών σεναρίων που εξετάστηκαν.....	95
Διάγραμμα 24: Απεικόνιση ελλείμματος που παρουσιάζει το δεύτερο σενάριο	96
Διάγραμμα 25: Απεικόνιση ελλείμματος που παρουσιάζει το σενάριο 3	97
Διάγραμμα 26: Συσχέτιση όγκων ταμιευτήρα του εκάστοτε σεναρίων για το διάστημα 1970-2098.....	98
Διάγραμμα 27: Προσδιορισμός ελλείμματος του σεναρίου 2 κατά την περίοδο 1970-2098	99
Διάγραμμα 28: Προσδιορισμός ελλείμματος του σεναρίου 3 κατά την περίοδο 1970-2098	100
Διάγραμμα 29: Η θερμοκρασία ανά έτος στο φράγμα Ποταμών μέχρι το 2098 σύμφωνα με το μοντέλο κλιματικής αλλαγής που χρησιμοποιείται.....	102
Διάγραμμα 30: Η κατακρήμνιση ανά έτος στο φράγμα Ποταμών μέχρι το 2098 σύμφωνα με το μοντέλο κλιματικής αλλαγής που χρησιμοποιείται.....	103
Διάγραμμα 31: Η μέση παροχή ανά έτος του φράγματος Ποταμών μέχρι το 2098, σύμφωνα με το μοντέλο κλιματικής αλλαγής που έχει επιλεγεί.....	104
Διάγραμμα 32: Η αθροιστική παροχή ανά έτος του φράγματος Ποταμών μέχρι το 2098, , σύμφωνα με το επιλεγμένο μοντέλο κλιματικής αλλαγής	104
Διάγραμμα 33: Η εξατμισοδιαπνοή ανά έτος στο φράγμα Ποταμών μέχρι το 2098 σύμφωνα με το επιλεγμένο μοντέλο	105
Διάγραμμα 34: Πιθανότητα μη πλήρωσης της εκάστοτε τιμής της παροχής του ταμιευτήρα.....	105
Διάγραμμα 35: Υπολογισμός Δείκτη Ξηρασίας SPI ανά έξι μήνες.....	107
Διάγραμμα 36: Υπολογισμός Δείκτη Ξηρασίας SPI ανά δώδεκα μήνες	108

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1: Εύρος τιμών SPI και αξιολόγηση ξηρασίας βάσει αυτού	47
Πίνακας 2: Τεχνικά Χαρακτηριστικά κατασκευής Φράγματος Ποταμών παραχωρημένα από τον κ. Βαγγέλη Μαμαγκάκη, Προϊστάμενο της Διεύθυνσης Ρεθύμνου του Ο.Α.ΔΥ.Κ. (Πηγή: amariotes.gr)	51
Πίνακας 3: Παράμετροι του SWAT που μεταβλήθηκαν για να γίνει η βαθμονόμηση	71
Πίνακας 4: Πρότυπες τιμές δεικτών βάσει Moriasi, για την αξιολόγηση της βαθμονόμησης ενός μοντέλου	75
Πίνακας 5: Αξιολόγηση προσομοίωσης παροχής με χρήση στατιστικών δεδομένων της περιόδου 1970-1988.....	75
Πίνακας 6: Αξιολόγηση προσομοίωσης παροχής με χρήση στατιστικών δεδομένων της περιόδου 1970-1997.....	77
Πίνακας 7: Τιμές υδατικού ισοζυγίου της υδρολογικής λεκάνης του φράγματος Ποταμών.....	79
Πίνακας 8: Απεικόνιση δεδομένων όγκου και στάθμης φράγματος ποταμών Αμαρίου (Πηγή: Ο.Α.ΔΥ.Κ.).....	82
Πίνακας 9: Απεικόνιση δεδομένων που προέκυψαν από την προσομοίωση του ταμιευτήρα στις περιόδους 2008-2009	84
Πίνακας 10: Απεικόνιση δεικτών για την αξιολόγηση προσομοίωσης ταμιευτήρα	88
Πίνακας 11: Απεικόνιση ποσοστών αστοχίας που παρουσιάζει το κάθε σενάριο.....	97
Πίνακας 12: Υπολογισμός μέσου όρου παραμέτρων ανά περιόδους	101
Πίνακας 13:Απεικόνιση παραμέτρων στις ημιπεριόδους που εξετάζονται	101

1.Εισαγωγή-Ανάλυση του προβλήματος

1.1Εισαγωγή

Το νερό αποτελεί αδιαμφισβήτητα ένα από τα σημαντικότερα συστατικά για τη διατήρηση της ζωής στη Γη ενώ ταυτόχρονα αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους φυσικούς πόρους. Είναι η περισσότερο διαδεδομένη ανόργανη χημική ένωση στην επιφάνεια της Γης αφού καλύπτει το 70, 9% του πλανήτη μας στη φύση του οποίου, το νερό υπάρχει στην αέρια κατάσταση, , στην υγρή και στη στερεή. Η συνολική ποσότητα νερού που υπάρχει στον πλανήτη θα μπορούσε να καλύψει τις ανθρώπινες ανάγκες αν ήταν ισομερώς κατανεμημένη και προσβάσιμη.

Από τη συνολική ποσότητα νερού που υπάρχει στον πλανήτη το μεγαλύτερο ποσοστό 97% σχηματίζει θάλασσες και ωκεανούς «αλμυρού νερού» ενώ μόνο το 3% αντιστοιχεί σε «γλυκό νερό», το οποίο μπορεί να καταναλώσει τόσο ο άνθρωπος όσο και τα ζώα, όμως μόνο το 1% του « γλυκού νερού» είναι διαθέσιμο, δεδομένου ότι το υπόλοιπο είναι αποθηκευμένο είτε στα υπόγεια εδάφη είτε σε παγετώνες. (Peck, 1992)

Το νερό ως φυσικός πόρος παίζει σημαντικό ρόλο σε κάθε παραγωγική διαδικασία και αναπτυξιακή δραστηριότητα, ενώ είναι απαραίτητο για την επιβίωση του ανθρώπου. Μαζί με το έδαφος και τον αέρα αποτελεί τη βάση κάθε οικοσυστήματος. Η ποσοτική και ποιοτική κατάσταση του καθορίζουν σε σημαντικό βαθμό την ποιότητα του περιβάλλοντος.

Η μη ορθολογική αξιοποίηση των υδατικών πόρων περιορίζει σημαντικά τις δυνατότητες για ανάπτυξη. Θα πρέπει λοιπόν να υπάρχει μακροχρόνιος προγραμματισμός για τη διαχείριση τους και προχωρημένη γνώση των ποσοτικών και ποιοτικών μεταβλητών, τόσο σε εθνική όσο και σε τοπική κλίμακα, σε επίπεδο δηλαδή λεκάνης απορροής. Αν για οποιοδήποτε λόγο δεν τηρούνται οι παραπάνω κανόνες τότε οδηγούμαστε σταδιακά σε εξάντληση και ποιοτική υποβάθμιση των υδατικών πόρων, που καθιστούν πολύ δύσκολη, αν όχι αδύνατη τη λήψη αποφάσεων για ορθολογική διαχείριση και μελλοντική ανάπτυξη.

Η διαχείριση των υδάτων είναι μια δραστηριότητα με πολλαπλούς και μερικώς αντικρουόμενους στόχους όσον αφορά στη διαχείριση και τη βελτίωση των υδάτινων πόρων. Η ανεξέλεγκτη αστικοποίηση καθώς και εκβιομηχάνιση πολλών περιοχών μπορεί να οδηγήσει στην επιδείνωση της κατάστασης στην οποία βρίσκονται οι υδάτινοι πόροι. Τόσο τεχνολογικά επιτεύγματα, όσο και γνώση είναι διαθέσιμα στις μέρες μας, οδηγώντας στο συμπέρασμα ότι η οποιαδήποτε αντιμετώπιση των εκάστοτε προβλημάτων

είναι εφικτή. Η σημασία της διαχείρισης των υδάτινων πόρων καθώς και της κατανομής αλλά και της ποιότητας του νερού έχει πάρει μεγαλύτερες διαστάσεις την τελευταία δεκαετία. Αυτό αποδίδεται στο γεγονός ότι η κατανομή και ο τρόπος διαχείρισης των υδάτων επηρεάζει σημαντικά την ακεραιότητα του οικοσυστήματος, επομένως και τη λειτουργία του (ποτάμια, παραπόταμοι) (Dyson et al. 2003). Λόγω της αυξημένης ανθρώπινης παρέμβασης των τελευταίων ετών όχι μόνο στην ποσότητα αλλά και στην ποιότητα του νερού, μερικά από τα πιο συχνά περιβαλλοντικά προβλήματα που έχουν προκληθεί είναι μεταβολές της ποιότητας του επιφανειακού νερού λόγω τεχνικών κατασκευών, λανθασμένη διαχείριση και χρήση αρδευτικών έργων, κακή λειτουργία μεγάλων υδροφραγμάτων κ.α.(Μήτρακας, 2001).

Στην Ελλάδα οι υδατικοί πόροι, στο σύνολο τους είναι επαρκείς, παρ' όλα αυτά η ζήτηση του νερού είναι αρκετά μεγάλη λόγω των ποσοτήτων που απαιτούνται για την άρδευση καλλιεργήσιμων εκτάσεων, με αποτέλεσμα να είναι δύσκολο να μπορούν να καλύψουν πλήρως τις ανάγκες. Παρά το ότι το ισοζύγιο είναι πλεονασματικό, δηλαδή η ποσότητα του νερού που είναι διαθέσιμη θα μπορούσε να καλύψει τις ανάγκες, συχνά παρουσιάζεται το φαινόμενο της λειψυδρίας (F. Rijsberman, 2004). Η συνεχής ζήτηση νερού για την ανάπτυξη αγροτικών καλλιεργειών δεν αποτελεί το μόνο εμπόδιο στην όλη διαδικασία, καθώς οι κλιματικές αλλαγές αποτελούν ένα πλέον σημαντικό ανασταλτικό παράγοντα, δεδομένου ότι υπάρχει μεγάλη αβεβαιότητα στην μελλοντική διάθεση και ζήτηση νερού σύμφωνα με τις έρευνες λόγω των έντονων κλιματικών αλλαγών. Η ολοένα αυξανόμενη συγκέντρωση αερίων στην ατμόσφαιρα που προέρχονται από το φαινόμενο του θερμοκηπίου αναμένεται να προκαλέσει σταδιακά αύξηση της μέσης θερμοκρασίας της Γης από 1 έως 3.5 βαθμούς Κελσίου τον ερχόμενο αιώνα. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε ένα πλέον πιο δραστήριο υδρολογικό κύκλο, προκαλώντας αλλαγές στην κατακρήμνιση αλλά και ποικίλες τιμές στην εξατμισοδιαπνοή ανά περιοχή (Middelkoop et.al 2001). Οι αρνητικές συνέπειες τις κλιματικής αλλαγής φαίνεται ότι θα είναι πιο δυσμενείς στην περιοχή της Μεσογείου, λόγω των αυξημένων πιθανοτήτων ερημοποίησης μεγάλων εκτάσεων. (Alpert et al. 2008) .

Περιβαλλοντικά προγράμματα σχεδιάζονται και εφαρμόζονται από την Ευρωπαϊκή Ένωση, καθώς έχει διαπιστωθεί τη σημασία που έχει η διατήρηση, προστασία και αποκατάσταση υδατικών πόρων για ένα ποιοτικό τρόπο ζωής. Πιο συγκεκριμένα το 2000 με την Οδηγία - Πλαίσιο για τα Νερά (2000/60/EK), ένα πολύ σημαντικό νομοθετικό εργαλείο της Ένωσης, επιχειρείται η εφαρμογή μιας περιβαλλοντικής πολιτικής της οποίας σκοπός είναι η επίτευξη καλής ποιότητας επιφανειακών και υπογείων υδάτων (ΕΕ, 2000). Στην Οδηγία – Πλαίσιο γίνεται λόγος για την έννοια της λεκάνης απορροής, δηλαδή, τα κράτη μέλη προσδιορίζουν τις επί μέρους λεκάνες απορροής ποταμού στο εθνικό έδαφος και για τους σκοπούς της παρούσας οδηγίας, τις υπάγουν σε επιμέρους περιοχές λεκάνης απορροής ποταμού. Οι μικρές λεκάνες απορροής ενδεχομένως συνδυάζονται με μεγαλύτερες λεκάνες απορροής ποταμού ή ενώνονται με γειτονικές μικρές λεκάνες απορροής ποταμού για το σχηματισμό επιμέρους περιοχών λεκάνης

απορροής ποταμού, όπου αυτό ενδείκνυται. Στη συνέχεια εξασφαλίζονται οι κατάλληλες διοικητικές ρυθμίσεις, συμπεριλαμβανομένου του προσδιορισμού της κατάλληλης αρμόδιας αρχής, για την εφαρμογή των κανόνων της παρούσας οδηγίας μέσα σε κάθε περιοχή λεκάνης απορροή ποταμού στο έδαφος τους (ΕΕ, 2000) .

Τέλος σύμφωνα με την οδηγία κρίνεται απαραίτητη η μαθηματική προσομοίωση των υδραυλικών και γεωχημικών στοιχείων με την εφαρμογή διαφόρων τύπων μοντέλων. Τα μοντέλα αυτά έχουν τη δυνατότητα προσομοίωσης της κατάστασης των επιφανειακών και υπογείων υδάτων της περιοχής στην οποία πρόκειται να εφαρμοστεί το Διαχειριστικό Σχέδιο Υδάτων. Ακόμα πιο ζωτικής σημασίας είναι ότι τα μοντέλα αυτά μπορούν να τρέξουν μελλοντικά «σενάρια», αναφορικά με την κατάσταση των λεκανών απορροής, που σημαίνει ότι καθίσταται εφικτή η θέσπιση περιβαλλοντικών μέτρων και στόχων. Το μοντέλο SWAT (Soil and Water Assessment Tool) (Arnold et al., 1998, Neitsch et al., 2002, Gassman et al., 2007, Oeurng et al., 2011) θεωρείται ότι μπορεί να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις που έχει επιβάλει το νομοθετικό εργαλείο της Ευρωπαϊκής Ένωσης, Οδηγία – Πλαίσιο για τα Νερά (Dilks et al.2003, Dilks et al. 2005) .

1.2.Σκοπός της παρούσας διπλωματικής διατριβής

Όπως είναι ήδη γνωστό η αλόγιστη εκμετάλλευση των υδατικών πόρων στην περιοχή της Μεσογείου, οι οποίοι είναι περιορισμένοι σε αριθμό και διαθεσιμότητα ύδατος, καθώς και οι επιπτώσεις που μπορεί να προέλθουν από τις κλιματικές αλλαγές, αποτελούν κίνδυνο για την βιωσιμότητα των πόρων και την ερημοποίηση της περιοχής (Fantechi et al., 1995). Μιλώντας πιο ειδικά για την νήσο Κρήτη, η οποία εντοπίζεται στην περιοχή της νοτιοανατολικής Μεσογείου, εικάζεται ότι διατρέχει σημαντικούς κινδύνους, τόσο λόγω των πρακτικών διαχείρισης γεωργικών εκτάσεων, όσο και λόγω των κλιματικών αλλαγών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να καθίσταται επιτακτική η ανάγκη της κατανόησης της σημασίας και του ρόλου των κλιματικών διαφοροποιήσεων και των πρακτικών χρήσης γης στους υδατικούς πόρους της νήσου. Στην περιοχή του Αμαρίου στο Ρέθυμνο, το μεγαλύτερο μέρος του δικτύου ύδρευσης και άρδευσης εξυπηρετείται από το φράγμα Ποταμών, η λειτουργία του οποίου έχει ως αποτέλεσμα την χρήση μόλις 2.000.000 κυβικών μέτρων νερού από αυτό, αν και το προσχέδιο της μελέτης του αναφερόταν στην ανάληψη 15.000.000 κυβικών μέτρων νερού ετησίως, τόσο για τις επιτακτικές ανάγκες ύδρευσης αλλά και άρδευσης της περιοχής .

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μοντελοποίηση του «Φράγματος Ποταμών », κάνοντας χρήση του υδρολογικού μοντέλου SWAT (Soil and Water Assessment Tool-Εργαλείο Αξιολόγησης Εδαφών και Νερού). Στη συνέχεια εφαρμόζονται διάφορα διαχειριστικά σενάρια στο ήδη

βαθμονομημένο μοντέλο που άπτονται κυρίως του τρόπου κάλυψης τόσο των αναγκών άρδευσης αλλά και ύδρευσης, αξιολογώντας τις πιθανές επιπτώσεις στο υδατικό ισοζύγιο της περιοχής. Βασικός στόχος είναι η εύρεση της βέλτιστης πρακτικής που θα ικανοποιεί πλήρως τις αρδευτικές και υδρευτικές ανάγκες, καθώς και τη βιώσιμη διαχείριση των υδατικών πόρων της περιοχής.

2.Βιβλιογραφική ανασκόπηση

2.1.Γενικά

Η συνολική έκταση της επιφάνειας της Ελλάδας (131.957 km^2) καλύπτεται με επιφανειακούς υδατικούς πόρους συνολικής επιφάνειας 2.200 km^2 δηλαδή ποσοστό κάλυψης 1,6%. Στο σύνολο των υδατικών πόρων 956 km^2 καλύπτονται από φυσικές και τεχνητές λίμνες, 288 km^2 καλύπτονται από λιμνοθάλασσες ενώ 723 km^2 καλύπτονται από τις εκβολές και τα δέλτα των ποταμών. Το μήκος του συνόλου των ποταμών ανέρχεται σε 4268 km ενώ των ελών μόλις 58 km (Νομαρχιακές Αυτοδιοικήσεις 1970-2002, ΕΚΒΥ 1994). Γενικότερα, για την περιγραφή και πρόβλεψη της παρουσίας και κυκλοφορίας του νερού τόσο στην Ελλάδα, όσο και σε ολόκληρη τη Γη, σημαντικό αντικείμενο μελέτης αποτελεί ο υδρολογικός κύκλος, για την κατανόηση του οποίου υπάρχουν διαφορετικά είδη μοντέλων, μερικά από τα οποία αναλύονται παρακάτω.

2.2.Εφαρμογή περιβαλλοντικών μοντέλων

Στα περισσότερα φυσικά ή μη φυσικά φαινόμενα, η συμπεριφορά είναι εφικτό να εκφραστεί με κάποια μαθηματική σχέση, η οποία συνήθως προκύπτει υπό ορισμένες προϋποθέσεις. Με την εφαρμογή διαφορετικών τιμών στην εκάστοτε σχέση, προκύπτουν ανάλογα αποτελέσματα καθιστώντας εφικτή την πραγματοποίηση προβλέψεων. Ανάλογα με την σαφήνεια και την ακρίβεια με την οποία περιγράφεται κάθε μεταβολή, προσδιορίζεται η πολυπλοκότητα της κάθε σχέσης και γίνεται προσέγγιση των πραγματικών συνθηκών. Στο περιβάλλον, η μαθηματική περιγραφή αυτών των φαινομένων κρίνεται απαραίτητη για τους εξής λόγους (Schnoor, 2005):

- Βελτίωση του βαθμού κατανόησης των πολύπλοκων υδρολογικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στο σύστημα
- Έλεγχος απόκρισης του συστήματος
- Προσδιορισμός συγκεντρώσεων έκθεσης σε χημικές ενώσεις για υδρόβιους οργανισμούς ή και ανθρώπους στο παρελθόν, το παρόν αλλά και το μέλλον
- Προσδιορισμός των μελλοντικών συνθηκών για διάφορα σενάρια επιβάρυνσης ή και εναλλακτικών ενεργειών διαχείρισης

Η έννοια του «μοντέλου περιβάλλοντος» (Νικολαΐδης, 2013) αποδίδεται ως εξής:

1. Μοντέλο είναι ένα κατασκευάσμα που ποσοτικοποιεί, περιγράφει ή είναι ανάλογο χημικών, φυσικών, βιολογικών φαινομένων.
2. Μοντέλο είναι η μαθηματική περιγραφή της συμπεριφοράς που έχει ένα φυσικό σύστημα

Τα μαθηματικά μοντέλα των οποίων η χρήση έχει αυξηθεί σε μεγάλο βαθμό τα τελευταία κυρίως 50 χρόνια, εφαρμόζονται για την αντιμετώπιση προβλημάτων που αφορούν κυρίως την ποιότητα των υδάτων και χρησιμοποιούνται για τη διερεύνηση και την προσομοίωση κάθε τύπου προβλήματος που έχει σχέση με τους υδατικούς πόρους (Friedman et al., 1984, Van Grisen et al., 1995). Παρά την ιδιαίτερα συχνή εφαρμογή τους τα μοντέλα έχουν αβεβαιότητες κυρίως λόγω της ατελούς κατανόησης των διεργασιών που διέπουν το υδρολογικό σύστημα, καθώς και της έλλειψης δεδομένων. Λόγω της αβεβαιότητας αυτής, απαιτείται η προσομοίωση της λεκάνης απορροής του υπό μελέτη φράγματος και στη συνέχεια η επαλήθευση με πραγματικά δεδομένα λόγω της μοναδικότητας και της πολυπλοκότητας που παρουσιάζει κάθε λεκάνη.

2.3.Υδρολογικά μοντέλα

2.3.1.Ορισμός υδρολογικού μοντέλου και στάδια δημιουργίας

Τα υδρολογικά μοντέλα συνιστούν μαθηματικούς μετασχηματισμούς που χρησιμοποιούν δεδομένα πεδίου (υδρολογικά, γεωμορφολογικά, κτλ.) και υποθέσεις σχετικά με τους μηχανισμούς του υδρολογικού κύκλου, αναπαριστώντας τις υδρολογικές διεργασίες σε κατάλληλη χωρική και χρονική κλίμακα.

Με τον όρο «υδρολογικό μοντέλο», εννοείται ένα ευρύ φάσμα μαθηματικών μετασχηματισμών τα οποία χρησιμοποιούν δεδομένα πεδίου και υποθέσεις σχετικά με τους φυσικούς μηχανισμούς, έχοντας ως τελικό στόχο την εκτίμηση υδρολογικών μεταβλητών που είναι σχεδόν αδύνατο να μετρηθούν στο πεδίο (Εργαστήριο Υδρολογίας και αξιοποίησης υδατικών πόρων, ΕΜΠ, 2009).

Ποικίλα είναι τα μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί για την προσομοίωση της επιφανειακής και υπόγειας υδρολογίας, μερικά από αυτά είναι τα παρακάτω:

- **HSPF (Hydrological Simulation Program-Fortran)** (Johanson et al., 1980, Bicknell et al., 2001) Προσομοιώνει την υδρολογία για μεγάλες χρονικές περιόδους, ακόμα και σε αστικές περιοχές.
- **ETD (Enhanced Trickle –Down Model)** (Schoor et al., 1984, Nikolaidis et al., 1988) Με τη δυνατότητα να περιγράφει επαρκώς όλους τους τύπους υδρολογικών συστημάτων σε συστήματα απορροής και αποστράγγισης
- **Topoflow** (Pecham et al., 2007) Μελέτη φυσικών διαδικασιών σε κλιματικές αλλαγές, μη κατανεμημένο μοντέλο
- **Modoflow (Modular Three-Dimensional Finite –Difference Ground –Water Flow Model)** (Harbaugh and McDonald, 1996) Μοντέλο πεπερασμένων διαφορών για έδαφος – νερό, τριών διαστάσεων

- ANSWERS-Continuous (**A**real **N**onpoint **S**ource **W**atershed **E**nvironment **R**esponse **S**imulation – Continuous) (Beasley et al., 1980)
- AGNPS (**A**gricultural **N**on-**P**oint **S**ource Pollution Model) (Young et al., 1987)
- MIKE-SHE (European Hydrological System Model) (Refsgaard, 1997, Demetriou and Punthakey, 1998)
- SURFER (Golden Software Inc., 1989)
- TMWAM (**T**urkey-**M**ersey **W**atershed **A**cidification **M**odel) (Lam et al., 1988, Bobba and Lam, 1990)
- ILWAS (**I**ntegrated **L**ake –**W**atershed **A**cidification **S**tudy) (Chen et al., 1984)
- RAINS (**R**egional **A**ir Pollution **I**nformation and **S**imulation) (Kamari, 1985)
- SWAT (**S**oil and **W**ater **A**ssessment **T**ool) (Arnold et al., 1998, Neitsch et al., 2002, Gassman et al., 2007, Oeurng et al., 2011)

Τα στάδια τα οποία περιλαμβάνει η δημιουργία ενός μοντέλου είναι:

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

2.3.2.Κατηγορίες μοντέλων

Η χωρική κλίμακα, η χρονική διακριτότητα και η στοχαστική ή μη δομή των μεταβλητών του μοντέλου καθώς και ο βαθμός προσέγγισης των φυσικών διεργασιών αποτελούν θεμελιώδη χαρακτηριστικά των υδρολογικών μοντέλων με βάση τα οποία μπορούν να προκύψουν οι παρακάτω κατηγορίες.

➤ Κατηγοριοποίηση με βάση τη χωρική κλίμακα

Στα υδρολογικά μοντέλα οι σημειακές διεργασίες ανάγονται σε επιφανειακές, με ολοκλήρωση των υδρολογικών μεταβλητών εισόδου και εξόδου (βροχόπτωση, εξατμισοδιαπνοή, απορροή, κατείσδυση) αλλά και παραμέτρων που περιγράφουν τα φυσικά χαρακτηριστικά του συστήματος σε πεπερασμένη χωρική κλίμακα. Η διάκριση των υδρολογικών μοντέλων μπορεί να γίνει σε τέσσερις κατηγορίες

σχηματοποίησης και παραμετροποίησης με βάση την χωρική τους διακριτότητα η οποία αποτελεί θεμελιώδες χαρακτηριστικό (Gupta et al., 2003).

- **Αδιαμέριστα μοντέλα (lumped)**

Σε όλη την επιφάνεια της λεκάνης γίνεται η ολοκλήρωση της χρονοσειράς φόρτισης, ενώ οι τιμές των παραμέτρων θεωρούνται ενιαίες. Η εκτίμηση της απορροής στην έξοδο της λεκάνης βασίζεται στις κύριες μεταβλητές του υδατικού ισοζυγίου.

- **Ημι-κατανεμημένα μοντέλα (semi-distributed)**

Σε επιμέρους υπολεκάνες διακρίνεται η λεκάνη απορροής με διαφορετικές χρονοσειρές φόρτισης και τιμές παραμέτρων. Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η εκτίμηση της απορροής στην έξοδο της λεκάνης προκύπτει συναρτήσει των υπολογισμών για κάθε υποενότητα.

- **Ημι-αδιαμέριστα μοντέλα (semi-lumped)**

Είναι μία ενδιάμεση μορφή μεταξύ της αδιαμέριστης και της ημικατανεμημένης σχηματοποίησης στην οποία θεωρούνται διακριτές χωρικές ενότητες που δέχονται διαφορετικές φορτίσεις. Ωστόσο οι παράμετροι είναι κοινές.

- **Πλήρως κατανεμημένα (distributed)**

Δημιουργούνται πολύ μικρές ενότητες (κύτταρα), οι οποίες έχουν ομοιογενή και ισότροπα τμήματα. Η κάθε μία δέχεται διαφορετικές χρονοσειρές φόρτισης και τιμές παραμέτρων.

- Κατηγοριοποίηση με βάση τη χρονική διακριτότητα

Η χρονική διακριτότητα έχει άμεση εξάρτηση από το σκοπό του μοντέλου. Για διαχείριση υδάτων συνήθως χρειάζεται μηνιαία, ή σπανιότερα ημερήσια κλίμακα ενώ για πλημμύρες ή συνδυαστικά υδρολογικά – υδροδυναμικά μοντέλα υιοθετούνται μικρότερες κλίμακες, με μέγιστη κλίμακα την ημερήσια. Όσο πιο λεπτή είναι η χρονική κλίμακα, τόσο πιο μικρή πρέπει να είναι η διακριτότητα των μεταβλητών.

Η διάκριση των υδρολογικών μοντέλων μπορεί να γίνει σε δύο κατηγορίες με βάση την χρονική τους διακριτότητα:

- **Συνεχή μοντέλα**

Σε αυτά γίνεται περιγραφή της διαχρονικής εξέλιξης του ισοζυγίου των υδατικών πόρων μιας πεπερασμένης χωρικής ενότητας.

- **Μοντέλα μεμονωμένου υδρολογικού γεγονότος**

Σε αυτά γίνεται περιγραφή μεμονωμένων γεγονότων, όπως ένα υδρογράφημα ή την αιχμή μιας πλημμύρας.

- Κατηγοριοποίηση με βάση τη στοχαστική δομή των μεταβλητών του μοντέλου

Η διάκριση των υδρολογικών μοντέλων μπορεί να γίνει σε δύο κατηγορίες με βάση τη στοχαστικότητα τους:

- **Στοχαστικά μοντέλα**

Τα μοντέλα αυτά βασίζονται στην πιθανολογική προσέγγιση των υδρολογικών διεργασιών, τις οποίες αντιμετωπίζουν ως τυχαίες μεταβλητές, είτε ως μεμονωμένες είτε από κοινού. Χρησιμοποιούν μεθόδους επαγωγικής στατιστικής και ενδείκνυται για περιπτώσεις στις οποίες η πραγματοποίηση ενός υδρολογικού φαινομένου είναι ή μπορεί να θεωρηθεί ανεξάρτητη από κάθε άλλη πραγματοποίηση του ίδιου φαινομένου.

Αυτό το είδος μοντέλων δε δίνει μονοσήμαντες προγνώσεις των μεταβλητών που αναπαριστούν, αλλά ποσοτικοποιούν την αβεβαιότητα των προγνώσεων. Με την αναπαραγωγή των στατιστικών μεγεθών των παρατηρημένων δειγμάτων, όχι μόνο εξασφαλίζουν στατιστική συνέπεια, αλλά διατηρούν και μια στοιχειώδη συνέπεια με τα χαρακτηριστικά του φυσικού συστήματος (Salas et al., 1980).

- **Προσδιοριστικά μοντέλα**

Η στοχαστική δομή των δεδομένων δεν υπεισέρχεται σε καμία μεταβλητή των μοντέλων αυτών. Ο υδρολογικός κύκλος μπορεί να προσομοιωθεί πλήρως με τα μοντέλα αυτά καθώς και οι συνιστώσες του. Κατά τον τρόπο αυτό αποτελούν μια αξιόπιστη αναπαράσταση της συμπεριφοράς και απόκρισης του φυσικού συστήματος δίνοντας σαφή και μονοσήμαντα αποτελέσματα .

- Κατηγοριοποίηση με βάση τον βαθμό προσέγγισης των φυσικών διεργασιών

Τα υδρολογικά μοντέλα μπορούν να διακριθούν σε τρεις κατηγορίες με βάση τον βαθμό προσέγγισης των φυσικών διεργασιών:

- **Μοντέλα φυσικής βάσης (physically-based)**

Τα μοντέλα φυσικής βάσης είναι κατανεμημένα, υδρολογικά μοντέλα, τα οποία στηρίζονται στους φυσικούς νόμους που σχετίζονται με την κίνηση του νερού (εξισώσεις ακόρεστης και κορεσμένης ροής), καθώς και σε ημιεμπειρικές περιοχικές σχέσεις που έχουν προκύψει από πειραματικές λεκάνες. Παρόλα αυτά, είναι σχεδόν αδύνατο να βρεθούν όλες οι λεπτομερείς διεργασίες του κύκλου του νερού και της μεταφοράς των θρεπτικών και γι' αυτό, ενδείκνυται περισσότερο σε επίπεδο λεκάνης απορροής.

- **Εννοιολογικά μοντέλα (conceptual)**

Τα μοντέλα αυτά διατυπώνουν παραμετρικές σχέσεις σε υδραυλικά ανάλογα που αναπαριστούν τις κύριες υδρολογικές διεργασίες στην ελάχιστη χωρική ενότητα που υποστηρίζεται από την σχηματοποίηση (λεκάνη, υπολεκάνη). Σε αυτό το είδος μοντέλων θεωρούνται όγκοι ελέγχου στους οποίους ολοκληρώνονται οι μεταβλητές καταστάσεις τόσο χωρικά όσο και χρονικά καθώς και οι ροές του συστήματος, αποφεύγοντας έτσι τα προβλήματα κλίμακας που εισάγουν τα μοντέλα φυσικής βάσης (Nash & Sutcliffe, 1970).

Με τα εννοιολογικά μοντέλα επιτρέπεται η προσομοίωση πολύπλοκων διεργασιών με έντονη χωρική ανομοιογένεια, μέσω μικρού αριθμού παραμέτρων.

Τα επιφανειακά εννοιολογικά μοντέλα αναφέρονται και ως μοντέλα συγκέντρωσης της εδαφικής υγρασίας (soil moisture accounting models), καθώς το υδραυλικό ανάλογο που χρησιμοποιούν είναι μια υποθετική δεξαμενή νερού, η στάθμη της οποίας αναπαριστά το μέσο ύψος υγρασίας στην ακόρεστη ζώνη.

- **Μοντέλα Μαύρου Κουτιού (Black Box)**

Οι εξισώσεις που περιέχουν περιγράφουν πολύπλοκα συστήματα με πολύ μικρό υπολογιστικό φόρτο σε σχέση με τα αναλυτικά μοντέλα προσομοίωσης (Μαμάσης, 2007). Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται δεν αναπαριστούν τις ενδιάμεσες διεργασίες του υδρολογικού κύκλου, όπως συμβαίνει με άλλων ειδών μοντέλα που έχουν ήδη αναφερθεί.

2.4.Βαθμονόμηση και Επαλήθευση Υδρολογικού Μοντέλου

2.4.1.Ορισμός βαθμονόμησης

Μια συστηματική διαδικασία προσαρμογής των τιμών των παραμέτρων ενός υδρολογικού μοντέλου υποδηλώνεται με τον όρο της βαθμονόμησης (calibration), με τέτοιο τρόπο ώστε οι προσομοιωμένες αποκρίσεις του να προσεγγίζουν όσο το δυνατόν περισσότερο τις πραγματικές (παρατηρούμενες) τιμές.

Η διαδικασία της βαθμονόμησης για να γίνει επιτυχώς προϋποθέτει μία συνεχή λήψη δεδομένων σε έναν επαρκές χρονικό διάστημα. Στη βαθμονόμηση, οι παράμετροι οι οποίες χρησιμοποιούνται δεν είναι πάντοτε γνωστές, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα να ζητείται ουσιαστικά η βελτιστοποίηση της ίδιας της μαθηματικής δομής του μοντέλου με τρόπο ώστε η προσομοιωμένη απόκριση να προσεγγίζει καλύτερα την παρατηρημένη συμπεριφορά του υδρολογικού συστήματος. (Ευστρατιάδης, 2008).

Όσο πιο σύνθετα είναι τα μοντέλα ή τείνουν να γίνουν στη δομή και τον αριθμό των παραμέτρων που διαθέτουν, τόσο πιο δύσκολο είναι να προσομοιωθούν με υψηλό βαθμό βεβαιότητας οι διάφορες φυσικές διεργασίες.

2.4.2. Τύποι βαθμονόμησης

Η βαθμονόμηση διαχωρίζεται σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- **Χειροκίνητη βαθμονόμηση**

Αυτού του είδους η βαθμονόμηση δεν είναι μια αυστηρά συστηματική διαδικασία αλλά βασίζεται στη διερεύνηση εναλλακτικών συνδυασμών παραμέτρων που επιλέγονται από τον ίδιο το χρήστη. Η επιλογή των παραμέτρων συνήθως γίνεται με τη βοήθεια κάποιων γραφημάτων καθώς και δεικτών μέσα από τα οποία ο χρήστης μπορεί να αντιληφθεί με μεγαλύτερη ευκολία το βαθμό στον οποίο προσεγγίζουν οι προσομοιωμένες τιμές τις παρατηρούμενες. Παρά το ότι η συγκεκριμένη μέθοδος μπορεί να χαρακτηριστεί ιδιαίτερα επίπονη, πόσο μάλλον όταν ο αριθμός παραμέτρων είναι ιδιαίτερα μεγάλος, χρησιμοποιείται ευρέως από ένα μεγάλο κοινό υδρολόγων, έχοντας ο σκεπτικό ότι κατά τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η βαθμονόμηση με τις παραμέτρους να λαμβάνουν τιμές πιο ρεαλιστικές και αντιπροσωπευτικές.

- **Αυτόματη Βαθμονόμηση**

Σε αυτού του είδους τη βαθμονόμηση διατυπώνεται ένα μέτρο καλής προσαρμογής των προσομοιωμένων σε σχέση με τις παρατηρημένες αποκρίσεις της λεκάνης, το οποίο θεωρείται ως η αντικειμενική συνάρτηση ενός προβλήματος μη γραμμικής βελτιστοποίησης, με μεταβλητές ελέγχου τις παραμέτρους του μοντέλου. Η αυτόματη βαθμονόμηση προσφέρει τη δυνατότητα πολλαπλών δοκιμών με τυχαίες αλλαγές στις παραμέτρους, με σκοπό τα αποτελέσματα του μοντέλου να παρουσιάζουν την επιθυμητή συνέπεια με τα παρατηρημένα. Η τελική επιλογή των παραμέτρων προκύπτει ως αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης. Το κύριο μειονέκτημα της είναι η πλήρης εξάρτηση των αποτελεσμάτων από το μέτρο προσαρμογής που χρησιμοποιείται, τα σφάλματα που μεταφέρονται από τα δεδομένα τις υπολογιστικές αδυναμίες της διαδικασίας αναζήτησης και άλλες πηγές αβεβαιότητας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, ένα υδρολογικό μοντέλο να λειτουργεί υπό τη μορφή «μαύρου κουτιού», χρησιμοποιώντας

παραμέτρους οι οποίες δεν έχουν φυσικό νόημα, δηλαδή οι παράμετροι του μοντέλου δεν αντιπροσωπεύουν τα χαρακτηριστικά του φυσικού συστήματος. Τα μοντέλα αυτού του τύπου διατυπώνουν έντονα γραμμικούς μετασχηματισμούς των μεταβλητών εισόδου σε εξόδου. Η δομή και οι παράμετροι τους δεν έχουν φυσικό υπόβαθρο και εκτιμώνται μέσω μιας αυτοματοποιημένης διαδικασίας προσαρμογής στις αντίστοιχες μετρημένες αποκρίσεις του συστήματος με τη χρήση γενετικών , κατά κανόνα αλγορίθμων .

▪ **Ημιαυτόματη βαθμονόμηση**

Πρόκειται για μία διαδραστική μέθοδο που συνδυάζει τις δύο προηγούμενες, βάσει αυτής ο εκάστοτε μελετητής παρακολουθεί την πορεία της βελτιστοποίησης και επεμβαίνει σε αυτή μεταβάλλοντας τα κριτήρια και τις υποθέσεις του προβλήματος, ώστε να κατευθύνει την πορεία αναζήτησης προς την επιθυμητή κατεύθυνση. Κατά τον τρόπο αυτό διασφαλίζεται η εγκυρότητα της προσομοίωσης, ενώ ταυτόχρονα επιτρέπεται στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης του μοντέλου να επιτύχει το βέλτιστο δυνατό αποτέλεσμα σε μικρό χρόνο. Κατά τον τρόπο αυτό, η μέθοδος αυτή θεωρείται ως η πλέον πρόσφορη και ενδεικνυόμενη ιδιαίτερα στην περίπτωση σύνθετων σχημάτων, όπου συναντάται έντονη αβεβαιότητα στην εκτίμηση των παραμέτρων λόγω της ύπαρξης πολλών ισοδύναμα καλών λύσεων (Boyle et al., 2000 Mazi et al., 2004 Efstratiadis et al., 2008).

Όσον αφορά στη αξιοπιστία βαθμονόμησης ενός υδρολογικού μοντέλου κρίνεται από τα εξής:

- Το μοντέλο διαθέτει επαρκή προγνωστική ικανότητα, δηλαδή μπορεί να αναπαράγει όλο το φάσμα των αποκρίσεων μιας λεκάνης (π.χ. υγρά και ξηρά έτη)και σε περισσότερες της μίας θέσης ποταμού, με ικανοποιητική ακρίβεια
- Στις βελτιστοποιημένες παραμέτρους του μοντέλου μπορεί να αποδοθεί κάποιο φυσικό νόημα, ώστε να θεωρηθούν συμβατές με τα χαρακτηριστικά του φυσικού συστήματος

Κατά τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται ότι το μοντέλο αναπαριστά με τους υδρολογικούς μηχανισμούς της λεκάνης με συνέπεια, καθώς επίσης το πεδίο εφαρμογής του δεν περιορίζεται στο διάστημα που υπάρχουν ιστορικές παρατηρήσεις αλλά επεκτείνεται για οποιοδήποτε χρονικό ορίζοντα, είτε στο παρελθόν, είτε στο μέλλον. Συνεπώς τα ιστορικά δείγματα φορτίσεων και αποκρίσεων που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των παραμέτρων του μοντέλου πρέπει να αντιπροσωπεύουν πλήρως την υδρολογική δίαιτα της λεκάνης.

Για το λόγο που μόλις αναφέρθηκε, ένα ανεξάρτητο δείγμα παρατηρήσεων που δεν χρησιμοποιήθηκε για σύγκριση κατά την βαθμονόμηση και αναφέρεται σε διαφορετική χρονική περίοδο ή διαφορετική διατομή ποταμού εντός της λεκάνης, συγκρίνεται εκ των υστέρων με το αντίστοιχο προσομοιωμένο δείγμα (Refsgaard, 1997). Αυτή η σύγκριση που αποτελεί την διαδικασία της επαλήθευσης, κρίνει τελικά την επιτυχία της προσομοίωσης και καθορίζει την προγνωστική ικανότητα, που είναι επιβεβλημένο να

είναι ικανοποιητική για ένα μοντέλο που έχει καταστρωθεί, ώστε αργότερα να μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην προσομοίωση εναλλακτικών διαχειριστικών πρακτικών σε τμήματα της λεκάνης απορροής.

2.4.3.Ορισμός επαλήθευσης

Ο όρος επαλήθευση (validation) αναφέρεται σε μια διαδικασία αξιολόγησης μαθηματικών μοντέλων, ώστε να διαπιστωθεί αν αποτελούν αντιπροσωπευτικές αναπαραστάσεις του συστήματος που προσομοιώνουν.

Είναι σύνηθες, η επαλήθευση ενός υδρολογικού μοντέλου να γίνεται για το βέλτιστο σύνολο παραμέτρων που έχει προκύψει από την βαθμονόμηση, ελέγχοντας το ίδιο κριτήριο προσαρμογής για μια άλλη (κατά κανόνα μεταγενέστερη της βαθμονόμησης) χρονική περίοδο, για την οποία επίσης διατίθενται μετρημένες φορτίσεις και αποκρίσεις της λεκάνης. Η προσέγγιση αυτή είναι γνωστή ως διαχωρισμός δεδομένων (data-split), και για να έχει νόημα θα πρέπει τα χαρακτηριστικά του συστήματος να έχουν διατηρηθεί αμετάβλητα για το σύνολο της περιόδου ελέγχου του μοντέλου (περίοδος βαθμονόμησης και επαλήθευσης μαζί), ώστε να εξασφαλιστεί ότι στη λεκάνη ισχύουν συνθήκες στασιμότητας (stationarity).

Αυτό που αξίζει να σημειωθεί, είναι ότι η επιτυχής βαθμονόμηση δεν συνεπάγεται απαραίτητα επιτυχή επαλήθευση του μοντέλου. Υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες παρατηρείται πολύ καλή προσαρμογή ενός υδρολογικού μοντέλου στα ιστορικά δεδομένα κατά την περίοδο βαθμονόμησης, ενώ αντίθετα κατά την περίοδο επαλήθευσης η επίδοση του μοντέλου με βάση το ίδιο κριτήριο (στοχαστική συνάρτηση) είναι κατά πολύ χαμηλότερη. Ενώ λοιπόν από τη διαδικασία βελτιστοποίησης έχει εντοπιστεί, ένα ικανοποιητικό σύνολο παραμέτρων, το μοντέλο δεν αναπαράγει τις ανεξάρτητες αποκρίσεις μιας άλλης χρονικής περιόδου. Το φαινόμενο αυτό αναφέρεται και ως υπερπροσαρμογή (overfitting) του μοντέλου, και αποτελεί ένα από τα πλέον προβληματικά ζητήματα σχημάτων με μεγάλο αριθμό βαθμών ελευθερίας, όπως τα νευρωνικά δίκτυα.

Γενικότερα υποστηρίζεται από ορισμένους ερευνητές, ότι η παραδοσιακή προσέγγιση, που βασίζεται στον διαχωρισμό των δεδομένων, δεν αποτελεί ιδιαίτερα αξιόπιστη πρακτική για την αξιολόγηση της προγνωστικής ικανότητας ενός μοντέλου (Klemes, 1986).

