



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Μοντελοποίηση της Υδρορροής του ποταμού Ταυρωνίτη
και αξιολόγηση του προτεινόμενου φράγματος
Σεμπρωνιώτη**

ΚΟΥΡΗ ΑΜΑΡΥΛΛΙΣ-ΙΩΑΝΝΑ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

ΝΙΚΟΛΑΪΔΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)

ΚΑΡΑΤΖΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΠΑΡΑΝΥΧΙΑΝΑΚΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

Χανιά, 2015

Ν' αγαπάς την ευθύνη. Να λες:

Εγώ, εγώ μονάχος μου έχω χρέος
να σώσω τη γη. Αν δε σωθεί, εγώ φταίω.

Νίκος Καζαντζάκης

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος και επιβλέποντα στην παρούσα διπλωματική εργασία κ. Νικόλαο Νικολαΐδη για την ανεκτίμητη βοήθειά του και το χρόνο που διέθεσε για τη συνεχή καθοδήγηση καθόλη την διάρκεια εκπόνησής της.

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

Θα ήθελα επίσης να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στη Σοφία Νερατζάκη για την άψογη συνεργασία καθώς και τη συνεχή υποστήριξη και βοήθεια, όποτε ήταν αναγκαίο.

Επίσης ευχαριστώ τους φίλους μου στα Χανιά και την Αθήνα για όλες τις στιγμές και ιδιαιτέρως τον Γιώργο Σπαή, την Friederike, την Εύα, τη Μαίρη, τον Γιώργο Κονδυλάκη, τη Μαρία, την Αργυρώ, την Ελευθερία, τον Βαγγέλη και το Φίλιππο!

Ακόμη θέλω να ευχαριστήσω τον Αλέξανδρο Δημητρίου που έκανε την bias προσαρμογή για τους μετεωρολογικούς σταθμούς της εργασίας, αλλά και για την καλή παρέα κατά τη διάρκεια εκπόνησής της.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την απεριόριστη ευγνωμοσύνη και αγάπη στην οικογένειά μου για την ηθική και οικονομική συμπαράστασή τους όλα αυτά τα χρόνια.

Περίληψη

Η περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας είναι η λεκάνη απορροής του ποταμού Ταυρωνίτη που βρίσκεται στη νήσο Κρήτη, στην Περιφερειακή Ενότητα Χανίων και έχει έκταση περίπου 173 Km². Σε αυτήν εφαρμόστηκε το ημι-κατανεμημένο μοντέλο Soil and Water Assessment Tool (SWAT 2012), σε συνδυασμό με περιβάλλον ΓΣΠ, για την εκτίμηση του υδατικού ισοζυγίου της λεκάνης απορροής. Από τη μοντελοποίηση βρέθηκε ότι οι ετήσιες παροχές του Σεμπρωνιώτη, Ρουματιανού και Ντεριανού είναι 13.6 εκατ. m³/yr, 16.4 εκατ. m³/yr και 32.2 εκατ. m³/yr αντίστοιχα. Ο συντελεστής επιφανειακής απορροής (Runoff Coefficient) ήταν 0.44. Η αποτελεσματικότητα του μοντέλου ελέγχθηκε με χρήση διαφόρων στατιστικών δεικτών, όπως οι NSE, RSR και PBIAS.

Στη συνέχεια δημιουργήθηκε μοντέλο προσομοίωσης φράγματος στο Microsoft Office Excel και με τα αποτελέσματα του SWAT για την παροχή, τη βροχόπτωση και την εξάτμιση, διερευνήθηκε η αποτελεσματικότητα του προτεινόμενου φράγματος στον παραπόταμο του Ταυρωνίτη, Σεμπρωνιώτη. Τέλος, εφαρμόστηκαν τρία τοπικά μοντέλα κλιματικής αλλαγής του σεναρίου A1B, για την πρόβλεψη των επιπτώσεων στο ποτάμι και στο προτεινόμενο φράγμα.