2.4.5.Μοντέλο SWAT

Το μοντέλο SWAT, (Soil and water assessment tool-Εργαλείο για την εκτίμηση νερού και εδάφους) αναπτύχθηκε από τον καθηγητή Jeff Arnold για την Υπηρεσία Αγροτικών Ερευνών των ΗΠΑ (USDA-ARS, Agricultural Research Service), για την πρόβλεψη των επιπτώσεων που θα έχουν κάποιες πρακτικές διαχείρισης στα ύδατα, στα εδάφη και στον κύκλο των θρεπτικών συστατικών, σε μια λεκάνη

απορροής (Arnold et al., 1995 ; Neitsch et al., 2005). Αυτό το κατέστησε διεθνώς αποδεκτό ως ένα από τα πλέον κατάλληλα μοντέλα προσομοίωσης μεγάλων και πολύπλοκων λεκανών απορροής με διάφορους τύπους εδάφους, χρήσεων γης και συνθηκών διαχείρισης (Arnold and Fohrer, 2005; Behera and Panda, 2006; Gassman et al., 2007a). Πρόκειται για ένα κατανεμημένο υδρολογικό μοντέλο λεκάνης απορροής, φυσικής βάσης (physically-based) και συνεχούς χρόνου, που λειτουργεί με ημερήσιο βήμα (Arnold et al., 1998, Neitsch et al., 2001). Διαφορετικές φυσικές διαδικασίες επιτρέπεται να προσομοιωθούν σε μια λεκάνη απορροής, όπως τη διαδρομή των φυτοφαρμάκων, των νιτρικών, των ιζημάτων, του μικροβιακού φορτίου, της διάβρωσης που προκαλείται από τη ροή του νερού και τις γεωργικές πρακτικές, και πολλών ακόμη.

Το μοντέλο SWAT παρέχει μεταξύ άλλων τη δυνατότητα:

- Προσομοίωσης της βροχόπτωσης και/ή της χιονόπτωσης μέχρι και 10 κλιμάκων υψομέτρου
- Επαναπροσδιορισμού των εισαχθέντων δεδομένων για προσομοίωση της κλιματικής αλλαγής
- Πρόβλεψης μελλοντικών κλιματικών συνθηκών

2.4.6. Δεδομένα Εισόδου του μοντέλου SWAT

Το ανάγλυφο, οι χρήσεις γης, οι τύποι του εδάφους (ιδανικά της ακόρεστης ζώνης), οι χρονοσειρές με τα ημερήσια δεδομένα βροχόπτωσης, μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας, ταχύτητας του ανέμου, καθώς και ηλιακής ακτινοβολίας (η απαίτηση των τριών τελευταίων εξαρτάται από τη μέθοδο προσομοίωσης της χρονοσειράς δυνητικής εξατμισοδιαπνοής) για όλο το χρονικό διάστημα προσομοίωσης, συγκαταλέγονται στα δεδομένα εισόδου του μοντέλου (Gassman et al., 2007b). Ο μέσος όρος της ημερήσιας θερμοκρασίας του αέρα που υπολογίζεται από τα δεδομένα που εισήχθησαν, χρησιμοποιείται για να καθοριστεί αν η βροχόπτωση πρέπει να προσομοιωθεί ως χιονόπτωση, ενώ η ελάχιστη και μέγιστη ημερήσια θερμοκρασία χρησιμοποιούνται για τους υπολογισμούς της ημερήσιας θερμοκρασίας του εδάφους και του νερού. Τα εισαχθέντα δεδομένα χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση του κλίματος της περιοχής μελέτης με τη βοήθεια 13 μηνιαίων κλιματικών μεταβλητών, οι οποίες αναπτύχθηκαν μετά από χρόνια καταγραφή κλιματικών δεδομένων, και είναι καταγεγραμμένες σε πίνακες που διαθέτει το μοντέλο.

2.4.7. Μεθοδολογία του μοντέλου

Στο μοντέλο SWAT αυτό που κυρίως μας ενδιαφέρει είναι να δούμε πως προσομοιώνεται ο υδρολογικός κύκλος. Εξάλλου, αυτός ορίζει την ποσότητα του νερού, φερτών υλών και θρεπτικών στοιχείων που εγκαταλείπουν το έδαφος και καταλήγουν στο υδρογραφικό δίκτυο στο ημερήσιο χρονικό βήμα προσομοίωσης. Η διαίρεση τη λεκάνης απορροής σε υδρολογικές μονάδες απόκρισης (HRU) επιτρέπει στο μοντέλο να βρίσκει την εξατμισοδιαπνοή για διαφορετικές χρήσεις γης και εδάφη. Η απορροή

βρίσκεται ξεχωριστά για κάθε (HRU) και στη συνέχεια στο σύνολο της απορροής. Οι συνιστώσες του υδρολογικού κύκλου απεικονίζονται στην εικόνα 1 και προσομοιώνονται από το μοντέλο στη χωρική κλίμακα της Υδρολογικής Μονάδας Απόκρισης (HRU) όπως παρουσιάζεται παρακάτω:



Εικόνα 1: Ο υδρολογικός κύκλος στο SWAT

Το SWAT δέχεται ημερήσια δεδομένα για τα κατακρημνίσματα τα οποία δέχεται η λεκάνη απορροής. Η κατακρήμνιση εμφανίζεται με τη μορφή βροχόπτωσης ή χιονόπτωσης, ανάλογα με τη μέση ημερήσια θερμοκρασία. Η χιονόπτωση σχηματίζει στρώσεις χιονιού στο έδαφος το οποίο τήκεται (λιώνει) όταν η εδαφική θερμοκρασία το επιτρέψει. Η δε συμπεριφορά του λιωμένου χιονιού είναι αντίστοιχη με αυτή της βροχόπτωσης (Neitsch et al., 2005).

Το νερό της βροχής πέφτει στα φύλλα ή στο έδαφος. Η ποσότητα του νερού που αναλογεί σε κάθε υπολεκάνη, είναι αυτή που έχει καταγραφεί από εκείνον το μετεωρολογικό σταθμό(μεταξύ αυτών που ορίζει ο χρήστης), που βρίσκεται κοντά στο κέντρο βάρους της. Το νερό στο έδαφος είτε θα απορροφηθεί, είτε θα γίνει επιφανειακή απορροή. Ο συντελεστής απορροής είναι αυτός που καθορίζει το ποσοστό νερού απορροής, ανάλογα με τον τύπο του εδάφους και τις χρήσεις γης. Η εκτίμηση του πραγματοποιείται με μια τροποποιημένη μέθοδο του αριθμού καμπύλης CN (Curve Number) κατά SCS (USDA, Soil Conservation Service, 1972). Το εδαφικό νερό προσλαμβάνεται από την βλάστηση και διαπνέεται, υφίσταται εδαφική εξάτμιση, κατεισδύει στον αβαθή υδροφορέα ή συμβάλλει στην απορροή στην έξοδο της λεκάνης με την ενδιάμεση απορροή(lateral flow). Για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής το μοντέλο περιλαμβάνει τρεις διαφορετικές μεθόδους (Thornthwaite, Hargreaves και Penman-Monteith), που χρησιμοποιούνται ανάλογα με τα υπάρχοντα δεδομένα. Ένα μέρος του υπόγειου νερού από τον αβαθή υδροφορέα (shallow aquifer) θεωρείται ότι φτάνει στα βαθύτερα στρώματα (deep

aquifer) και χάνεται από το σύστημα. Το επιφανειακό νερό συναντά πιθανές διεξόδους, όπου η εξίσωση υδατικού ισοζυγίου διέπει την αποθήκευση και την απελευθέρωση νερού στο εκάστοτε χρονικό βήμα. Το νερό που τελικά φτάνει στο ποτάμι είναι το άθροισμα της επιφανειακής, ενδιάμεσης και υπόγειας απορροής και διοδεύεται μέχρι τον ταμιευτήρα ή λίμνη. Το μοντέλο επιτρέπει ακόμα την αφαίρεση από κάθε σημείο του συστήματος (υδατόρευμα, ταμιευτήρας, λίμνη, αβαθής και βαθύς υδροφορέας) για ανθρωπογενείς χρήσεις (Μιμίκου, 2006). Η γενική εξίσωση που χρησιμοποιεί το SWAT για την περιγραφή του υδρολογικού κύκλου σ κάθε υδρολογική μονάδα είναι:

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

όπου:

SW_t : η τελική περιεκτικότητα υγρασίας του εδάφους την ημέρα t

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

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

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

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

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

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

2.4.8.Δημιουργία υδρολογικού ισοζυγίου

Το μοντέλο λαμβάνει υπόψη όλες τις υδρολογικές διεργασίες συμπεριλαμβανομένης της επιφανειακής απορροής, του κύκλου και της μεταφοράς των θρεπτικών, της ανάπτυξης της βλάστησης, των χρήσεων γης καθώς και της διαχείρισης των υδατικών πόρων σε επίπεδο υπολεκάνης (subbasin). Η λεκάνη απορροής υποδιαιρείται σε επιμέρους υπολεκάνες βάσει του αριθμού των παραποτάμων που υπάρχουν στη λεκάνη απορροής. Η κάθε υπολεκάνη διαχωρίζεται στη συνέχεια περαιτέρω σε υδρολογικές μονάδες απόκρισης (Hydrological Response Units, HRUs), καθεμία από τις οποίες χαρακτηρίζεται σε όλη της την έκταση από ένα μοναδικό συνδυασμό εδάφους (soil), κλίσης γης (land slope) και χρήσης γης (land use).

Η προσομοίωση του υδρολογικού ισοζυγίου πραγματοποιείται αρχικά για καθεμία υδρολογική μονάδα απόκρισης ξεχωριστά, στην οποία συνυπολογίζονται το ποσοστό της βροχόπτωσης που συγκρατείται από το φύλλωμα των φυτών και των δέντρων, ο τρόπος καταμερισμού της βροχόπτωσης, το νερό από το

λιώσιμο του χιονιού, το νερό άρδευσης μεταξύ της επιφανειακής απορροής και της διήθησης, η αναδιανομή του νερού στο προφίλ του εδάφους, η εξατμισοδιαπνοή, η υπεδάφια απορροή, καθώς και η ροή που επιστρέφει από τους ρηχούς υδροφορείς.

Αφού ολοκληρωθεί ο υπολογισμός της επιφανειακής απορροής, των κύκλων των θρεπτικών, της παραγωγής φερτών υλών και της ανάπτυξης των φυτών για κάθε υδρολογική μονάδα απόκρισης (HRU), τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση του συνόλου της λεκάνης απορροής. Αναλυτικότερα οι ροές των υδρολογικών μονάδων απόκρισης της κάθε υπολεκάνης αθροίζονται και στη συνέχεια διοδεύονται μέσα στο υδρογραφικό δίκτυο χρησιμοποιώντας είτε τη μέθοδο αποθήκευσης μεταβλητού ρυθμού (Williams, 1969), είτε τη μέθοδο Muskingum (Neitsch et al., 2005), που είναι και οι δύο παραλλαγές της προσέγγισης του κινηματικού κύματος. Οι δύο παραπάνω μέθοδοι είναι παραλλαγές της προσέγγισης του κινηματικού κύματος. Τέλος, αθροίζονται τα φορτία, ή συγκεντρώσεις από τα ιζήματα, τα θρεπτικά, τα φυτοφάρμακα, και τα βακτήρια των υδρολογικών μονάδων απόκρισης της κάθε υπολεκάνης (συμπεριλαμβανομένης της απομάκρυνσης) και στη συνέχεια διοδεύονται μέσω των καναλιών, των λιμναζόντων νερών, των υγροτόπων και των ρεζερβουάρ για να καταλήξουν στην έξοδο της λεκάνης απορροής.

Στους υπολογισμούς λαμβάνονται υπόψη οι διαφοροποιήσεις στη ροή και τα φορτία λόγω των σημειακών πηγών αλλά και των πιέσεων από τις παρακείμενες αστικές περιοχές (Gassman et al., 2007).

2.4.9. Διαχειριστικές πρακτικές στο μοντέλο

Το μοντέλο SWAT επιτυγχάνει μια λεπτομερειακή προσομοίωση των διαχειριστικών πρακτικών στην αγροτική γη, καθώς οι βασικότερες από αυτές όπως η σπορά, λίπανση, άρδευση, συγκομιδή, βόσκηση κ.α., μπορούν να οριστούν εύκολα από το χρήστη για κάθε υδρολογική μονάδα, καθώς και η ημερομηνία εφαρμογής της κάθε μίας. Επιπροσθέτως, ορίζονται λεπτομέρειες εφαρμογής της κάθε διαχειριστικής πρακτικής.

2.5. Φράγματα

2.5.1. Γενικά

Φράγμα είναι ένα τεχνικό έργο που κατασκευάζεται στην κοίτη ενός ποταμού για να ανακόψει τη ροή, με σκοπό την αποθήκευση νερού για τη χρησιμοποίησή του. Η έκταση γης στην οποία αποθηκεύεται το νερό και βρίσκεται στα ανάντη του φράγματος, ονομάζεται ταμιευτήρας ή λεκάνη κατάκλισης (Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων).

Η αναγκαιότητα τους εμφανίστηκε όταν ο άνθρωπος χρειάστηκε να αξιοποιήσει με συστηματικό τρόπο τα επιφανειακά νερά για άρδευση, ύδρευση, παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και να προστατευθεί από πλημμύρες.

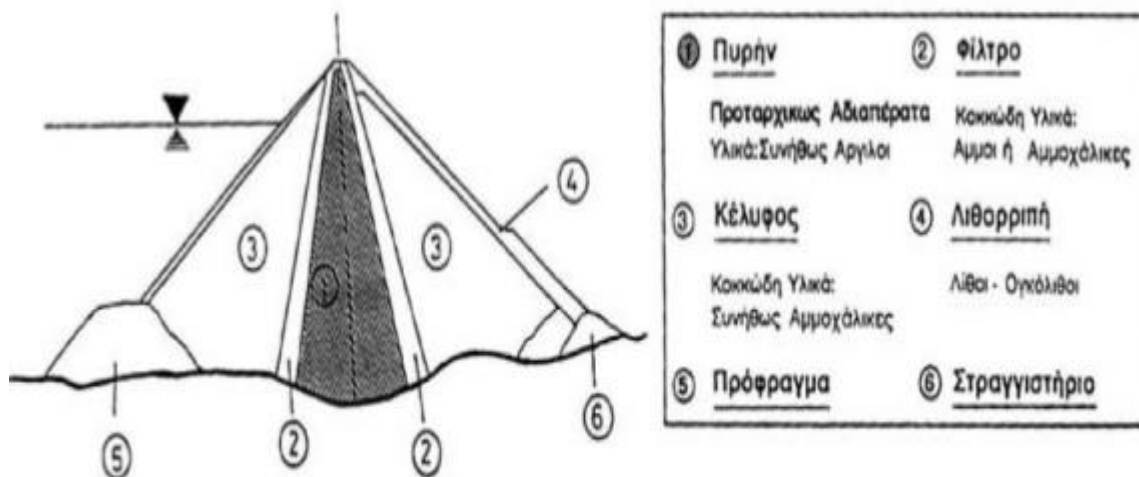
Η μελέτη και η κατασκευή των φραγμάτων αποτελεί εξειδικευμένη εργασία, η οποία διέπεται από ειδική νομοθεσία στη χώρα μας, αλλά και διεθνώς όσον αφορά τη διαδικασία και τις τεχνικές προδιαγραφές που εφαρμόζονται.

Ανάλογα με τα υλικά κατασκευής τους και τη γεωμετρία τους, τα φράγματα διακρίνονται στα παρακάτω:

- **Εύκαμπτα:** Κατασκευάζονται από γαιώδη υλικά (αργίλους, άμμους κροκάλες) και τεμάχια βράχων και διακρίνονται κυρίως σε χωμάτινα και λιθόρριπτα
- **Άκαμπτα:** Παρασκευάζονται από σκυρόδεμα και διακρίνονται κυρίως στα βαρύτητας και τα τοξωτά
- **Μεικτά:** Συνδυασμός των δύο παραπάνω

Αναλόγως τα υλικά κατασκευής χωρίζονται στα χωμάτινα και στα λιθόρριπτα. Τα χωμάτινα, θεωρούνται τα πιο εύκολα και πιο οικονομικά.

Στην εικόνα 2 φαίνονται τα βασικά τμήματα χωμάτινου φράγματος:



Εικόνα 2: Σκαρίφημα χωμάτινου φράγματος (υλικά-ζώνες) (Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων)

Οι απαραίτητες προϋποθέσεις μιας καλής θεμελίωσης για χωμάτινο φράγμα, είναι να παρέχει ανθεκτική στήριξη στο επίχωμα για όλες τις συνθήκες διάβρωσης και φόρτισης, καθώς επίσης και επαρκή αντίσταση στην διήθηση του ύδατος για την αποφυγή απώλειας μεγάλης ποσότητας ύδατος.

Η σημασία της σωστής αντιμετώπισης της θεμελίωσης λαμβάνει ιδιαίτερη έμφαση από το γεγονός ότι το 40% όλων των αστοχιών στα χωμάτινα φράγματα και το 12% όλων των θραύσεων αποδίδονται στην αστοχία της θεμελίωσης (Καράλης, 2001)

Η επιλογή της θέσης ενός φράγματος εξαρτάται από την υδατοστεγανότητα της λεκάνης κατάκλισης, την αντοχή του εδάφους θεμελίωσης και την ύπαρξη κατάλληλων υλικών για την κατασκευή του αναχώματος. Η χωρητικότητα ταμιευτήρων εξαρτάται από το ύψος του φράγματος και τις μορφολογικές (τοπογραφικές) κλίσεις των πρανών της κοίτης του χειμάρρου ή του ποταμού.

Σε ένα φράγμα ο υπερχειλιστής του οποίου η κατασκευή γίνεται με ισχυρά οπλισμένο σκυρόδεμα και γι' αυτό το λόγο απορροφά σημαντικό τμήμα του προϋπολογισμού του έργου, αποτελεί το κυριότερο κομμάτι. Η κατασκευή υπερχειλιστή απαιτείται στις περιπτώσεις χωμάτων και λιθόρριπτων φραγμάτων, ενώ στα φράγματα βαρύτητας από τσιμέντο ή λιθοδομή, ενσωματώνεται στην κατασκευή του σώματος του φράγματος και δεν αποτελεί ξεχωριστό έργο (φράγμα υπερπηδητό).

2.5.2. Υδρολογικός σχεδιασμός

Το γενικό ισοζύγιο για το σχεδιασμό ενός φράγματος με μηνιαίο χρονικό βήμα είναι:

$$V_i = V_{i-1} + Q_{ini} + P \cdot A - PET \cdot A - Q_{out} - Q_{irrfinal}$$

όπου

V_i , V_{i-1} : ο αποθηκευμένος όγκος νερού στον ταμιευτήρα τους μήνες i και $i-1$ αντιστοίχως (m^3), ενώ ισχύει ότι $V_{min} \leq V_i \leq V_{max}$

Q_{ini} : εισροή ανά μήνα i στον ταμιευτήρα, (m^3)

A : επιφάνεια του φράγματος (m^2)

P : ποσότητα βροχόπτωσης το μήνα i , (m)

PET : δυνητική εξατμισοδιαπνοή το μήνα i , (m)

Q_{out} : υπερχείλιση, , οικολογική παροχή Q_{eco} , το μήνα i (m^3)

$Q_{irrfinal}$: τελική ποσότητα που παρέχεται για ύδρευση και άρδευση το μήνα i (m^3)

Συνήθως ο τρόπος λειτουργίας των ταμιευτήρων αφορά σε ετήσιο κύκλο, αποθηκεύοντας νερό τους υγρούς μήνες και αποδίδοντας το συγκεκριμένο νερό τους ξηρούς μήνες. Ο συνολικός όγκος του

ταμιευτήρα πάντα είναι μεγαλύτερος από τον ωφέλιμο όγκο, δεδομένου ότι ένα μέρος του όγκου του ταμιευτήρα θα γεμίσει με φερτά υλικά στο πέρασμα των χρόνων λειτουργίας του, ενώ ταυτόχρονα σημαντικό ρόλο έχει ο επιπλέον όγκος πάνω από τον ωφέλιμο για ανάσχεση πλημμύρων.

Η εικόνα 3 αποτυπώνει τα χαρακτηριστικά μεγέθη του ταμιευτήρα, όπου κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- **Κατώτατη στάθμη λειτουργίας (ΚΣΛ)** :Ελάχιστη τιμή στάθμης νερού στον ταμιευτήρα από την οποία μπορεί να παραληφθεί νερό από την υδροληψία
- **Ανώτατη στάθμη λειτουργίας (ΑΣΛ)** :Μέγιστη στάθμη απολήψεων
 - Υψόμετρο στέψης υπερχειλιστή (ελεύθερος υπερχειλιστής, χωρίς θυροφράγματα)
 - Υψόμετρο άνω παρειάς θυροφραγμάτων (Υ/Η ταμιευτήρας, με εκχειλιστή)
- **Ανώτατη στάθμη πλημμύρας (ΑΣΠ)** : Μέγιστη στάθμη που εκτιμάται ότι μπορεί να ανέλθει το νερό στη διάρκεια της πλημμύρας σχεδιασμού του υπερχειλιστή.
- **Πλημμυρικός όγκος** :Μέγιστος όγκος πλημμύρας που μπορεί να ανασχεθεί στον ταμιευτήρα, θεωρώντας την Ανώτατη στάθμη λειτουργίας κατά την έναρξη της πλημμύρας σχεδιασμού . Σε αυτόν εμπεριέχονται η Προσωρινή αποθήκευση πλημμυρικής παροχής και η Αποθήκευση πλημμυρικής παροχής
- **Νεκρός όγκος** : Όγκος του ταμιευτήρα μέχρι την Κατώτατη στάθμη λειτουργίας , που στο πέρας της ζωής του έργου προβλέπεται να καταληφθεί από φερτά υλικά (μη απολήψιμο απόθεμα)
- **Ωφέλιμος όγκος** : Όγκος νερού που μπορεί να αξιοποιηθεί για διάφορες χρήσεις



Εικόνα 3: Φράγμα και ανάντη ταμιευτήρα (Βαφειάδης Σημειώσεις «Ταμιευτήρες»)

Τόσο η μορφή όσο και το μέγεθος του ταμιευτήρα μπορεί να καθοριστεί από έναν τοπογραφικό χάρτη του οποίου ο συνολικός όγκος δηλαδή η ποσότητα του νερού που μπορεί να αποθηκευτεί πίσω από το

φράγμα εξαρτάται πρωτίστως από το ύψος του φράγματος και δευτερευόντως από την γεωμορφολογία της περιοχής.

Όσον αφορά στο βαθμό εκμετάλλευσης ενός ταμιευτήρα θεωρείται ο λόγος του συνολικού όγκου που μπορεί να αποθηκεύσει (όγκος ζήτησης, V_z) προς το συνολικό όγκο εισροής των παροχών του υδατορέματος στον ταμιευτήρα (V_e).

$$\alpha = \frac{V_z}{V_e}$$

2.5.3.Επιπτώσεις φραγμάτων

Κατά κύριο λόγο τα φράγματα χρησιμοποιούνται για άρδευση (37%), παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (16%), ύδρευση (12%), αντιπλημμυρικό έλεγχο (6%), για λόγους αναψυχής (3%) και για λοιπούς σκοπούς (4%).

Πολλοί είναι οι παράγοντες που καθορίζουν τις επιπτώσεις που έχει ένα φράγμα. Μερικοί από αυτούς είναι η λειτουργία και η δομή του φράγματος, ο όγκος των φερτών υλών, οι γεωμορφολογικοί περιορισμοί, το κλίμα, η τοπική υδρολογία, οι ιδιότητες που αφορούν στον τοπικό διάκοσμο και γενικότερα οι διαδικασίες που ακολουθούνται.

Αναλύοντας τις επιπτώσεις των φραγμάτων τόσο στα θετικά αποτελέσματα που επιφέρει όσο και στα αρνητικά διαπιστώνεται ότι:

Οι **θετικές επιδράσεις** της λειτουργίας ενός φράγματος είναι:

- Ο έλεγχος των πλημμύρων
- Η ύδρευση των οικισμών
- Η αύξηση του παραγόμενου γεωργικού προϊόντος λόγω της δυνατότητας άρδευσης γεωργικών εκτάσεων και αύξηση της παραγωγικότητας του αγροτικού τομέα
- Οικονομικό όφελος από πιθανή ιχθυοκαλλιέργεια στον ταμιευτήρα
- Αυξάνεται η τουριστική ελκυστικότητα, ώστε μπορεί να λειτουργήσει ως χώρος αναψυχής

Οι **αρνητικές επιδράσεις** της λειτουργίας ενός φράγματος είναι:

- Μείωση των φερτών υλών κατάντη, καθώς συγκρατούνται στο φράγμα
- Διάβρωση στο έδαφος

- Αλλαγή στη θρεπτική ισορροπία αφού αυξάνεται ο χρόνος παραμονής και η θερμοκρασία του νερού , ενώ στα κατάντη μειώνεται η θολερότητα
- Χώροι με αρχαιολογική, τοπογραφική, γεωλογική, αισθητική αξία είναι πιθανό να καλυφθούν
- Παρεμποδίζεται η αναπαραγωγή των ψαριών

Ο μόνος τρόπος για ελαχιστοποιηθούν οι παραπάνω αρνητικές επιπτώσεις είναι να γίνει κατάλληλος σχεδιασμός του φράγματος και να γίνει σωστή λήψη απόφασης όσον αφορά στη θέση κατασκευής του φράγματος.

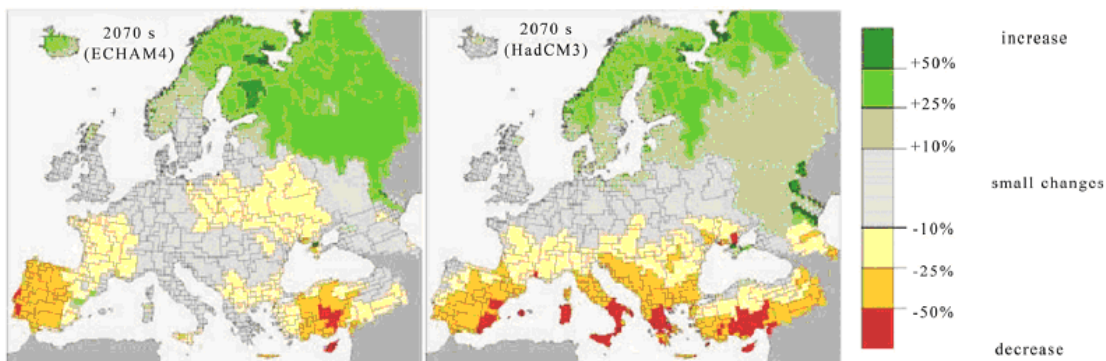
2.6.Η κλιματική αλλαγή και ο IPCC

Με τον όρο κλιματική αλλαγή αναφερόμαστε στην μεταβολή του παγκόσμιου κλίματος και ειδικότερα σε μεταβολές των μετεωρολογικών συνθηκών που εκτείνονται σε μεγάλη χρονική κλίμακα. Οι κλιματικές αλλαγές οφείλονται σε φυσικές διαδικασίες, καθώς και σε ανθρώπινες δραστηριότητες που έχουν επιπτώσεις στο κλίμα. Η Διακυβερνητική Επιτροπή για την αλλαγή του κλίματος (Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC) δημοσίευσε το 2014 την 5^η Έκθεση Αξιολόγησης (AR5), οποία επιβεβαιώνει ότι το κλίμα αλλάζει, πράγμα το οποίο οφείλεται έντονα στον ανθρώπινο παράγοντα. Είναι γεγονός ότι στο κλιματικό σύστημα, , από τα μέσα του περασμένου αιώνα, λαμβάνουν χώρα ποικίλες αλλαγές. Πιο συγκεκριμένα, αυξάνεται η θερμοκρασία των κατώτερων στρωμάτων της ατμόσφαιρας, θερμαίνονται οι ωκεανοί, οι παγετώνες που καλύπτουν πολύ μεγάλες εκτάσεις ξηράς λιώνουν και χάνουν μάζα , τα μόνιμα παγωμένα εδάφη γίνονται θερμότερα, η στάθμη της θάλασσας συνεχίζει να ανεβαίνει.

Κύρια αιτία της αύξησης της θερμοκρασίας είναι η εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου, ιδιαίτερα του διοξειδίου του άνθρακα, η συγκέντρωση του οποίου στην ατμόσφαιρα είναι σήμερα τόσο υψηλή όσο ποτέ άλλοτε τα τελευταία 800.000 χρόνια. Σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν τις συγκεντρώσεις των αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα είναι ο πληθυσμός οι οικονομικές δραστηριότητες, ο τρόπος ζωής, η χρήση ενέργειας, χρήση γης, η τεχνολογία και η κλιματική πολιτική. Αν ο σημερινός ρυθμός εκπομπής, παραμείνει αμετάβλητος, τότε ήδη στα μέσα αυτού του αιώνα, θα υπάρξει εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, η οποία θα προκαλέσει αύξηση της παγκόσμιας μέσης θερμοκρασίας πάνω από 2⁰C σε σχέση με τα προβιομηχανικά επίπεδα. Μία ασυγκράτητη εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου θα μπορούσε να αλλάξει το κλιματικό σύστημα υπερβολικά πολύ. Θα επηρεάζονταν όλες οι περιοχές της Γης και πολλές από τις αλλαγές αυτές θα παρέμεναν για αιώνες, ακόμα και αν δεν εκπέμπονταν πλέον αέρια του θερμοκηπίου (Καινοτόμες Μεθοδολογίες Διαχείρισης Υδατικών Πόρων για την Προσαρμογή της Κλιματικής Αλλαγής και Διακυβέρνησης της Περιφέρειας Κρήτης, Επιστημονικός Υπεύθυνος Νικόλαος Π. Νικολαΐδης).

Οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής διαφέρουν από περιοχή σε περιοχή. Όμως, παρά την ένταση του κλιματικού παράγοντα, μελέτες σε επίπεδο λεκανών απορροής υποδεικνύουν ότι οι αλλαγές αυτές δεν οφείλονται μόνο στην κλιματική αλλαγή αλλά και σε πληθυσμιακούς παράγοντες, στην οικονομική και τεχνολογική ανάπτυξη και άλλους κοινωνικο-οικονομικούς παράγοντες που συνεισφέρουν στην αλλαγή της ζήτησης, ποσοτικά και ποιοτικά, των υδάτινων πόρων (Alcamo et al, 2007; Kundzewicz et al, 2008).

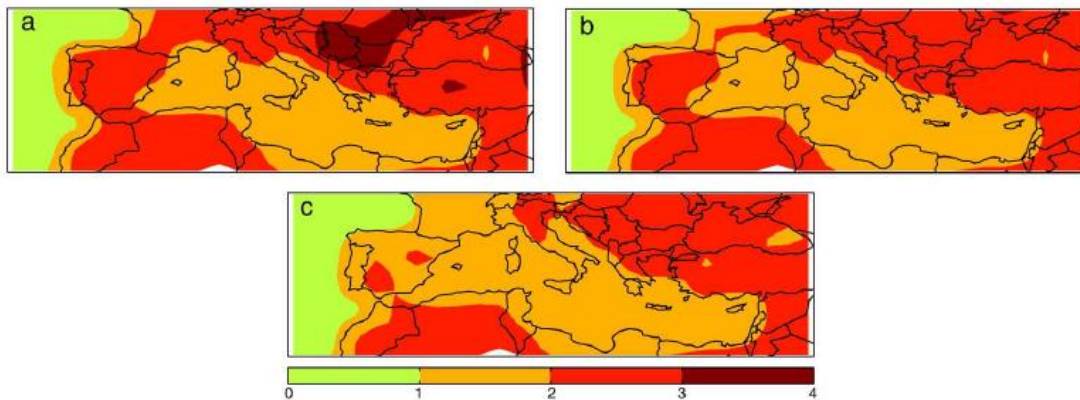
Για την Ευρώπη είναι γενικά αποδεκτό ότι βρίσκεται ήδη υπό την επήρεια κλιματικής αλλαγής με τις επιπτώσεις στους υδατικούς πόρους να είναι εμφανείς, όπως αυξημένη ευαισθησία σε πλημμύρες και ξηρασίες, αυξημένος κίνδυνος των επιφανειακών υδατικών οικοσυστημάτων, υπερεκμετάλλευση του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα και μείωση της ποιότητας των υδάτων (Mimikou and Baltas, 2013). Η μέση θερμοκρασιακή αύξηση στην Ευρώπη τα τελευταία 100 χρόνια είναι περίπου $+0.95^{\circ}\text{C}$ και αναμένεται να αυξηθεί 2°C με 6.3°C μέχρι το 2100, ενώ παράλληλα παρατηρείται μειούμενη τάση στις βροχοπτώσεις μέχρι και 20% στην Νότια και Νότιο-ανατολική Ευρώπη (Mimikou and Baltas, 2013). Υδρολογικά οι ποτάμιες παροχές αναμένεται να αυξηθούν στην Βόρεια Ευρώπη και να μειωθούν στην Νότια (Henrichs and Alcamo, 2001), ενώ η διαφοροποίηση μεταξύ χειμερινών και καλοκαιρινών απορροών στην περιοχή της Μεσογείου θα αυξηθεί (Mimikou and Baltas, 2013). Στην εικόνα 4 γίνεται αντιληπτή η αλλαγή στη μέση ετήσια ποταμική απορροή στις Ευρωπαϊκές λεκάνες απορροής, ως αποτέλεσμα των διαφόρων κλιματικών διαφοροποιήσεων.



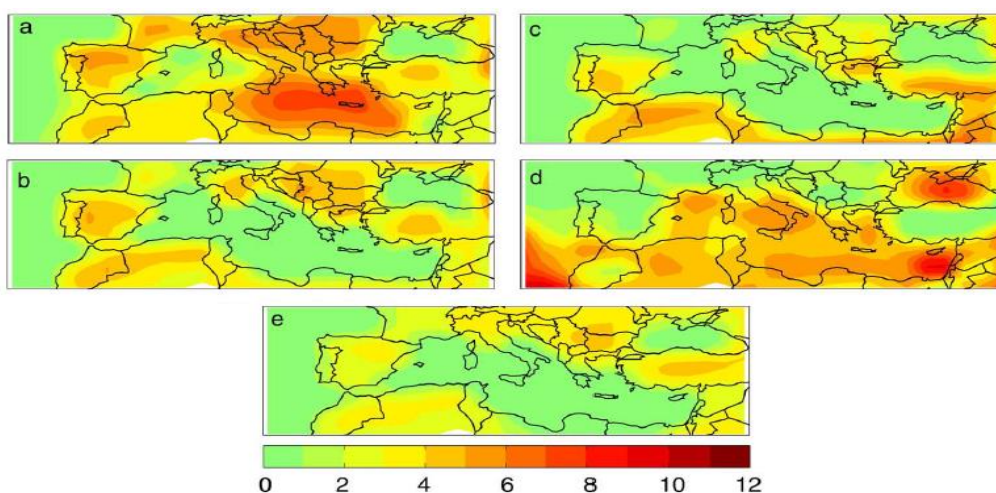
Εικόνα 4: Αλλαγή στη μέση ετήσια ποταμική απορροή στις Ευρωπαϊκές λεκάνες απορροής μεταξύ του 2000 και του 2070 με βάση τα κλιματικά μοντέλα ECHAM4 και HadCM3 (Henrichs and Alcamo, 2001)

Ειδικότερα η περιοχή της Μεσογείου χαρακτηρίζεται από αυξημένη ευαισθησία στην κλιματική αλλαγή και συγκεκριμένα ως "hot spot" κινδύνου για τον επόμενο αιώνα (Kundzewicz et al, 2008; Tsanis et al, 2011). Οι διαφορές στην ελάχιστη, μέση και μέγιστη ετήσια θερμοκρασία στην λεκάνη της Μεσογείου, παρουσιάζονται στην Εικόνα 5, όπως έχει διαπιστωθεί με τη χρήση του κλιματικού μοντέλου HadCM3 A2/B2. Με τη χρήση του ίδιου μοντέλου προσδιορίστηκε γραφικά η αύξηση καλοκαιρινών ημερών, θερμών ημερών, ημερών με καύσωνα, τροπικών νυχτών, μείωση στις νύχτες του πάγου, στην περιοχή της Μεσογείου (Εικόνα 6) .

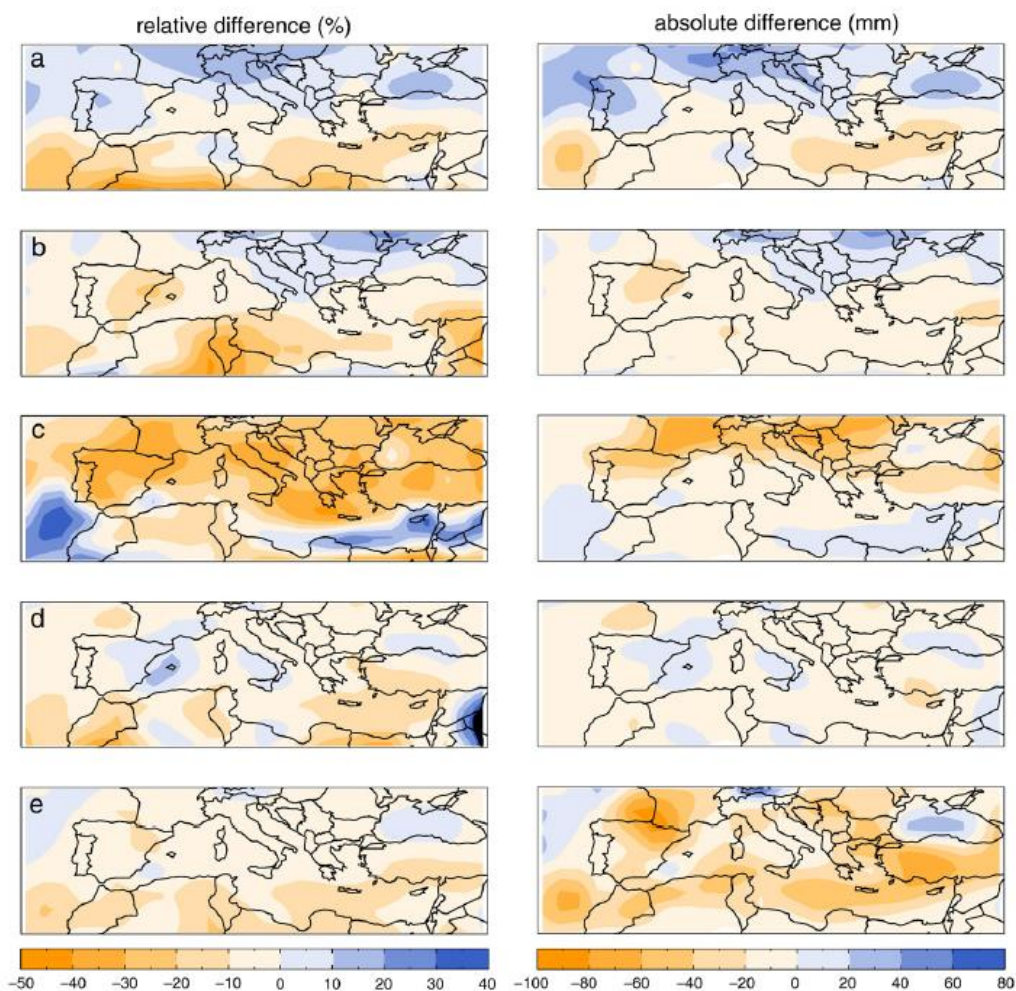
Μέχρι το 2060 αναμένεται αύξηση της μέσης θερμοκρασίας κατά 2°C, ιδιαίτερα τη χειμωνιάτικη περίοδο, αύξηση των ξηρών ημερών και των επεισοδίων καύσωνα, μετατόπιση του καλοκαιριού και μείωση των βροχοπτώσεων κατά 10-20% (Εικόνα 7), ιδιαίτερα την καλοκαιρινή περίοδο στη λεκάνη της Μεσογείου (Giannakopoulos et al, 2009).



Εικόνα 5: Διαφορά στη, (a) μέγιστη, (b) μέση και (c) ελάχιστη, μέση ετήσια θερμοκρασία μεταξύ 1961-1990 και 2031-2060, κλιματικό μοντέλο HadCM3 A2/B2 (Giannakopoulos et al,2009)



Εικόνα 6: Αύξηση στις, (a) καλοκαιρινές μέρες, (b) θερμές μέρες, (c) μέρες καύσωνα, (d) τροπικές νύχτες και (e) μείωση στις νύχτες πάγου μεταξύ 1961-1990 και 2031-2060, κλιματικό μοντέλο HadCM3 (Giannakopoulos et, al 2009)



Εικόνα 7 : Αλλαγή, ποσοστιαία αριστερά και απόλυτη δεξιά, στην ετήσια, (α) χειμερινή, (β) ανοιξιιάτικη, (c) καλοκαιρινή, (d) φθινοπωρινή και (e) όλου του χρόνου βροχόπτωση μεταξύ 1961-1990 και 2031-2060, κλιματικό μοντέλο HadCM3 A2/B2 (Giannakopoulos et al, 2009)

Στη σύμβαση πλαίσιο των Ηνωμένων Εθνών για τις Κλιματικές Μεταβολές (UNFCC), η κλιματική αλλαγή ορίζεται ειδικότερα ως η μεταβολή στο κλίμα που οφείλεται άμεσα ή έμμεσα σε ανθρώπινες δραστηριότητες, διακρίνοντας τον όρο από την κλιματική μεταβλητότητα που έχει φυσικά αίτια (United Nations Framework Convention on Climate Change, United Nation, 1992).

Κατά τον τρόπο αυτό, το 1988 ιδρύθηκε η «Διακυβερνητική Επιτροπή για την Αλλαγή του Κλίματος» (Intergovernmental Panel on Climate Change-IPCC), από τον Παγκόσμιο Μετεωρολογικό Οργανισμό και το Πρόγραμμα Περιβάλλοντος και υπό την αιγίδα του Οργανισμού Ηνωμένων Εθνών. Σκοπός της επιτροπής αυτής είναι η αξιολόγηση της επιστημονικής γνωστικής βάσης και των ερευνών που διεξάγονται για τη μελέτη κλιματικών αλλαγών. Πέρα από αυτό, η επιτροπή καλείται να αξιολογήσει τις συνέπειες των κλιματικών μεταβολών που προέρχονται από ανθρώπινη δραστηριότητα, μελετώντας

πιθανές πολιτικές και δράσεις για την αντιμετώπιση των ενδεχόμενων κινδύνων. Αυτό επιτυγχάνεται με το συντονισμό επιστημόνων από ολόκληρο τον κόσμο και τη συνεχή ανάρτηση δημοσιεύσεων που αφορούν στις ολοένα και εξελισσόμενες κλιματικές αλλαγές, καθώς και τις επιπτώσεις που επιφέρουν. Όλα τα ζητήματα που άπτονται της παγκόσμιας θέρμανσης βασίζονται σε επιστημονικές δημοσιεύσεις ειδικών ερευνητών, πράγμα το οποίο καθιστά ιδιαίτερα σημαντικής αξίας τις εκθέσεις της IPCC.

Η πιο πρόσφατη αναφορά της IPCC (2014) κάνει αναφορά για τα εξής:

- Κυρίως στα μεγάλα υψόμετρα, η τιμή της μέσης θερμοκρασίας αυξάνεται. Πιο συγκεκριμένα, από το 1980 τα καλοκαίρια είναι πιο θερμά στην Ιβηρική χερσόνησο (EEA, 2012), ενώ οι χειμώνες είναι πιο θερμοί κυρίως στις Σκανδιναβικές χώρες. Η μέση θερμοκρασία της 2002-2011 έχει αυξηθεί κατά $1.3^{\circ}\text{C} \pm 0.11^{\circ}\text{C}$ σε σχέση με την χρονική περίοδο 1850-1899 (HadCRUT 3;Brohan et al., 2006)
- Περίπου το 1/3 των μεγαλύτερων ποταμών της γης είχε μια συγκεκριμένη τάση. Τα 45 είχαν μείωση ροής και μόνο τα 19 αύξηση (Dai et al., 2009), σύμφωνα με μία παγκόσμια ανάλυση προσομοιωμένων ροών (1948-2004)
- Τα ακραία φαινόμενα υψηλών θερμοκρασιών (τροπικές νύχτες, καύσωνες) έχουν γίνει πιο συχνά ενώ φαινόμενα χαμηλών θερμοκρασιών (παγετοί, πολικό ψύχος) όχι τόσο συχνά κυρίως από το 1950.
- Σχετικά με τις αλλαγές στη βροχόπτωση αιτιολογούνται είτε στην τοπική μεταβλητότητα της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας, είτε στην παγκόσμια θέρμανση (Lambert et al., 2004 ; Stott et al., 2010). Ο ανθρώπινος παράγοντας έχει προσδιοριστεί ότι επηρέασε σημαντικά στις αλλαγές τόσο της παγκόσμιας όσο και της τοπικής βροχόπτωσης, κυρίως τον 20^ο αιώνα (Zhang et al., 2007)
- Είναι η εμφανής η διαφορά στη ροή των ποταμών της βόρειας Ευρώπης σε σχέση με τους ποταμούς της νότιας και ανατολικής (Stahl et al., 2010;Wilson et al., 2010).
- Τέλος αξιοσημείωτη είναι η αύξηση περιόδων ξηρασίας που σημειώνονται από το 1960 και έπειτα (Fischer et al., 2011)

2.7.Μοντέλα σεναρίων

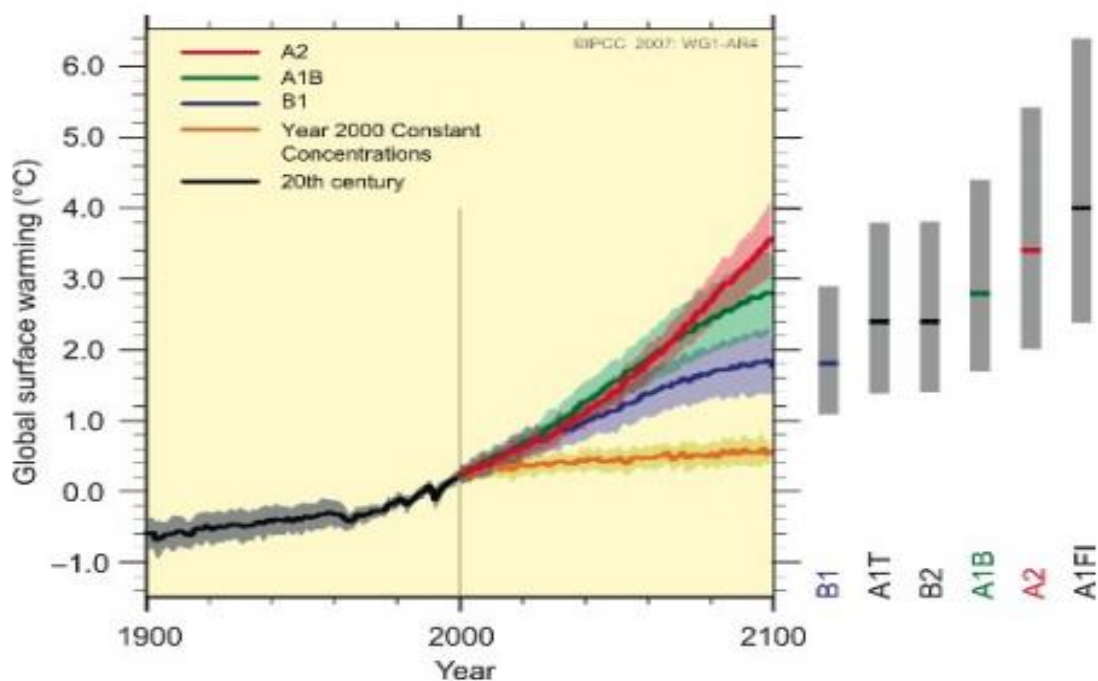
Ένα σενάριο αλλαγής κλίματος δεν είναι μια πρόγνωση ή μία πρόβλεψη υπό την έννοια των καιρικών προγνώσεων των επόμενων ημερών, αλλά μπορεί να θεωρηθεί ως μία συνεκτική συνεπής και εύλογη περιγραφή μιας πιθανής μελλοντικής κατάστασης του κόσμου. Τέτοια σενάρια κατασκευάζονται με τη χρήση των παγκόσμιων μοντέλων (GCMs). Αυτά είναι μαθηματικές απεικονίσεις του κλιματικού συστήματος, βασισμένες στους φυσικούς νόμους, όπως η διατήρηση της μάζας, της ενέργειας και της ορμής. Εμφανίζουν τα δεδομένα σε τετράγωνα (κελιά) με τυπική χωρική ανάλυση των 300χλμ. Για τα μέσα γεωγραφικά υψόμετρα στη σύγχρονη γενιά μοντέλων. Οι διεργασίες που αναλύονται στην κλίμακα αυτή, όπως η μεταφορά των νεφών και η διάταξη των βροχοπτώσεων, παραμετροποιούνται. Τα

σενάρια αλλαγής κλίματος στηρίζονται σε υποθέσεις για μελλοντικές αλλαγές των εκπομπών και της επακόλουθης ατμοσφαιρικής συγκέντρωσης του διοξειδίου του άνθρακα και άλλων αερίων του θερμοκηπίου. Στα τελευταία 5-10 έτη, είχαν χρησιμοποιηθεί, μάλλον απλοϊκές υποθέσεις και σενάρια, π.χ. μία αύξηση των εκπομπών της τάξης του 1% το χρόνο. Κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών όλες οι εκτιμήσεις έχουν ουσιαστικά χρησιμοποιήσει τα σενάρια της IPCC SRES (ειδική έκθεση σχετικά με τα σενάρια εκπομπών). Αυτά ενσωματώνουν διάφορες υποθέσεις σχετικά με τις μελλοντικές αλλαγές στον πληθυσμό και, την οικονομική και τεχνολογική ανάπτυξη κλπ. Εκφράζονται ως τέσσερις «οικογένειες σεναρίων»:

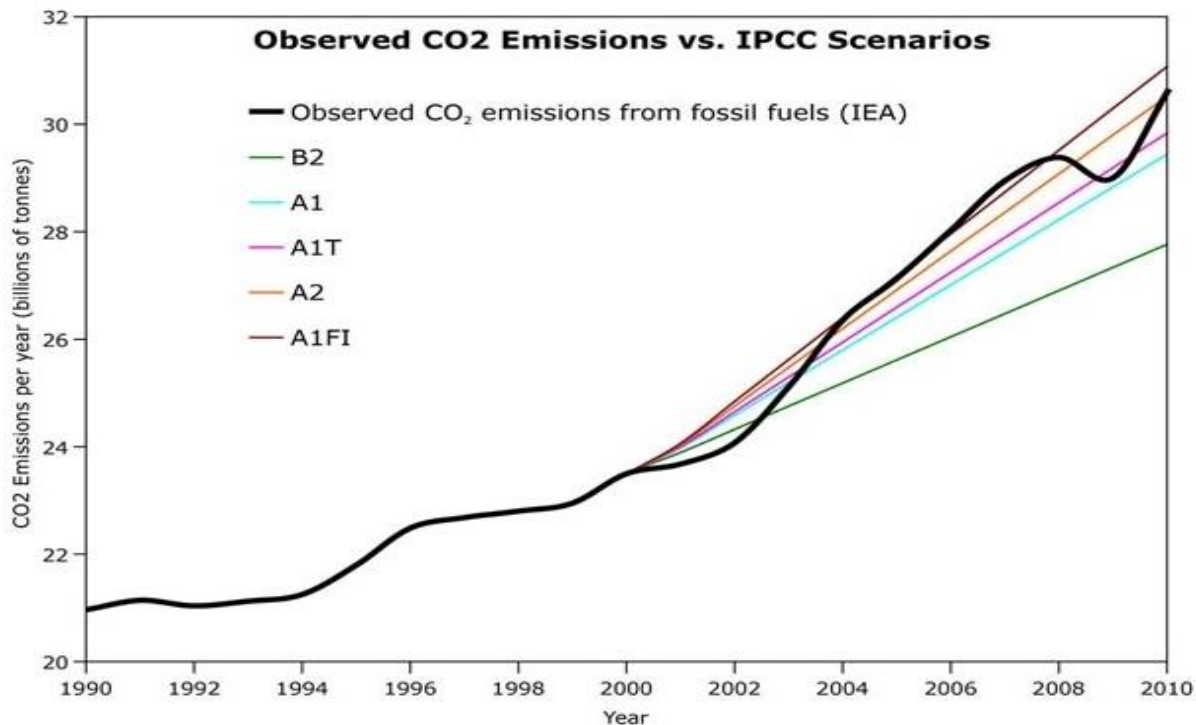
- **A1:** Παγκόσμιες αγορές
- **B1:** Παγκόσμια αειφορία
- **A2:** Εθνική δραστηριότητα
- **B2:** Τοπική διαχείριση

Αυτά αντικατοπτρίζουν διαφορετικές κοινωνικές ισορροπίες μεταξύ της παγκόσμιας και της τοπικής ανάπτυξης αφενός, και των οικονομικών και των περιβαλλοντικών αξιών αφετέρου. Το A2 σενάριο οδηγεί σε μια συνολική ατμοσφαιρική συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα 715 μέρη στο εκατομμύριο (ppm) το 2100, με 562 ppm για το B2 σενάριο – σε σύγκριση με τη μετρούμενη συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα το 2005 που ήταν 379 ppm.

Στην εικόνα 8, παρουσιάζεται η πρόβλεψη κατανομής της θερμοκρασίας για διάφορα σενάρια του IPCC και γίνεται αντιληπτό ότι η αύξηση των επιπέδων CO₂ στην ατμόσφαιρα έχει συνδεθεί με το φαινόμενο του θερμοκηπίου, δηλαδή την αύξηση της θερμοκρασίας της γήινης ατμόσφαιρας.



Εικόνα 8: Οι συνεχείς γραμμές είναι οι παγκόσμιοι μέσοι όροι θερμοκρασίας επιφάνειας (σχετικοί με το διάστημα 1980-1999) για τα σενάρια A2, A1B, B1 σενάρια βασισμένα στο SRES, που παρουσιάζονται ως συνέχειες των προσομοιώσεων του 20ου αιώνα (μαύρη γραμμή). Οι σκιασμένες περιοχές και οι μπάρες παρέχουν μια ένδειξη της αβεβαιότητας του μοντέλου. (IPCC WGI, εικόνα SPM.5, 2007)



Εικόνα 9: Η καύση ορυκτών καυσίμων (πετρέλαιο, άνθρακας, λιγνίτης, φυσικό αέριο) ευθύνεται περίπου για τα 2/3 των εκπομπών.

Στην εικόνα 9, απεικονίζονται οι εκπομπές CO₂ , διαπιστώνοντας ότι με την πάροδο του χρόνου , βρισκόμαστε καθοδόν για την υλοποίηση του χειρότερου σεναρίου της IPCC.

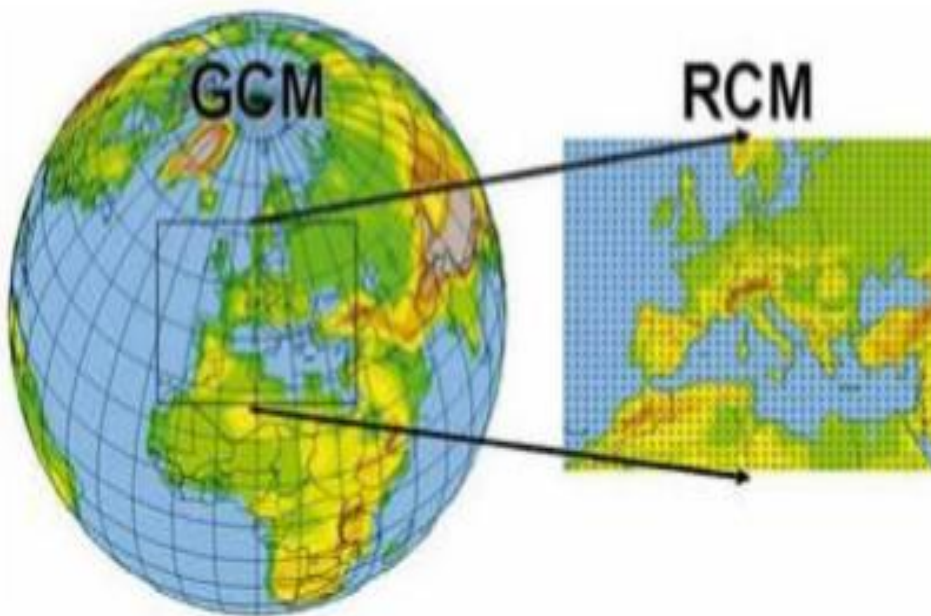
Στο Κέντρο Έρευνας Φυσικής της Ατμόσφαιρας και Κλιματολογίας της Ακαδημίας Αθηνών (ΚΕΦΑΚ) έχουν αναπτυχθεί βάσεις δεδομένων και προσομοιώσεων μοντέλων με βάση τα σενάρια εκπομπών A2, B1, B2, A1B (Εικόνα 10) .

Σενάριο A2	Μέτρια αύξηση του μέσου παγκόσμιου κατά κεφαλήν εισοδήματος. Ιδιαίτερα έντονη κατανάλωση ενέργειας. Ραγδαία αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού. Αργή και τμηματική τεχνολογική ανάπτυξη και μέτριες έως μεγάλες αλλαγές στη χρήση γης. Ραγδαία αύξηση της συγκέντρωσης του CO ₂ στην ατμόσφαιρα η οποία θα φτάσει τα 850 ppm το 2100.
Σενάριο A1B	Ραγδαία οικονομική ανάπτυξη. Ιδιαίτερα έντονη κατανάλωση ενέργειας αλλά παράλληλα διάδοση νέων και αποδοτικών τεχνολογιών. Χρήση τόσο ορυκτών καυσίμων όσο και εναλλακτικών πηγών ενέργειας. Μικρές αλλαγές στη χρήση γης. Ραγδαία αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού μέχρι το έτος 2050 και σταδιακή μείωσή του στη συνέχεια. Έντονη αύξηση της συγκέντρωσης του CO ₂ στην ατμόσφαιρα η οποία θα φτάσει τα 720 ppm το 2100.
Σενάριο B2	Ανάπτυξη της παγκόσμιας οικονομίας με μέτριους ρυθμούς. Ηπιότερες τεχνολογικές αλλαγές σε σύγκριση με τα σενάρια εκπομπών A1 και B1. Ραγδαία αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού. Αύξηση της συγκέντρωσης του CO ₂ στην ατμόσφαιρα με μέτριους αλλά σταθερούς ρυθμούς η οποία θα φτάσει το 2100 τα 620 ppm .
Σενάριο B1	Μεγάλη αύξηση του παγκόσμιου κατά κεφαλήν εισοδήματος. Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Μείωση της χρήσης των συμβατικών πηγών ενέργειας και στροφή στη χρήση τεχνολογιών που χρησιμοποιούν ανανεώσιμες ενεργειακές πηγές. Ραγδαία αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού μέχρι το έτος 2050 και σταδιακή μείωσή του στη συνέχεια. Αύξηση της συγκέντρωσης του CO ₂ στην ατμόσφαιρα με ήπιους σχετικά ρυθμούς ιδιαίτερα από το 2050 και μετά η οποία θα φτάσει το 2100 τα 550 ppm .

Εικόνα 10: Σενάρια Εκπομπών (Επιτροπή Μελέτης της Κλιματικής Αλλαγής, Τράπεζα της Ελλάδος) (IPCC, 2000)

Για αρκετές εκτιμήσεις των περιφερειακών επιπτώσεων της αλλαγής του κλίματος η χωρική ανάλυση που προκύπτει από το GCMs δεν είναι καθόλου λεπτομερής. Κατά συνέπεια απαιτείται μία προσαρμογή σε λεπτομερειακή κλίμακα (λογική προβολή των πληροφοριών μεγάλης κλίμακας σε τοπική κλίμακα). Δύο κύριες προσεγγίσεις χρησιμοποιούνται για την επίτευξη του παραπάνω στόχου. Η πρώτη είναι δυναμική, κατά την οποία ένα τοπικό μοντέλο κλίματος (RCM) επεξεργάζεται τα στοιχεία του λιγότερο λεπτομερούς μοντέλου GCM. Το RCM εφαρμόζεται σε μια μικρότερη περιοχή, π.χ. Ευρώπη, με πολύ μεγαλύτερη ανάλυση ή διάσταση κελιού. Οι ακραίες καταστάσεις λαμβάνονται από το GCM, δηλαδή το τοπικό μοντέλο αναλύει τα δεδομένα κυκλοφορίας αερίων μαζών, θερμοκρασίας της επιφάνειας της θάλασσας και άλλες μεταβλητές μέσα στο παγκόσμιο μοντέλο GCM. Η δεύτερη προσέγγιση είναι στατιστική, στην οποία οι σχέσεις μεταξύ των μεγαλύτερης κλίμακας μεταβλητών κλίματος και των τοπικών επιφανειακών μεταβλητών κλίματος (π.χ. ημερήσιων θερμοκρασιών και βροχοπτώσεων που καταγράφονται σε συγκεκριμένους σταθμούς), προέρχονται από δεδομένα παρατηρήσεων, και στη συνέχεια εφαρμόζονται στα αποτελέσματα του GCM. Αυτή η προσέγγιση είναι βασισμένη σε δύο

σημαντικές υποθέσεις: (α) ότι τα μεγαλύτερης κλίμακας δεδομένα του συστήματος GCM είναι πιο αξιόπιστα στη μοντελοποίηση από ότι τα τοπικά και (β) ότι οι σχέσεις παραμένουν έγκυρες σε ένα μεταβαλλόμενο κλίμα. Στην εικόνα 11 απεικονίζεται η προσέγγιση του τοπικού κλιματικού μοντέλου, από γενικό κλιματικό μοντέλο.



Εικόνα 11: Η προσέγγιση του τοπικού κλιματικού μοντέλου RCM ως προς το παγκόσμιας κλίμακας μοντέλο GCM

2.8.Φαινόμενο Ξηρασίας

2.8.1.Χαρακτηριστικά γνωρίσματα και ιδιότητες

Οι ξηρασίες κατατάσσονται ως γνωστό στα ακραία κλιματικά φαινόμενα ενός τόπου και καταλαμβάνουν το ένα άκρο της διακύμανσης της βροχής του σε διάφορες χρονικές κλίμακες. Παραστατικότερα, οι ξηρασίες βρίσκονται στο ένα άκρο μιας «τραμπάλας» και οι πλημμύρες στο άλλο. Επομένως εκδηλώνονται έντονα σε διάφορες περιοχές του πλανήτη μας όταν σε άλλες περιοχές εκδηλώνονται πλημμύρες. Η εμφάνιση βέβαια του «διπόλου» ξηρασιών – πλημμυρών σε ετήσια ή σε διαφορετική χρονική κλίμακα είναι αναμενόμενη και φυσιολογική, αφού η εκδήλωση ισχυρών βροχοπτώσεων σε μία περιοχή συνεπάγεται την εκδήλωση ξηρασιών σε κάποιες άλλες περιοχές. Κατά συνέπεια κανένα έτος δεν μπορεί να είναι πολύ υγρό ή πολύ ξηρό για εκτεταμένες περιοχές, αφού η ποσότητα νερού που εξατμίζεται και πέφτει με περίσσεια σε ορισμένες περιοχές σπανίζει σε άλλες.

Η ξηρασία εμφανίζεται και επεκτείνεται βαθμιαία και «άπουλα» και δίνει την εντύπωση μη ύπαρξης ενός συγκεκριμένου συμβάντος. Ακόμα η ξηρασία χαρακτηρίζεται ως κινητήριος δύναμη που έχει μόνο συνέπειες και ως σχετική και όχι απόλυτη έννοια.

Όλα τα παραπάνω καθιστούν την ξηρασία ένα πολύ επικίνδυνο κλιματικό φαινόμενο. Τονίζεται ακόμα πως η ξηρασία δε θα πρέπει να συγχέεται με την ξηρότητα του κλίματος μιας περιοχής, η οποία είναι μία μόνιμη κατάσταση με πολύ λίγες ετήσιες βροχοπτώσεις που καθορίζονται από τις κανονικές κατευθύνσεις των αερίων μαζών σε ευρεία πλανητική κλίμακα .

2.8.2. Έννοια της ξηρασίας-Ορισμοί

Οι δυσκολίες καθορισμού της έννοιας της ξηρασίας είναι ένας ακόμα λόγος που δυσκολεύει την ορθολογική της διαχείριση. Όμως παρά τις προσπάθειες που έγιναν για την αποδοχή ενός κοινού ορισμού, οι ειδικοί δε κατέληξαν σε συμφωνία. Έτσι σήμερα υπάρχουν πολλοί ορισμοί για τη συγκεκριμένη έννοια. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως η ξηρασία ξεκινά πάντοτε από την έλλειψη ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων, ενώ η έλλειψη υγρασίας του εδάφους, η μείωση της απορροής των υδατορευμάτων, η πτώση στάθμης των λιμνών και ταμιευτήρων, των υπογείων νερών κλπ. έπονται του χρόνου μείωσης των κατακρημνισμάτων.

Σύμφωνα με τα παραπάνω οι πιο γνωστοί ορισμοί της ξηρασίας είναι:

- **Μετεωρολογική ξηρασία:** Μείωση των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων μιας περιοχής σε μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο σημαντικά κάτω από το μέσο όρο της ή κάτω από μία κρίσιμη τιμή που καθορίζει την έναρξη της ξηρασίας
- **Γεωργική (αγροτική) ξηρασία:** Μείωση της υγρασίας του εδάφους σε τέτοιο βαθμό ώστε η γεωργική παραγωγή μειώνεται σημαντικά ή η μείωση της υγρασίας του εδάφους περισσότερο από την εξατμισοδιαπνοή κατά την κρίσιμη περίοδο ανάπτυξης φυτών
- **Υδρολογική ξηρασία:** Έλλειψη όχι μόνο ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων αλλά επιφανειακής και υπόγειας απορροής
- **Κοινωνικο-οικονομική ξηρασία:** Ορίζεται ως η αρνητική τιμή της διαφοράς κάθε μορφής προσφοράς και ζήτησης νερού

2.8.3. Αιτίες εκδήλωσης φαινομένου

Βασική αιτία εκδήλωσης μίας ξηρασίας καθώς και των υπολοίπων ακραίων καιρικών και κλιματικών φαινομένων είναι η φυσική διακύμανση του κλίματος ενός τόπου. Ο όρος αυτός φανερώνει το «κλιματονομικό» γνώρισμα του κλίματος να παρουσιάζει συχνά διαφορές μεταξύ των ημερήσιων μηνιαίων ετησίων κλπ. τιμών της βροχής, θερμοκρασίας κλπ. και των αντίστοιχων μέσων τιμών τους. Οι

διαφορές αυτές των καιρικών παραμέτρων μπορεί να είναι μία, δύο ή περισσότερες φορές μεγαλύτερες ή μικρότερες από το μέσο όρο.

Η διακύμανση του κλίματος οφείλεται στη μείωση ή αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται κάθε τόπος στον πλανήτη τις διάφορες εποχές. Η αυξομείωση της θερμότητας με τη σειρά της επιφέρει αλλαγές στις κανονικές κατευθύνσεις των αερίων μαζών ή τις μπλοκάρει και διαταράσσει τον καιρό και το κλίμα. Έτσι μια περιοχή που κανονικά θα δεχόταν βροχές σε μία εποχή με τη διατάραξη της κυκλοφορίας των αερίων μαζών απομακρύνονται και οι υδρατμοί της ατμόσφαιρας από αυτή και επικρατεί ξηρασία..

2.8.4.Διαχείριση της ξηρασίας

Τονίστηκε προηγούμενα πως οι ξηρασίες θεωρούνται σήμερα ως κανονικά χαρακτηριστικά της διακύμανσης του κλίματος. Επομένως ανεξάρτητα από την αλλαγή του ή όχι από ανθρωπογενείς επιδράσεις, ξηρασίες θα εμφανιστούν αναπόφευκτα και στη χώρα μας στο μέλλον. Βέβαια μετά τις ισχυρές ξηρασίες 1989 - 1990 και του 2000, έγιναν μέχρι σήμερα πολλές ενέργειες σε επίπεδο προσφοράς και ζήτησης νερού για τη μείωση των επιπτώσεων από μελλοντική τους επανεμφάνιση. Όμως ο σχεδιασμός αντιμετώπισης των επιπτώσεων ενός τέτοιου φαινομένου πρέπει να είναι διαρκής. Ο σχεδιασμός αυτός πρέπει να γίνεται βέβαια από διεπιστημονική ομάδα ειδικών και με ολιστική προοπτική αφού η ξηρασία είναι η συνισταμένη των αποτελεσμάτων της διατάραξης των μετεωρολογικών, υδρολογικών, αγροτικών και κοινωνικο-οικονομικών συνθηκών μιας περιοχής. Σύμφωνα με τα παραπάνω, από τη σκοπιά μας εκφράζονται περιληπτικά οι παρακάτω απόψεις ως συμβολή στην ορθολογική διαχείριση αυτού του ακραίου φαινομένου.

2.8.5.Δείκτης Ξηρασίας

Ο συντελεστής SPI (Standardized Precipitation Index) αναπτύχθηκε με κύριο σκοπό τον προσδιορισμό και τον έλεγχο της ξηρασίας (McKee et al., 1993). Δίνει τη δυνατότητα στον εκάστοτε αναλυτή να καθορίσει εύρος – τιμή της ξηρασίας στο ενδιαφερόμενο για εκείνον χρονικό διάστημα, βασισμένος σε δεδομένα βροχόπτωσης που παρέχονται από ένα αντιπροσωπευτικό βροχομετρικό σταθμό της περιοχής στην οποία γίνεται η μελέτη. Ο δείκτης SPI δεν αποτελεί μηχανισμό πρόβλεψης της ξηρασίας. Μερικά από τα πλεονεκτήματα που μπορούν να προκύψουν από τη διαδικασία υπολογισμού του δείκτη SPI γίνονται εύκολα αντιληπτά από την γραφική απεικόνιση του δείκτη συναρτήσει του χρόνου, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την καλύτερη ένδειξη του ιστορικού ξηρασίας του εκάστοτε σταθμού μελέτης.

Ο υπολογισμός του δείκτη SPI για κάθε περιοχή βασίζεται σε μεγάλης χρονικής διάρκειας δεδομένα βροχόπτωσης που αφορούν στην περίοδο που είναι επιθυμητό να εξεταστεί. Αυτά τα μεγάλης χρονικής διάρκειας δεδομένα εφαρμόζονται σε μία κατανομή πιθανότητας, η οποία στη συνέχεια μετατρέπεται σε

μία μέση κατανομή, ούτως ώστε η μέση τιμή του δείκτη SPI για την τοποθεσία και ανάλογη περίοδο μελέτης να είναι μηδενική (Edwards and McKee, 1997). Οι θετικές τιμές του δείκτη δείχνουν την τάση μεγαλύτερης ποσότητας βροχόπτωσης από την ενδιάμεση τιμή (μέτρια βροχόπτωση) που θα μπορούσε να πάρει, ώστε να μην χαρακτηρίζεται όχι τόσο υπερβολική ως ποσότητα αλλά ούτε και ανεπαρκής. Αντίθετα οι αρνητικές τιμές δηλώνουν μικρότερη ποσότητα κατακρήμνισης σε σχέση με τη μέτρια βροχόπτωση.

Στον πίνακα 1 παρουσιάζεται η κατανομή του δείκτη ξηρασίας σε εύρος τιμών [-2, 2], καθώς και ο τρόπος με τον οποίο αξιολογείται η ξηρότητα της εκάστοτε περιοχής σύμφωνα με αυτόν.

Table 1. SPI values

2.0+	extremely wet
1.5 to 1.99	very wet
1.0 to 1.49	moderately wet
-.99 to .99	near normal
-1.0 to -1.49	moderately dry
-1.5 to -1.99	severely dry
-2 and less	extremely dry

Πίνακας 1: Εύρος τιμών SPI και αξιολόγηση ξηρασίας βάσει αυτού

Το γεγονός ότι ο δείκτης SPI είναι τυποποιημένος, καθιστά εφικτό τον προσδιορισμό της σπανιότητας που διέπει κάθε εξεταζόμενη περίοδο ξηρασίας, δηλαδή την πιθανότητα επανεμφάνισης του ίδιου φαινομένου (McKee and others, 1993). Τέλος δίνει στον χρήστη, τη δυνατότητα να συγκρίνει με έγκυρο τρόπο, ιστορικά και τρέχοντα δεδομένα ξηρασίας ανάμεσα σε τοποθεσίες με διαφορετικό κλίμα και γεωγραφική κατανομή, αξιολογώντας πόσο συχνό η σπάνιο είναι το υπό εξέταση φαινόμενο ξηρασίας.

Table 2. Probability of recurrence

SPI	Category	Number of times in 100 years	Severity of event
0 to -0.99	Mild dryness	33	1 in 3 yrs.
-1.00 to -1.49	Moderate dryness	10	1 in 10 yrs.
-1.5 to -1.99	Severe dryness	5	1 in 20 yrs.
< -2.0	Extreme dryness	2.5	1 in 50 yrs.

Με τη χρήση του παραπάνω πίνακα μπορεί να εκτιμηθεί η πιθανότητα επανεμφάνισης του φαινομένου της ξηρασίας στην περίοδο εξέτασης 100 ετών.

Ο δείκτης ξηρασίας μπορεί να κατανεμηθεί ανάλογα με το μέγεθος της χρονικής περιόδου για την οποία εξετάζεται στις εξής κατηγορίες,:

- 1-month SPI
- 3-month SPI
- 6-month SPI
- 12-month up to 24-month SPI

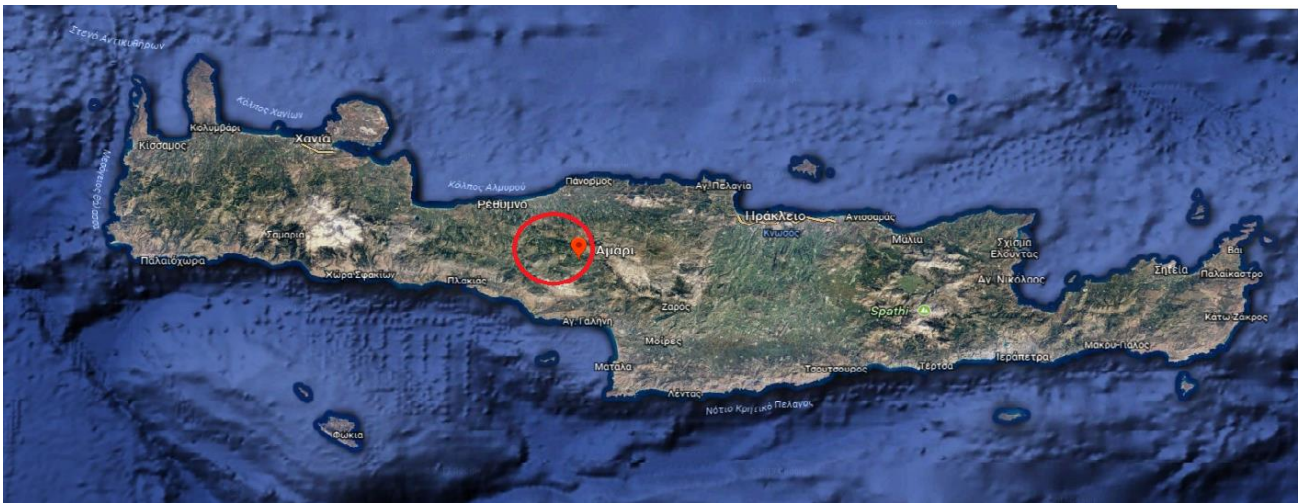
3.Περιγραφή της περιοχής μελέτης

3.1.Γενικά

Σ

την παρούσα διπλωματική διατριβή η περιοχή μελέτης είναι το φράγμα Ποταμών στην περιοχή του Αμαρίου, η οποία ανήκει στο γεωγραφικό διαμέρισμα της Κρήτης και διοικητικά υπάγεται στην Περιφερειακή Ενότητα Ρεθύμνης της Περιφέρειας Κρήτης.

Στην εικόνα 12 προσδιορίζεται η περιοχή μελέτης του φράγματος Ποταμών ως προς την ευρύτερη περιοχή της Κρήτης.



Εικόνα 12: Η Κρήτη και η περιοχή μελέτης του φράγματος Ποταμών της περιοχής Αμαρίου (Πηγή: Google Earth)

Στην εικόνα 12 παρουσιάζεται η περιοχή μελέτης του φράγματος Ποταμών Αμαρίου ως προς το γεωγραφικό διαμέρισμα της Κρήτης.

Το Αμάρι είναι ένας παραδοσιακός ορεινός οικισμός της δημοτικής κοινότητας Συβρίτου, του δήμου Αμαρίου του νομού Ρεθύμνης. Από το χωριό έλαβε την ονομασία της κατά την ενετοκρατία ολόκληρη η ομώνυμη επαρχία. Το σύνολο των κατοίκων της περιοχής ασχολείται με την κτηνοτροφία και την γεωργία καλλιεργώντας κυρίως αμπέλια, ελαιόδεντρα, δημητριακά και ζωοτροφές.

Στην ευρύτερη περιοχή του Αμαρίου υπάγονται ένα σύνολο από τοπικές κοινότητες δημιουργώντας κατά αυτό τον τρόπο ένα ενιαίο δήμο. Η έκταση της περιοχής ανέρχεται σε 277.74 τ.χλμ, ενώ ο πληθυσμός σύμφωνα με τη τελευταία απογραφή είναι 5.915 κάτοικοι.

3.1.1.Ιστορική αναδρομή λειτουργίας του Ταμειντήρα

Το Υπουργείο Γεωργίας αποτέλεσε κινητήρια δύναμη της κατασκευής του φράγματος στους Ποταμούς Αμαρίου, έχοντας δώσει για αρχή στον ταμειντήρα την ονομασία «Φράγμα Πρασσών» από τον ομώνυμο

οικισμό Πρασσές. Σύμφωνα με την τότε έρευνα στην περιοχή εκτελέστηκαν ερευνητικές γεωτρήσεις στην περίοδο 1965 - 1967 αρχικά στο στένωμα που αρχίζει το Πρασσανό φαράγγι και στη συνέχεια στη σημερινή θέση. Τότε το Υπουργείο Γεωργίας εγκατέστησε το βροχομετρικό σταθμό στο χωριό Βολιώνες, μέσα στη λεκάνη απορροής του φράγματος και συγχρόνως άρχισε να εκτελεί, σχεδόν σε μηνιαία βάση, μετρήσεις της παροχής του Ποταμού.

Το 1984, η δημιουργία του παραρτήματος Ο.Α.ΔΥ.Κ. στο Ρέθυμνο διευκόλυνε την έρευνα της περιοχής εντατικοποιώντας τις μετρήσεις, ώστε το 1987 έγιναν οι πρώτες ερευνητικές γεωτρήσεις στην περιοχή μέχρι και το 1991, όπου πραγματοποιήθηκαν 31 ερευνητικές γεωτρήσεις, τόσο στην περιοχή της θέσης του φράγματος, όσο και στον ταμιευτήρα, και 21 ερευνητικά φρέατα δειγματοληψίας των υλικών κατασκευής του φράγματος, εκτελώντας παράλληλα και τις απαραίτητες εργαστηριακές δοκιμές.

3.1.2.Σκοπός κατασκευής-Τεχνικά χαρακτηριστικά φράγματος Ποταμών

Το φράγμα Ποταμών Αμαρίου στο Ρέθυμνο, κατασκευάστηκε από τον Ο.Α.ΔΥ.Κ. με προϋπολογισμό 51 εκ. €.

Το έργο περιλαμβάνει μια σειρά από επιμέρους έργα που έχουν σκοπό την εξασφάλιση μέσου ετήσιου όγκου νερού 22, 5 εκ.κυβικά μέτρα, για τις ανάγκες άρδευσης του κάμπου του Ρεθύμνου και των γειτονικών περιοχών του Δήμου Αμαρίου και στη συνέχεια ύδρευσης της ευρύτερης περιοχής του Δήμου Ρεθύμνου. Επίσης στους αμέσως επόμενους στόχους του Ο.Α.ΔΥ.Κ. είναι η αξιοποίηση του φράγματος για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Το Φράγμα σε συνδυασμό με το Φαράγγι Παστού, το Πρασσανό Φαράγγι, το Άγιο Πνεύμα Παντάνασσας και γενικότερα το ανάγλυφο της περιοχής με την ποικιλομορφία χρωμάτων αποτελούν εκτός των άλλων πόλο έλξης δεκάδων τουριστών, αλλά και ντόπιων περιηγητών στην ενδοχώρα ολόκληρης της Κρήτης.

Στον πίνακα 2 παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά σύμφωνα με τα οποία κατασκευάστηκε το Φράγμα Ποταμών.

Τύπος	Χωμάτινο
Όγκος ταμιευτήρα	22,5 * 10 ⁶ m ²
Υψος	55 m
Οφέλιμος όγκος	17,5 * 10 ⁶ m ²
Πλάτος βάσης	310 m.
Επιφάνεια ταμιευτήρα	1.600 στρεμ.
Μήκος στέψης	265 m.
Λεκάνη απορροής	60 km ²
Πλάτος στέψης	10 m
Όγκος αναχώματος	1.800.000 m ³
Μήκος υπερχειλιστή	340 m
Σκυροδέματα πάσης φύσεως	40.000 m ³
Παροχή υπερχειλιστή	1.325 m ³ /sec
Γεωτρήσεις - τοιμεντενέσεις	27.500 m
Υψος πύργου υδροληψίας	25 m
Ανωτάτη στάθμη αποθηκεύσεως	+ 203,00 m
Διατομή πύργου υδροληψίας	4,5 m x 4,5 m
Κατωτάτη στάθμη υδροληψίας	+ 177,00 m
Μήκος σήραγγας εκτροπής	385 m
Διάρκεια κατασκευής	1996-2000 & 2003-2005
Διατομή σήραγγας εκτροπής	Εσωτ. διάμ. 4,5 m

Πίνακας 2: Τεχνικά Χαρακτηριστικά κατασκευής Φράγματος Ποταμών παραχωρημένα από τον κ. Βαγγέλη Μαμαγκάκη, Προϊστάμενο της Διεύθυνσης Ρεθύμνου του Ο.Α.ΔΥ.Κ .(Πηγή: amariotes.gr)

Το υψόμετρο της κοίτης στη θέση του φράγματος είναι +160. Το μέγιστο ύψος του φράγματος είναι 55μέτρα και το μέγιστο πλάτος της βάσης του είναι 310 μέτρα. Το υψόμετρο της στέψης του είναι +210μέτρα ενώ το μήκος και πλάτος αυτής είναι 275μέτρα και 10μέτρα αντίστοιχα. Το υψόμετρο της στέψης του υπερχειλιστή είναι +203, η ανώτατη στάθμη νερού για την περίπτωση της πλημμύρας +206.5, ενώ η κατώτατη στάθμη υδροληψίας +177.0. Τέλος ο συνολικός αποθηκευμένος όγκος νερού για τις στάθμες +177.0 και +203.0 είναι 5 και 22.5 εκατομμύρια κυβικά μέτρα νερού αντίστοιχα.

3.2.Περιγραφή Υδρολογικής Λεκάνης Φράγματος Ποταμών

3.2.1.Γεωγραφική τοποθέτηση

Η κοιλάδα του Αμαρίου σχηματίζεται ανάμεσα στα όρη Κέδρος και στον Ψηλορείτη, σε υψόμετρο 400-500 μέτρα και έχει μήκος 25 χλμ. Είναι το φυσικό πέρασμα από το βόρειο Ρέθυμνο προς το Νότο και τη Μεσσαρά. Το Αμάρι ανήκει στις περιοχές της Κρήτης με τις μεγαλύτερες βροχοπτώσεις. Γι αυτό από εδώ πηγάζει ο Πλατύς Ποταμός που εκβάλλει στην Αγία Γαλήνη, αλλά και εδώ υπάρχει ένα από τα μεγαλύτερα φράγματα της Κρήτης, το φράγμα των Ποταμών με το οποίο ασχολείται η παρούσα μελέτη.

Στην εύφορη κοιλάδα του υπάρχουν πολλά και σπάνια είδη Κρητικής χλωρίδας, όπως στον φυσικό «Βοτανικό Κήπο» του Γιους Κάμπου, βόρεια του Όρους Κέδρος.

Το κύριο φράγμα βρίσκεται σε ευθεία απόσταση 25 km. ΝΑ της πόλης του Ρεθύμνου, επί του χειμάρρου Πρασιανού, μεταξύ δύο αντερεισμάτων αμέσως κατάντη (προς Β) της συμβολής των δύο δευτερευόντων κλάδων του χειμάρρου. Τρία από τα κυρίως ρέματα του φράγματος Ποταμών είναι: Βολεώνες, Κεφαλόβρυσα, Απόστολοι αποτελώντας τους κύριους τροφοδότες του ταμιευτήρα. Η θέση της λεκάνης απορροής του φράγματος Ποταμών παρουσιάζεται στην εικόνα 13.



Εικόνα 13: Η θέση της λεκάνης απορροής του φράγματος Ποταμών (Πηγή: Google Earth)

3.2.2.Γεωμορφολογία

Από τη βόρεια παραλία και προς το εσωτερικό του νησιού, η περιοχή αποτελείται από το ορεινό ανάγλυφο που ορίζουν ο χειμάρρος Σφακόρνακο ρεύμα, οι παραπόταμοι με τις αντίστοιχες κοιλάδες, το Πρασσανό φαράγγι και το φαράγγι του Αγίου Αντωνίου (Πατσός). Νοτιοδυτικά του Ψειλορείτη και σχεδόν παράλληλα υψώνεται το όρο Κέδρος (1.777μέτρα), ο οποίος εκτείνεται στα βόρεια με τις κορυφές Σωρός και Φορτέτσα. Η κοιλάδα του Αμαρίου, η οποία αποτελεί το μεγαλύτερο μέρος της πεδινής έκτασης της λεκάνης σχηματίζεται μεταξύ του όρους Κέδρους και του Ψηλορείτη. Το φαράγγι της Πατσού βρίσκεται 8 χλμ. νοτιοδυτικά της Μονής Αρκαδίου, στην καταπράσινη επαρχία του Αμαρίου. Τα νερά του φαραγγιού χύνονται πλέον στο φράγμα των Ποταμών. Λόγω της ύπαρξης των Δρυμών στην υπό μελέτη περιοχή, είναι αναμενόμενο ότι ένα μεγάλο μέρος αυτής ανήκει στο δίκτυο NATURA (Εφαρμογή Σημαντικών Περιοχών για την Προστασία της Φύσης). Η ευρύτερη περιοχή της λεκάνης απορροής του φράγματος Ποταμών Αμαρίου διαθέτει πλούσια βλάστηση, όλη η βλάστηση και οι καλλιέργειες οφείλονται στις πολλές πηγές νερού που διαθέτει.

Οι σημαντικότερες μορφές οικοτόπων, που χαρακτηρίζουν την έκταση, είναι οι τυπικοί μεσογειακοί χερσότοποι και οι θαμνώνες, με τη χαρακτηριστική μακία βλάστηση και τη μορφή φρυγανικού τοπίου, καλλιεργούμενες γεωργικές περιοχές, αειθαλή δάση του χλωριδικού τύπου *oleo-Ceratonion* με κυρίαρχο είδος το πουρνάρι, και υγρότοποι γλυκού νερού στο εσωτερικό.



Εικόνα 14: Απεικόνιση των κλίσεων στη Λεκάνη Απορροής του φράγματος Ποταμών Αμαρίου, σχεδιασμένος με τη χρήση του μοντέλου SWAT

Σύμφωνα με τον παραπάνω χάρτη (Εικόνα 14), στον οποίο απεικονίζονται οι κλίσεις του εδάφους στο σύνολο της λεκάνης, διαπιστώνεται ότι στην υπό εξέταση υδρολογική λεκάνη υπάρχει μεγάλη διακύμανση τοπογραφικών υψομέτρων. Η κλίση του εδάφους στο σύνολο της λεκάνης είναι αρκετά μεγάλη, το οποίο είναι φυσικό λόγω των οροσειρών που εκτείνονται κατά μήκος. Στην εικόνα 15 παρουσιάζεται το τοπογραφικό ανάγλυφο της λεκάνης απορροής του φράγματος Ποταμών.



Εικόνα 15: Το τοπογραφικό ανάγλυφο της λεκάνης απορροής του φράγματος Ποταμών (Πηγή: Περιγραφή υδατικού διαμερίσματος, 1^η ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΗ ΣΔΔΑΠ, ΥΔ ΚΡΗΤΗΣ)

3.2.3. Υδρογεωλογική συμπεριφορά του ευρύτερου πεδίου

Από γεωλογικής πλευράς η περιοχή βρίσκεται πάνω στη φυλετική - χαλαρωτική σειρά. Η σειρά αυτή βρίσκεται απωθημένη πάνω στους ανθρακικούς σχηματισμούς της Ιονίου ζώνης, είναι έντονα πτυχωμένη και αποτελείται από ένα σύνολο μεταμορφωμένων κυρίως παραπετρωμάτων, με λίγες εμφανίσεις ορθοπετρωμάτων. Ο βαθμός μεταμόρφωσης τους ποικίλλει από πολύ χαμηλό έως χαμηλό.

Τα παραπετρώματα αντιπροσωπεύονται από σχιστόλιθους (μαρμαρυγιακούς, μαρμαρυγιακούς-χλωριτικούς, μοσχοβιτικούς με χλωριτοειδή, χαλαζιτικούς, μοσχοβιτικούς με χλωριτοειδή, χαλαζιτικούς, ανθρακομιγείς-μαρμαρυγιακούς, γραφιτικούς-μαρμαρυγιακούς), φυλλίτες (κυρίως ανθρακομιγείς με χλωριτοειδή) και χαλαζίτες. Μέσα σε αυτά απαντούν ενστρώσεις ασβεστόλιθων, μαύρου έως υπόλευκου χρώματος, μεσοστρωματώδεις, κρυσταλλικοί και κατακερματισμένοι καθώς και διάσπαρτα τεμάχια μεταψαμμιτών και μεταπηλινών.

Τα ορθοπετρώματα κυρίως μεταβασάλτες (πρασινίτες) περιέχονται στα παραπετρώματα σαν φλέβες και κοίτες. Έχουν ιστό μικρο-μεσο-λεπιδοβλαστικό και υφή συμπαγή, παράλληλη μικροπτυχωμένη.

Οι φυλλίτες χαλαζίτες θεωρούνται αδιαπέρατα από το νερό πετρώματα. Οι περιβάλλοντες ανθρακικοί σχηματισμοί χαρακτηρίζονται από μεγάλο πάχος και έντονη καρστικοποίηση. Είναι υδροπερατοί και ενδέχεται να έχουν σημαντική υδροφορία. Όλες οι παραπάνω πληροφορίες σχετικά με τη γεωλογία και την υδρολογία της εξεταζόμενης περιοχής παραχωρήθηκαν κατόπιν επικοινωνίας με μέλη του Ινστιτούτου Έρευνας Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, αποτελώντας μέρος μελέτης που

πραγματοποιήθηκε την περασμένη δεκαετία για την ανάλυση της γεωλογίας της Ελλάδας. Σχετικά με τους γεωλογικούς σχηματισμούς που κυριαρχούν στη λεκάνη απορροής του φράγματος Ποταμών, αυτοί χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- Ασβεστόλιθοι

Το μεγαλύτερο τμήμα της υδρολογικής λεκάνης του φράγματος Ποταμών Αμαρίου, βρίσκεται εντός καρστικών σχηματισμών. Ο σχηματισμός ιζηματογενών πετρωμάτων όπως ο ασβεστόλιθος εκτείνεται κατά μήκος του όρους Βρύσινα καθώς και του Όρους Ίδη (Ψηλορείτης) το οποίο εκτείνεται κατά μήκος της λεκάνης απορροής του φράγματος Ποταμών. Κατά συνέπεια το μεγαλύτερο μέρος του βόρειου τμήματος της λεκάνης αποτελείται από ασβεστόλιθους, δηλαδή μονόμεικτα πετρώματα αποτελούμενα κυρίως από ασβεστίτη. Το χρώμα του πετρώματος είναι άσπρο, γαλαζωπό. Διαβρώνεται έντονα από το νερό. Είναι υδροπερατό και στο υπόστρωμα του απαρτίζεται από αδιαπέρατα στρώματα φυλλίτη με αποτέλεσμα να δημιουργεί υδροφόρου ορίζοντες. Με την διαβρωτική ενέργεια του νερού απογυμνώνεται και δίνει περίεργους συνδυασμούς όπως ρήγματα, καταβόθρες κ.α., γεγονός το οποίο εξηγεί πλήρως την «άγρια» ομορφιά του τοπίου της εξεταζόμενης περιοχής, με τα απότομα φαράγγια, τις μεγάλες οροσειρές.

- Νεογενείς σχηματισμοί

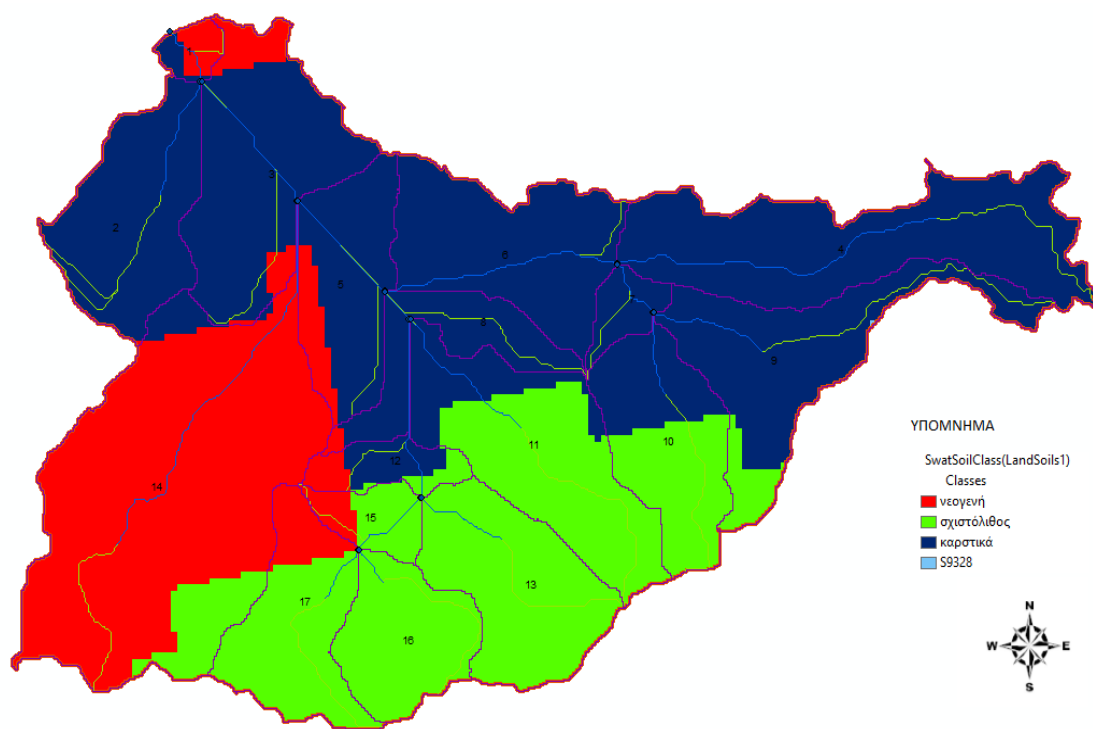
Έχουμε νεογενείς μετασχηματισμούς νοτιοδυτικά του φράγματος Ποταμών. Οι συγκεκριμένοι σχηματισμοί είναι μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι, πλεικαινικές αποθέσεις με κατά θέσεις επικράτηση των μαργών και των κροκαλοπαγών. Η μάργα είναι μικτό χημικοκλαστικό ιζηματογενές πέτρωμα, του οποίου το κλαστικό υλικό είναι αργιλικό και το χημικό ανθρακικό ασβέστιο. Λόγω του ότι είναι πρόσφατης ηλικίας και κυρίως οι μάργες νεογενούς χαρακτηρίζονται από την παρουσία απολιθωμάτων που διατηρούνται σε καλή κατάσταση. Πρόκειται για υδατοστεγή πετρώματα, μη επιτρέποντας τη διέλευση του νερού στο έδαφος.

- Σχιστόλιθοι

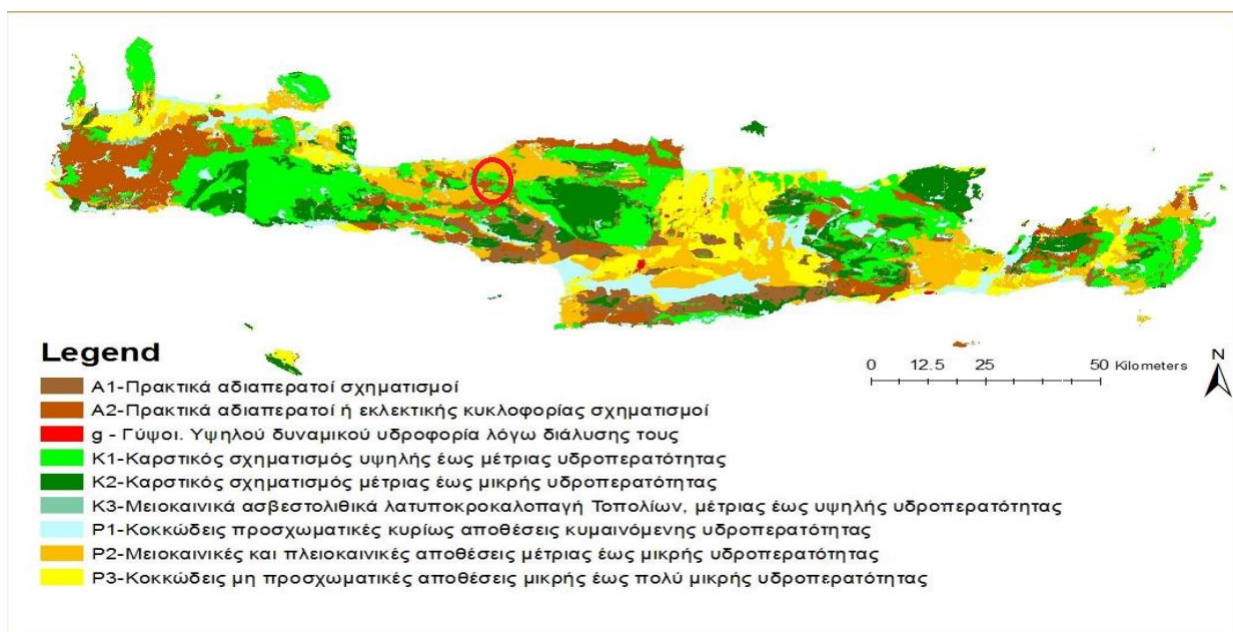
Σε ολόκληρο το νότιο τμήμα της λεκάνης γίνεται έντονη η εμφάνιση του σχιστόλιθου. Ένα μεταμορφωμένο (κρυσταλλοσχιστώδες) πέτρωμα, , το οποίο περιέχει μοσχοβίτη, χλωρίτη, χαλαζία και

άλλα τυπικά ορυκτά, που είναι διατεταγμένα σε σχεδόν παράλληλη διάταξη, λόγω του ότι το πέτρωμα έχει δημιουργηθεί υπό συνθήκες έντονης μεταμόρφωσης με αποτέλεσμα αυτό να παρουσιάζει σχιστοφυή όψη και να έχει την ιδιότητα να σχίζεται σε πλάκες μετά από κρούση. Οι σχιστόλιθοι είναι τα κατεξοχήν κρυσταλλοσχιστώδη πετρώματα που συμμετέχουν στη δομή μιας μεταμορφωσιγενούς περιοχής. Για να γίνει πιο αντιληπτή η έννοια του σχιστόλιθου, είναι πετρώματα με καλή σχιστότητα, διάφοροι γνεύσιοι και φυλλίτες, ορισμένοι ασβεστόλιθοι και ασβεστιτικοί σχιστόλιθοι, χαλαζίτες καθώς και λεπτόκοκκα πυροκλαστικά πετρώματα. Οι σχιστόλιθοι είναι πετρώματα τα οποία δεν επιτρέπουν τη διέλευση του νερού. (Περιφέρεια Κρήτης, 2012)

Στην εικόνα 16 απεικονίζεται ο εδαφικός χάρτης της λεκάνης απορροής του φράγματος Ποταμών, όπως αποτυπώθηκε από το SWAT.



Εικόνα 16: Εδαφικός χάρτης της λεκάνης απορροής του φράγματος Ποταμών Αμαρίου, σχεδιασμένος με τη χρήση του μοντέλου SWAT



Εικόνα 17: Υδρολιθολογικός χάρτης της Κρήτης, σημειώνεται η λεκάνη απορροής του φράγματος Ποταμών

Η εικόνα 17 παρουσιάζει μία γενικότερη εικόνα της υδρολιθολογικής κατανομής ολόκληρης της Κρήτης, προσδιορίζοντας τα υδρολιθολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής της λεκάνης απορροής του φράγματος Ποταμών.

3.2.4. Γεωλογική δομή και υδρογεωλογική συμπεριφορά της περιοχής

Η ευρύτερη περιοχή δομείται από:

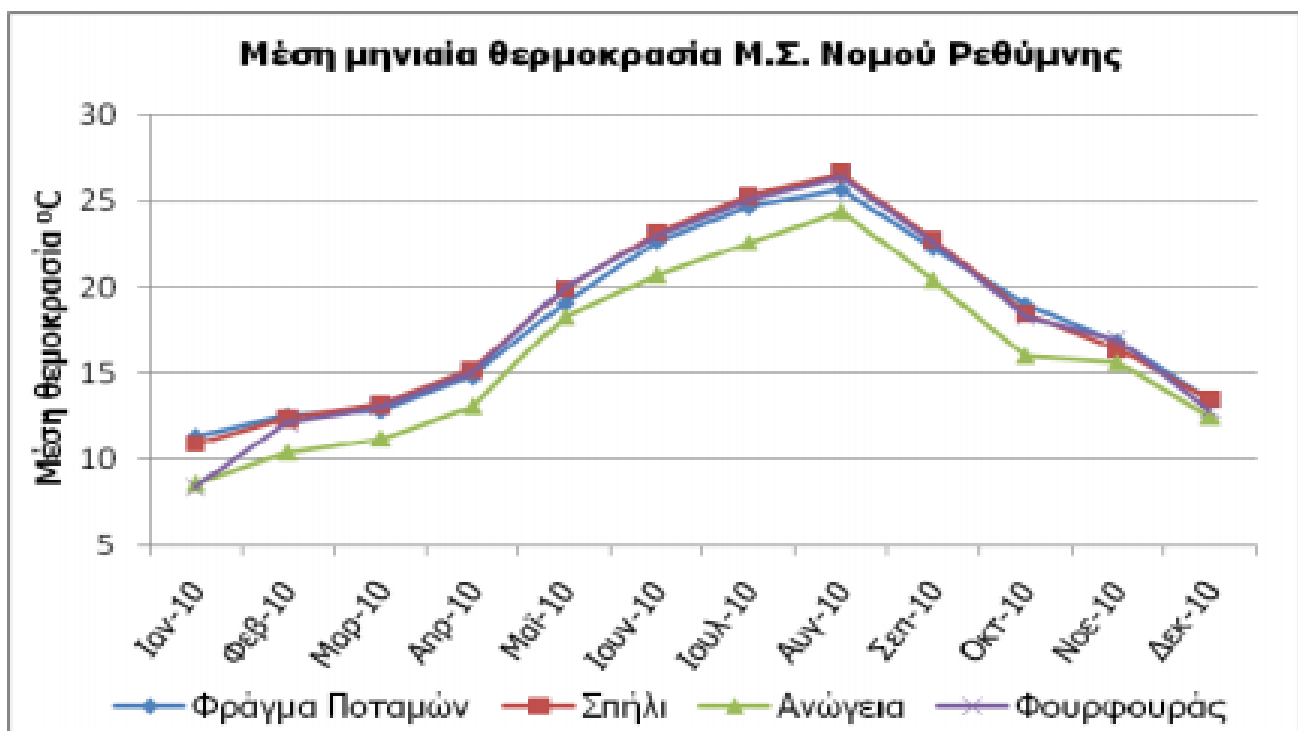
- Αλλουβιακές προσχώσεις
- Νεογενείς σχηματισμούς (μαργαϊκούς ασβεστόλιθους, μάργες, αργίλους και κροκαλοπαγή)
- Ασβεστόλιθους και δολομίτες του Ιουρασικού (ζώνη Τρίπολης)
- Φυλλίτες-χαλαζίτες περμοτριάδικής ηλικίας
- Δολομίτες και ασβεστόλιθοι τριαδικού, αντίστοιχοι των ασβεστόλιθων Παντοκράτορα της Ιόνιας ζώνης

Η φυλλιτική χολαλπική σειρά είναι επωθημένη στους υποκείμενους σχηματισμούς. Η επαφή μεταξύ φυλλιτών, χαλαζιτών και σχηματισμών της ζώνης Τρίπολης είναι επίσης τεκτονική. Σύμφωνα με ορισμένους ερευνητές οι σχηματισμοί της φυλλιτικής – χαλαζιτικής σειράς είναι ανεξάρτητο κάλυμμα, ενώ κατά άλλους αποτελούν το υπόβαθρο της ανθρακικής σειράς της ζώνης Τρίπολης. (Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, 2014)

3.3.Μετεωρολογικά –Κλιματολογικά στοιχεία της περιοχής

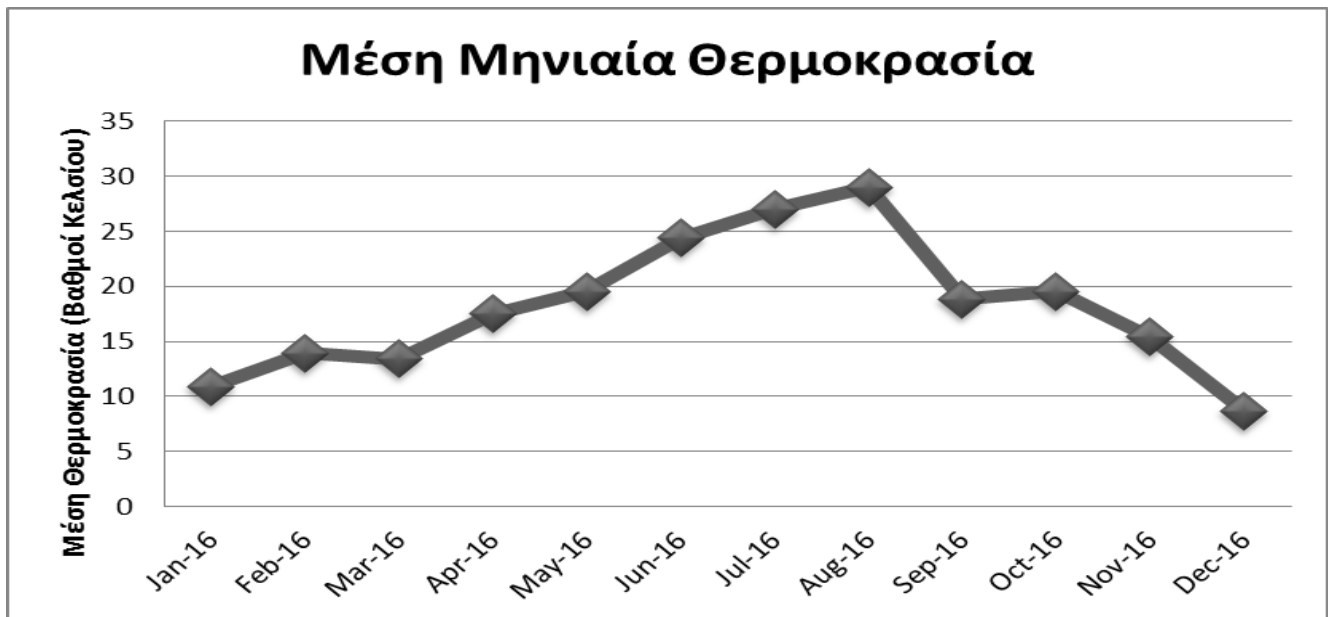
Η περιοχή μελέτης σύμφωνα με τα στοιχεία της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (Ε.Μ.Υ.) ανήκει στον υγρό βιοκλιματικό όροφο με χειμώνα ήπιο ή ψυχρό. Οι λιγότερο βροχεροί μήνες είναι ο Ιούλιος και ο Αύγουστος σύμφωνα με τις μελέτες, ενώ αντίθετα οι πιο βροχεροί είναι ο Δεκέμβριος και ο Ιανουάριος. Οι χιονοπτώσεις είναι σπάνιες, ενώ λιγότερο σπάνιο φαίνεται το φαινόμενο των χαλαζοπτώσεων στους υγρούς μήνες. Όσον αφορά τις θερμοκρασίες, γενικά η περιοχή παρουσιάζει το καλοκαίρι υψηλές σχετικά θερμοκρασιακές συνθήκες και το χειμώνα επίσης η διακύμανση των θερμοκρασιών είναι ομαλή. Η μέση διεύθυνση των ανέμων που επικρατούν στην περιοχή είναι βόρεια καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται κλιματολογικά στοιχεία για το έτος 2010 για τους μετεωρολογικούς σταθμούς του νομού Ρεθύμνου που υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα από το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, επικεντρώνεται η προσοχή στη συνολική μηνιαία βροχόπτωση, μέση ταχύτητα ανέμου καθώς και στη μέση θερμοκρασία που αφορούν στο φράγμα Ποταμών.



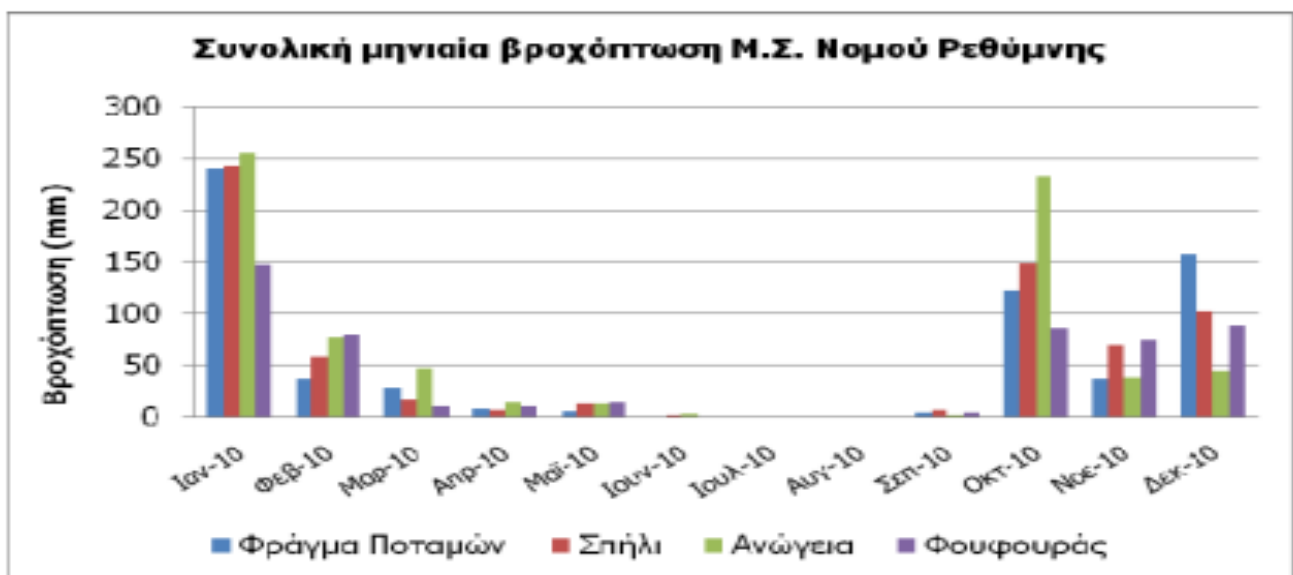
Διάγραμμα 1: Μέση Μηνιαία Θερμοκρασία για το 2010(Πηγή: Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών)

Από το παραπάνω γράφημα (Διάγραμμα 1) φαίνεται ότι η θερμοκρασία στο φράγμα των Ποταμών είναι μεγαλύτερη, κατά τους μήνες Αύγουστο, Ιούλιο, και πιο χαμηλή τους μήνες Δεκέμβρη και Φλεβάρη.



Διάγραμμα 2: Μέση μηνιαία θερμοκρασία του φράγματος Ποταμών για το έτος 2016

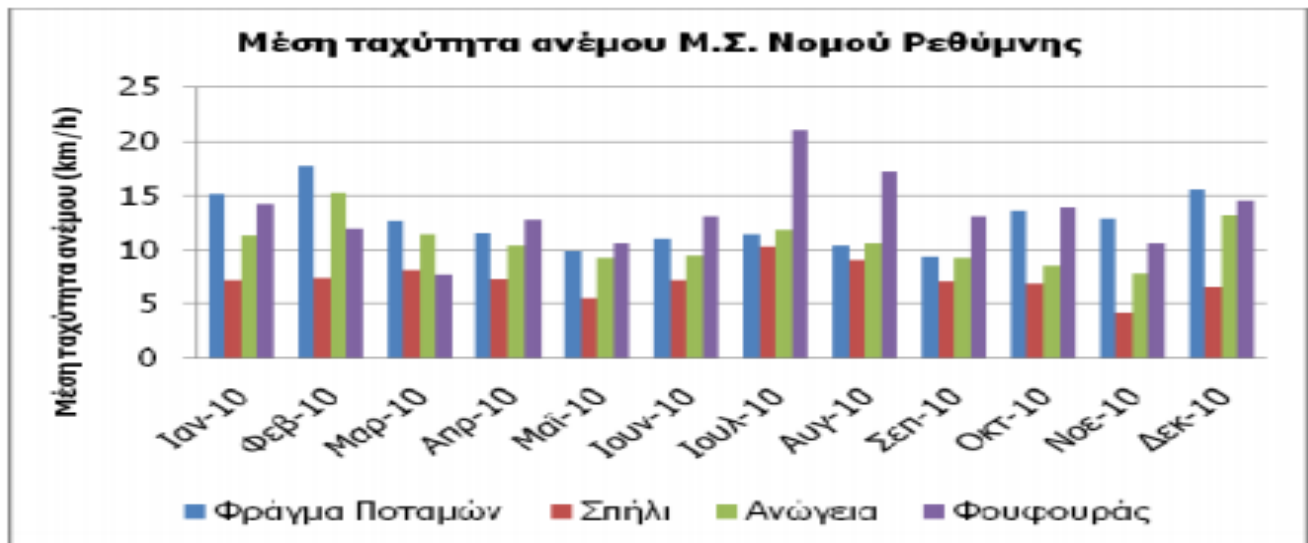
Από το διάγραμμα 2 φαίνεται ότι η θερμοκρασίες είναι χαμηλές το χειμώνα ($8,7^{\circ}\text{C}$ η μικρότερη θερμοκρασία), και σχετικά υψηλές το καλοκαίρι (29°C η μεγαλύτερη). Το κλίμα είναι ήπιο σχετικά, ήπιος χειμώνας και σχετικά θερμό καλοκαίρι.



Διάγραμμα 3: Συνολική Μηνιαία Βροχόπτωση για το 2010 (Πηγή: Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών)

Σύμφωνα με το παραπάνω γράφημα (Διάγραμμα 3) γίνεται αντιληπτό ότι η βροχόπτωση στο φράγμα Ποταμών είναι πολύ έντονη κυρίως το μήνα Ιανουάριο, όμως αρκετά έντονο είναι το φαινόμενο της κατακρήμνισης και το μήνα Οκτώβριο, ενώ λιγότερες κατακρημνίσεις εμφανίζονται κατά τους μήνες Νοέμβρη και Δεκέμβρη. Όσον αφορά στη μέση ταχύτητα ανέμου την ίδια περίοδο (έτος 2010), φαίνεται

ότι πνέουν ισχυροί άνεμοι κατά κύριο λόγο τους μήνες Δεκέμβρη, Γενάρη, Φλεβάρη, (17χλμ./ώρα, η μεγαλύτερη τιμή), αν και καθόλη τη διάρκεια του χρόνου πνέουν βόρειοι άνεμοι (Διάγραμμα 4).



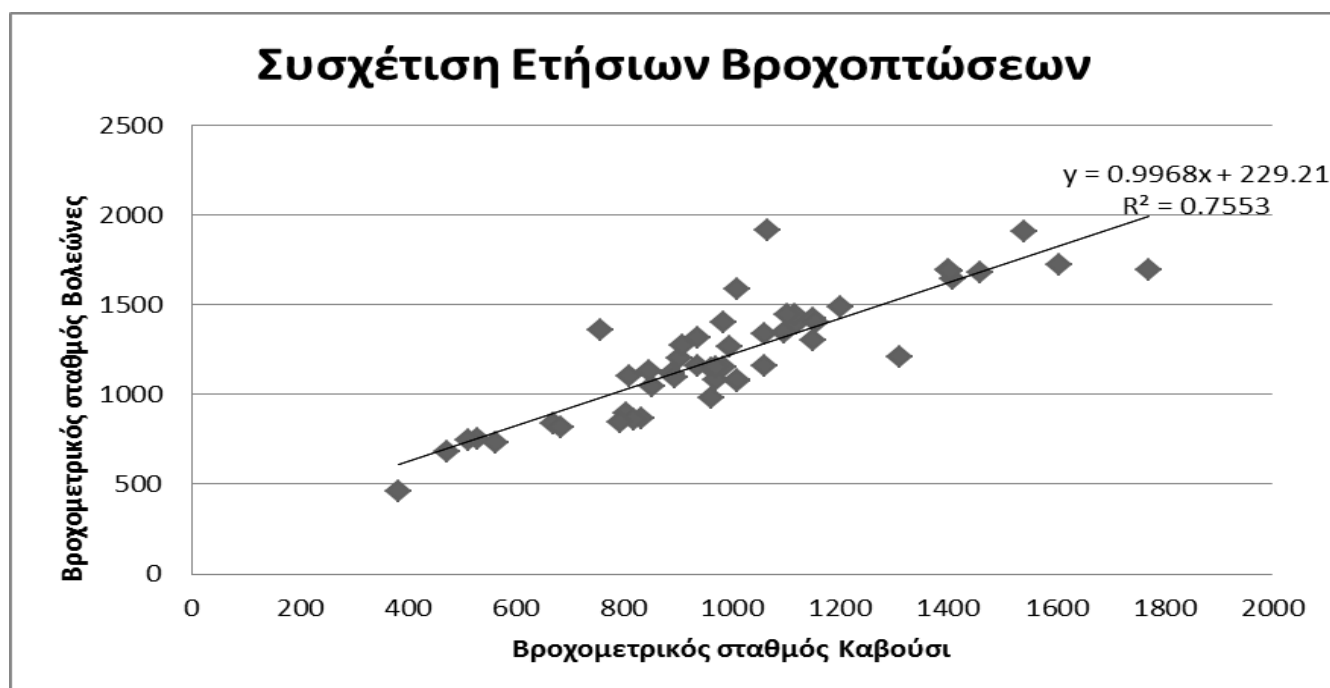
Διάγραμμα 4 : Μέση ταχύτητα ανέμου για το 2010 (Πηγή: Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών)

Η κατασκευή Μετεωρολογικού Σταθμού στο φράγμα Ποταμών (Δωρεά του Ιδρύματος «Σταύρος Νιάρχος»), αποτελώντας ιδιοκτησία του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών, φιλοξενείται από τον Ο.Α.ΔΥ.Κ. Αυτό καθιστά ευκολότερη τόσο τη λειτουργία του φράγματος με το συνεχή έλεγχο των βασικών παραμέτρων του.

Στην παρούσα μελέτη έγινε υπολογισμός της Ετήσιας Βροχόπτωσης, Αθροιστικής Ετήσιας Βροχόπτωσης την περίοδο 1961 - 2010 σύμφωνα με δεδομένα βροχόπτωσης που παραχωρήθηκαν από τέσσερις βροχομετρικούς σταθμούς γύρω από τη λεκάνη, και πιο συγκεκριμένα, στα εξής σημεία: Καβούσι, Βολεώνες, Σπήλι, Γερακάρι, ώστε να έχουμε μία πιο αντιπροσωπευτική και ολοκληρωμένη εικόνα του κλίματος της περιοχής της υπό μελέτη λεκάνης απορροής.

Πιο συγκεκριμένα στο διάγραμμα 5 παρουσιάζεται η μέση ετήσια βροχόπτωση την περίοδο 1961 - 2010, όπως καταγράφηκε από το βροχομετρικό σταθμό στο Καβούσι, συναρτήσει της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης την αντίστοιχη περίοδο, από το σταθμό στην περιοχή Βολεώνες. Συγκρίνοντας τις τιμές από τους δύο σταθμούς είναι εύκολο να προσδιοριστεί η απόκλιση που υπάρχει στα αποτελέσματα των αντίστοιχων τιμών ετήσιας βροχόπτωσης, καθώς είναι φυσικό να υπάρχει λόγω της διαφορετικής τοποθεσίας στην οποία βρίσκεται ο κάθε σταθμός. Η απόκλιση μεταξύ των ετήσιων βροχομετρικών τιμών που καταγράφει ο σταθμός «Βολεώνες», είναι μικρή σε σχέση με τις τιμές του βροχομετρικού σταθμού «Καβούσι», γεγονός το οποίο γίνεται αντιληπτό από το συντελεστή R^2 που λαμβάνει τιμή ικανοποιητική (κοντά στη μονάδα). Πιο συγκεκριμένα αυτό σημαίνει ότι οι ετήσιες τιμές βροχόπτωσης και από τους δύο σταθμούς τους οποίους μελετάμε στο γράφημα, είναι πλησίον της γραμμής τάσης που

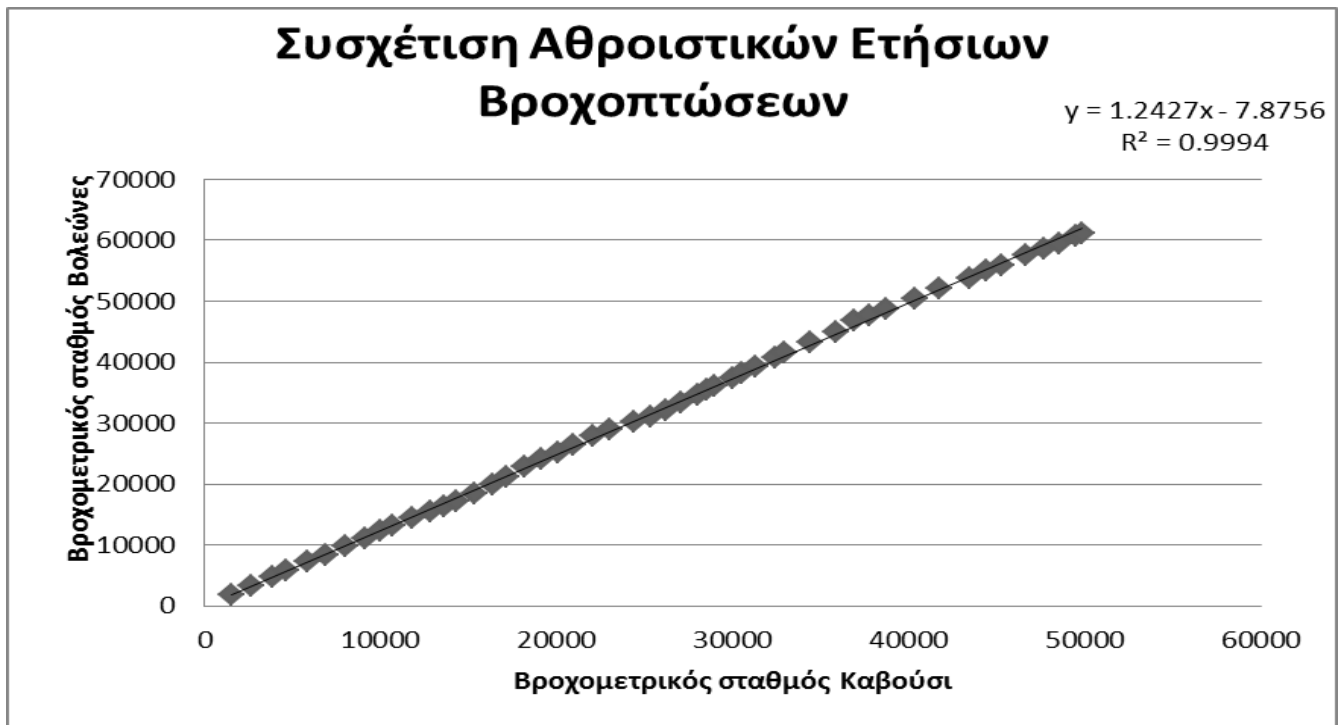
έχει σχεδιαστεί, η οποία με τη σειρά της αποτελεί την κατευθυντήριο γραμμή σύμφωνα με την οποία αν όλες οι τιμές συμφωνούσαν πλήρως θα βρίσκονταν πάνω σε αυτή. Κατά τον τρόπο αυτό διαπιστώνεται ότι οι ετήσιες τιμές βροχόπτωσης και από τους δύο σταθμούς είναι αντιπροσωπευτικές. Το ίδιο φαίνεται και στα διαγράμματα 7 και 9 στα οποία γίνεται σύγκριση των τιμών βροχόπτωσης που καταγράφηκαν από το σταθμό στο Καβούσι σε σχέση με εκείνες που έδωσε ο σταθμός των Βολεώνων, καθώς αντίστοιχα σύγκριση των τιμών του σταθμού του Καβουσίου με το σταθμό στην περιοχή Γερακάρι. Η συσχέτιση των εκάστοτε σταθμών οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η απόκλιση των τιμών τους είναι πολύ μικρή, υπάρχει εξαιρετική συσχέτιση μεταξύ των τιμών τους διαπιστώνοντας ότι οι τιμές είναι αντιπροσωπευτικές και τα σφάλματα στις μετρήσεις είναι μηδαμινά.



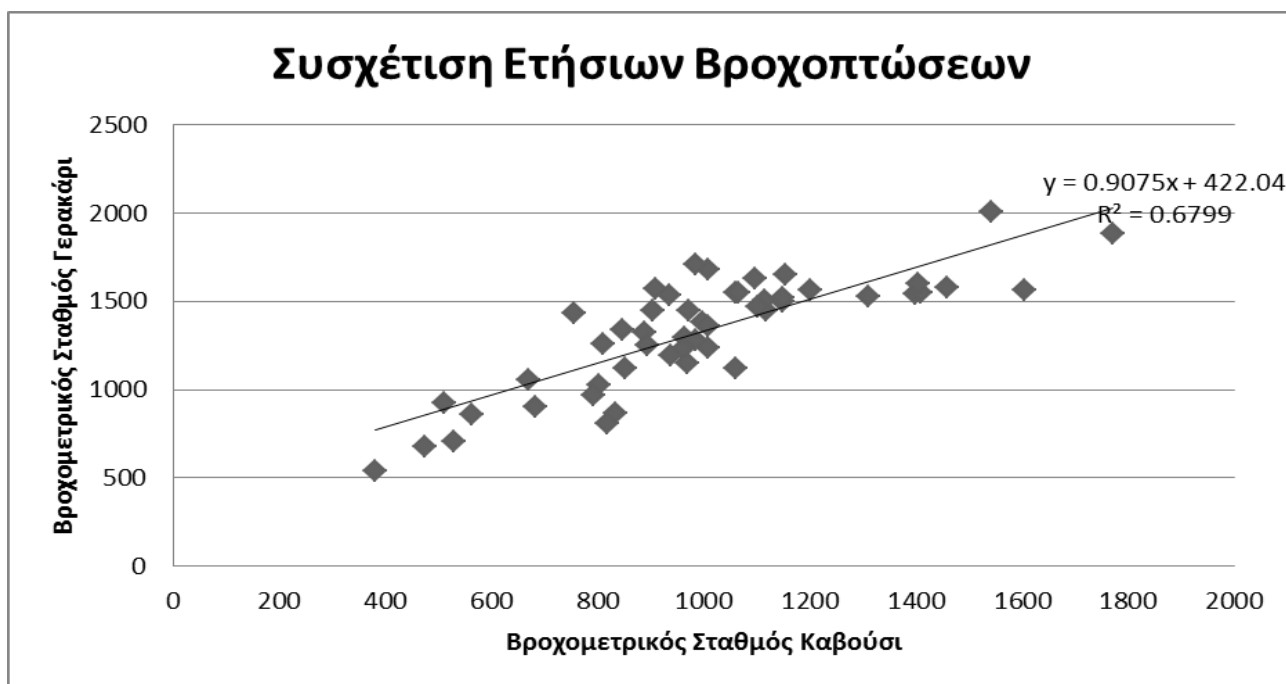
Διάγραμμα 5: Σύγκριση Βροχομετρικών δεδομένων, Καβούσι-Βολεώνες

Στο διάγραμμα 6 απεικονίζονται οι αθροιστικές ετήσιες τιμές βροχόπτωσης του σταθμού του Καβουσίου σε συνάρτηση με τις αθροιστικές ετήσιες τιμές βροχόπτωσης του σταθμού της περιοχής των Βολεώνων. Με τη χρήση του αθροιστικού – συσσωρευτικού διαγράμματος είναι δυνατό να ανιχνευτούν μικρά συστηματικά σφάλματα μεταξύ των τιμών, προσδιορίζοντας την τιμή του συντελεστή R^2 . Σε γενικότερες γραμμές όταν η τιμή του προαναφερόμενου συντελεστή είναι πλησίον της μοναδιαίας τιμής (1), όπως συμβαίνει στο υπό εξέταση διάγραμμα, τότε οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι δεν υπάρχουν ιδιαίτερα συστηματικά σφάλματα μεταξύ των τιμών, καθώς και ότι υπάρχει εξαιρετική συσχέτιση μεταξύ των δύο σταθμών ώστε να μην υποδηλώνεται σφάλμα στην οποιαδήποτε μέτρηση. Το ίδιο παρατηρείται και στο διάγραμμα 8 στο οποίο γίνεται αθροιστική συσχέτιση των ετήσιων τιμών βροχόπτωσης μεταξύ των σταθμών Καβουσίου, Βολεώνων καθώς και στο γράφημα 10 του οποίου η αθροιστική συσχέτιση αφορά

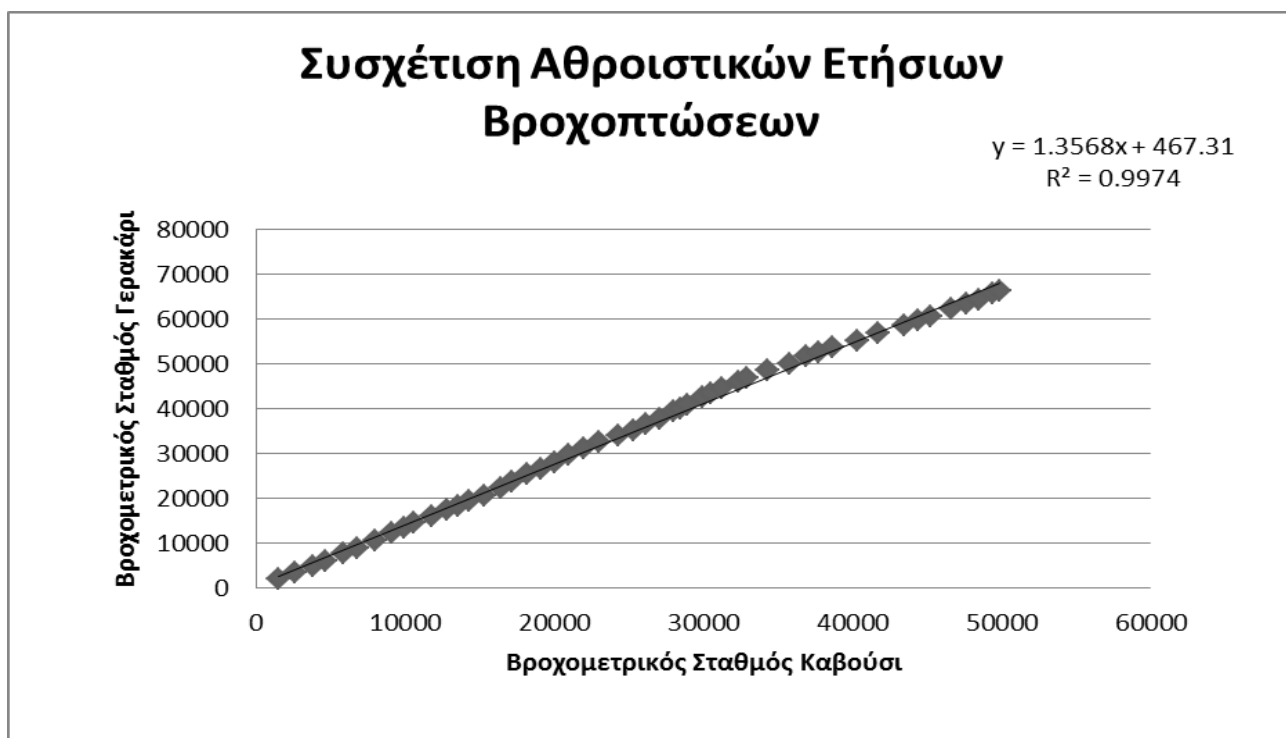
τους σταθμούς στις περιοχές Καβούσι και Γερακάρι. Κατά τον τρόπο αυτό επιβεβαιώνεται η απουσία συστηματικών σφαλμάτων μεταξύ των τιμών και διαπιστώνεται η εξαιρετική συσχέτιση μεταξύ των τιμών των εκάστοτε υπό εξέταση σταθμών.



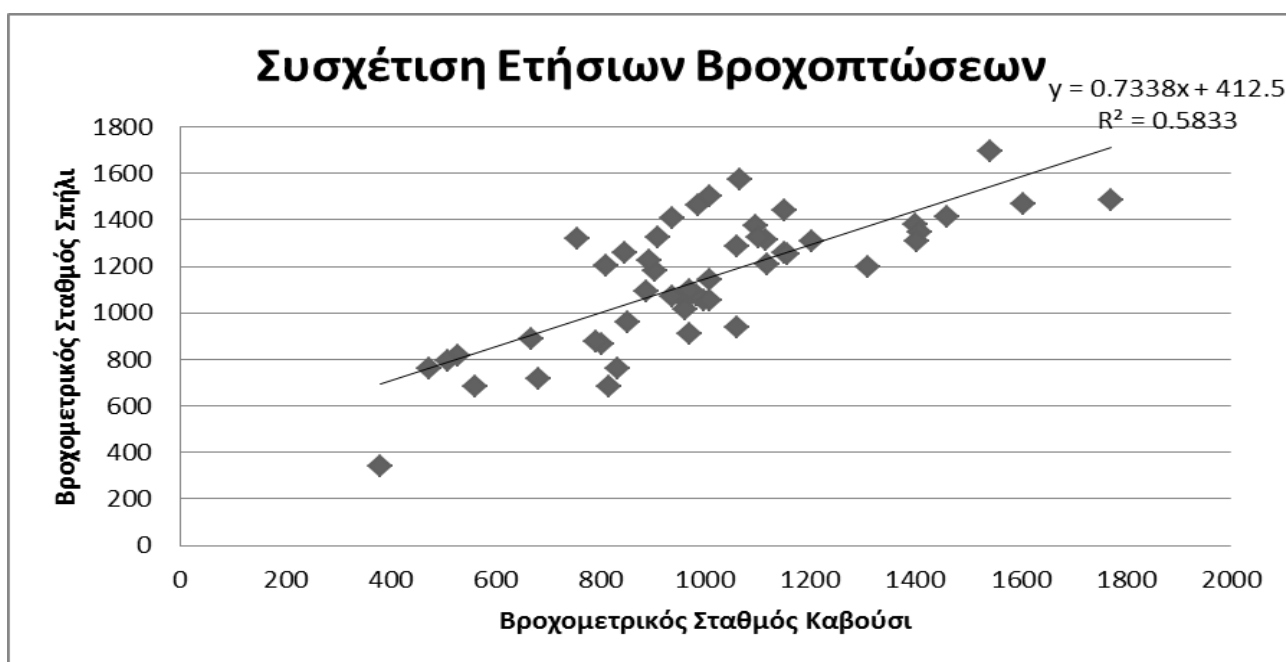
Διάγραμμα 6: Σύγκριση Αθροιστικών Ετήσιων Βροχοπτώσεων, Καβούσι-Βολεώνες



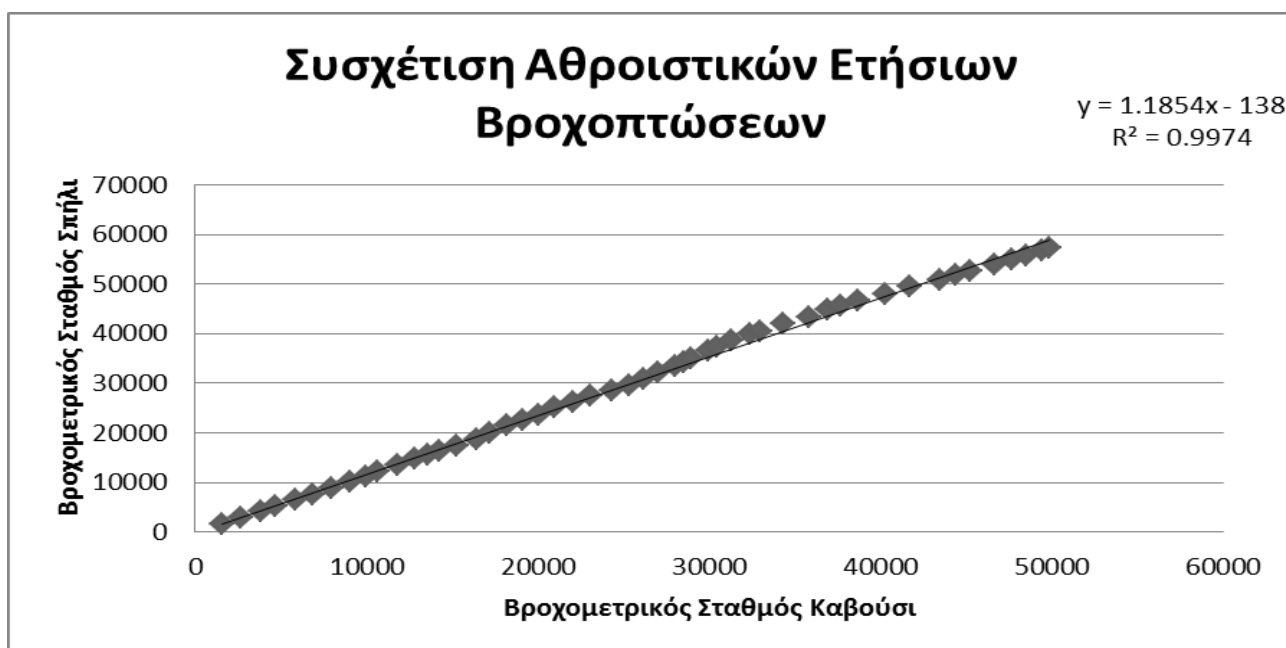
Διάγραμμα 7: Σύγκριση Βροχομετρικών δεδομένων, Καβούσι - Σπήλι



Διάγραμμα 8: Σύγκριση Αθροιστικών Ετήσιων Βροχοπτώσεων, Καβούσι-Σπήλι



Διάγραμμα 9: Σύγκριση Βροχομετρικών δεδομένων, Καβούσι - Σπήλι

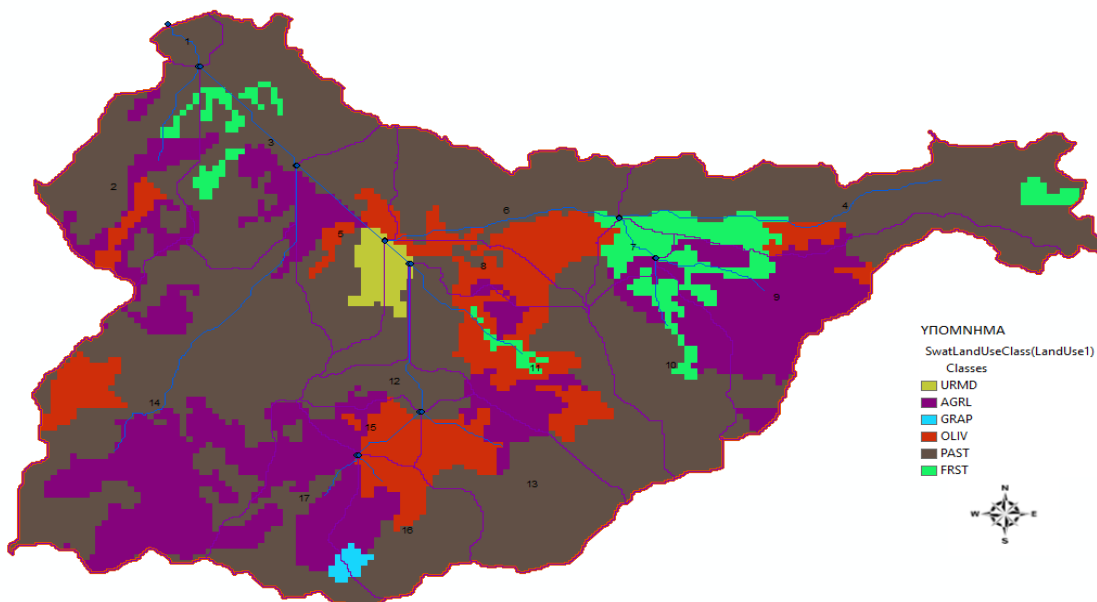


Διάγραμμα 10: Σύγκριση Αθροιστικών Ετήσιων Βροχοπτώσεων, Καβούσι-Σπήλι

Με τη χρήση αθροιστικών, σωρευτικών διαγραμμάτων είναι πιο εύκολο να γίνει αντιληπτή η ύπαρξη μικρών συστηματικών σφαλμάτων. Το αθροιστικό διάγραμμα του οποίου η ερμηνεία είναι μόνο ποιοτική, είναι καθοριστικό για τον προσδιορισμό του συστηματικού σφάλματος όπου αυτό υπάρχει, το

οποίο ορίζεται ανάλογα με της εκάστοτε καμπύλης/ευθείας. Στα παραπάνω γραφήματα, φαίνεται ότι η κατασκευή αθροιστικού διαγράμματος του σταθμού του Καβουσίου με καθένα από τους σταθμούς (Σπήλι, Γερακάρι, Βολεώνες), έχει τέτοια μορφή αποδεικνύοντας την εξαιρετική συσχέτιση μεταξύ των τιμών των εκάστοτε σταθμών, επιβεβαιώνοντας την έλλειψη σφαλμάτων στις μετρήσεις. Στα διαγράμματα που έχουν προηγηθεί αυτό γίνεται αντιληπτό τόσο από τη μορφή τους, καθώς οι τιμές δεν αποκλίνουν από τη γραμμή τάσης, αλλά και από τον υπολογισμό του συντελεστή R^2 , ο οποίος παίρνει άριστες τιμές όπως έχει ήδη διαπιστωθεί παραπάνω.

3.4.Χρήσεις Γης



Εικόνα 18: Χρήσεις γης στη λεκάνη απορροής του φράγματος Ποταμών

Στην εικόνα 18 παρουσιάζονται οι χρήσεις γης του φράγματος Ποταμών έτσι όπως αποτυπώθηκαν από το πρόγραμμα SWAT.

LANDUSE:	Area [ha]	Area[acres]	%Wat.Area
Residential-Medium Density --> URMD	102.0000	252.0471	1.07
Agricultural Land-Generic --> AGRL	2057.5625	5084.3398	21.67
Vineyard --> GRAP	27.0000	66.7184	0.28
Olives --> OLIV	1019.2500	2518.6177	10.73
Pasture --> PAST	5871.3125	14508.3068	61.82
Forest-Mixed --> FRST	419.6250	1036.9144	4.42

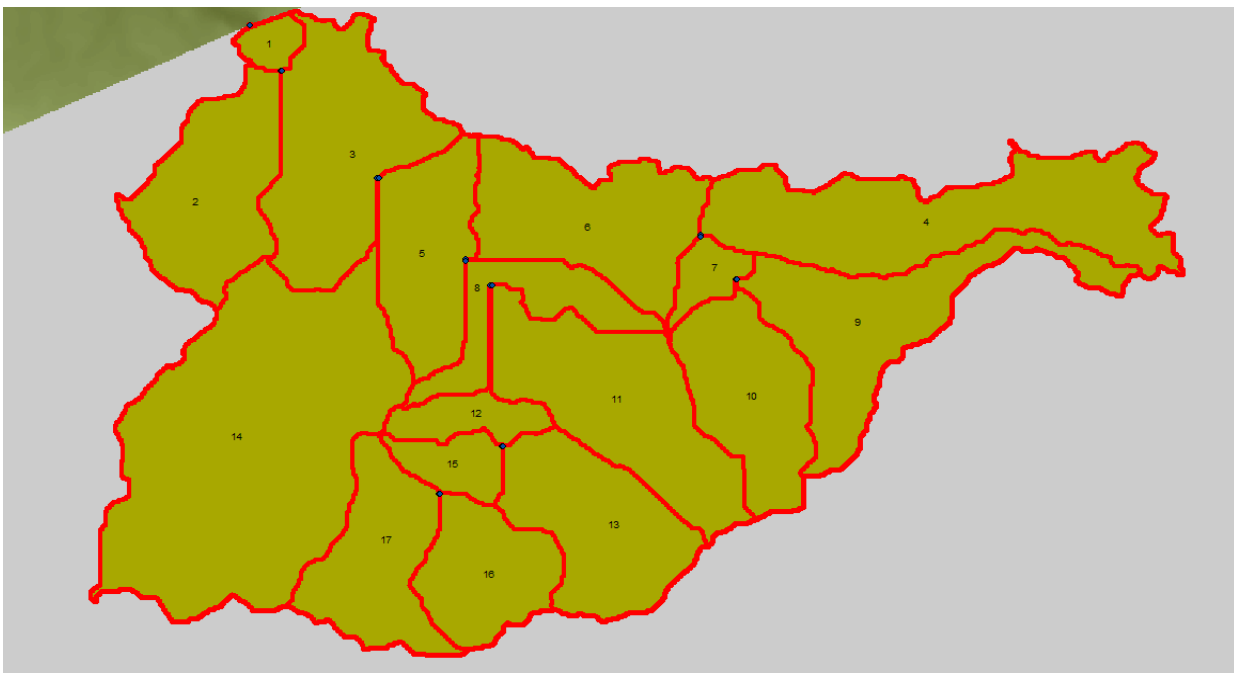
Εικόνα 19:Απεικόνιση χρήσεων γης (landuse) της λεκάνης απορροής του ταμιευτήρα, όπως αποτυπώθηκε από το SWAT

Η κατανομή χρήσης γης στη λεκάνη απορροής του φράγματος Ποταμών απεικονίζεται στην εικόνα 19. Στην τελευταία στήλη προσδιορίζονται τα ποσοστά κατανομής των χρήσεων γης στην υπό μελέτη λεκάνη. Όπως μπορεί να διαπιστωθεί το μεγαλύτερο ποσοστό δηλαδή 62% αφορά σε βοσκοτόπια (PAST), δηλαδή φοιτοκοινότητες που αποτελούνται από ποώδη ή ξυλώδη φυτού από αμφότερες τις δύο ομάδες ειδών, παράγοντας βοσκήσιμη ύλη η οποία κατά κύριο λόγο χρησιμοποιείται ως τροφή από τα αγροτικά ζώα. Περίπου 22% της συνολικής έκτασης της λεκάνης είναι αγροτική γη (AGRL), περιλαμβάνοντας καλλιεργήσιμα εδάφη, αποτελώντας σημαντικό τομέα της τοπικής οικονομίας της περιοχής. Ένα τμήμα της λεκάνης περίπου 10% της συνολικής έκτασης αυτής αποτελεί καλλιεργήσιμη έκταση, με κυριότερες καλλιέργειες τα ελαιόδεντρα (OLIV) και τις αμπέλους. Το υπόλοιπο 6% αντιστοιχεί σε δασικές εκτάσεις, αστικές επιφάνειες και κηπευτικά.

4.Ανάπτυξη Υδρολογικού Μοντέλου

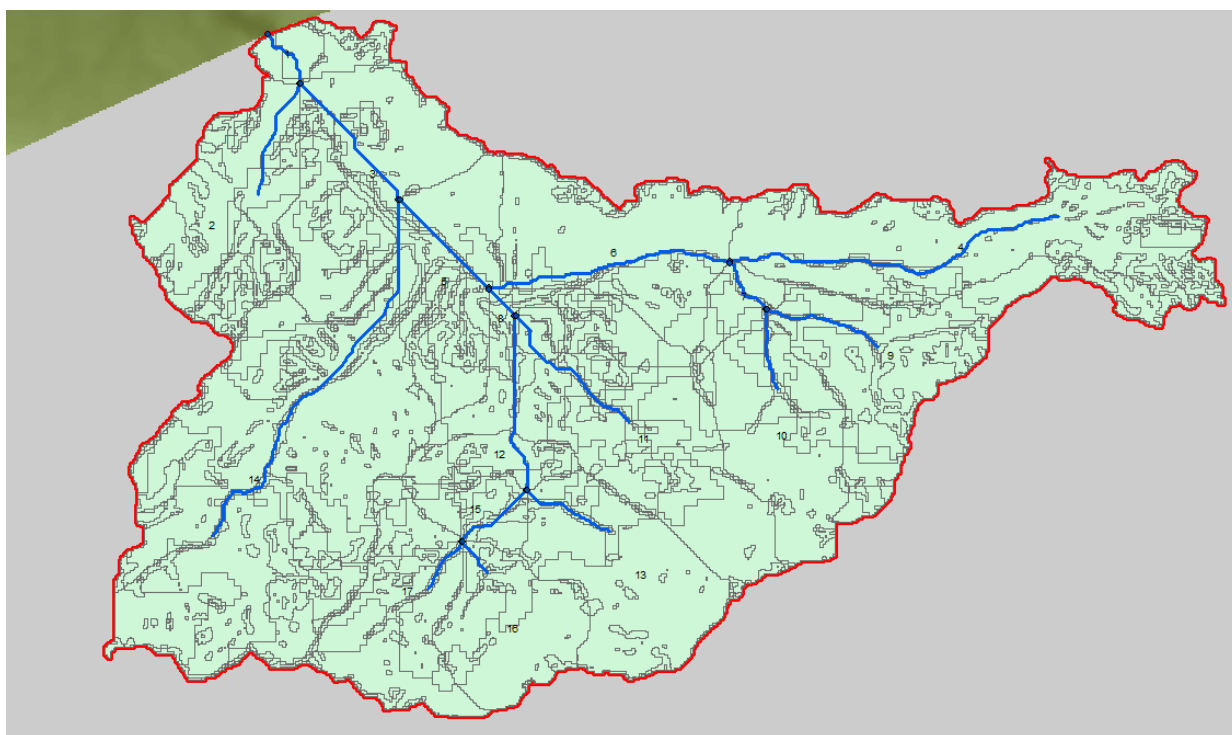
4.1.Πρόγραμμα –Δεδομένα Εισόδου

Για την υλοποίηση της μοντελοποίησης χρησιμοποιήθηκε η έκδοση του Arc Map 10, Service Pack 5 (Build 4400) και η έκδοση του SWAT 2012.10_0.15. Σε πρώτο επίπεδο εισήχθησαν δεδομένα όπως ο τοπογραφικός και ο εδαφολογικός χάρτης της λεκάνης απορροής καθώς και ο χάρτης χρήσεων γης, και στη συνέχεια οι ημερήσιες μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασιακές μετρήσεις καθώς και οι βροχομετρικές μετρήσεις των σταθμών από το 1970 έως το 2009. Με τη χρήση των παραπάνω δεδομένων το υδρολογικό μοντέλο που χρησιμοποιείται στην παρούσα μελέτη, SWAT, μοντελοποιεί την ταχύτητα του ανέμου, ηλιακή ακτινοβολία και σχετική υγρασία για τις χρονιές αυτές και χωρίζει τη λεκάνη απορροής σε 4 διαφορετικές κλίσεις εδάφους (%). Κατά τον τρόπο αυτό η λεκάνη χωρίζεται σε επιμέρους υπολεκάνες και σε HRUs (Hydrologic-Response Units) τα οποία είναι ο συνδυασμός τύπου εδάφους, χρήσης γης και κλίσης. Η έκταση της λεκάνης που μοντελοποιήθηκε είναι 94, 2 km² και χωρίστηκε σε 17 υπολεκάνες και 109 HRUs. Στην εικόνα 20 απεικονίζονται όλες οι υπολεκάνες της λεκάνης απορροής του φράγματος Ποταμών.



Εικόνα 20:Προσδιορισμός των υπολεκανών της λεκάνης απορροής

Η εικόνα 21 παρουσιάζει την πλήρη κατανομή των HRUs όπως αποτυπώθηκε από το πρόγραμμα SWAT.



Εικόνα 21: Η πλήρης κατανομή των HRUs μετά την κατηγοριοποίηση του SWAT

4.2.Βαθμονόμηση – Επαλήθευση μοντέλου

Η βαθμονόμηση (calibration) ενός μοντέλου επιτυγχάνεται με τη μεταβολή των τιμών των διαφόρων παραμέτρων του μοντέλου, μέχρι οι τιμές των προβλέψεων του μοντέλου καθώς και του αντίστοιχου πεδίου να συγκλίνουν σε ικανοποιητικό βαθμό. Οι παράμετροι οι οποίες κατά κύριο λόγο μεταβάλλονται είναι εκείνες οι οποίες χαρακτηρίζονται ως οι πιο ευαίσθητες, δηλαδή αυτές οι οποίες προκαλούν έντονες διαφοροποιήσεις παίρνοντας διαφορετικές τιμές, καθώς και εκείνες που εμπεριέχουν το μεγαλύτερο βαθμό αβεβαιότητας. Αναφερόμενοι στο τελευταίο είδος παραμέτρων εννοούνται οι παράμετροι οι οποίες δεν έχουν κάποια ικανοποιητική φυσική ερμηνεία, ούτε ικανοποιητικού βαθμού μέτρηση στο πεδίο.

Στη μελέτη του φράγματος Αμαρίου, επιλέχθηκε χειροκίνητη βαθμονόμηση του μοντέλου με μεταβολή σε παραμέτρους που παίζουν σημαντικό ρόλο στην προσομοίωση των υδρολογικών μεγεθών με στόχο την ελαχιστοποίηση του σφάλματος των προβλέψεων του μοντέλου καθώς και των παρατηρούμενων μετρήσεων. Το εύρος των παραμέτρων αυτών προέρχεται από την διεθνή βιβλιογραφία (Arabi et al., 2008, Lenhart et al. 2002, Shanti et al. 2001, Van Griensven et al.2006)

Στη χειροκίνητη βαθμονόμηση συντελείται μια μεταβολή τη φορά η οποία συνοδεύεται από γραφική και στατιστική σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων αποτελεσμάτων στο ποτάμι(trial and error process). Παρόλο που είναι υποκειμενική και χρονοβόρα, η χειροκίνητη βαθμονόμηση αποτελεί έναν αποτελεσματικό τρόπο να ελεγχθεί ο τρόπος μεταβολής των πιο ευαίσθητων και αβέβαιων παραμέτρων (Engel et al. 2007). Σε γενικές γραμμές είναι δύσκολο να προσδιοριστεί η βέλτιστη βαθμονόμηση , καθώς και το σημείο στο οποίο πρέπει να τερματιστεί η διαδικασία, το οποίο έχει ως συνέπεια από κάθε χρήστη να προκύπτει ένα διαφορετικό αποτέλεσμα (Wheater 2002).

Η ανάπτυξη της αυτόματης βαθμονόμησης υδρολογικών μοντέλων επήλθε με σκοπό την επιτάχυνση της βαθμονόμησης αλλά και της ανάπτυξης μιας σταθερής και αξιόπιστης εκτίμησης των παραμέτρων περιορίζοντας την υποκειμενικότητα της ανθρώπινης κρίσης που υπάρχει στη χειροκίνητη βαθμονόμηση (Boyle et al. 2000).

Η διαδικασία της αυτόνομης βαθμονόμησης ακολουθεί μια σειρά βημάτων όπως: την επιλογή της αντικειμενικής συνάρτησης, τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης τα κριτήρια τερματισμού της διαδικασίας και τα δεδομένα βαθμονόμησης. Η αυτόματη βαθμονόμηση έχει ως στόχο να προσδιορίσει τις τιμές σύμφωνα με τις οποίες βελτιστοποιείται η αριθμητική τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης.(Schaeffli & Gupta 2007).

Αναφερόμενοι στις αντικειμενικές συναρτήσεις, μια από τις πιο καθοριστικές είναι ο δείκτης NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency) σύμφωνα με τον οποίο γίνεται υπολογισμός του ποσοστού διακύμανσης των δεδομένων που χρησιμοποιούνται στο εκάστοτε μοντέλο (Nash-Sutcliffe 1970).

Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας της βαθμονόμησης λαμβάνει χώρα η διαδικασία της επαλήθευσης. Πιο συγκεκριμένα, τα δεδομένα πεδίου διαιρούνται σε δύο ή περισσότερες χρονοσειρές ούτως ώστε η μία από αυτές να χρησιμοποιηθεί για τη διαδικασία της βαθμονόμησης του μοντέλου και η άλλη για την επαλήθευση του. Αυτό αποτελεί ουσιαστικά μία μέθοδο εξακρίβωσης της αποτελεσματικότητας του μοντέλου ως προς την προσομοίωση των δεδομένων πεδίου τα οποία δε χρησιμοποιήθηκαν κατά την διάρκεια της βαθμονόμησης.

Στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται οι παράμετροι του μοντέλου SWAT που μεταβλήθηκαν μέχρι για να γίνει η βαθμονόμηση.

α/α	Παράμετρος	Περιγραφή	Τυπικό εύρος στο SWAT	Εύρος τιμών στη λεκάνη απορροής
Παράμετροι δεδομένων : Soils(.sol)εισαγωγής				
1	SOL_AWC	Διαθέσιμη υγρασία Available water capacity in soil layer (mm H ₂ O/mm εδάφους)	0-1	1
2	SOL_K	Κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα Saturated hydraulic conductivity (mm/h)	0-2000	12
3	SOL_Z	Βάθος εδάφους Soil depth (mm)	0-3500	950
Πίνακας εισαγωγής δεδομένων Groundwater (.gw)				
4	GW_DELAY	Συντελεστής καθυστέρησης υπογείου νερού - Groundwater Delay time (days)	0-500	2
5	ALPHA_BF	Παράγοντας ύφεσης της παροχής του υπογείου νερού - Baseflow alpha factor (days)	0-1	0.01
6	GW_REVAP	Συντελεστής επανατροφοδότησης υπογείου νερού - Groundwater Revap coefficient	0.02-0.2	0.2
7	RCHRG_DP	Ποσοστό ποσότητας νερού που από τον αβαθή κατεισδύει στο βαθύ υδροφορέα - Deep aquifer percolation factor	0-1	0
8	GWQMIN	Ελάχιστο βάθος νερού στον αβαθή υδροφορέα για να επιστρέψει η ροή στην επιφάνεια – Threshold depth of water in the shallow aquifer required for return flow to occur (mm)	0-5000	5000
Πίνακας εισαγωγής δεδομένων,: Subbassin(.sub)				
9	CH_K1	Υδραυλική αγωγιμότητα από την επιφανειακή ροή προς το αλλούβιο - Effective hydraulic conductivity in tributary	0-300	300

		channel alluvium (mm/hr)		
10	TLAPS	Θερμοβαθμίδα – Temperature lapse rate °C/km	0-50	20
Πίνακας εισαγωγής δεδομένων HRU(.hru)				
11	HRU_SLP	Average slope steepness (m/m)	0-0.6	0.27
12	ESCO	Soil evaporation compensation factor	0-1	0.01
13	EPCO	Plant uptake compensation factor	0-1	1
Πίνακας εισαγωγής δεδομένων : Management(.Mgt)				
14	CN2	Initial SCS runoff curve number for moisture condition II	35-98	35
Πίνακας εισαγωγής δεδομένων General Data (.bsn)				
15	SFTMP	Θερμοκρασία Χιονόπτωσης Snowfall temperature (°C)	-5°C -5°C	-5
16	SMTMP	Θερμοκρασία που λιώνει το χιόνι Snow melt base temperature(°C)	-5°C -5°C	-5
17	SMFMX	Συντελεστής ρυθμού που λιώνει το χιόνι το θερινό ηλιοστάσιο Maximum melt rate for snow during the year (summer solstice) (mm H ₂ O /(°C *day))	0-10	4.5
18	SMFMN	Συντελεστής ρυθμού που λιώνει το χιόνι το χειμερινό ηλιοστάσιο Minimum melt rate for snow during the year (winter solstice) (mm H ₂ O /(°C *day))	0-10	1.5

Πίνακας 3: Παράμετροι του SWAT που μεταβλήθηκαν για να γίνει η βαθμονόμηση

4.3. Αποτελέσματα Μοντελοποίησης

Για την αξιολόγηση της μοντελοποίησης χρησιμοποιήθηκε ο δείκτης NSE (δείκτης αποδοτικότητας Nash-Sutcliffe Efficiency), η ποσοστιαία απόκλιση (Percent BIAS-PBIAS), ο λόγος του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (Root Mean Square-RMSE) και τέλος ο λόγος του μέσου τετραγωνικού σφάλματος προς την τυπική απόκλιση των μετρήσεων (Root Mean Square Error-Standard deviation of measured data Ratio-RSR). Γενικότερα οι στατιστικοί δείκτες χρησιμοποιούνται από τους υδρολόγους για την εκτίμηση των βελτιώσεων κατά τη βαθμονόμηση του μοντέλου, για την ποσοτική εκτίμηση της δυνατότητας του μοντέλου να αναπαράγει την παρελθοντική και μελλοντική συμπεριφορά του αντικειμένου του και τέλος για τη σύγκριση της εκάστοτε προσπάθειας μοντελοποίησης με προγενέστερες (Krause et al, 2005). Εκτός όμως από τις μοντελοποιημένες τιμές, οι μετρήσεις αποτελούν πηγή σφάλματος το οποίο είναι σημαντικό να λαμβάνεται υπόψη κατά τη στατιστική ανάλυση (Moriasi et al, 2007). Σύμφωνα με τους Moriasi et al (2007) διατυπώνονται οι δείκτες που αναφέρθηκαν αρχικά, αποτελώντας κριτήρια για την εκτίμηση των υδρολογικών μοντέλων. Οι δείκτες αναλυτικότερα:

➤ NSE

Ο δείκτης Nash-Sutcliffe εκτιμά τη σύγκλιση της προσομοιωμένης με την παρατηρούμενη χρονοσειρά, κανονικοποιεί τη διακύμανση των παρατηρήσεων και το εύρος τιμών του είναι $(-\infty, 1)$, με βέλτιστη τιμή τη μονάδα όταν οι παρατηρούμενες τιμές ταυτοποιούνται με τις προσομοιωμένες. Για την λήψη έμπιστων αποτελεσμάτων θεωρείται απαραίτητο να λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες από το 0, 5 ή ίσες. Ο τύπος από τον οποίο υπολογίζεται είναι:

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \right]$$

όπου,

O_i : η παρατηρούμενη χρονοσειρά

P_i : η προσομοιωμένη χρονοσειρά

\bar{O} : ο αριθμητικός μέσος όρος της παρατηρούμενης χρονοσειράς

n : το μήκος της χρονοσειράς

➤ PBIAS

Ο δείκτης PBIAS μετρά την τάση των προσομοιωμένων τιμών να είναι μεγαλύτερες ή μικρότερες από τις αντίστοιχες παρατηρούμενες και ταυτόχρονα προσδιορίζει τη μικρή αποδοτικότητα καθώς και την προγνωστική ικανότητα του μοντέλου (Gupta et al., 1999). Η βέλτιστη τιμή του δείκτη είναι το 0, οι τιμές οι οποίες είναι κοντά στο 0 προσδίδουν επιτυχή και ακριβή προσομοίωση σε αντίθεση με τις τιμές οι οποίες είναι μεγαλύτερες από αυτό υποδηλώνοντας ότι το μοντέλο έχει την τάση να υποεκτιμά τις πραγματικές τιμές των μεταβλητών, ενώ οι αρνητικές το αντίστροφο (Gupta et al., 1999). Αποδεκτές τιμές είναι αυτές που ορίζονται από -25% έως 25% (Moriasi et al, 2007). Ο τύπος από τον οποίο υπολογίζεται ο δείκτης είναι:

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i) * 100}{\sum_{i=1}^n (O_i)} \right] \%$$

όπου,

O_i : η παρατηρούμενη χρονοσειρά

P_i : η προσομοιωμένη χρονοσειρά

➤ RMSE & RSR

Ο δείκτης RMSE, μέσο υπολειμματικό σφάλμα είναι ένας από τους πιο συχνά χρησιμοποιούμενους στατιστικούς δείκτες, ο οποίος λαμβάνοντας μικρές τιμές υποδηλώνει την καλή αποδοτικότητα του μοντέλου (Moriasi et al. 2007). Σε συνδυασμό με το δείκτη RSR γίνεται αξιολόγηση του μοντέλου, καθώς οι τιμές που υπολογίζονται από το στατιστικό αυτό δείκτη εξαρτάται από την κλίμακα των μεγεθών στα οποία αναφέρεται (Singh et al. 2004). Ο δείκτης RSR μεταβαλλόμενος από την τιμή 0, αντιστοιχεί είτε σε μηδενική τιμή του RMSE ή μηδενική απόκλιση των σφαλμάτων, το οποίο σημαίνει ότι η προσομοίωση είναι επιτυχής, στο βέλτιστο βαθμό. Γενικότερα όσο μικρότερο είναι το RSR τόσο μικρότερος είναι ο δείκτης RMSE, άρα τόσο καλύτερη η προγνωστική ικανότητα του μοντέλου. Οι τιμές του έχουν εύρος από 0 έως 1 με το 0 να είναι η καλύτερη εκτίμηση ενώ το 0, 7 είναι κατώφλι επάρκειας (Moriasi et al. 2007). Ο τύπος από τον οποίο υπολογίζεται ο δείκτης είναι:

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV} = \left[\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}} \right]$$

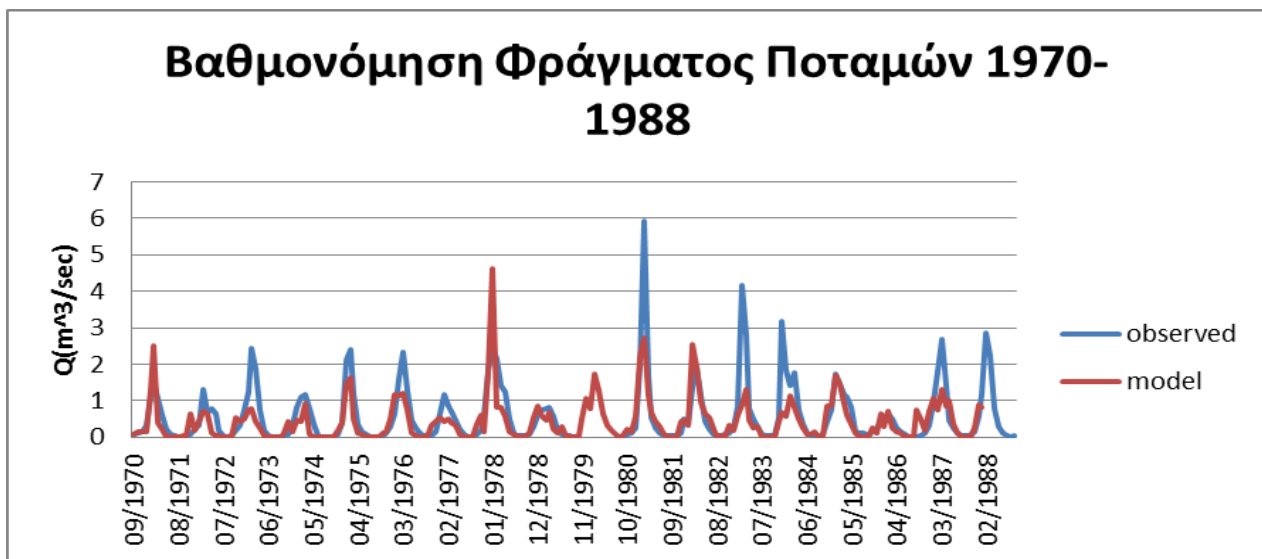
όπου,

O_i : η παρατηρούμενη χρονοσειρά

P_i : η προσομοιωμένη χρονοσειρά

\bar{O} : ο αριθμητικός μέσος όρος της παρατηρούμενης χρονοσειράς

Τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης παρουσιάζονται στο διάγραμμα 11. Το διαγραμμα συγκρίνει τις προσομοιωμένες με τις παρατηρούμενες παροχές για την πρώτη χρονοσειρά η οποία μελετάται, δηλαδή την χρονική περίοδο 1970-1988. Με τη βοήθεια του γραφήματος μπορεί να γίνει εύκολα αντιληπτό ότι υπάρχει πολύ ικανοποιητική προσομοίωση των παροχών του πεδίου με τις παροχές του μοντέλου.



Διάγραμμα 11: Προσομοιωμένες και παρατηρημένες παροχές για την πρώτη χρονοσειρά την οποία μελετάμε με διαθέσιμα δεδομένα

Η προσομοίωση καθίσταται δυνατό να αξιολογηθεί ως ικανοποιητική από τους στατιστικούς δείκτες οι οποίοι υπολογίστηκαν για την περίοδο της βαθμονόμησης . Οι τιμές των δεικτών οι οποίες προέκυψαν από τη διαδικασία της μοντελοποίησης (Πίνακας 4) συγκρίνονται με τις πρότυπες τιμές για τους αντίστοιχους δείκτες οι οποίες έχουν οριστεί από το Moriasi (Moriasi et al.2007) (Πίνακας 5).

Performance Rating	RSR	NSE	Stream flow
Very Good	$0.00 \leq RSR \leq 0.50$	$0.75 \leq NSE \leq 1.00$	$PBIAS < \pm 10$
Good	$0.50 \leq RSR \leq 0.60$	$0.65 \leq NSE \leq 1.00$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$
Satisfactory	$0.60 \leq RSR \leq 0.70$	$0.50 \leq NSE \leq 0.65$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$
Unsatisfactory	$RSR > 0.70$	$NSE \leq 0.50$	$PBIAS \geq \pm 25$

Πίνακας 4: Πρότυπες τιμές δεικτών βάσει Moriasi, για την αξιολόγηση της βαθμονόμησης ενός μοντέλου

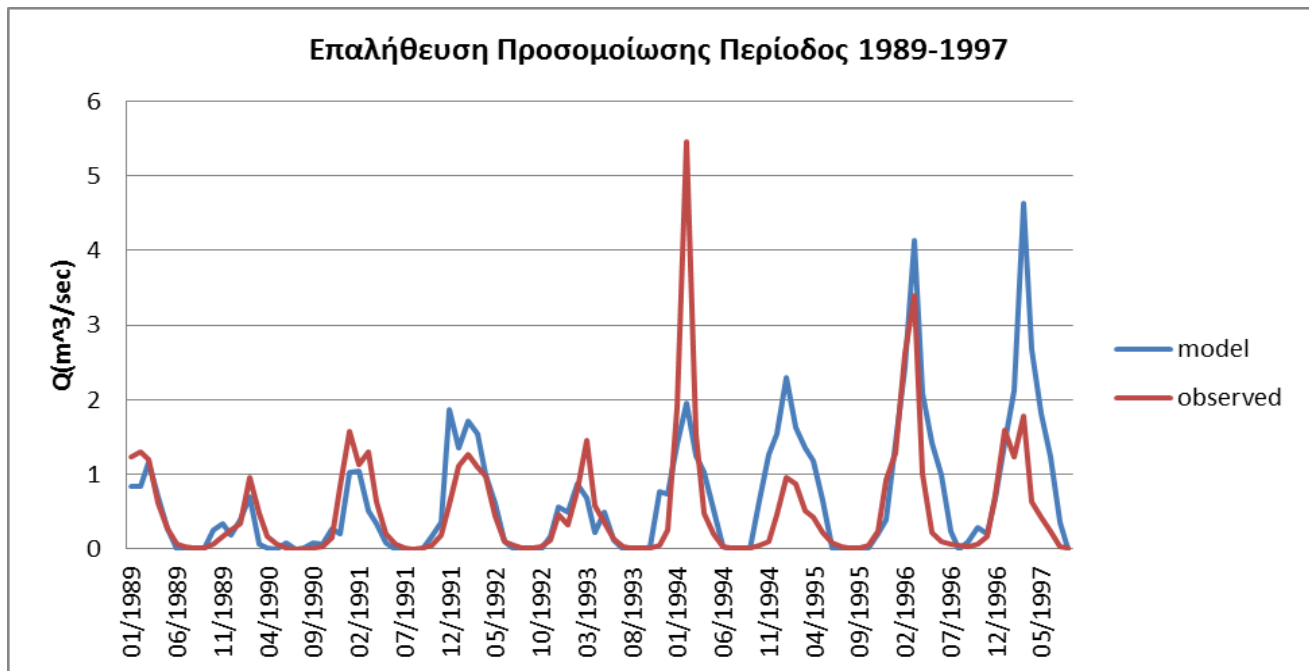
Δείκτης	Τιμή	Αξιολόγηση τιμών βάσει Moriasi
RMSE	0.60	Αρκετά ικανοποιητικό
NSE	0.49	Μη ικανοποιητικό
PBIAS	19.18	Αρκετά ικανοποιητικό
RSR	0.70	Αρκετά ικανοποιητικό

Πίνακας 5: Αξιολόγηση προσομοίωσης παροχής με χρήση στατιστικών δεδομένων της περιόδου 1970-1988

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η χρονοσειρά βαθμονόμησης επιλέχθηκε να είναι η περίοδος 1970 – 1998. Τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης ήταν πολύ καλά, όπως φανερώνουν και οι ακόλουθοι στατιστικοί δείκτες, $NSE=0.49$, $PBIAS=19.18$, $RSR=0.70$ και $RMSE=0.60$. Πιο συγκεκριμένα το γεγονός ότι ο δείκτης NSE λαμβάνει αυτή την τιμή δείχνει ότι η σύγκλιση της προσομοιωμένης με την παρατηρούμενη χρονοσειρά δεν είναι ικανοποιητική, το οποίο όμως μπορεί να δικαιολογηθεί σε ένα σύστημα μη γραμμικό, όπως αυτό το οποίο χρησιμοποιούμε. Ο δείκτης PBIAS εκτιμά ότι δεν υπάρχει τόσο μεγάλη τάση των προσομοιωμένων τιμών να είναι κατά πολύ μικρότερες από τις αντίστοιχες παρατηρούμενες, επιβεβαιώνοντας κατά τον τρόπο αυτό την αποδοτικότητα και την ικανοποιητική προγνωστική ικανότητα του μοντέλου. Σχετικά με τους δείκτες RMSE και RSR λόγω των αρκετά ικανοποιητικών τιμών τους, πιστοποιούν την αποδοτικότητα και την προγνωστική ικανότητα που έχει το μοντέλο.

Από το διάγραμμα 11 φαίνεται ότι το μοντέλο προσομοιώνει αρκετά καλά τη βασική παροχή, εκτός από τις ακραίες παροχές όπως τα έτη 1980 και 1982, 1983 που έχουν μετρηθεί υψηλότερες παροχές από τις προσομοιωμένες. Αυτό σημαίνει ότι η δεν δίνει σωστές παροχές σε περιόδους έντονων βροχοπτώσεων, ή τα δεδομένα του πεδίου δεν είναι σωστά, το οποίο μπορεί να αποδίδεται στο γεγονός ότι οι μηνιαίες μετρήσεις για τα δεδομένα του πεδίου δεν έγιναν με απόλυτη συνέπεια (ισαπέχουσες χρονικές περιόδους), ή ακόμα κάποιες από αυτές πιθανώς έχουν παραλειφθεί.

Ακολουθώς γίνεται η επαλήθευση της βαθμονόμησης του μοντέλου του φράγματος Ποταμών με τις ίδιες ακριβώς τιμές των παραμέτρων οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στη βαθμονόμηση ούτως ώστε να διαπιστωθεί αν το μοντέλο προσομοιώνει αρκετά καλά τη βασική παροχή και στην επόμενη περίοδο (1989-1997) από αυτή στην οποία έγινε η βαθμονόμηση. Μέσω του γραφήματος 12 γίνεται κατανοητό ότι η προσομοίωση της υδρολογίας της υπό μελέτη λεκάνης απορροής είναι πολύ ικανοποιητική καθώς και στην περίοδο επαλήθευσης οι τιμές που προκύπτουν από τη βαθμονόμηση του μοντέλου συγκλίνουν με τις ήδη παρατηρούμενες τιμές.

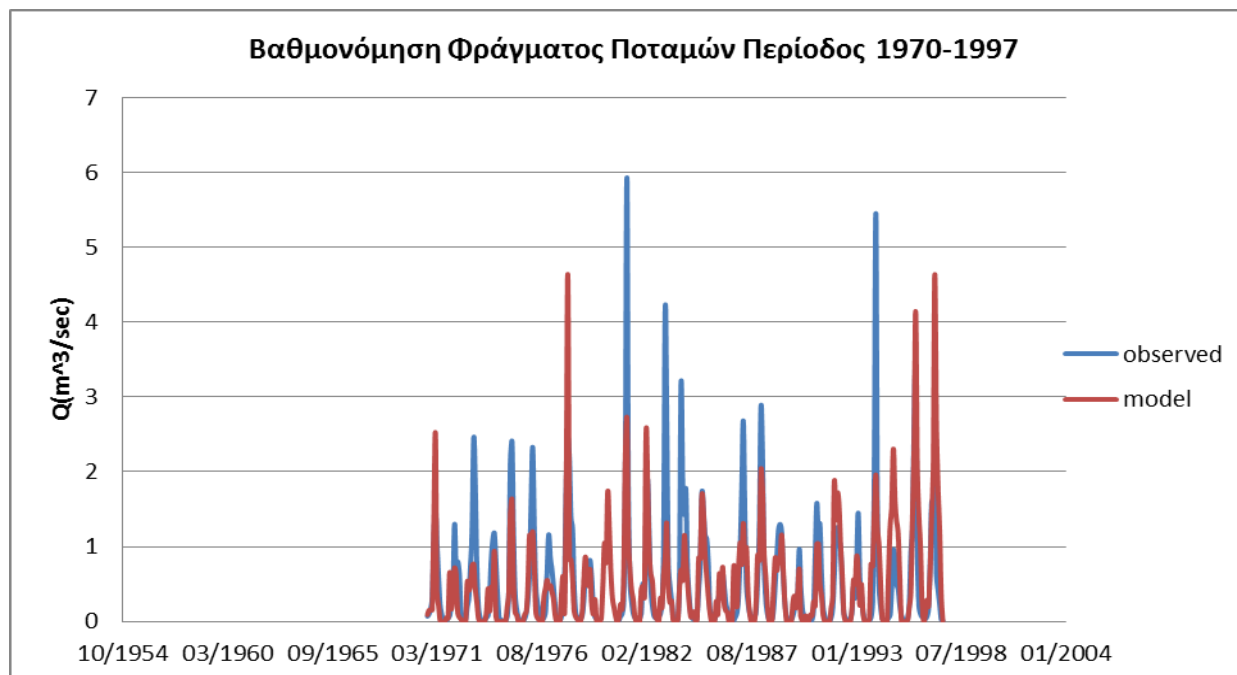


Διάγραμμα 12: Προσομοιωμένες και παρατηρημένες παροχές για το Φράγμα Ποταμών, περίοδος επαλήθευσης (1989-1997).

Δείκτης	Τιμή	Αξιολόγηση τιμών
RMSE	0.62	Αρκετά ικανοποιητικό
NSE	0.26	Μη ικανοποιητικό
PBIAS	-22	Ικανοποιητικό
RSR	1.09	Μη Ικανοποιητικό

Κατά την αξιολόγηση της περιόδου επαλήθευσης βάσει των δεικτών Moriasi, είναι εμφανές ότι οι δείκτες RMSE και RSR είναι μη ικανοποιητικοί υποδηλώνοντας ότι το μοντέλο σε αυτή την περίοδο δεν προσομοιώνει τόσο καλά τις πραγματικές τιμές. Αυτό που αξίζει να αναφερθεί είναι ότι την παρούσα χρονική περίοδο οι τιμές δεδομένων είναι ελλιπείς ενώ ταυτόχρονα κάποιες από αυτές δεν

έγιναν σε ισαπέχουσες χρονικές περιόδους με αποτέλεσμα να είναι φυσιολογική η εικόνα της προσομοίωσης.



Διάγραμμα 13: Προσομοιωμένες και παρατηρημένες παροχές για το Φράγμα Ποταμών, , περίοδος (1970-1997).

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 13, υπάρχει μια αρκετά ικανοποιητική προσομοίωση των τιμών του πεδίου με τις τιμές του μοντέλου στην περίοδο 1970 – 1997. Η προσομοίωση της βασικής παροχής είναι αρκετά ικανοποιητική τις περισσότερες χρονιές, κάποιες είναι λίγο χαμηλότερη. Επίσης οι ακραίες τιμές σε ορισμένες χρονικές περιόδους που δίνονται από τις μετρήσεις του πεδίου, δεν προσομοιώνονται πολύ καλά από το μοντέλο όπου στην προκειμένη περίπτωση το τελευταίο δίνει χαμηλότερες τιμές από αυτές του πεδίου. Αυτό όπως έχει ήδη αναφερθεί αποδίδεται σε διαφορετικούς εξωτερικούς παράγοντες όπως για παράδειγμα έντονες βροχοπτώσεις τη συγκεκριμένη περίοδο, λανθασμένη καταγραφή μετρήσεων ή παράλειψη αυτών.

Δείκτης	Τιμή	Αξιολόγηση τιμών βάσει Moriasi
RMSE	0.61	Αρκετά ικανοποιητικό
NSE	0.61	Ικανοποιητικό
PBIAS	4.36	Πολύ Καλό
RSR	0.63	Ικανοποιητικό

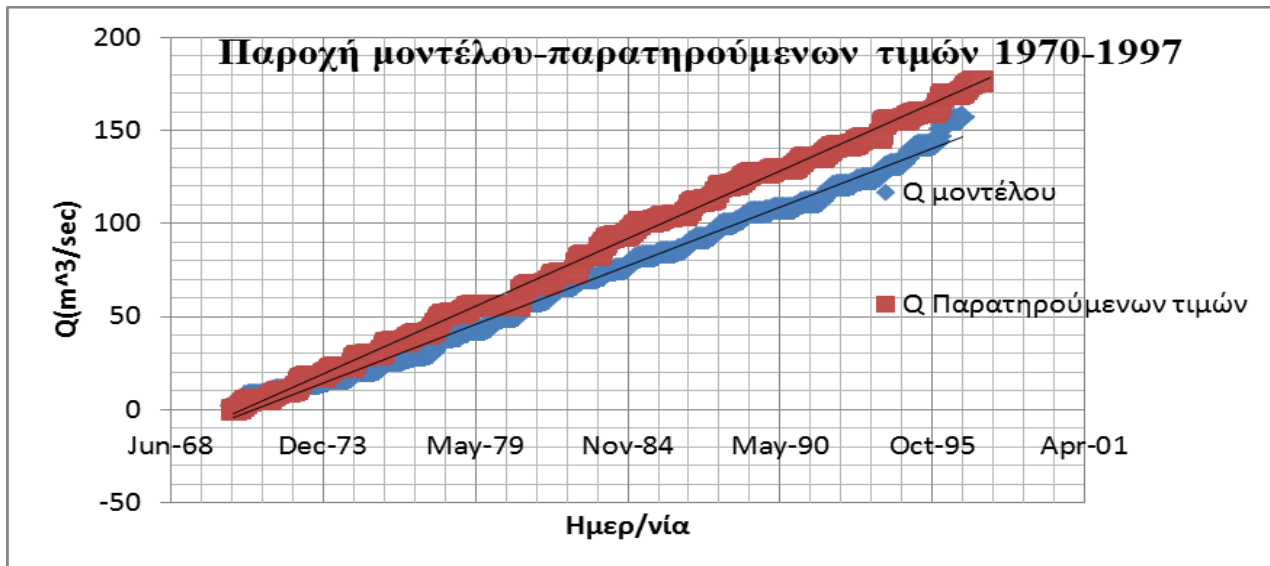
Πίνακας 6: Αξιολόγηση προσομοίωσης παροχής με χρήση στατιστικών δεδομένων της περιόδου 1970-1997

Στον Πίνακα 6, διαπιστώνεται ότι και στην περίοδο επαλήθευσης αλλά και στο σύνολο της περιόδου η οποία μελετάται, η προσομοίωση είναι αρκετά ικανοποιητική καθώς οι δείκτες παίρνουν τιμές οι οποίες

είναι εξίσου ικανοποιητικές. Πιο συγκεκριμένα ο δείκτης PBIAS είναι πολύ καλός, επιβεβαιώνοντας της αποδοτικότητα και την προγνωστική ικανότητα του μοντέλου, οι δείκτες NSE και RSR είναι ικανοποιητικοί πιστοποιώντας τη μεγάλη σύγκλιση μεταξύ της προσομοιωμένης με την παρατηρούμενη χρονοσειρά, ενώ ο δείκτης RMSE είναι αρκετά ικανοποιητικός.



Διάγραμμα 14: Συσχέτιση παρατηρούμενων τιμών παροχής με τις τιμές που προκύπτουν μέσω του μοντέλου

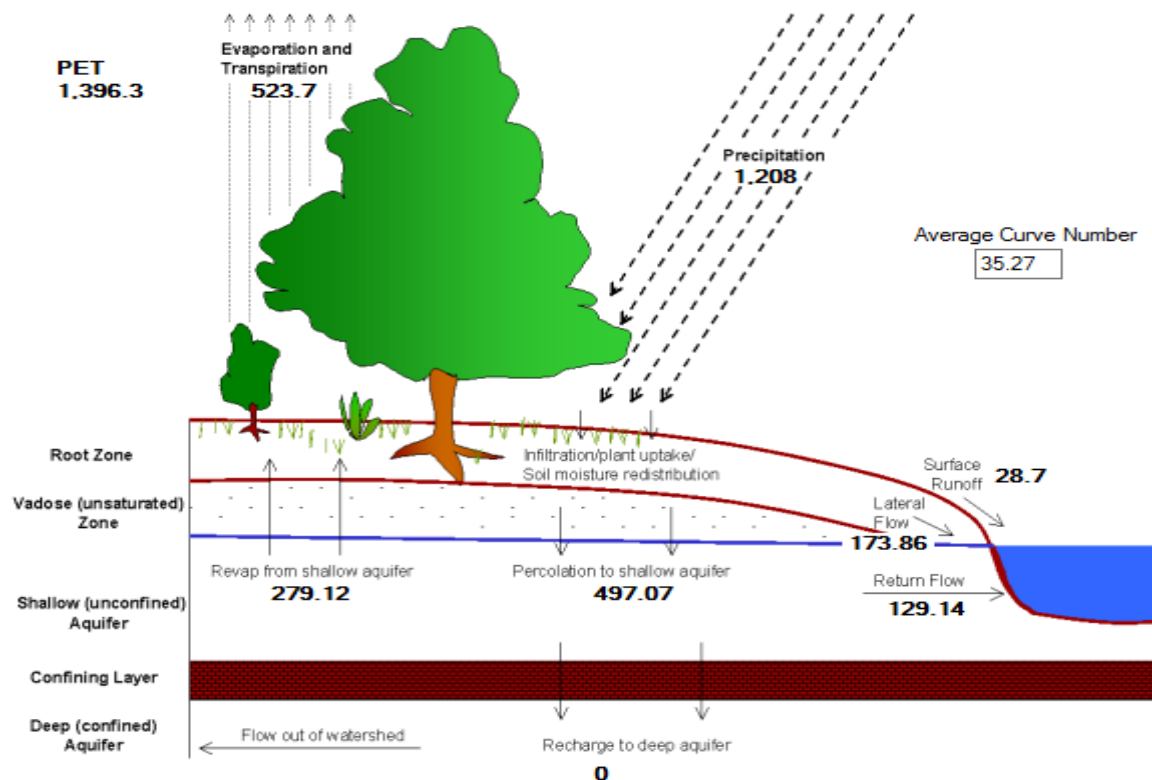


Διάγραμμα 15: Τιμές παροχής μοντέλου, Παροχή παρατηρούμενων τιμών ως προς το χρόνο

Στο γράφημα 14 γίνεται σύγκριση των παροχών του πεδίου με τις παροχές του μοντέλου ούτως ώστε να επιβεβαιωθεί η σύγκλιση μεταξύ των τιμών τους την περίοδο 1970 – 1997. Όπως φαίνεται οι τιμές αν και δεν ταυτοποιούνται πλήρως, σε γενικές γραμμές συγκλίνουν σε μεγάλο βαθμό στα περισσότερα σημεία. Στη συνέχεια με τη βοήθεια του γραφήματος 15 γίνεται σύγκριση των ίδιων τιμών συναρτήσει του χρόνου, διαπιστώνοντας ότι οι τιμές του μοντέλου προσεγγίζουν τις παρατηρούμενες τιμές στο μεγαλύτερο διάστημα, ενώ υπάρχει μία σχετικά μικρή απόκλιση από το 1985 μέχρι το τέλος της περιόδου. Το τελευταίο είναι απόλυτα φυσιολογικό δεδομένου ότι κάποιες από τις τιμές του πεδίου πιθανώς να μην έγιναν τη σωστή χρονική περίοδο, ή ακόμα να υπήρχαν έντονα φαινόμενα βροχοπτώσεων που ελαφρώς τις επηρέασαν. Παρόλα αυτά και από τα δύο γραφήματα γίνεται κατανοητό ότι το μοντέλο προσομοιώνει πολύ καλά τις τιμές του πεδίου, καθώς οι αποκλίσεις δεν είναι τόσο μεγάλες. Στον πίνακα 7 απεικονίζονται οι τιμές του υδατικού ισοζυγίου της υδρολογικής λεκάνης του φράγματος Ποταμών.

Υδατικό ισοζύγιο φράγματος ποταμών Αμαρίου	
Παράμετρος	Τιμή (mm)/year
Βροχόπτωση	1.208
Εξατμισοδιαπνοή	524
Επανατροφοδότηση από το ρηχό υδροφορέα	279
Κατείσδυση στο ρηχό υδροφορέα	497
Πλάγια Ροή	174
Βασική Ροή	129
Επιφανειακή απορροή	29

Πίνακας 7: Τιμές υδατικού ισοζυγίου της υδρολογικής λεκάνης του φράγματος Ποταμών



Εικόνα 22: Απεικόνιση του υδατικού ισοζυγίου του φράγματος ποταμών Αμαρίου όπως αποτυπώνεται από το SWAT

Στην εικόνα 22 απεικονίζεται το υδατικό ισοζύγιο του φράγματος Ποταμών, όπως αποτυπώθηκε από το μοντέλο SWAT.

Όπως διαμορφώνεται το υδατικό ισοζύγιο διαπιστώνεται ότι η κατακρήμνιση ανέρχεται σε 1.208 mm/year, από αυτό 173.86 (mm/year) δηλαδή 0.21 (Mm³/year) καταλήγουν στη λεκάνη μέσω πλάγιας ροής (lateral flow), 497.07 mm/year κατεισδύουν στο ρηχό υδροφορέα, δηλαδή απορροφώνται στο έδαφος στο οποίο φτάνουν μέσω της βλάστησης. Η ποσότητα του ύδατος που απορρέει στην έξοδο της λεκάνης είναι 129 mm/year, περίπου 0.21 (Mm³/year), ενώ η ποσότητα νερού που απομένει επιστρέφει στην επιφάνεια, μέσω του ρηχού υδροφορέα από όπου και εξατμίζεται. Σε θεωρητικό επίπεδο ένα μέρος αυτής της ποσότητας ύδατος κατεισδύει στον βαθύ υδροφορέα (deep aquifer) και χάνεται από το σύστημα, όμως στην παρούσα μελέτη λόγω της σύστασης των εδαφών θεωρείται ότι δεν κατεισδύει ύδωρ σε αυτόν, γεγονός το οποίο ευνοεί την αποθήκευση ύδατος στον ταμιευτήρα καθώς χάνεται μικρότερη ποσότητα νερού.

Η ποσότητα του νερού που δεν απορροφάται από το έδαφος, ρέει πάνω σε αυτό και απορρέει στη λεκάνη απορροής, λεγόμενη ως επιφανειακή απορροή 28.7 mm/year δηλαδή περίπου 0.046 Mm³/year. Η εναπομείνουσα ποσότητα ύδατος πάνω στο έδαφος καθώς και στην επιφάνεια των φυτών (διαπνοή) εξατμίζεται. Η συνολική ποσότητα νερού που καταλήγει στην υδρολογική λεκάνη είναι περίπου 332 mm/year, περίπου 0.53 Mm³/year, ποσότητα σχετικά ικανοποιητική δεδομένου ότι λόγω της έντονης

Παρατηρώντας το διάγραμμα 16 για το φράγμα ποταμών Αμαρίου το οποίο διαθέτει μέγιστο όγκο 22.5 εκ.μ³, διαπιστώνουμε ότι οι πιθανότητες να μην διατίθενται σε αυτό η αναφερόμενη ποσότητα ύδατος κάθε έτος είναι 80%, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι χρονικά δε θα μπορεί να συμπληρωθεί περίπου για 4 χρόνια λειτουργίας του ως προς μια πενταετή λειτουργία, αντίστοιχα δε θα μπορεί να γεμίζει σε αυτή την ποσότητα τα 8 από τα 10 χρόνια λειτουργίας του.

81

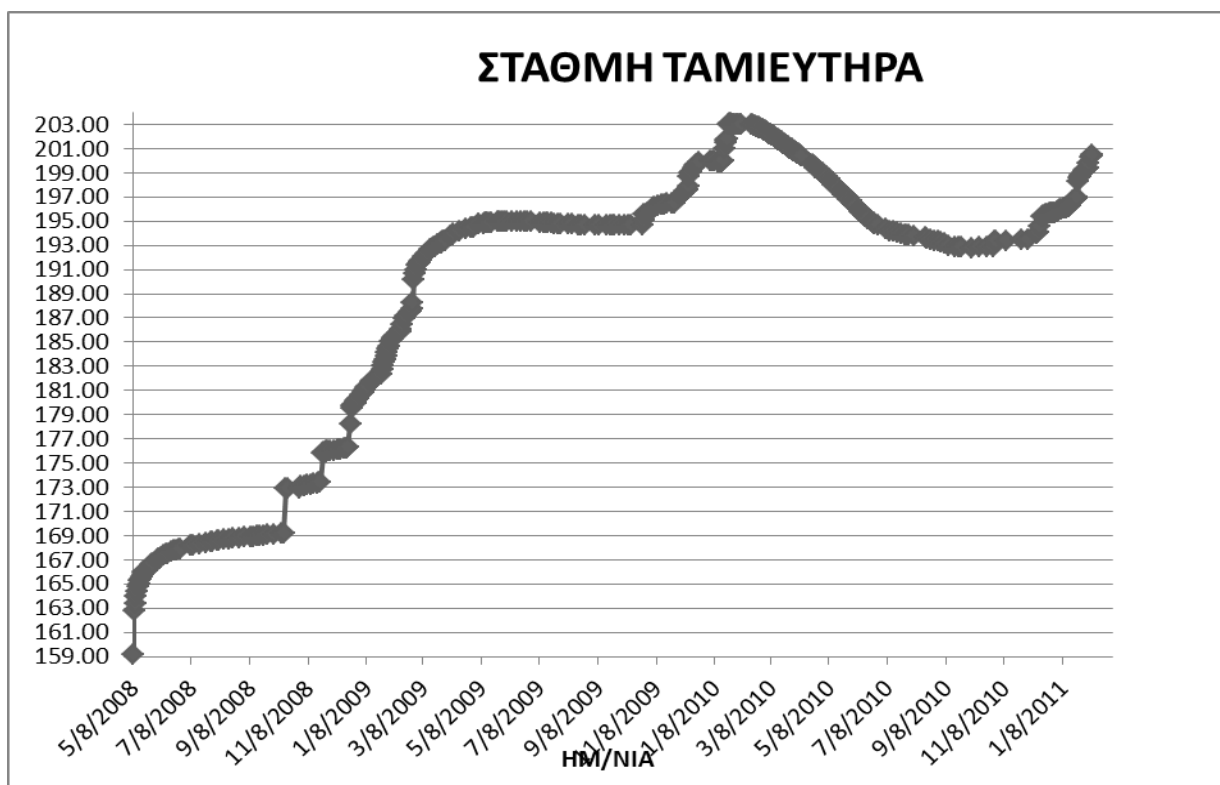
4.4. Αποτελέσματα προσομοίωσης ταμιευτήρα με τη χρήση του μοντέλου

Για την πλήρη εξακρίβωση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν όσον αφορά στον τρόπο προσομοίωσης του ταμιευτήρα με τη χρήση του τρέχοντος μοντέλου, χρησιμοποιούνται τα δεδομένα μιας ήδη υπάρχουσας μελέτης η οποία παραχωρήθηκε από την υπηρεσία Ο.Α.ΔΥ.Κ. (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΡΕΘΥΜΝΟΥ) εμπεριέχοντας στοιχεία για τον όγκο και τη στάθμη του ταμιευτήρα, από ημερήσιες μετρήσεις για τα έτη 2008 - 2009.

Παρατίθεται ο πίνακας 8 που παρουσιάζει τα δεδομένα της στάθμης καθώς και του όγκου του ταμιευτήρα.

Ημερ/νία	Όγκος Ταμιευτήρα /Μήνα(Mm^3) (Πηγή Ο.Α.ΔΥ.Κ.)	Μηνιαία Στάθμη(m)
05/2008	0	0.00
06/2008	177306	167.48
07/2008	233726	168.33
08/2008	257694	168.69
09/2008	276250	168.97
10/2008	434964	171.35
11/2008	855028	174.38
12/2008	1974774	177.84
01/2009	3822029	182.39
02/2009	6165129	187.08
03/2009	10159168	192.54
04/2009	11621990	194.11
05/2009	12343505	194.88
06/2009	12435738	194.98
07/2009	12311983	194.85
08/2009	12191730	194.72
09/2009	12142361	194.67
10/2009	12588779	195.13
11/2009	13743250	196.29
12/2009	15928583	198.48

Πίνακας 8: Απεικόνιση δεδομένων όγκου και στάθμης φράγματος ποταμών Αμαρίου (Πηγή: Ο.Α.ΔΥ.Κ.)



Διάγραμμα 17: Στάθμη ταμιευτήρα συναρτήσει του χρόνου (Πηγή: Ο.Α.ΔΥ.Κ.)



Διάγραμμα 18: Χωρητικότητα/όγκος ταμιευτήρα συναρτήσει της στάθμης του (Πηγή: Ο.Α.ΔΥ.Κ)

Στο διάγραμμα 17 παρουσιάζεται η στάθμη του ταμιευτήρα του οποίου μελετάται ως προς το χρόνο (2008 – 2011). Στη συνέχεια με τη βοήθεια του διαγράμματος 18 γίνεται κατανοητή η σχέση μεταξύ του όγκου νερού του ταμιευτήρα με τη στάθμη σύμφωνα με τις τιμές του Ο. Α . ΔΥ. Κ..

Με γνώμονα τα παραπάνω στοιχεία, καθώς και τα ήδη υπάρχοντα στοιχεία που έχουν προκύψει από το μοντέλο καθ'όλη τη διάρκεια της μελέτης του, είναι εφικτό να αξιολογηθεί η προσομοίωση του ταμιευτήρα στις αντίστοιχες περιόδους 2008-2009 . Η περίοδος αυτή αν και δεν εκπροσωπεί τη συνολική περίοδο λειτουργίας του ταμιευτήρα είναι ικανή να δώσει μια ολοκληρωμένη εικόνα και καθιστά ικανή την αξιολόγηση της προσομοίωσης του.

Στη συνέχεια (Πίνακας 9) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πιο βασικών παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση του ταμιευτήρα την χρονική περίοδο 2008 – 2009, ούτως ώστε να γίνει σύγκριση με τις αντίστοιχες παραμέτρους που παραχωρήθηκαν από τον Ο.Α.ΔΥ.Κ την ανάλογη χρονική περίοδο.

Date	V	Qin/month	P*A	PET*A	Qout(m ³ /mon)	Qirr final
05/2008	0	868873	33.44	223.0272	0	0
06/2008	3, 623	3916.512	0	293.168	0	0
07/2008	3, 290	0	0	333.5088	0	0
08/2008	3, 230	260.1262	0	320.2768	0	0
09/2008	88, 533	85484.16	47.68	228.5632	0	0
10/2008	282, 254	193862.6	23.2	165.1056	0	0
11/2008	612, 474	330220.8	122.08	122.4928	0	0
12/2008	1, 848, 352	1235546	392.16	60.0512	0	0
01/2009	3, 861, 885	2013353	238.4	58.6496	0	0
02/2009	6, 206, 650	2344447	370.88	52.6448	0	0
03/2009	9, 214, 463	3007843	95.04	125.2896	0	0
04/2009	10, 614, 303	1399939	72.16	171.8512	0	0
05/2009	11, 421, 717	807537.6	84.48	207.6224	0	0
06/2009	11, 573, 459	152046.7	0	305.1072	0	0
07/2009	11, 576, 514	3406.925	0	351.0816	0	0
08/2009	11, 576, 199	0	0	315.0064	0	0
09/2009	11, 954, 269	378172.8	115.52	218.2528	0	0
10/2009	12, 625, 210	670671.4	442.56	173.8912	0	0
11/2009	15, 396, 126	2770848	196.48	127.712	0	0
12/2009	17, 194, 548	1798278	232	88.0016	0	0

Πίνακας 9: Απεικόνιση δεδομένων που προέκυψαν από την προσομοίωση του ταμιευτήρα στις περιόδους 2008-2009

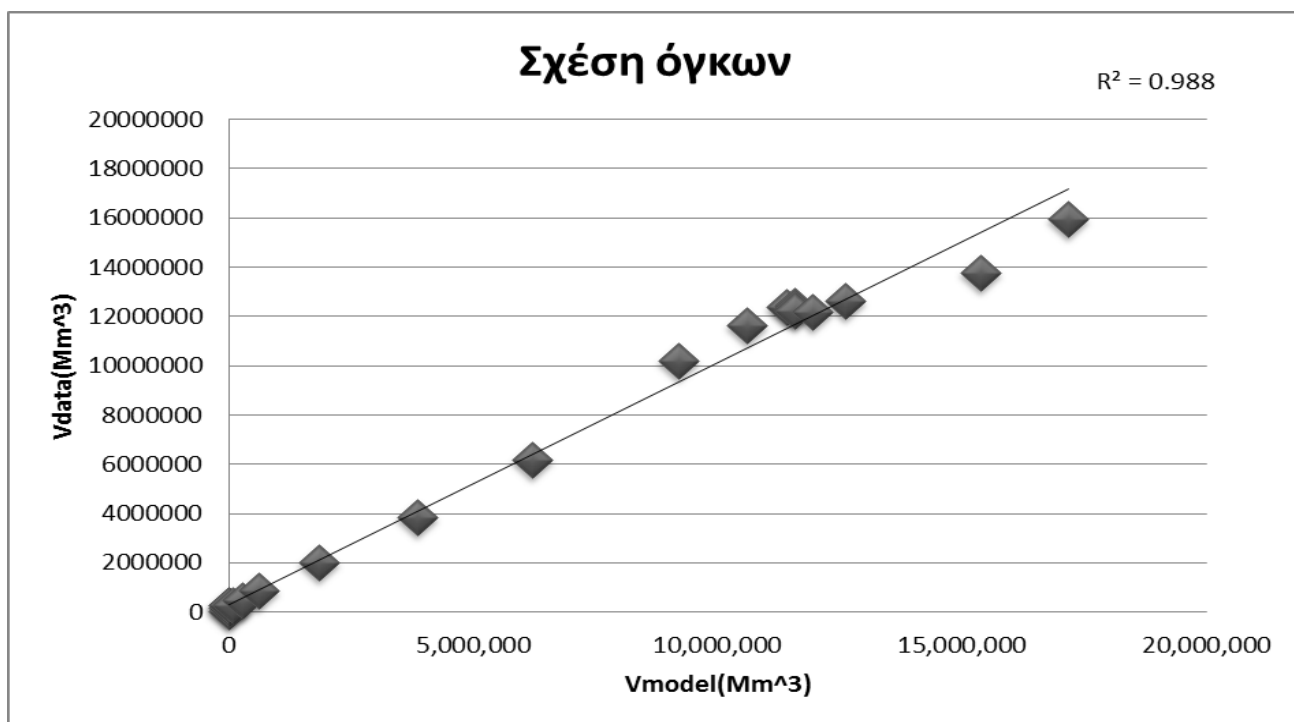
Όπως μπορεί εύκολα να γίνει αντιληπτό για να επιτευχτεί η σύγκριση των στοιχείων που προήλθαν από την υπηρεσία Ο.Α.ΔΥ.Κ., με εκείνα που προέκυψαν από το τρέχον μοντέλο της παρούσας μελέτης, κρίθηκε απαραίτητο να θεωρηθεί ότι ο ταμιευτήρας δεν προσφέρει νερό τόσο για την ενίσχυση του

δικτύου άρδευσης όσο και για την ενίσχυση του δικτύου ύδρευσης. Οποιαδήποτε εκροή/έξοδος καθώς και διαρροές ύδατος από τον ταμιευτήρα ελήφθησαν ως μηδενικές. Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικότερα τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

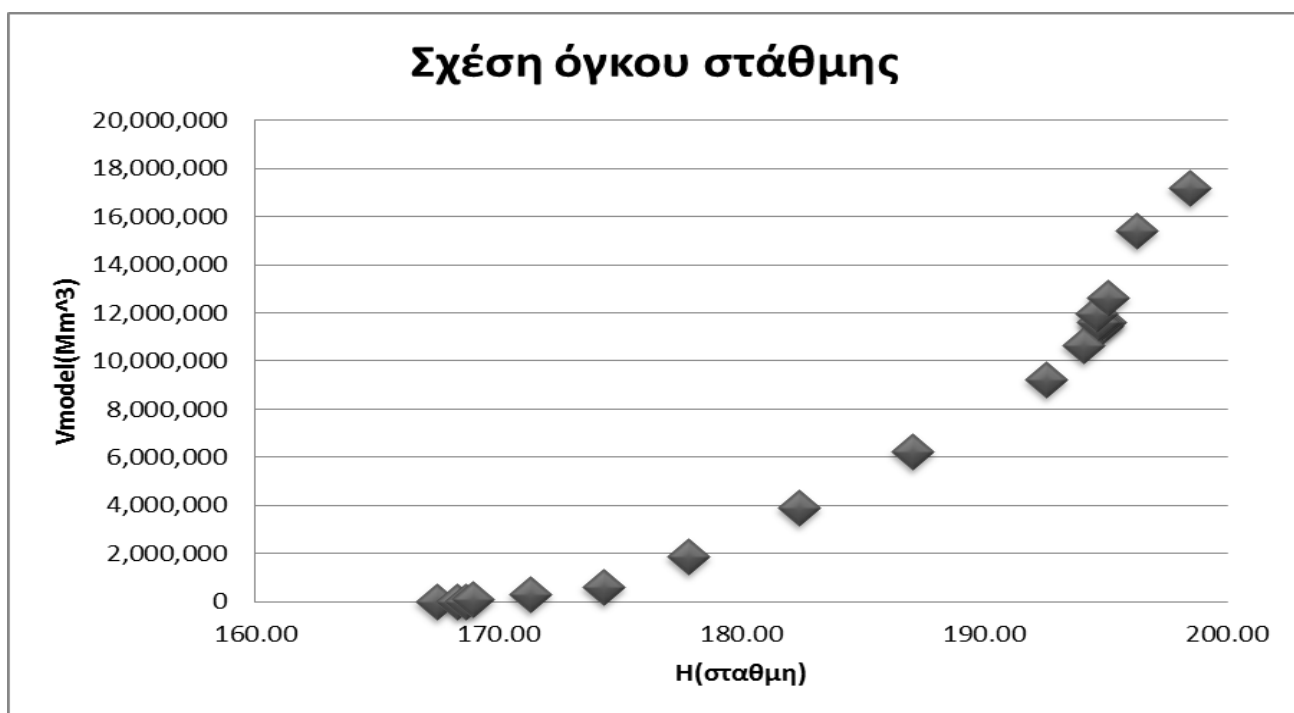


Διάγραμμα 19: Σχέση όγκου ταμιευτήρα του μοντέλου, όγκου ταμιευτήρα από πηγή Ο.Α.ΔΥ.Κ. συναρτήσει του χρόνου

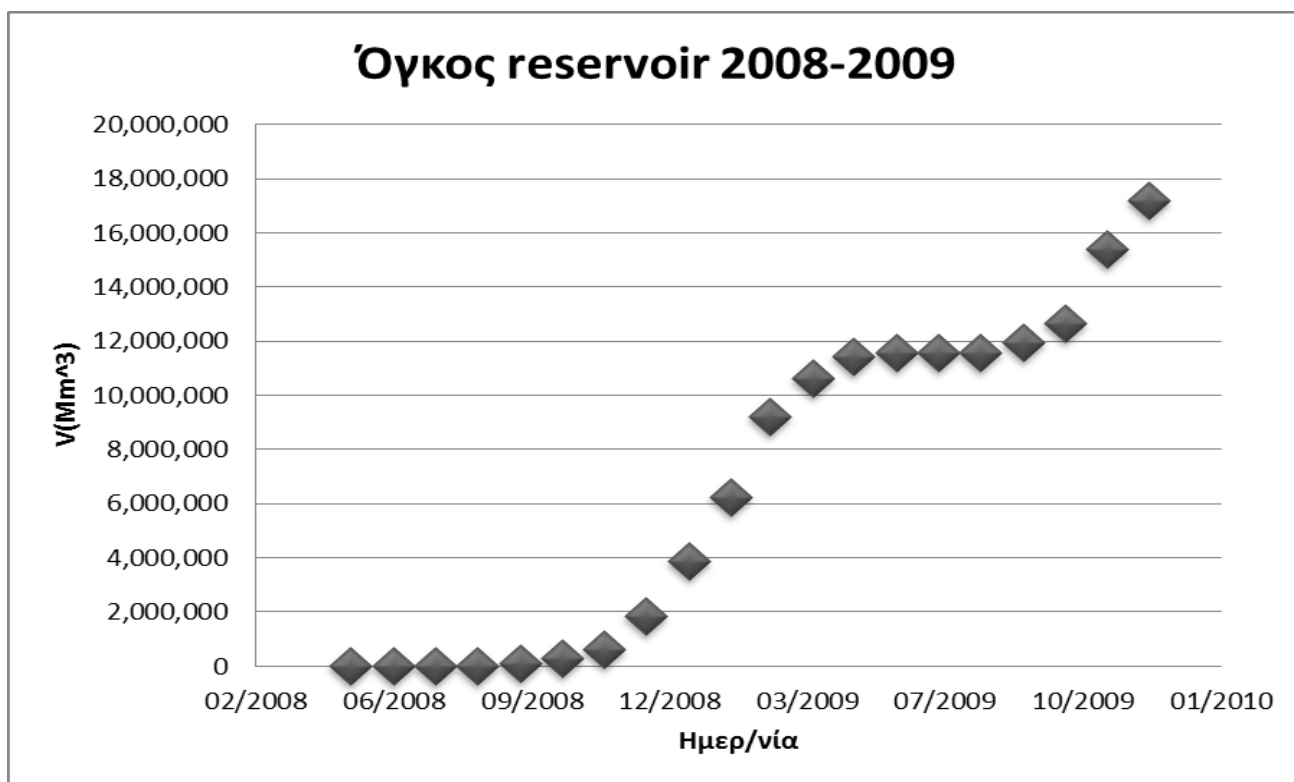
Στο διάγραμμα 19 παρουσιάζεται ο όγκος νερού μέσα στον ταμιευτήρα όπως προέκυψε από την προσομοίωση, καθώς και ο όγκος νερού μέσα στον ταμιευτήρα σύμφωνα με τις τιμές που δόθηκαν από τον Ο. Α. ΔΥ. Κ. την εξεταζόμενη χρονική περίοδο (2008 – 2009). Η χρήση του γραφήματος αποσκοπεί στην διαπίστωση της μεγάλης σύγκλισης των τιμών του μοντέλου με αυτές του πεδίου, οδηγώντας στο συμπέρασμα ότι η προσομοίωση του ταμιευτήρα έγινε επιτυχώς.



Διάγραμμα 20: Σχέση όγκου ταμιευτήρα από πηγή Ο.Α.ΔΥ.Κ. συναρτήσει του όγκου του ταμιευτήρα του μοντέλου



Διάγραμμα 21: Σχέση όγκου νερού του μοντέλου – στάθμης ταμιευτήρα



Διάγραμμα 22: Όγκος ταμιευτήρα συναρτήσει του χρόνου

Το γράφημα 20 απεικονίζει τη σχέση του όγκου του νερού μέσα στον ταμιευτήρα σύμφωνα με τις τιμές που προέκυψαν από την προσομοίωση του, σε σχέση με τον όγκο του νερού μέσα στο φράγμα βασισμένο στις τιμές που παραχωρήθηκαν από την πηγή Ο. Α. ΔΥ. Κ. Είναι ευδιάκριτο ότι τιμές και των δύο δεν αποκλίνουν κατά πολύ μεταξύ τους, το οποίο είναι αποτέλεσμα της εύστοχης προσομοίωσης του ταμιευτήρα μέσω του μοντέλου. Στη συνέχεια το διάγραμμα 21 παρουσιάζει τη σχέση του όγκου του νερού μέσα στο φράγμα όπως προέκυψε από την προσομοίωση, με τη στάθμη. Ανατρέχοντας στο διάγραμμα 18 το οποίο όπως έχει ήδη αναφερθεί συσχετίζει τις αντίστοιχες τιμές, με τη μόνη διαφορά ότι έχουν παραχωρηθεί από την πηγή και όχι από το τρέχον μοντέλο, βλέπουμε ότι η σχέση του όγκου με τη στάθμη και στις δύο περιπτώσεις έχει παρόμοια εικόνα. Τέλος στο γράφημα 22 παρουσιάζεται ο όγκος του ταμιευτήρα σύμφωνα με το μοντέλο προσομοίωσης για τη χρονική περίοδο 2008 – 2009.

Με τη χρήση των παραπάνω διαγραμμάτων διαπιστώνεται ότι τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το υπό μελέτη μοντέλο συμφωνούν πλήρως με τα στοιχεία που παρέχονται από την μελέτη της υπηρεσίας Ο.Α.ΔΥ.Κ. Κατά τον τρόπο αυτό πιστοποιείται η αξιοπιστία του μοντέλου, και του τρόπου προσομοίωσης του ταμιευτήρα στην παρούσα μελέτη.

Για ακόμα καλύτερη διαπίστωση της ευστοχίας της προσομοίωσης του ταμιευτήρα με τη χρήση του μοντέλου, κρίνεται αναγκαίος ο υπολογισμός σημαντικών δεικτών, NSE, RMSE, οι τιμές των οποίων είναι πολύ καλές όπως φαίνεται και στον πίνακα 10.

Δείκτης	Τιμή	Αξιολόγηση βάσει Moriasi
NSE	0.99	Πολύ καλό
RMSE	0.22	Πολύ καλό

Πίνακας 10: Απεικόνιση δεικτών για την αξιολόγηση προσομοίωσης ταμιευτήρα

Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω καταλήγουμε στο γεγονός ότι το μοντέλο προσομοιώνει πολύ καλά καθώς οι τιμές όγκου και στάθμης του ταμιευτήρα που προκύπτουν από τη μοντελοποίηση προσεγγίζουν σε πολύ μεγάλο βαθμό τις τιμές του πεδίου, ώστε οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι το μοντέλο είναι αξιόπιστο.

5.Προσομοίωση ταμιευτήρα

5.1.Εισαγωγή

Το υπό μελέτη φράγμα αποσκοπεί στη συγκράτηση ορισμένης ποσότητας νερού ούτως ώστε ένα μέρος αυτού να χρησιμοποιείται για άρδευση και ένα άλλο μέρος για ύδρευση των κατοίκων των γύρω περιοχών. Ο όγκος του ταμιευτήρα είναι 22.500.000 κυβικά, επιλέγοντας να συμπληρώνεται μόλις ένα μέρος αυτού ετησίως ώστε να ικανοποιεί τις ανάγκες τόσο των εκτάσεων γης των γύρω περιοχών, όσο και των κατοίκων.

Ως βασικός στόχος τέθηκε η μάστευση 15.000.000 κυβικών νερού εκ των οποίων το μεγαλύτερο μέρος (14.000.000 κυβικά) θα χρησιμοποιείται για άρδευση των καλλιεργήσιμων εκτάσεων των γύρω περιοχών, ενώ μόλις 1.000.000 κυβικά νερού θα ενισχύει το υδρευτικό δίκτυο των κατοίκων της περιοχής. Ο λόγος για τον οποίο επιλέξαμε να επιτύχουμε μια τέτοια αναλογία προκύπτει από ένα πλήρη έλεγχο της λειτουργίας του ταμιευτήρα όχι μόνο στην τρέχουσα περίοδο την οποία εξετάζουμε αλλά και στο μέλλον, πληρώντας αν όχι όλες αλλά τις περισσότερες από τις προϋποθέσεις που τέθηκαν. Πέρα από αυτό όμως, η ποσότητα αυτή του ύδατος είναι σύμφωνη με τις ανάγκες τις οποίες εξυπηρετεί ο ταμιευτήρας, αποδίδοντας σε αυτές τους λόγους κατασκευής του, καθώς η απόληψη αυτής της ποσότητας είναι σύμφωνη με τα τεχνικά χαρακτηριστικά και τα χαρακτηριστικά χρήσης ταμίευσης νερού του έργου, τα οποία σε πλήρη λειτουργία του αναφέρονται σε χρήση 15 εκ.κυβικών μέτρων ύδατος ανά έτος

Η προσομοίωση του φράγματος πραγματοποιήθηκε στο Excel, Microsoft office. Τα δεδομένα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται παρακάτω :

- Υδρολογικά δεδομένα
- 1. Δυνητική εξατμισοδιαπνοή (PET)
- 2. Εισροή ανά μήνα ($m^3/month$)
- 3. Κατακρήμνιση (PRECIP)
- Όγκοι λειτουργίας ταμιευτήρα (m^3), V_{max} και V_{min}
- Μηνιαίο ποσοστό ύδρευσης και άρδευσης
- Οικολογική παροχή (Qeco, $m^3/month$)

Με το excel υπολογίζονται τα εξής:

- Όγκος ανά μήνα στον ταμιευτήρα ($m^3/month$)
- Εξερχόμενη Παροχή ανά μήνα ($m^3/month$)

- Ζήτηση Ύδρευσης και Άρδευσης ανά μήνα (m^3/month)
- Παρεχόμενη ποσότητα άρδευσης ανά μήνα (Qirr final, m^3/month)
- Ποσότητα άρδευσης που απαιτείται ανά μήνα (Qirr απαιτ, m^3/month)
- Ποσοστό αστοχίας ως προς την ποσότητα νερού που παρέχεται για άρδευση σε σχέση με αυτή που ζητείται (Failure%)

Για να προσδιοριστεί ο βέλτιστος τρόπος λειτουργίας του ταμιευτήρα έγιναν τρεις διαφορετικές υποθέσεις (σενάρια) οι οποίες παρουσιάζονται παρακάτω:

▪ 1^ο Σενάριο

Συνολική Ποσότητα Άρδευσης και Ύδρευσης που παρέχεται το χρόνο 5.000.000 m^3

με την ακόλουθη κατανομή:

Ποσότητα Άρδευσης : 4.500.000 m^3

Ποσότητα Ύδρευσης: 500.000 m^3

▪ 2^ο Σενάριο

Συνολική Ποσότητα Άρδευσης και Ύδρευσης που παρέχεται το χρόνο 10.000.000 m^3 με την ακόλουθη κατανομή:

Ποσότητα Άρδευσης : 9.500.000 m^3

Ποσότητα Ύδρευσης: 500.000 m^3

▪ 3^ο Σενάριο

Συνολική Ποσότητα Άρδευσης και Ύδρευσης που παρέχεται το χρόνο 15.000.000 m^3 με την ακόλουθη κατανομή,:

Ποσότητα Άρδευσης : 14.000.000 m^3

Ποσότητα Ύδρευσης: 1.000.000 m^3

DATE	V	Q _{in} /month	P*A	PET*A	Q _{out} (m ³ /mo n)	Q _{irr} final	(%) Failure	deficit	ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ		Q _{irr} απαιτ	Q _{eco} /mo th
09/1970	0	232,710	115	225	0	0			Q _{eco} (m ³ /s)	V _{max} (m ³)	5.14680E+05	251164.8
10/1970	402,593	402,564	183	153	0	0			0.00323	22500000	188546.1224	259536.96
11/1970	805,413	402,797	149	127	0	0			V _{min} (m ³)		39473.68421	251164.8
12/1970	957,803	411,938	80	91	259,537	0					39473.68421	259536.96
01/1971	4,183,386	3,484,598	593	71	259,537	39,474	0				39473.68421	259536.96
02/1971	10,031,378	6,081,869	593	50	234,420	39,474	0	0			39473.68421	234420.48
03/1971	10,849,090	1,077,252	116	119	259,537	26,316	0	0		Σ. Υδρευσης(m ³ /year)	26315.78947	259536.96
04/1971	11,147,860	550,022	77	165	251,165	206,557	0	0		500000	206557.1308	251164.8
05/1971	10,933,016	44,917	5	228	259,537	629,036	0	0		Σ.Αρδευσης(m ³ /year)	629036.0653	259536.96
06/1971	10,682,264	700	1	288	251,165	1,023,199	0	0		4500000	1023198.881	251164.8
07/1971	10,422,409	0	0	318	259,537	1,187,646	0	0		Σ.ολικό Απαιτούμενο	1187646.189	259536.96
08/1971	10,162,915	344	6	308	259,537	1,066,018	0	0		5000000	1066018.369	259536.96
09/1971	10,050,722	139,113	81	222	251,165	514,680	0	0		(%) Υδρευση	514679.6898	251164.8
10/1971	9,902,072	110,886	156	156	259,537	188,546	0	0		0.1	188546.1224	259536.96
11/1971	11,356,931	1,705,795	360	131	251,165	39,474	0	0		(%) Αρδευση	39473.68421	251164.8
12/1971	11,547,919	450,507	101	83	259,537	39,474	0	0		0.9	39473.68421	259536.96
01/1972	12,421,492	1,132,963	223	75	259,537	39,474	0	0	Wet Season Parameters		39473.68421	259536.96
02/1972	13,929,526	1,742,308	221	75	234,420	39,474	0	0	Q _{out}	10%	39473.68421	234420.48
03/1972	15,372,767	1,702,659	250	130	259,537	26,316	0	0	Q _{storage}	90%	26315.78947	259536.96
04/1972	15,419,565	298,080	61	179	251,165	206,557	0	0			206557.1308	251164.8

Μοντέλο φράγματος στο Excel, , Microsoft Office

5.1.Μηνιαίο ισοζύγιο

Το ισοζύγιο για την προσομοίωση του φράγματος Ποταμών παρουσιάζεται παρακάτω,:

$$V_i = V_{i-1} + Q_{ini} + P \cdot A - PET \cdot A - Q_{out} - Q_{irr\,final}$$

όπου

V_i , V_{i-1} : ο αποθηκευμένος όγκος νερού στον ταμιευτήρα τους μήνες i και $i-1$ αντιστοίχως (m^3), , ενώ ισχύει ότι $V_{min} \leq V_i \leq V_{max}$

Q_{ini} : εισροή ανά μήνα i στον ταμιευτήρα, (m^3)

A : επιφάνεια του φράγματος (m^2)

P : ποσότητα βροχόπτωσης το μήνα i , (m)

PET : δυνητική εξατμισοδιαπνοή το μήνα i , (m)

Q_{out} : υπερχειλίση, οικολογική παροχή Q_{eco} , το μήνα i (m^3)

$Q_{irr\,final}$: τελική ποσότητα που παρέχεται για ύδρευση και άρδευση το μήνα i (m^3)

5.2.Ανάλυση Παραμέτρων

➤ Όγκος φράγματος

Ο όγκος του φράγματος προσδιορίζεται από την επεξεργασία υδρολογικών στοιχείων όπως των μηνιαίων και ετήσιων βροχοπτώσεων, μετρήσεων και παροχών . Οι υδραυλικοί υπολογισμοί στους οποίους υπεισέρχεται ο μέγιστος δυνατός αριθμός μεταβλητών υδραυλικών παραμέτρων, έχουν ως στόχο την βέλτιστη διαστασιολόγηση του όγκου φράγματος και των συναφών του έργων όπως τον προσδιορισμό του ύψους και μήκους υπερχείλισης κ.α. σε συνδυασμό βέβαια και με τα τοπογραφικά και γεωλογικά δεδομένα της περιοχής ούτως ώστε ο βαθμός στον οποίο θα εξυπηρετούνται οι ανάγκες ύδρευσης και άρδευσης να είναι ο προσδοκώμενος (ΥΔΡΟ-ΣΥΣΤΗΜΑ, Μελέτη Συμβούλων Μηχανικών Ο.Α.ΔΥ.Κ., Μάρτιος 1992). Ο μέγιστος όγκος (πλήρωσης) του φράγματος είναι 22, 5 εκ.(m³), ενώ ως ελάχιστος όγκος επιλέχθηκε η τιμή των 2,5 εκ. (m³), το οποίο είναι απαραίτητο ούτως ώστε ο ταμιευτήρας να μην εκκενώνεται σε καμία χρονική περίοδο, καθώς η πλήρης έλλειψη νερού από τον ταμιευτήρα ελλοχεύει τον κίνδυνο της οξείδωσης των ιζημάτων που υπάρχουν στον πάτο του ταμιευτήρα, γεγονός το οποίο σηματοδοτεί την εμφάνιση προβλημάτων τόσο στην οσμή, όσο και στη γεύση του νερού.

➤ Εισερχόμενη Παροχή

Η παροχή (Q_{in}) αφορά στην παροχή νερού που εισέρχεται κάθε μήνα, η παράμετρος αυτή υπολογίζεται από τα αποτελέσματα προσομοίωσης του προγράμματος SWAT.

➤ Δυνητική εξατμισοδιαπνοή

Η δυνητική εξατμισοδιαπνοή (PET) υπολογίζεται από τα αποτελέσματα προσομοίωσης που αποδίδει το SWAT, η οποία στη συνέχεια πολλαπλασιάζεται με την επιφάνεια του ταμιευτήρα .

➤ Κατακρήμνιση - Θερμοκρασία

Οι παράμετρος της κατακρήμνισης καθώς επίσης και της θερμοκρασίας ανά ημέρα έχουν μετρηθεί από τους μετεωρολογικούς σταθμούς που υπάρχουν κοντά στην περιοχή μελέτης και πιο συγκεκριμένα στις εξής περιοχές: Καβούσι, Βολεώνες, Γερακάρι, Σπήλι κατά τις περιόδους 1970-2010. Στη συνέχεια η προσομοίωση στα σενάρια γίνεται μέχρι το 2098.

➤ Υπερχείλιση – Οικολογική παροχή

Η οικολογική παροχή Q_{eco} προέκυψε από τον υπολογισμό του μέσου όρου των παροχών των μηνών Ιουνίου, Ιουλίου και Αυγούστου ανά έτος και στη συνέχεια από την εύρεση ενός συνολικού μέσου όρου για όλα τα χρόνια πολλαπλασιασμένου με τον συντελεστή 0, 5. Αναλυτικότερα από κάθε μηνιαίο ισοζύγιο μένει μία ποσότητα νερού, ένα μέρος της οποίας οδεύει για άρδευση, ένα άλλο για ύδρευση και

το υπόλοιπο φεύγει ως οικολογική παροχή. Τέλος από τα παραπάνω μένει μία ποσότητα η οποία αποθηκεύεται στο φράγμα και η τιμή της προσδιορίζεται με όριο τη μέγιστη τιμή του φράγματος . Η ποσότητα που μένει υπερχειλίζει . Ανάλογα με την περίοδο στην οποία γίνεται η υπερχειλίση, λαμβάνει διαφορετικές τιμές, δηλαδή το χειμώνα πληρώντας ορισμένες συνθήκες ($Q_{in} \geq V_{max}$ ή $V_{i-1} \leq 0.9 * V_{max}$) επιτρέπεται μεγαλύτερη ποσότητα υπερχειλίσης από αυτή που έχει ήδη καθοριστεί ούτως ώστε να διατηρείται η ισορροπία εντός του φράγματος όταν υπάρχουν αρκετές βροχοπτώσεις ή γενικότερα αυξημένη ποσότητα νερού που εισέρχεται στο φράγμα από αυτή που μπορεί να δεχτεί.

5.3.Εφαρμογή διαχειριστικών πρακτικών στο βαθμονομημένο μοντέλο του φράγματος Ποταμών Αμαρίου

Το ήδη βαθμονομημένο μοντέλο του φράγματος Ποταμών Αμαρίου στο SWAT μπορεί να διερευνηθεί περεταίρω σχετικά με την επίδραση που έχουν τα εναλλακτικά σενάρια διαχείρισης, στο υδρολογικό καθεστώς της περιοχής μελέτης.

Σκοπός της συγκεκριμένης ενότητας είναι η εξέταση τριών διαχειριστικών σεναρίων που αφορούν την αξιολόγηση των επιδράσεων τους στο υδατικό ισοζύγιο του υπό μελέτης φράγματος. Τα σενάρια αυτά εφαρμόζονται στην περίοδο 1970-2009. Στη συνέχεια παρουσιάζεται αναλυτικότερα ο τρόπος με τον οποίο εφαρμόστηκαν τα σενάρια, η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε καθώς και τα αποτελέσματα που προέκυψαν σε καθένα από αυτά.

5.4.Ανάπτυξη Σεναρίων

5.4.1.Σενάριο άρδευσης και ύδρευσης (Σενάριο 1)

Η υπόθεση του σεναρίου αφορά στην σταθερή απόδοση 5.000.000 κυβικών μέτρων νερού ετησίως στις γύρω περιοχές, εκ των οποίων 4.500.000 κυβικά μέτρα νερού χρησιμοποιούνται για άρδευση, ενώ μόλις 500.000 κυβικά μέτρα νερού χρησιμοποιούνται για ύδρευση των κατοίκων, δηλαδή ως πόσιμο νερό.

Με τη χρήση του προγράμματος Microsoft Excel στο οποίο τοποθετήθηκαν τα δεδομένα του τρέχοντος μοντέλου, κάνοντας χρήση του ισοζυγίου στο οποίο έχει ήδη γίνει αναφορά υπολογίστηκε ο όγκος του φράγματος στις αντίστοιχες τιμές παροχής βροχόπτωσης, εξάτμισης και εξατμισοδιαπνοής, ενώ ταυτόχρονα διαπιστώθηκε η ορθή λειτουργία του φράγματος καθώς το έλλειμμα που παρουσιάστηκε ήταν μηδενικού βαθμού. Το φράγμα υπολογίζεται ότι γεμίζει συνεχώς και είναι πολύ λίγες οι περίοδοι κατά τις οποίες δεν είναι γεμάτο παρέχοντας τη απαιτούμενη ποσότητα νερού για τις ανάγκες άρδευσης και ύδρευσης.

Παρόλα αυτά η ποσότητα η οποία παρέχεται από το ίδιο το φράγμα σε αυτή την περίπτωση δεν είναι τόσο ικανοποιητική, βασιζόμενοι στο γεγονός ότι απώτερος σκοπός της παρούσας μελέτης είναι η μέγιστη σταθερή απόδοση του φράγματος Ποταμών Αμαρίου παρουσιάζοντας ακόμα και ένα μικρού βαθμού έλλειμμα κάποιους μήνες.

5.4.2.Σενάριο άρδευσης και ύδρευσης (Σενάριο 2)

Το παρόν σενάριο αναφέρεται στην απόδοση 10.000.000 κυβικών μέτρων νερού ετησίως στις γύρω περιοχές, εκ των οποίων 9.500.000 κυβικά μέτρα νερού χρησιμοποιούνται για άρδευση ενώ μόλις 500.000 κυβικά μέτρα χρησιμοποιούνται για άρδευση των κατοίκων.

Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία με το (σενάριο 1), υπολογίζοντας τις ίδιες παραμέτρους διαπιστώθηκε ότι το φράγμα Ποταμών Αμαρίου γεμίζει τους περισσότερους μήνες, και παρουσιάζει μικρού βαθμού έλλειμμα. Ο αριθμός των μηνών κατά τους οποίους το φράγμα δε γεμίζει σε ικανοποιητικό βαθμό ούτως ώστε να αποδώσει την ποσότητα νερού που απαιτείται είναι μικρός . Η αστοχία του φράγματος υπολογίζεται ως ένα ποσοστό της τάξης του 2%, το οποίο σημαίνει ότι στους 480 περίπου μήνες στους οποίους γίνεται υπολογισμός του όγκου του νερού μέσα στο φράγμα, μόλις οι 10 μήνες δε μπορούν να δώσουν τη ζητούμενη ποσότητα νερού (μήνες αρκετά μεγάλης ξηρασίας), οδηγώντας στο συμπέρασμα ότι το σενάριο είναι εύστοχο σε μεγάλο βαθμό.

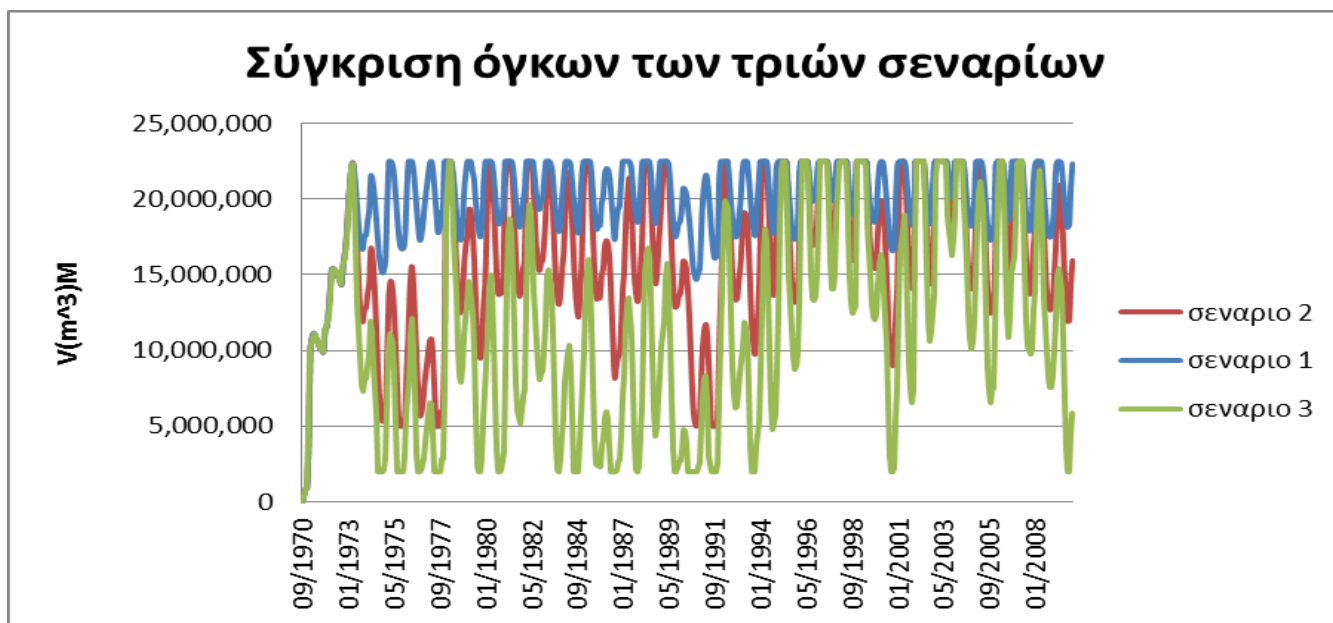
Παρά την ικανοποιητική απόδοση του τρέχοντος σεναρίου η ποσότητα εξακολουθεί να μην είναι τόσο επαρκής λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι τα τεχνικά χαρακτηριστικά όσο και τα χαρακτηριστικά χρήσης νερού του φράγματος βασίζονται στην χρήση 15.000.000 κυβικών μέτρων νερού ετησίως από το φράγμα.

5.4.3.Σενάριο λειτουργίας φράγματος Ποταμών Αμαρίου (Σενάριο 3)

Στο σενάριο αυτό θεωρούμε ότι λειτουργεί το φράγμα, καθώς η ποσότητα του ύδατος που είναι απολήψιμη ανέρχεται στα 15.000.000 κυβικά μέτρα, από τα οποία μόλις το 1.000.000 κυβικών μέτρων χρησιμοποιείται ως πόσιμο νερό, ενώ η εναπομείνουσα ποσότητα διατίθενται για την ενίσχυση του αρδευτικού δικτύου. Το παρόν σενάριο πληροί τα τεχνικά χαρακτηριστικά καθώς και τα χαρακτηριστικά χρήσης του έργου ταμίευσης νερού του υπό μελέτη φράγματος καθώς η ποσότητα νερού για την πλήρη λειτουργία του φράγματος έχει προμελετηθεί και υπολογιστεί στα 15.000.000 κυβικά μέτρα, με αποτέλεσμα να έρχεται σε πλήρη συμφωνία με την ποσότητα που αποδίδεται από το σενάριο. Η αστοχία του φράγματος υπολογίζεται ως ένα ποσοστό της τάξης του 12% που σημαίνει ότι στα 40 χρόνια λειτουργίας του φράγματος μόλις τα 5 χρόνια το παρόν έργο δεν θα είναι σε θέση να διαθέσει την απαιτούμενη ποσότητα νερού, οδηγώντας στο συμπέρασμα ότι το σενάριο παρουσιάζει μεγάλου βαθμού ευστοχία, ώστε να επιλεγεί ως ο βέλτιστος τρόπος λειτουργίας.

5.5.Αποτελέσματα σεναρίων –Γραφική Απεικόνιση

Με τη βοήθεια του διαγράμματος 23 γίνεται αντιληπτή η συσχέτιση του όγκου του νερού μέσα στο φράγμα σε όλη τη διάρκεια λειτουργίας του φράγματος, με τη χρήση του εκάστοτε σεναρίου.



Διάγραμμα 23: Γράφημα σύγκρισης όγκων των τριών σεναρίων που εξετάστηκαν

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από το διάγραμμα 23 είναι ότι ο όγκος του ύδατος μέσα στο φράγμα παραμένει σταθερός σχεδόν για όλα τα χρόνια στη μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει (22, 5 εκ.κ.μ), το φράγμα είναι σχεδόν γεμάτο καθ' όλη την περίοδο λειτουργίας του με πολύ μικρές αποκλίσεις σε ένα δύο έτη (1989 - 1991), ενώ η ποσότητα του ύδατος δεν πέφτει ποτέ κάτω από 15.000.000 κυβικά μέτρα. Στο δεύτερο σενάριο η ποσότητα του νερού μέσα στο φράγμα είναι πολύ ικανοποιητική, υπάρχουν μικρές αποκλίσεις σε μερικά έτη (1973 - 1977, 1990 - 1992), όμως και πάλι γεμίζει σχεδόν στο μεγαλύτερο μέρος του χρόνου λειτουργίας του, ενώ η ποσότητα του νερού δεν πέφτει ποτέ κάτω από τα 2.500.000 κυβικά μέτρα. Στο τρίτο σενάριο, το οποίο έχει οριστεί και ως σενάριο λειτουργίας του φράγματος, ο όγκος νερού μέσα σε αυτό είναι πολύ ικανοποιητικός, αφού γεμίζει σε ένα μεγάλο μέρος του χρόνου λειτουργίας του, με αποκλίσεις σε διάφορες χρονικές περιόδους (1974 - 1977, 1978 - 1980, 1983 - 1987). Τέτοιου είδους αποκλίσεις σε καθένα από τα σενάρια είναι φυσιολογικό να παρουσιάζονται και πιθανό να οφείλονται σε περιόδους αυξημένης ξηρασίας, γεγονός το οποίο εξετάζεται από τις τιμές ειδικών δεικτών στην συνέχεια της μελέτης. Τέλος η ποσότητα του ύδατος δεν πέφτει ποτέ κάτω από το ελάχιστο όριο ποσότητας ύδατος που έχει οριστεί για την πλήρη και ορθή λειτουργία του.



Διάγραμμα 24: Απεικόνιση ελλείμματος που παρουσιάζει το δεύτερο σενάριο

Όπως παρατηρείται κατά τη διάρκεια των υπολογισμών το πρώτο σενάριο παρουσιάζει μηδενικό έλλειμμα καθώς η απαιτούμενη ποσότητα νερού είναι πολύ μικρή με αποτέλεσμα να μπορεί να ανταποκριθεί επιτυχώς, όλα τα χρόνια. Στο παραπάνω γράφημα (Διάγραμμα 24) απεικονίζεται το έλλειμμα που παρουσιάζει το δεύτερο σενάριο καθ'όλη τη διάρκεια λειτουργίας του φράγματος. Σχεδόν το ίδιο θα μπορούσε να διατυπωθεί και για το δεύτερο σενάριο το οποίο παρουσιάζει μικρού βαθμού έλλειμμα κυρίως σε περιόδους ξηρασίας, παρόλα αυτά και σ αυτό το σενάριο η απαιτούμενη ποσότητα νερού δεν είναι τόσο μεγάλη ώστε να υπάρχει μεγάλη απόκλιση μεταξύ της ποσότητας νερού που μπορεί να δοθεί από το φράγμα σε σχέση με αυτή που ζητείται. Το τρίτο σενάριο του οποίου η απαιτούμενη ποσότητα είναι αρκετά μεγάλη, είναι φυσιολογικό να παρουσιάζει μεγαλύτερο έλλειμμα όπως μπορεί να γίνει αντιληπτό από το γράφημα 25, το οποίο όμως δικαιολογείται πλήρως και δεν αποσυντονίζει την πλήρη και ορθή λειτουργία του φράγματος, πόσο μάλλον όταν αυτό διαδραματίζεται σε περιόδους ξηρασίας όπως την περίπτωση που μελετάται.



Διάγραμμα 25: Απεικόνιση ελλείμματος που παρουσιάζει το σενάριο 3

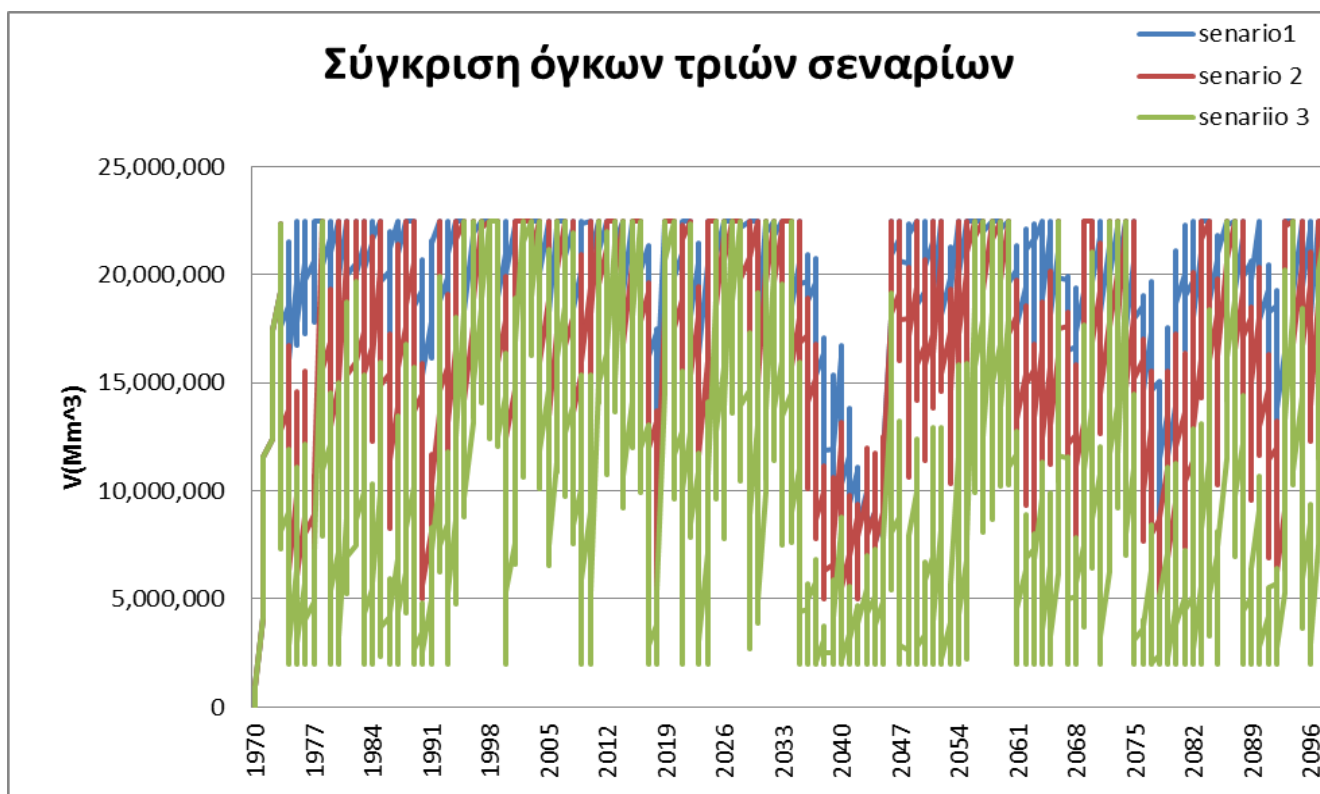
Στον πίνακα 11 απεικονίζονται τα ποσοστά αστοχίας που παρουσιάζει το καθένα από τα σενάρια που εξετάστηκαν.

Είδος σεναρίου	Ποσοστό Αστοχίας
Σενάριο 1(Εναλλακτικό σενάριο)	0%
Σενάριο 2(Εναλλακτικό σενάριο)	2%
Σενάριο 3(Σενάριο λειτουργίας)	12%

Πίνακας 11: Απεικόνιση ποσοστών αστοχίας που παρουσιάζει το κάθε σενάριο

5.6.Ανάπτυξη σεναρίων στο μέλλον

Για την επίτευξη μιας ολοκληρωμένης μελέτης η οποία θα μπορεί να προσδιορίζει τον τρόπο λειτουργίας του φράγματος, όχι μόνο για τα χρόνια της τρέχοντος λειτουργίας του, δηλαδή περίοδοι 1970-2009, αλλά και για τα προσεχώς έτη λειτουργίας του, κρίθηκε αναγκαία η ανάπτυξη των ίδιων σεναρίων με αυτά που αναλύθηκαν πριν, προσαρμοσμένα στα δεδομένα και τις ανάγκες του μέλλοντος (περίοδος 1970-2098). Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται αναλυτικότερα στα παρακάτω διαγράμματα.



Διάγραμμα 26: Συσχέτιση όγκων ταμιευτήρα του εκάστοτε σεναρίου για το διάστημα 1970-2098

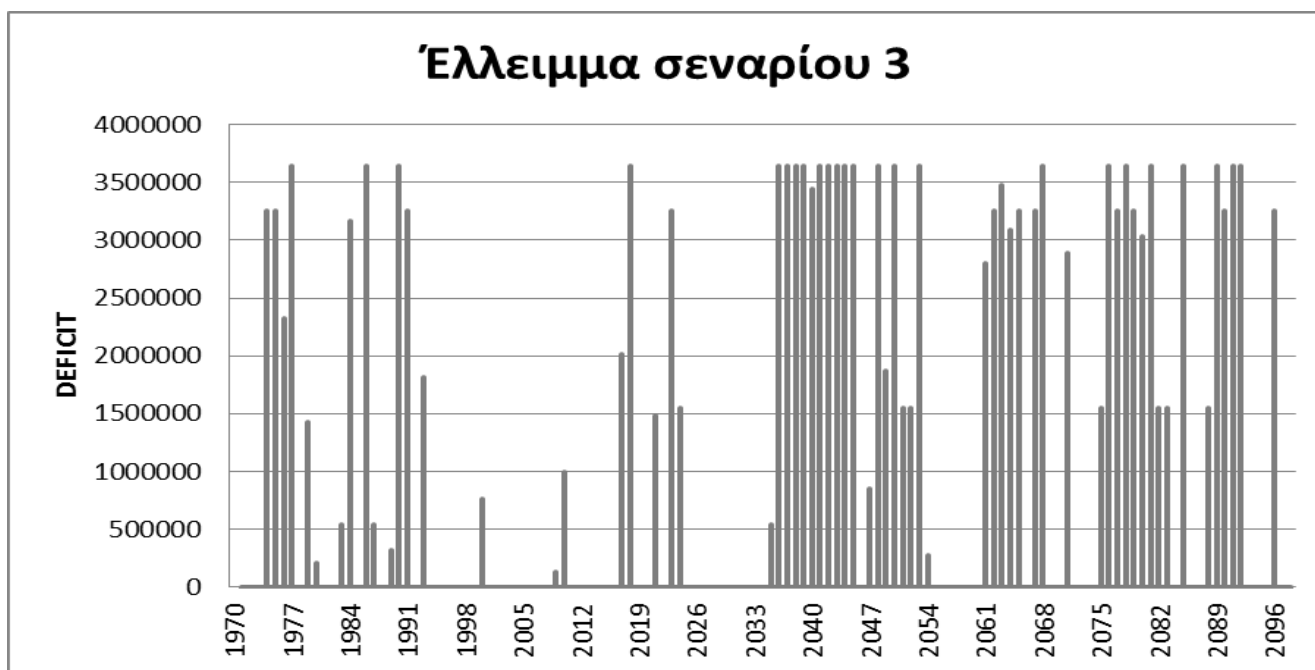
Παρατηρώντας το διάγραμμα 26 γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι στο πρώτο σενάριο ο όγκος νερού του ταμιευτήρα παραμένει σχετικά σταθερός ως προς ένα εύρος τιμών μέσα στο οποίο κινείται (15-22.5εκ.κυβικά μέτρα ύδατος), με εξαίρεση κάποιες περιόδους (έτη 2040 - 2047, έτος 2078) κατά τις οποίες υπάρχει μεγαλύτερη πτώση στον όγκο του νερού που περιέχεται μέσα στο φράγμα που μελετάται. Αν και σε αυτές τις χρονολογίες ο όγκος του νερού δεν είναι ο επιθυμητός, καθώς ίσως πρόκειται για κάποιες περιόδους έντονης ξηρασίας, φαινόμενο το οποίο θα εξεταστεί, όπως κάθε άλλος παράγοντας που μπορεί να οδήγησε σε αυτό το αποτέλεσμα, στη συνέχεια της παρούσας μελέτης, παρόλα αυτά το σενάριο είναι αποδοτικό σε μεγάλο βαθμό σχεδόν σε ολόκληρο το διάστημα. Όσον αφορά στο δεύτερο σενάριο, διαπιστώνεται ότι ο όγκος του νερού μέσα στο φράγμα φτάνει την τιμή των 22.5 εκ.κυβικών μέτρων ή κοντά σε αυτή στο μεγαλύτερο μέρος του διαστήματος στο οποίο γίνεται η μελέτη. Τέλος αναφορικά με το σενάριο λειτουργίας του φράγματος (σενάριο 3) το φράγμα γεμίζει με την επιθυμητή ποσότητα για μεγάλες χρονικές περιόδους, όμως υπάρχουν ορισμένα χρονικά διαστήματα στα οποία υπάρχει σχετικά μεγάλη πτώση του όγκου του ύδατος μέσα στον ταμιευτήρα, παρά την αποδοτικότητα και την ευστοχία που παρουσιάζει το υπό εξέταση σενάριο. Οι λόγοι για τους οποίους σημειώνεται αυτή η πτώση είναι η εμφάνιση σχετικά ξηρών περιόδων στο σύνολο της υπό μελέτη περιόδου, ιδιαίτερα τους καλοκαιρινούς μήνες κατά τους οποίους η ποσότητα του νερού που εισέρχεται μέσα στον ταμιευτήρα

είναι φυσικά πολύ λιγότερη. Το φαινόμενο σχετικής ξηρασίας ανά περιόδους δικαιολογεί πλήρως την εικόνα αυτή και αναμένεται να επιβεβαιωθεί και να εξεταστεί σε επόμενα κεφάλαια της παρούσας μελέτης. Το σημείο όμως στο οποίο αξίζει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή είναι μία δεκαετία (2074-2083) κατά την οποία ο ταμιευτήρας φαίνεται να μη γεμίζει σε ποσότητα πάνω από 6 εκ.κυβικά μέτρα κατά μέσο όρο, το οποίο πιθανολογείται να είναι αποτέλεσμα μιας περιόδου εκτεταμένης ξηρασίας.



Διάγραμμα 27: Προσδιορισμός ελλείμματος του σεναρίου 2 κατά την περίοδο 1970-2098

Το πρώτο σενάριο όπως υπολογίστηκε παρουσιάζει μηδενικό έλλειμμα καθ'όλη την περίοδο η οποία μελετάται. Η απεικόνιση του δεύτερου σεναρίου στο διάγραμμα 27 διευκολύνει την κατανόηση του ελλείμματος που παρουσιάζεται σε αυτό, διαπιστώνοντας ότι δεν είναι πολλές οι περίοδοι κατά τις οποίες εμφανίζεται ελλειμματική τάση παρά μόνο μερικές οι οποίες ανάγονται σε περιόδους ξηρασίας όπως αναμένεται να αποδειχθεί στη συνέχεια της μελέτης.



Διάγραμμα 28: Προσδιορισμός ελλείμματος του σεναρίου 3 κατά την περίοδο 1970-2098

Το διάγραμμα 28 που παρατίθεται παραπάνω δείχνει ότι το σενάριο λειτουργίας του φράγματος (σενάριο 3) εμφανίζει μεγαλύτερο έλλειμμα καθώς είναι φυσικό, δεδομένου ότι σε αυτή την περίπτωση η ποσότητα που απαιτείται για τις ανάγκες άρδευσης και ύδρευσης είναι αρκετά μεγάλη, συνεπώς είναι αναμενόμενο σε κάποιες περιόδους στις οποίες πιθανόν η κατακρήμνιση να μην είναι τόσο μεγάλη ώστε να ευνοούνται οι συνθήκες κάτω από τις οποίες ο ταμιευτήρας μπορεί πλήρως να ανταποκριθεί, εξυπηρετώντας τις ανάγκες των γύρω περιοχών. Τα αίτια της αύξησης του ελλείμματος στο παρόν σενάριο αναμένεται να εξεταστούν και να τεκμηριωθούν πλήρως, μέσω ελέγχου του δείκτη ξηρασίας, καθώς αποτελεί βασικό παράγοντα διαφοροποίησης της τιμής του ελλείμματος.

5.7.Εφαρμογή Σεναρίου για την κλιματική αλλαγή

5.7.1.Αποτελέσματα εφαρμογής σεναρίου κλιματικής αλλαγής

Οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στο φράγμα Ποταμών είναι εξαιρετικά σημαντικές. Όπως παρατηρείται η βροχόπτωση μειώνεται σημαντικά με ποσοστό 12% συγκρίνοντας τις ημιπεριόδους 1970-2009 και 2060-2098. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του ποσοστού της ξηρασίας στις μελλοντικές χρονολογίες που εξετάζονται. Κατά συνέπεια η παροχή του νερού που εισέρχεται στον ταμιευτήρα μειώνεται κατά 28%, καθώς ο μέσος όρος παροχής νερού μέσα σε αυτόν την ημιπερίοδο 1970 – 2009 είναι περίπου 20,5 (Mm³/year) ενώ την τελευταία εξεταζόμενη ημιπερίοδο 2060 – 2098 είναι 14,8 (Mm³/year). Η μείωση στην εξατμισοδιαπνοή υπολογίστηκε σε ποσοστό 4%, πιο

συγκεκριμένα την ημιπερίοδο 1970 – 2009 η μέση τιμή της υπολογίστηκε 0,52 (m/year) ενώ την χρονική περίοδο 2060 – 2098 μειώνεται σε 0.50 m/year. Τέλος η μεταβολή της μέσης θερμοκρασίας είναι περίπου 10%, σχεδόν 1.6⁰C, υπάρχει σταδιακή αύξηση από το 2009 έως το 2059 από τους 17⁰C στους 18.2⁰C, ενώ την χρονική περίοδο 2060-2098 η τιμή της μέσης θερμοκρασίας ανέρχεται στους 18.6⁰C. Οι παραπάνω τιμές αναφέρονται στο μέσο όρο των τιμών των παραμέτρων βροχόπτωσης, εξατμισοδιαπνοής θερμοκρασίας και παροχής όπως υπολογίστηκαν σύμφωνα με τον πίνακα 12.

Μ.Ο. ΒΡΟΧΟΠ/ΣΗ 1970-2009	Μ.Ο. ΕΞΑΤ/ΠΝΟΗ 1970- 2009	Μ.Ο ΘΕΡ 1970-2009	Μ.Ο. Q 1970-2009
1.21 (m/year)	0.52 (m/year)	17.00 (⁰ C)	20.5 (Mm ³ /year)
Μ.Ο. ΒΡΟΧΟΠ/ΣΗ2010- 2059	Μ.Ο. ΕΞΑΤ/ΠΝΟΗ 2010- 2059	Μ.Ο ΘΕΡ 2010-2059	Μ.Ο. Q 2010-2059
1.14 (m/year)	0.51 (m/year)	18.18 (⁰ C)	19.6 (Mm ³ /year)
Μ.Ο. ΒΡΟΧΟΠ/ΣΗ 2059- 2098	Μ.Ο.ΕΞΑΤ/ΠΝΟΗ 2060- 2098	Μ.Ο. ΘΕΡ 2060-2098	Μ.Ο. Q 2060-2098
1.06 (m/year)	0.50 (m/year)	18.64 (⁰ C)	14.8 (Mm ³ /year)

Πίνακας 12: Υπολογισμός μέσου όρου παραμέτρων ανά περιόδους

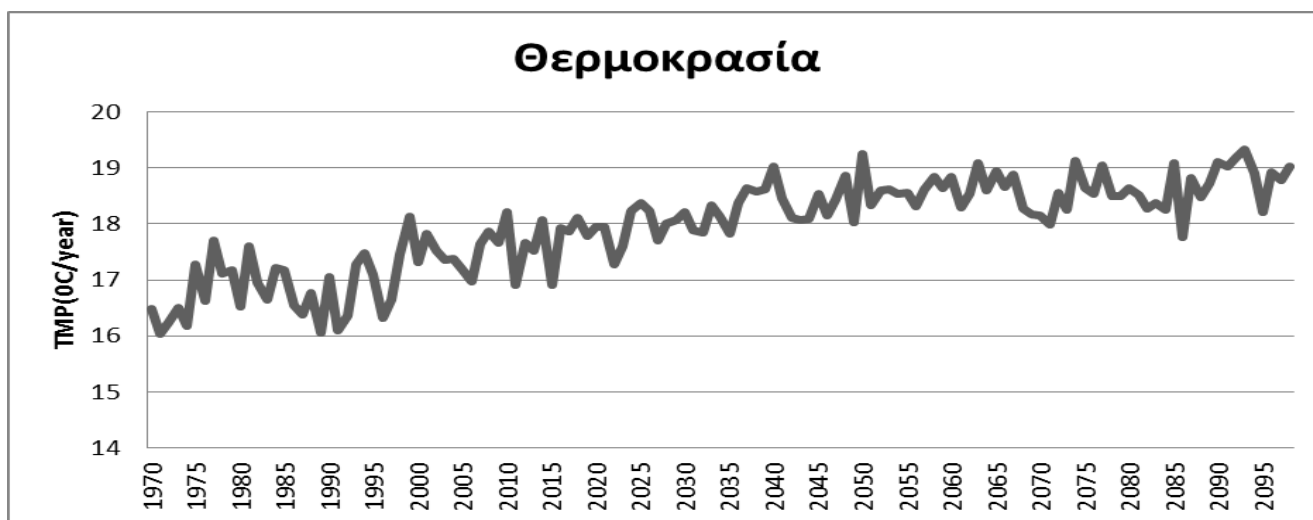
ΠΕΡΙΟΔΟΣ/ΣΥΓΚΡΙΣΗ	1970-2009]-[2010-2059]	[2010-2059]-[2060-2098]	[1970-2009]-[2060-2098]
ΜΕΤΑΒΛΗΤΗ			
Θερμοκρασία	-1,18 (⁰ C)	-0,46 (⁰ C)	-1,64 (⁰ C)
Βροχόπτωση	0,07 (m)	0,08 (m)	0,15 (m)
Εξατμισοδιαπνοή	0,01 (m)	0,01 (m)	0,02 (m)
Παροχή	0,9 (Mm ³)	4.8 (Mm ³)	5.7 (Mm ³)

Πίνακας 13:Απεικόνιση παραμέτρων στις ημιπεριόδους που εξετάζονται

Στον πίνακα 13 απεικονίζεται η διαφορά της τιμής της εκάστοτε παραμέτρου ανά χρονικά διαστήματα. Όπως έχει ήδη αναφερθεί η τιμή της μέσης θερμοκρασίας αυξάνεται κατά 1,6 (⁰C). Η κατακρήμνιση μειώνεται κατά 0,15 (m) και η εξατμισοδιαπνοή κατά 0,02 (m) το οποίο έχει ως φυσικό αποτέλεσμα τη μείωση της μέσης παροχής του νερού μέσα στον ταμιευτήρα κατά 5,7 (Mm³) .

5.7.2.Μεταβολή της θερμοκρασίας

Στο διάγραμμα 29 φαίνεται ότι το 1970 η θερμοκρασία είναι περίπου 16.5°C ενώ το 2095 φτάνει την τιμή των περίπου 19°C το οποίο σηματοδοτεί μία περίοδο με μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας, αποτελώντας ένα έντονο φαινόμενο κλιματικής αλλαγής. Παρόλα αυτά δεδομένου ότι οι διακυμάνσεις εντός της εξεταζόμενης περιόδου 1970 – 2098 είναι έντονες, δηλαδή δεν υπάρχει σταθερή αύξηση της θερμοκρασίας αλλά παρατηρούνται έντονες αυξομειώσεις ανά διαστήματα για να προσδιορίσουμε την αλλαγή της θερμοκρασίας σε ολόκληρη την περίοδο πρέπει να δοθεί έμφαση στη μέση τιμή αυτής ανά περιόδους ούτως ώστε να προκύψουν αποτελέσματα πιο αντικειμενικά. Παρατηρείται, ότι ο μέσος όρος θερμοκρασίας την ημιπερίοδο 1970-2009 ανέρχεται στους 17°C , στη συνέχεια λαμβάνει την τιμή των 18.2°C στο χρονικό διάστημα 2010-2059, ενώ τέλος αυξάνεται στους 18.6°C κατά την περίοδο 2060-2098. Διαπιστώνεται λοιπόν σημαντική αύξηση της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας, περίπου κατά 1.6°C συνολικά μέσα στην περίοδο μελέτης, με ιδιαίτερες διαφοροποιήσεις και αλλαγές ανά ημιπερίοδο.

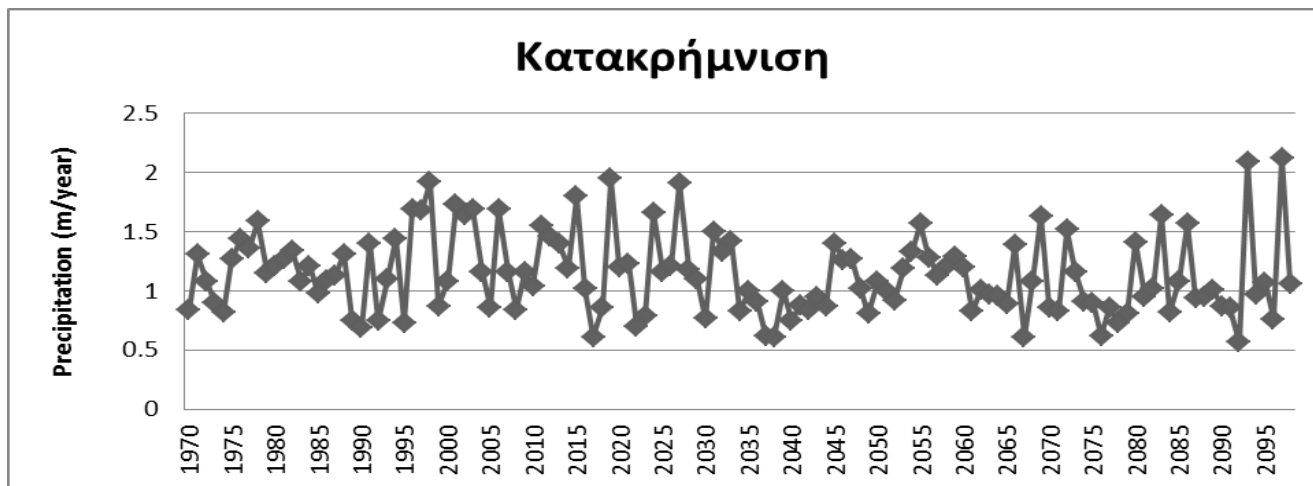


Διάγραμμα 29: Η θερμοκρασία ανά έτος στο φράγμα Ποταμών μέχρι το 2098 σύμφωνα με το μοντέλο κλιματικής αλλαγής που χρησιμοποιείται

5.7.3. Μεταβολή βροχόπτωσης

Σύμφωνα με το ενδιάμεσο μοντέλο κλιματικής αλλαγής που χρησιμοποιήθηκε η βροχόπτωση στο υπό μελέτη φράγμα μειώνεται σχετικά σταθερά, δεδομένου ότι μέχρι το 2009 ανέρχεται στο 1.210 (m/year), την δεύτερη περίοδο λαμβάνει την τιμή των 1,140 (m/year), ενώ την τελευταία περίοδο 2059 - 2098 είναι περίπου 1.060 (m/year). Γενικότερα η συνολική μείωση της βροχόπτωσης στο πέρασμα των χρόνων υπολογίζεται περίπου 12%. Στο διάγραμμα 30 παρουσιάζεται η ετήσια κατακρήμνιση στον ταμιευτήρα το χρονικό διάστημα 1970 – 2098 όπου παρατηρούνται περίοδοι αισθητά μειωμένης

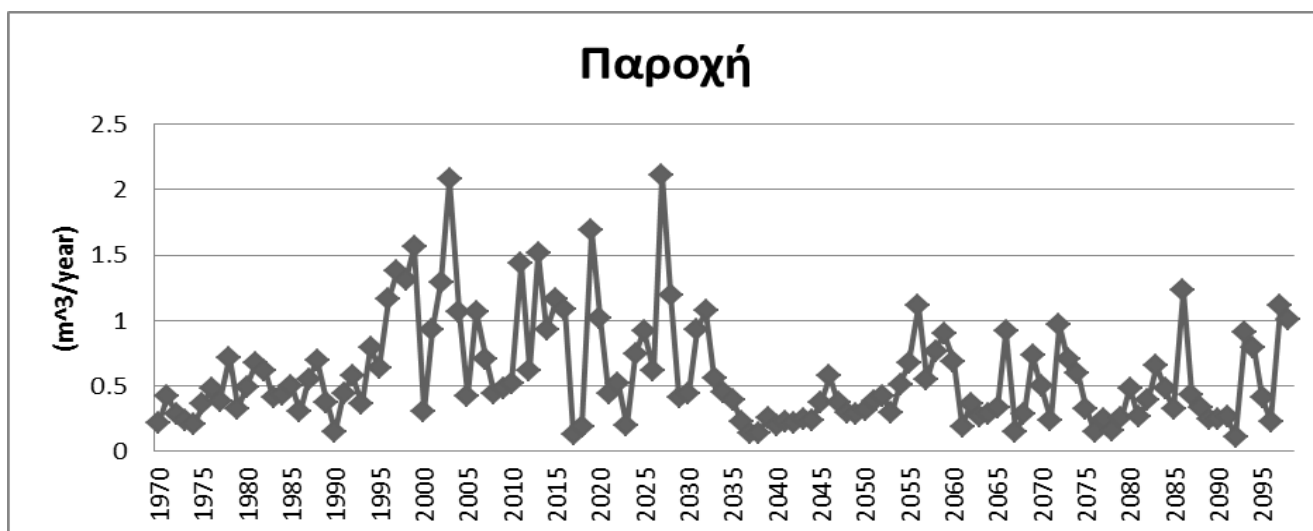
βροχόπτωσης κυρίως τις δεκαετίες 2035 - 2045 και 2075 - 2080 τα οποία μπορεί να οφείλονται σε περίοδο έντονης ξηρασίας.



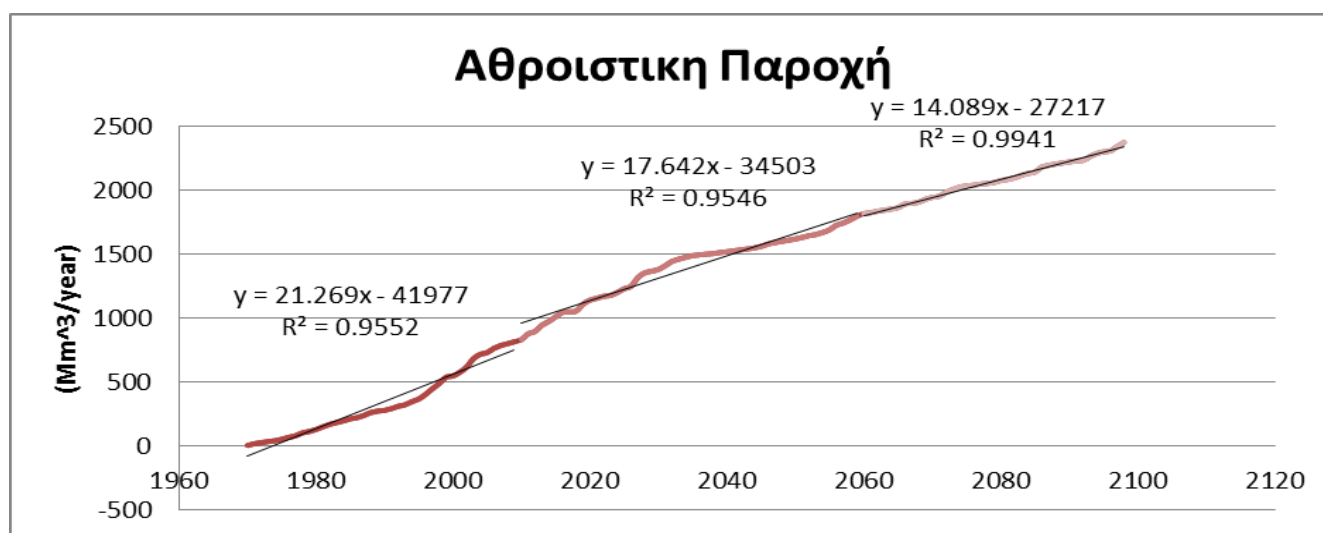
Διάγραμμα 30: Η κατακρήμνιση ανά έτος στο φράγμα Ποταμών μέχρι το 2098 σύμφωνα με το μοντέλο κλιματικής αλλαγής που χρησιμοποιείται

5.7.4.Μεταβολή παροχής

Οι μεταβολές στην παροχή εξαρτώνται άμεσα από τις μεταβολές της βροχόπτωσης, για το λόγο αυτό στην τρίτη περίοδο 2060 - 2098 που εξετάζεται, παρατηρείται σημαντική μείωση της ετήσιας παροχής . Οι διακυμάνσεις της ετήσιας παροχής είναι ανάλογες της βροχόπτωσης της εκάστοτε περιόδου. Η συνολική μείωση στη μέση ετήσια παροχή υπολογίζεται ποσοστιαία 27%, για να γίνει πιο σαφές η τιμή της παροχής από 20.5 εκ. κυβικά μέτρα ύδατος την περίοδο 1970 - 2009, μειώνεται σε 14.8 εκ. κυβικά μέτρα ύδατος ετησίως την τελευταία περίοδο μελέτης (2060 - 2098). Στο διάγραμμα 31 απεικονίζεται μέση ετήσια παροχή του νερού στον ταμιευτήρα την περίοδο 1970 – 2098.



Διάγραμμα 31: Η μέση παροχή ανά έτος του φράγματος Ποταμών μέχρι το 2098, σύμφωνα με το μοντέλο κλιματικής αλλαγής που έχει επιλεγθεί



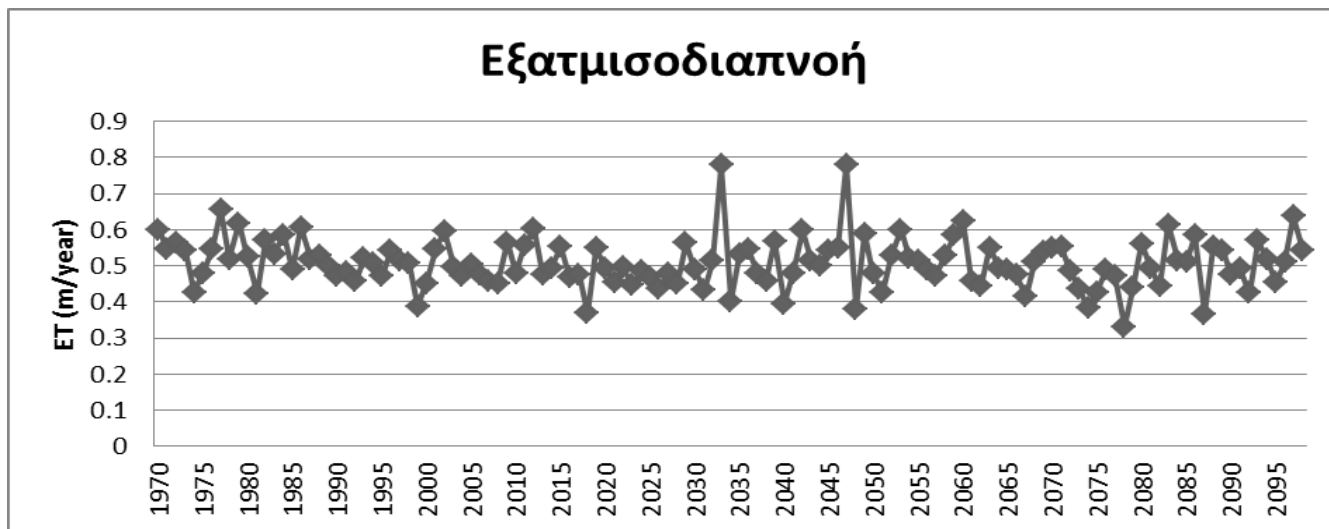
Διάγραμμα 32: Η αθροιστική παροχή ανά έτος του φράγματος Ποταμών μέχρι το 2098, σύμφωνα με το επιλεγμένο μοντέλο κλιματικής αλλαγής

Στο διάγραμμα 32 της αθροιστικής παροχής γίνεται πιο ευδιάκριτη η διακύμανση της παροχής σε κάθε ημιπερίοδο. Η γραμμή τάσης σε καθεμία από τις τρεις ημιπεριόδους που εξετάζονται διευκολύνει την κατανόηση της τάσης της ετήσιας παροχής σε καθεμία από αυτές.

5.7.5 Μεταβολή εξατμισοδιαπνοής

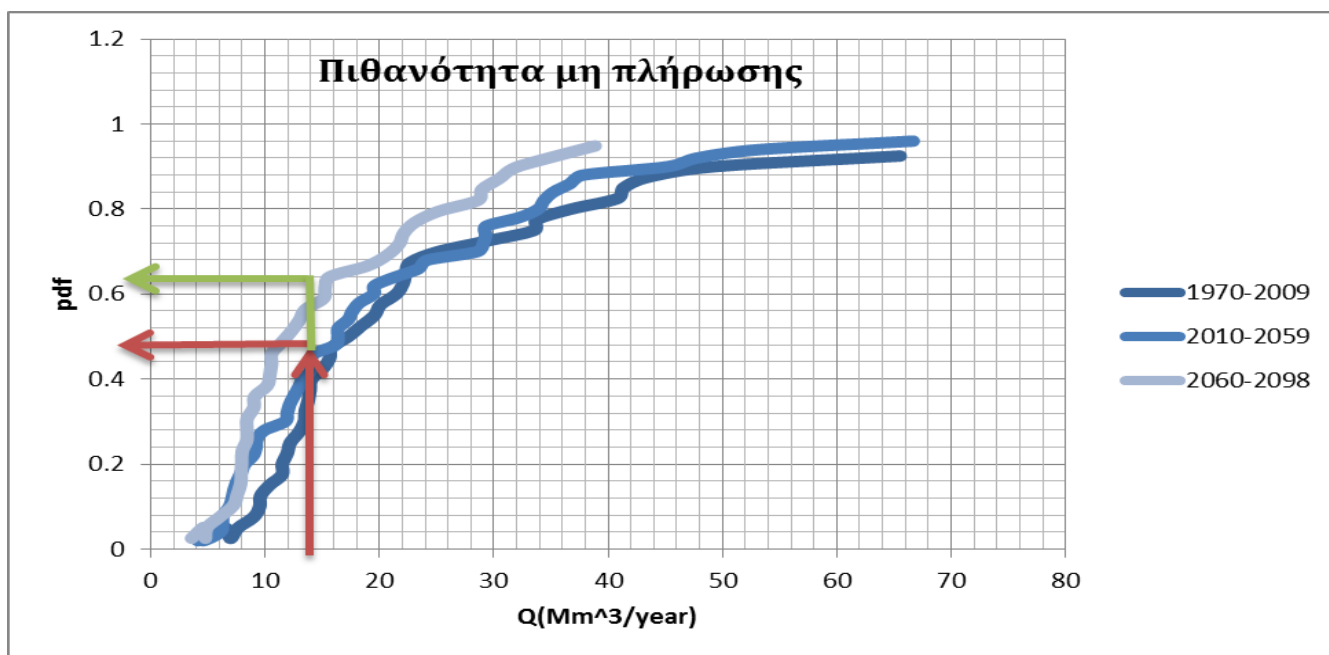
Η εξατμισοδιαπνοή το αναμενόμενο θα ήταν να αυξηθεί σε μικρό βαθμό με την αύξηση της θερμοκρασίας, όμως η ποσότητα που εξατμίζεται μειώνεται κατά 4%, λόγω της μείωσης του διαθέσιμου νερού μέσα στον ταμιευτήρα. Παρατηρώντας το διάγραμμα 33 διαπιστώνεται ότι η ποσότητα της

εξατμισοδιαπνοής καταγράφεται σε 0.52 μέτρα ετησίως την περίοδο 1970 - 2009, ενώ η νέα τιμή που λαμβάνει κατά την υποπερίοδο 2060 - 2098 λόγω της μείωσης την οποία πρόκειται να υποστεί είναι 0.50 μέτρα .



Διάγραμμα 33: Η εξατμισοδιαπνοή ανά έτος στο φράγμα Ποταμών μέχρι το 2098 σύμφωνα με το επιλεγμένο μοντέλο

Στο διάγραμμα που παρατίθεται παρακάτω, (Διάγραμμα 34) ουσιαστικά δείχνουμε ποιές είναι οι πιθανότητες να μην αποδοθεί στο φράγμα η επιθυμητή ποσότητα ύδατος που ζητείται ούτως ώστε ο ταμιευτήρας να είναι σε θέση να ενισχύσει το αρδευτικό και υδρευτικό δίκτυο.



Διάγραμμα 34: Πιθανότητα μη πλήρωσης της εκάστοτε τιμής της παροχής του ταμιευτήρα

Με τους δείκτες που χρησιμοποιούνται, προσδιορίζεται η πιθανότητα να μην επιτευχθεί η πλήρωση του φράγματος με την ποσότητα των 15 εκ.κυβικών μέτρων ύδατος, σύμφωνα με την οποία έχει επιλεγεί να λειτουργήσει. Διαπιστώνεται λοιπόν, ότι την περίοδο 1970 - 2009, η πιθανότητα να μην λάβει το φράγμα την ποσότητα αυτή, είναι περίπου 50%, το οποίο σημαίνει ότι περίπου 20 από τα 40 χρόνια λειτουργίας του δε θα μπορεί να πάρει αυτή την ποσότητα, το οποίο προφανώς αποδίδεται στις έντονες κλιματικές αλλαγές που σημειώνονται επηρεάζοντας τη λειτουργία του ταμιευτήρα και την απόδοση του. Το ίδιο περίπου συμβαίνει και στην περίοδο 2010-2059 η οποία όμως φαίνεται να έχει μικρή ανοδική τάση σε σχέση με την προηγούμενη περίοδο. Όσον αφορά στην χρονική περίοδο 2060 - 2098, η πιθανότητα να μην πληρωθεί ο ταμιευτήρας με όγκος ύδατος 15 εκ.κυβικών μέτρων είναι κοντά στο 65%, πράγμα το οποίο είναι αναμενόμενο, καθώς το φαινόμενο της αλλαγής του κλίματος είναι πιο έντονο κατά το πέρας κάθε δεκαετίας, με έντονες μειώσεις στην κατακρήμνιση, και περιόδους έντονης ξηρασίας. Λαμβάνοντας υπόψη ότι μία δεκαετία έντονης ξηρασίας η οποία αποτελεί μέρος της παρούσας μελέτης, και ανήκει στην τελευταία περίοδο 2060 - 2098 θα μπορούσαμε πλήρως να δικαιολογήσουμε τη μείωση της παροχής της ποσότητας ύδατος στο φράγμα.

5.8.Μελέτη Ξηρασίας

Υπολογισμός δείκτη ξηρασίας –Ανάλυση Αποτελεσμάτων

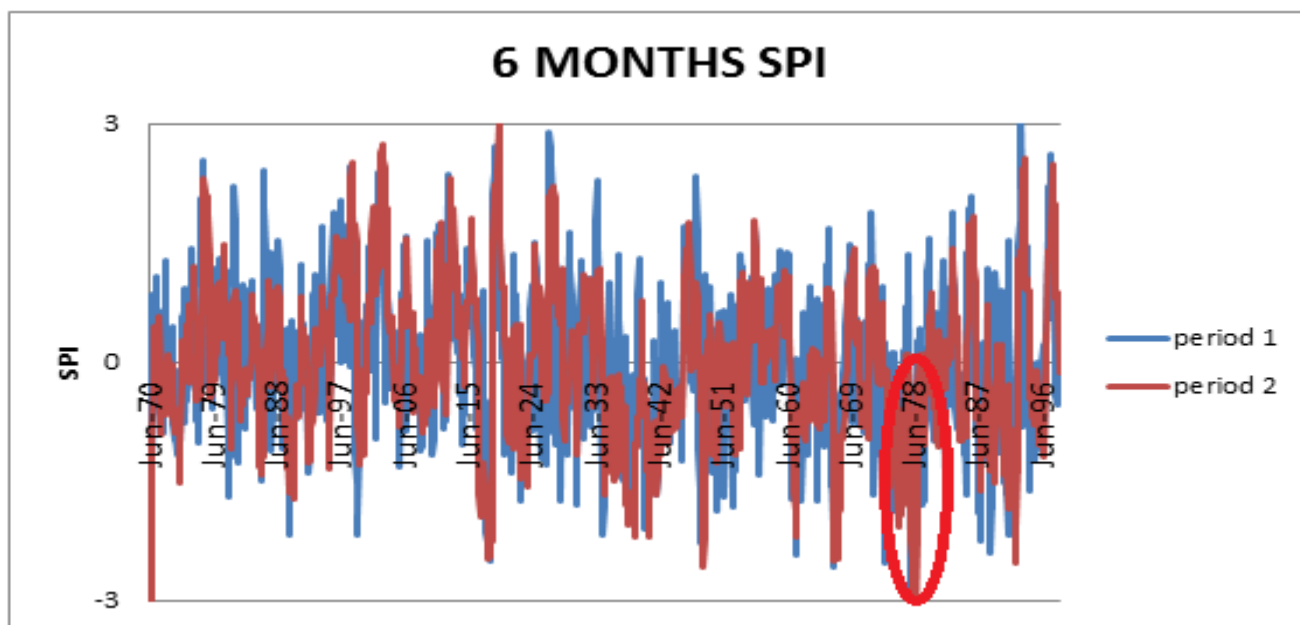
Στην τρέχουσα μελέτη ο δείκτης SPI υπολογίζεται για τους 6 καθώς και τους 12 μήνες. Κατά την εκτίμηση του δείκτη για τους έξι μήνες, γίνεται σύγκριση της βροχόπτωσης της εξάμηνης περιόδου με κάθε μία από τις εξάμηνες περιόδους, στο σύνολο των δεδομένων κατακρήμνισης που διατίθενται για ολόκληρο το διάστημα που εξετάζεται. Αντίστοιχα υπολογίζοντας τον δείκτη SPI για τους δώδεκα μήνες, συγκρίνεται η βροχόπτωση της περιόδου των δώδεκα μηνών με κάθε μία από τις επόμενες αντίστοιχες περιόδους στο σύνολο των δεδομένων που διατίθενται.

Για τον υπολογισμό του δείκτη ξηρασίας χρησιμοποιείται ειδικά σχεδιασμένο πρόγραμμα προσδιορισμού του δείκτη SPI, το οποίο αποτελεί μέρος μίας μελέτης του πανεπιστημίου της Nebraska. Στην ουσία στο συγκεκριμένο πρόγραμμα εισάγονται τα μηνιαία δεδομένα κατακρήμνισης ενός βροχομετρικού σταθμού, που μπορεί να θεωρηθεί αντιπροσωπευτικός για την περιοχή που μελετάται, ενώ στη συνέχεια τα αποτελέσματα που εξάγονται αφορούν στην τιμή του δείκτη SPI .

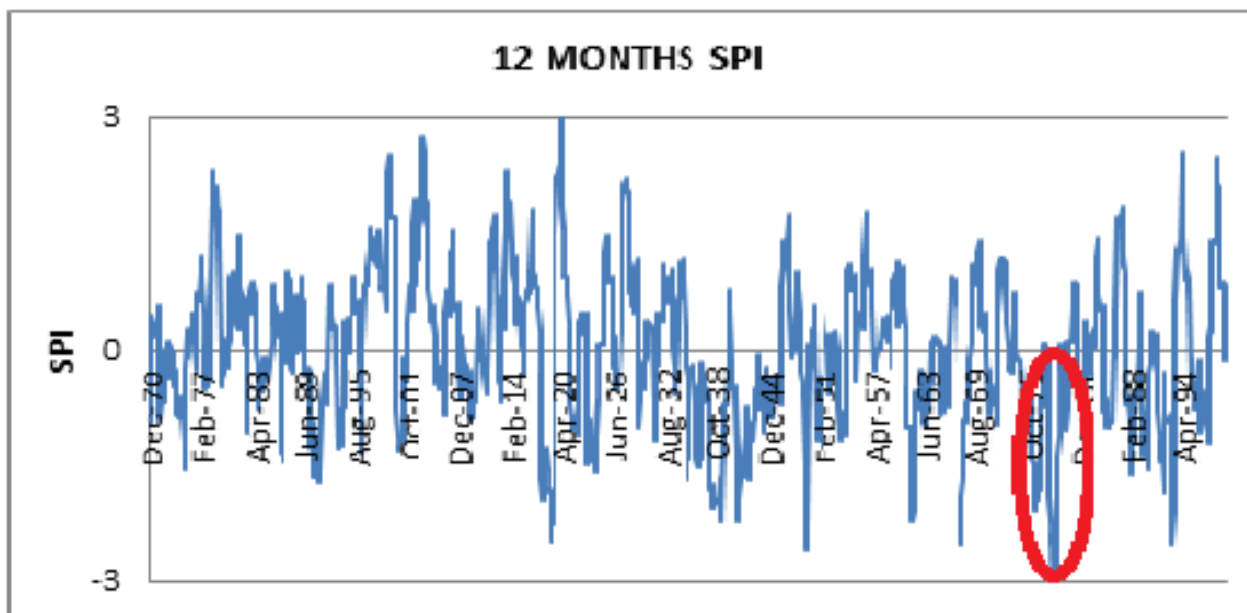
Στα διαγράμματα που παρατίθενται στη συνέχεια, παρατηρείται γενικότερα ανοδική και καθοδική τάση στην ξηρασία σε όλα τα χρόνια, πράγμα το οποίο είναι φυσιολογικό δεδομένου ότι υπάρχουν περίοδοι

ανά τα έτη στις οποίες η κατακρήμνιση δε θα είναι τόσο έντονη, πόσο μάλλον όταν αυτές οι υποπερίοδοι αφορούν στους καλοκαιρινούς μήνες. Κατά τον τρόπο αυτόν δικαιολογείται η λοιπόν η ελλειμματική τάση που παρουσιάζει ανά περιόδους ο ταμιευτήρας της παρούσας μελέτης, που σημαίνει σε περισσότερο ξηρές περιόδους δε μπορεί να ανταποκριθεί πλήρως στην ποσότητα ύδατος που απαιτείται τόσο για το δίκτυο άρδευσης όσο και για το δίκτυο ύδρευσης.

Παρόλα αυτά, τόσο στο διάγραμμα υπολογισμού του δείκτη ξηρασίας ανά έξι μήνες, (Διάγραμμα 35) όσο και στη γραφική απεικόνιση του ίδιου δείκτη ανά δώδεκα μήνες, (Διάγραμμα 36) γίνεται αντιληπτή η εμφάνιση μίας έντονης περιόδου ξηρασίας τη δεκαετία 2074-2083. Σε αυτό το χρονικό διάστημα, ο δείκτης παίρνει τιμές κοντά στο -3, όπου σύμφωνα με τον πίνακα αξιολόγησης της ξηρασίας, η τόσο χαμηλή τιμή του δείκτη οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η περίοδος χαρακτηρίζεται από «υπερβολική ξηρασία».



Διάγραμμα 35: Υπολογισμός Δείκτη Ξηρασίας SPI ανά έξι μήνες



Διάγραμμα 36: Υπολογισμός Δείκτη Ξηρασίας SPI ανά δώδεκα μήνες

Διαπιστώνοντας ένα τόσο έντονο φαινόμενο ξηρασίας, δε θα ήταν ανέφικτο να μην γίνει μία μικρή έρευνα όσον αφορά τις επιπτώσεις που θα έχει στην λειτουργία του ταμιευτήρα, δηλαδή στην ποσότητα του νερού που θα μπορεί να αποδώσει τόσο για τις ανάγκες ύδρευσης όσο και για τις ανάγκες άρδευσης.

Υπολογίζεται λοιπόν ότι ο μέσος όγκος του νερού μέσα στον ταμιευτήρα αυτή την περίοδο είναι μόλις 6, εκ.κυβικά μέτρα, όμως δεδομένου ότι πάντα υπάρχει ελάχιστη ποσότητα νερού μέσα στο φράγμα η οποία όπως έχει υπολογιστεί από την παρούσα μελέτη ανέρχεται στα 2 εκ.κυβικά μέτρα ύδατος, τότε η ποσότητα ύδατος που θα χρησιμοποιείται την τρέχουσα περίοδο από τον ταμιευτήρα για την κάλυψη αρδευτικών και υδρευτικών αναγκών είναι μόλις 4 εκ.κυβικά μέτρα . Φυσικά το παραπάνω συμπέρασμα βασίζεται στο σενάριο λειτουργίας του φράγματος Ποταμών, που όπως έχει ήδη διατυπωθεί αποσκοπεί στην κάλυψη αναγκών 15 εκ.κυβικών μέτρων νερού ανά έτος. Κατά την τρέχουσα περίοδο λοιπόν, ο ταμιευτήρας δε θα μπορεί να αποδώσει την επιθυμητή ποσότητα ύδατος, καθώς η λειτουργία του θα επηρεαστεί σε σημαντικό βαθμό, δεδομένου ότι οι κατακρημνίσεις την παρούσα περίοδο είναι αισθητά μειωμένες, έχοντας ως αποτέλεσμα τη μείωση της παροχής νερού σε αυτόν.

Συμπεραίνεται λοιπόν ότι, η δεκαετία παρατεταμένης ξηρασίας είναι η μόνη περίοδος που θα επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό τη λειτουργία του ταμιευτήρα, ενώ ταυτόχρονα δεν θα καλυφθούν οι ανάγκες των κατοίκων των γύρω περιοχών. Το συμπέρασμα το οποίο προκύπτει είναι ότι ο ταμιευτήρας θα υποστεί σημαντικό πλήγμα λόγω του έντονου φαινομένου της δεκαετίας αυτής.

Για το λόγο αυτό, σημαντικό είναι για την αντιμετώπιση του προβλήματος να εξεταστεί η πιθανότητα υδρομάστευσης από κάποιο παραπόταμο ή πηγή την τρέχουσα περίοδο λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι τα εδάφη πρέπει να είναι αδιαπέρατα.

6.Συμπεράσματα

Από την μελέτη του φράγματος Ποταμών Αμαρίου και την μοντελοποίηση της υδρολογίας του, προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Η μοντελοποίηση (calibration) είναι πολύ ικανοποιητική, πράγμα το οποίο επιβεβαιώνεται τόσο από τον υπολογισμό ανάλογων δεικτών, των οποίων η ένδειξη πιστοποιεί την πολύ σωστή προσομοίωση των τιμών του μοντέλου με τις παρατηρούμενες τιμές, λαμβάνοντας τιμές οι οποίες ήταν επιθυμητές, όσο και από την επαλήθευση (verification) των ίδιων τιμών για άλλη χρονική περίοδο. Σύμφωνα με το υδρολογικό ισοζύγιο της λεκάνης απορροής η ποσότητα του νερού που προέρχεται από την κατακρήμνιση υπολογίστηκε 1.208 mm/year εκ των οποίων περίπου $0.28 \text{ Mm}^3/\text{year}$ απορρέουν στη λεκάνη μέσω της πλάγιας ροής (lateral flow), από την ποσότητα του νερού που κατεισδύει στο ρηχό υδροφορέα (shallow aquifer) περίπου $0.21 \text{ Mm}^3/\text{year}$ καταλήγουν σε αυτή ενώ μόλις $0.046 \text{ Mm}^3/\text{year}$ προέρχονται από την επιφανειακή απορροή (surface runoff). Η συνολική ποσότητα νερού που καταλήγει μέσα στη λεκάνη είναι περίπου $0.53 \text{ Mm}^3/\text{year}$, ποσότητα σχετικά ικανοποιητική δεδομένου ότι λόγω της βλάστησης της περιοχής μεγάλη ποσότητα νερού εξατμίζεται παρά το ότι η σύσταση των εδαφών (μη διαπερατά) δεν ευνοεί την κατείσδυση του νερού στα ενδότερα στρώματα.
- Το μοντέλο του ταμιευτήρα (reservoir) προσομοιώθηκε πλήρως, το οποίο εξακριβώνεται από το γεγονός ότι το έλλειμμα που παρουσιάζει κάθε εναλλακτικό σενάριο λειτουργίας του φράγματος, είναι αρκετά μικρό, με αποτέλεσμα το φράγμα να εμφανίζει πληρότητα ή έστω σχετική πληρότητα σε ένα μεγάλο μέρος του υπό εξέταση διαστήματος, ενώ ταυτόχρονα είναι σε θέση να ικανοποιήσει σε μεγάλο βαθμό τις απαιτήσεις των γύρω περιοχών, όσον αφορά στις ανάγκες ύδρευσης και άρδευσης.
- Στο σενάριο λειτουργίας του φράγματος, κατά το οποίο ζητούνται απαιτούνται 15 εκ.κυβικά μέτρα ύδατος ώστε να καλυφθούν οι ανάγκες, η αστοχία είναι της τάξης του 12%, που σημαίνει ότι είναι οι μήνες κατά τους οποίους οι ανάγκες αυτές δε θα μπορούν να καλυφθούν πλήρως είναι 57 δηλαδή σχεδόν 5 χρόνια, το οποίο είναι πολύ ικανοποιητικό ως προς τα 40 χρόνια λειτουργίας του φράγματος τα οποία μελετώνται.
- Η αξιοπιστία της προσομοίωσης του ταμιευτήρα (validation) εξακριβώνεται με τη σύγκριση δεδομένων της στάθμης καθώς και του όγκου του ταμιευτήρα που παραχωρούνται από την υπηρεσία Ο.ΑΔΥ.Κ., όπου μέσα από την κατασκευή διαγραμμάτων διαπιστώνεται η σχεδόν πλήρης ταυτοποίηση αυτών με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την παρούσα μελέτη.
- Στη μελέτη χρησιμοποιείται το ενδιάμεσο σενάριο κλιματικής αλλαγής RCP4.5, με τη χρήση του οποίου παρατηρείται αισθητή μείωση της παροχής στο συνολικό διάστημα σε ποσοστό 27%, καθώς και σχετική μείωση της βροχόπτωσης της τάξης του 12%. Γενικότερα παρατηρείται σχετική σταθερότητα μέχρι το 2060, από εκεί και έπειτα υπάρχουν σχετικά μεγαλύτερες μεταβολές.

- Με τον έλεγχο του δείκτη ξηρασίας SPI, αν και η τιμή του υπολογίζεται για ολόκληρο το χρονικό διάστημα στο οποίο γίνεται η μελέτη, η προσοχή εστιάζεται περισσότερο σε μία δεκαετία εκτεταμένης ξηρασίας (2074-2083), κατά την οποία βγαίνει το πόρισμα ότι η βροχόπτωση είναι σχετικά υψηλή, δηλαδή 980 mm/year κατά μέσο όρο όπως υπολογίζεται, όμως λόγω της αυξημένης εξατμισοδιαπνοής καθώς και κλιματικών φαινομένων της περιοχής μεγάλο μέρος των κατακρημνίσεων δεν εισέρχεται στον ταμιευτήρα. Την αντίστοιχη περίοδο ο ταμιευτήρας μπορεί να δεχτεί 6 εκ.κυβικά μέτρα νερού ετησίως, από τα οποία μπορεί να προσφέρει 4.εκ.κυβικά μέτρα ύδατος καθώς η πλήρης εκκένωση του θα επιδράσει αρνητικά στην ποιότητα του νερού. Η αστοχία του ταμιευτήρα την τρέχουσα περίοδο είναι πολύ μεγάλη δεδομένου ότι κατασκευάστηκε με σκοπό να μπορεί να αποδώσει 15 εκ. κυβικά μέτρα ετησίως. Η έντονη περίοδος ξηρασίας στην οποία αναφερόμαστε είναι απόλυτα φυσιολογικό να επηρεάσει τόσο τη λειτουργία του ταμιευτήρα όσο και την ποσότητα την οποία θα είναι σε θέση να αποταμιεύσει. Όμως όπως έχει ήδη αναφερθεί, κρίνεται επιτακτική η ανάγκη κάλυψης αναγκών για αυτή την περίοδο, πρέπει να γίνει νέα μελέτη που αφορά στην μάστευση ύδατος με οποιοδήποτε τρόπο θεωρείται εφικτός, , ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή.
- Τα συμπεράσματα αυτά επιβεβαιώθηκαν και από το μοντέλο SWAT, το οποίο προσομοιώνει σε ικανοποιητικό βαθμό την υδρολογία του φράγματος Ποταμών Αμαρίου και να καταδεικνύει τις ευαίσθητες χρονικές περιόδους
- Το μοντέλο SWAT είναι ένα πολύ ευέλικτο και αξιόπιστο εργαλείο στη λήψη αποφάσεων για τη διαχείριση των υδάτων, ειδικά κάτω από την ανάγκη για εναρμόνιση με την οδηγία πλαίσιο και ότι και αν βαθμονομηθεί σωστά, είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικό στην εξέταση σεναρίων διαχείρισης λεκανών απορροής στη Μεσόγειο
- Η εφαρμογή των προτεινόμενων διαχειριστικών πρακτικών στο βαθμονομημένο μοντέλο της λεκάνης του φράγματος που μελετάται, καταδεικνύει ότι μπορεί να καλυφθεί ένα πολύ μεγάλο μέρος των αναγκών των κατοίκων των γύρω περιοχών (κάμπος Ρεθύμνης), επιλύοντας το πρόβλημα ύδρευσης καθώς και της περιορισμένης άρδευσης, αφού κατά τις πρακτικές που διερευνώνται, ενισχύεται σε πολύ μεγάλο βαθμό το αρδευτικό δίκτυο. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να ενισχυθεί σημαντικά η ανάπτυξη των γύρω αγροτικών περιοχών, επιφέροντας αύξηση των ειδών που μπορούν να καλλιεργηθούν αλλά και αύξηση της ποσότητας παραγωγής των ήδη υπαρχόντων.

7.Βιβλιογραφία

7.1.1.Διεθνής Βιβλιογραφία

1. Alpert, P., Krichak, S. O., Shafir, H., Haim, D., & Osetinsky, I. (2008). Climatic trends to extremes employing regional modeling and statistical interpretation over the E. Mediterranean. *Global and Planetary Change*, 63(2–3), 163–170.
2. Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. (1998). Large Area Hydrologic Modeling and Assessment Part I: Model Development. *Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 73–89.
3. Arnold, J. G., Williams, J. R., & Maidment, D. R. (1995). Continuous-Time Water and Sediment-Routing Model for Large Basins. *Journal of Hydraulic Engineering*, 121(2), 171–183. Beasley, D. B., Huggins, L. F., & E.J., M. (1980). ANSWERS: A model for watershed planning. *Transactions of the ASAE*. 23 (4), (7038), 938–944.
4. Boyle, D. P., Gupta, H. V., & Sorooshian, S. (2000). Toward improved calibration of hydrologic models,: Combining the strengths of manual and automatic methods. *Water Resources Research*, 36(12), 3663–3674.
5. Brohan, P., Kennedy, J. J., Harris, I., Tett, S. F. B., & Jones, P. D. (2006). Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes,: A new data set from 1850. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 111(12), 1–21
6. Chandler, R., & Wheeler, H. (2002). Analysis of rainfall variability using generalized linear models,: A case study from the west of Ireland. *Water Resources Research*, 38(10), 674–689.
7. Cooper, M. (2010). Advanced Bash-Scripting Guide An in-depth exploration of the art of shell scripting Table of Contents. Okt 2005 Abrufbar Uber [Httpwww Tldp orgLDPabsabsguide Pdf](http://www.tldp.org/LDP/absabsguide/Pdf) Zugriff 1112 2005, 2274(November 2008), 2267–2274.
8. Dai, A., Qian, T., Trenberth, K. E., & Milliman, J. D. (2009). Changes in continental freshwater discharge from 1948 to 2004. *Journal of Climate*, 22(10), 2773–2792.
9. Engel, B., Storm, D., White, M., Arnold, J., & Arabi, M. (2007). A hydrologic/water quality model application protocol. *Journal of the American Water Resources Association*, 43(5), 1223–1226.
10. Friedman, R., Ansell, C.S., Diamond, S., Haimes, Y.Y., 1984. The use of models for water resources management, planning and policy. *Water Resour. Res.* 20, 793-802
11. Gassman, P. W., Reyes, M. R., Green, C. H., & Arnold, J. G. (2007). The soil and water

- assessment tool,: Historical development, applications, and future research directions. *Trans. Asabe*, 50(4), 1211–1250.
12. Giambastiani, B. M. S., Antonellini, M., Oude Essink, G. H. P., & Stuurman, R. J. (2007). Saltwater intrusion in the unconfined coastal aquifer of Ravenna (Italy): A numerical model. *Journal of Hydrology*, 340(1–2), 91–104. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.04.001>
 13. Giannakopoulos, C., Le Sager, P., Bindi, M., Moriondo, M., Kostopoulou, E., & Goodess, C. M. (2009). Climatic changes and associated impacts in the Mediterranean resulting from global warming. *Global and Planetary Change*, 68(3), 209–224.
 14. Golden Software Inc., 1989. Surfer Version 4 Reference Manual,: Golden Software Inc., Golden, Colorado, 534 p.
 15. Grillakis, M. G., Koutroulis, A. G., & Tsanis, I. K. (2011). Climate change impact on the hydrology of Spencer Creek watershed in Southern Ontario, Canada. *Journal of Hydrology*, 409(1–2)
 16. Gupta, H.V., Khodatalab, N., Wagener, T., Sorooshian, S., 2003. Advances in semi distributed watershed modeling. EGS-AGU-EUG Joint Assembly, Geophysical Research Abstracts, Vol. 5, European Geophysical Society, American Geophysical Union, Nice.
 17. Horn, A. L., Hörmann, G., & Fohrer, N. (2005). Application of a virtual watershed in academic education. *Advances in Geosciences*, 5, 137–141.
 18. Jacobs, J. H. (2003). 2003 International SWAT Conference.
 19. Kamari, J., 1985. A model for analyzing lake water acidification on a regional scale. Report # CP-85-48. International Institute for Applied Systems Analysis, 2361 Laxenberg, Austria
 20. Klemeš, V. (1986). Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrological Sciences Journal*, 31(1), 13–24.
 21. Krause, P., & Boyle, D. P. (2005). Advances in Geosciences Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances In Geosciences*, 5(89), 89–97.
 22. Kundzewicz, Z. W., Mata, L. J., Arnell, N. W., Döll, P., Jimenez, B., Oki, T., ... Shiklomanov, I. (2015). The implications of projected climate change for freshwater resources and their management resources and their management, 6667(November).
 23. Lambert, F. H., Stott, P. A., Allen, M. R., & Palmer, M. A. (2004). Detection and attribution of changes in 20th century land precipitation. *Geophysical Research Letters*, 31(10).
 24. Leggett, J., Pepper, W. J., Swart, R. J., Edmonds, J., Meira Filho, L. G., Mintzer, I., ... Wasson, J. (1992). Emissions scenarios for the IPCC,: an update. *Climate Change 1992,: The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment*, 69–95.
 25. Lenhart, T., Eckhardt, K., Fohrer, N., & Frede, H. G. (2002). Comparison of two different approaches of sensitivity analysis. *Physics and Chemistry of the Earth*, 27(9–10), 645–654.
 26. Mckee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and

- duration to time scales. *AMS 8th Conference on Applied Climatology*, (January), 179–184.
27. Middelkoop, H., Daamen, K., Gellens, D., Grabs, W., Kwadijk, J. C. J., Lang, H., ... Wilke, K. (2001). Impact of Climate Change on Hydrological Regimes and Water Resource Management in the Rhine River Basin. *Climatic Change*, 49, 105–128.
 28. Mimikou, M. a. (2013). Assessment of Climate Change Impacts in Greece,: A General Overview. *American Journal of Climate Change*, 2(March), 46–56.
 29. Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Binger, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900.
 30. Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River Flow Forecasting Through Conceptual Models Part I-a Discussion of Principles*. *Journal of Hydrology*, 10, 282–290.
 31. Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R., 2001. Soil and Water Assessment Tool. Theoretical Documentation, Version 2000. Blackland Research Center, Agricultural Research Service, Texas, USA
 32. Neitsch, S. ., Arnold, J. ., Kiniry, J. ., & Williams, J. . (2011). Soil & Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009. *Texas Water Resources Institute*, 1–647.
 33. Nikolaidis, N.P., Rajaram, H., Schnoor, J.L., Georgankakos, K.P., 1988. A generalized soft water acidification model. *Water Resources Res.* 24, 1983-96.
 34. Peck, D. L. (1992). HYDRO-CLIMATIC DATA NETWORK (HCDN) ,: FOR THE UNITED STATES FOR THE STUDY OF CLIMATE
 35. Pisinaras, V., Petalas, C., Gikas, G. D., Gemitzi, A., & Tsihrintzis, V. A. (2010). Hydrological and water quality modeling in a medium-sized basin using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT). *Desalination*, 250(1), 274–286.
 36. Protocol, K. (1997). United Nations framework convention on climate change. *Kyoto Protocol*, Kyoto.
 37. Refsgaard, J. C. (1997). Parameterisation, calibration and validation of distributed hydrological models. *Journal of Hydrology*, 198(1–4), 69–97.
 38. Rijsberman, F. R. (2004). Water Scarcity ,: Fact or Fiction ?, 1–14.
 39. S.D. Nerantzaki, G.V. Giannakis, D. Efstathiou, N.P. Nikolaidis, I.A. Sibetheros, G.P. Karatzas, I. Zacharias, 2015. Modeling suspended sediment transport and assessing the impacts of climate change in a karstic Mediterranean watershed, *Science of The Total Environment*; 538 ,: 288-97
 40. Salas, J.D., Delleur, J.W., Yevjevich, V., Lane, W.L., 1980. Applied Modeling of Hydrologic Time Series, Water Resources Publications, Littleton, Colorado
 41. Santhi, C., Arnold, J. G., Williams, J. R., Dugas, W. a., Srinivasan, R., & Hauck, L. M. (2001). Validation of the SWAT Model on A Large River Basin With Point and Nonpoint Sources. *Journal of American Water Resources Association*.

42. Schnoor, J.L., Palmer, W.D., Jr & Glass, G.E., 1984. Modeling impacts of acid precipitation for northeastern Minnesota. In *Modeling of Total Acid Precipitation Impact*, ed. J. L. Schnoor. Butterworth, Boston, MA, 155-73
43. Schnoor, J. L. (1996). Flow e x • change Lateral Flow Transpirati • Percolation, 24(12), 1983–1996.
44. Schnoor, J. L., 2003. Περιβαλλοντικά Μοντέλα – Τύχη και μεταφορά ρύπων στον αέρα, νερό και έδαφος (Μεταφρασμένο), Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη
45. Spence, C., Bos, E., & Chipara, M. (n.d.). *Editado por Megan Dyson, , Ger Bergkamp and John Scanlon*. V, E. S. P. B., & Bobba, A. G. (1990). Ecological Modellin~ 50 (1990) 5-32, 50(July 1988), 5–32.
46. van Griensven, A., Meixner, T., Grunwald, S., Bishop, T., Diluzio, M., & Srinivasan, R. (2006). A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. *Journal of Hydrology*, 324(1–4), 10–23.
47. Wels, C., Cornett, R. J., & LaZerte, B. D. (1990). Groundwater and Wetland Contributions to Stream Acidification,: An Isotopic Analysis. *Water Resources Research*, 26(12), 2993–3003.
48. Williams, J.R., 1969. Flood routing with variable travel time or variable storage coefficients. *Trans. ASAE* 12 (1), 100-103
49. Young, R. A., Onstad, C. A., Bosch, D. D., & Anderson, W. P. (1989). AGNPS,: A nonpoint-source pollution model for evaluating agricultural watersheds. *Journal of Soil and Water Conservation*, 44(2), 168–173.
50. Zhang, Z., Wang, S., Sun, G., McNulty, S. G., Zhang, H., Li, J., ... Strauss, P. (2008). Evaluation of the MIKE SHE model for application in the Loess Plateau, China. *Journal of the American Water Resources Association*, 44(5), 1108–1120.

7.1.2.Ελληνική Βιβλιογραφία

1. Βαφειάδης Μ., 2005, Σημειώσεις «Ταμειυτήρες», Τομέας Υδραυλικής και Τεχνικής Περιβάλλοντος, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
2. Ευστρατιάδης, Α., 2008. Μη γραμμικές μέθοδοι σε πολυκριτηριακά προβλήματα βελτιστοποίησης υδατικών πόρων, με έμφαση στη βαθμονόμηση υδρολογικών μοντέλων. Διδακτορική Διατριβή. Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Υδατικών πόρων και Περιβάλλοντος, ΕΜΠ. Αθήνα, Φεβρουάριος, 2008
3. Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο. (2000). Οδηγία 2000/60/Εκ Του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου Και Του Συμβουλίου, (7), 1–69.
4. Μαμάσης, Ν., 2007. Παρουσιάσεις στο μάθημα «Προχωρημένη Υδρολογία» του ΔΠΜΣ «Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων», ΕΜΠ

5. Μιμίκου, Μ.Α., 2006. Τεχνολογία Υδατικών Πόρων. Γ' έκδοση, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, 2006
6. Νικολαΐδης, Ν., 2013. Εφαρμογές σε Περιβαλλοντικά Μοντέλα, Σημειώσεις μαθήματος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Χανιά
7. Περιφέρεια Κρήτης , 2012, Μελέτη για την Αναθεώρηση – Επικαιροποίηση του Περιφερειακού Σχεδιασμού Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων (ΠΕΣΔΑ) Περιφέρειας Κρήτης, «Υφιστάμενη Κατάσταση Περιβάλλοντος», Κεφάλαιο 5
8. Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας , 2014 «Προσχέδιο διαχείρισης των λεκανών απορροής του υδατικού διαμερίσματος Κρήτης», «Υπόγεια Υδατικά Συστήματα»

8. Παράρτημα

Αλγόριθμοι που χρησιμοποιήθηκαν στο Microsoft Office Excel για την προσομοίωση του φράγματος,:

Όγκος (m³)

if season = Wet then

if $Q_{in} \geq \frac{2}{3} * V_{max}$ or $V_{i-1} \geq 0.7 * V_{max}$ then

if $V_{i-1} + 90\% Q_{in} + P_{in} - PET - Q_{απαιτ} \leq V_{max}$ then

$$V_i = V_{i-1} + 90\% Q_{in} + P_{in} - PET - Q_{απαιτ}$$

else $V_i = V_{max}$

else if $V_{i-1} + Q_{in} + P_{in} - PET - Q_{eco} - Q_{απαιτ} > V_{max}$

then $V_i = V_{max}$

else if $V_{i-1} + Q_{in} + P_{in} - PET - Q_{eco} - Q_{απαιτ} < V_{min}$

then if $V_{i-1} + Q_{in} + P_{in} - PET - Q_{eco} < V_{min}$

$$\text{then } V_i = V_{i-1} + Q_{in} + P_{in} - PET - (V_{i-1} - V_{min} + Q_{in} + P_{in} - PET)$$

else $V_i = V_{min}$

else $V_i = V_{i-1} + Q_{in} + P_{in} - PET - Q_{eco} - Q_{απαιτ}$

else if $V_{i-1} + Q_{in} + P_{in} - PET - Q_{eco} - Q_{απαιτ} > V_{max}$

then $V_i = V_{max}$

else if $V_{i-1} + Q_{in} + P_{in} - PET - Q_{eco} - Q_{απαιτ} < V_{min}$

then if $V_{i-1} + Q_{in} + P_{in} - PET - Q_{eco} < V_{min}$

$$\text{then } V_i = V_{i-1} + Q_{in} + P_{in} - PET - (V_{i-1} - V_{min} + Q_{in} + P_{in} - PET)$$

else $V_i = V_{min}$

else $V_i = V_{i-1} + Q_{in} + P_{in} - PET - Q_{eco} - Q_{απαιτ}$

- Wet season=Ιανουάριος, , Φεβρουάριος, Νοέμβριος, Δεκέμβριος
- Συνθήκη για να εφαρμοστεί το $Q_{in} = 10\% Q_{out} + 90\% Q_{storage}$,:

$$Q_{in} \geq \frac{2}{3} * V_{max} \text{ or } V_{i-1} \geq 0.7 * V_{max}$$

Q_{out} - Υπεργείλιση [m³/month]

if season = Wet then

if $Q_{in} \geq \frac{2}{3} * V_{max}$ or $V_{i-1} \geq 0.7 * V_{max}$ then

if $V_{i-1} + 90\% Q_{in} + P_{in} - PET - Q_{απατ} \geq V_{max}$

then $Q_{out} = V_{i-1} + Q_{in} + P_{in} - PET - Q_{απατ} - V_{max}$

else $Q_{out} = 10\% Q_{in}$

else if $V_{i-1} + Q_{in} + P_{in} - PET - Q_{eco} - Q_{απατ} \geq V_{max}$ then

$Q_{out} = V_{i-1} + Q_{in} + P_{in} - PET - Q_{απατ} - V_{max}$

else if $V_{i-1} - V_{min} + Q_{in} + P_{in} - PET - Q_{eco} < 0$

then if $V_{i-1} - V_{min} + Q_{in} + P_{in} - PET > 0$

then $Q_{out} = V_{i-1} - V_{min} + Q_{in} + P_{in} - PET$

else $Q_{out} = 0$

else $Q_{out} = Q_{eco}$

Q_{irr} - final [m³/month]

if $V_{i-1} + Q_{in} + P_{in} - PET - Q_{eco} - Q_{απατ} < V_{min}$

then if $V_{i-1} + Q_{in} + P_{in} - PET - Q_{eco} - V_{min} < 0$

then $Q_{irr-final} = 0$

else $Q_{irr} = V_{i-1} + Q_{in} + P_{in} - PET - Q_{eco} - V_{min}$

else $Q_{irr-final} = Q_{απατ}$