Οι επιπτώσεις των κλιματικών αλλαγών στην λεκάνη του ταυρωνίτη έχουν ως εξής. Η μέση ετήσια θερμοκρασία μέχρι το 2100 θα αυξηθεί κατά 4°C, η βροχόπτωση θα μειωθεί κατά 30% και αυτό θα οδηγήσει και σε μείωση της παροχής του κατά 48%. Για τον ταμιευτήρα Σεμπρωνιώτη ως στόχος επιλέχθηκε ετήσια απόληψη 4,982,500m³. Με βάση αυτό τον στόχο το φράγμα όγκου 5 εκ. m³ σύμφωνα με τις σημερινές συνθήκες θα έχει επιτυχία παροχής νερού 99%, δηλαδή θα παρέχει το 99% της συνολικής ετήσιας παροχής που απαιτείται. Η προσομοίωση με τα μοντέλα κλιματικών αλλαγών δείχνει ότι η επιτυχία παροχής νερού για αυτό το φράγμα, το 2040 γίνεται 96% και μέχρι το 2060, 72.3%. Για τον ταμιευτήρα όγκου 6 εκ. m³ από επιτυχία 100% με τα σημερινά δεδομένα, το 2040 πέφτει στο 99.3% και το 2060 στο 74.5%. Αυτό σημαίνει ότι με την προβλεπόμενη κλιματική αλλαγή και τις επερχόμενες ξηρασίες θα υπάρχουν σημαντικές συνέπειες στη λειτουργία του φράγματος και ο παραπόταμος Σεμπρωνιώτης δε θα μπορεί να παρέχει ικανοποιητική ποσότητα νερού για την πλήρωση του ταμιευτήρα κατά τη διάρκεια περιόδων ξηρασίας.

Abstract

The study area of this Diploma Thesis is Tavronitis river basin, located in Crete, in the prefecture of Chania and covers an area of 173 Km². The semi-distributed river basin model Soil and Water Assessment Tool (SWAT 2012) was applied, coupled with a GIS interface (ArcSWAT), in order to assess the hydrological budget of the watershed. The main results were that the annual average flows of Semproniotis, Roumatianos and Derianos are 13.6 million m³/yr, 16.4 million m³/yr and 32.2 million m³/yr respectively. Additionally, the runoff coefficient was found to be 0.44. The model's performance was evaluated using statistical parameters such as the NSE, PBIAS and RSR indices.

Subsequently, a reservoir simulation model was developed to investigate the performance of a proposed dam, with two different volumes, 5 million m³ and 6 million m³. Also, three climate change models were run, using the A1B scenario, in order to evaluate the impact of climate change on the river flow and the reservoir.

For Tavronitis river basin it was found that the average temperature will increase about 3-4°C until the end of the century, the annual precipitation will decrease about 30% and these will lead to a major decrease in the river flow of about 48%. For the reservoir there was a primary goal set, to provide 4,982,500m³ annually. According to this goal, nowadays the 5 million m³ reservoir will have a 99% success for providing water, which by 2040 will decrease to 96% and by 2060 to 72.3%. The simulation for a 6 million m³ reservoir suggested that with the present circumstances it will have a success of 100% in providing water, which by 2040 will decrease to 99.3% and by 2060 to 74.5%. The results suggest that the projected climate change and the resulting droughts, will have significant impacts in the operation of the reservoir and that the watershed will not be able to provide sufficient water to fill the reservoir during drought periods.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	3
Περίληψη	4
1. Εισαγωγή-Ανάλυση του Προβλήματος.....	2
1.1 Γενικά	2
1.2. Σκοπός της εργασίας	3
2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	4
2.1 Περιβαλλοντικά μοντέλα:	4
2.2 Υδρολογικά μοντέλα	4
2.2.1 Γενικά-Ορισμοί.....	4
2.2.2 Κατηγορίες μοντέλων	6
2.2.3. Βαθμονόμηση και Επαλήθευση Υδρολογικού Μοντέλου	8
2.3. Μοντέλο SWAT	12
2.3.1. Δεδομένα Εισόδου	12
2.3.2. Μεθοδολογία του Μοντέλου	13
2.3.3 Δημιουργία υδρολογικού ισοζυγίου.....	15
2.3.4. Διαχειριστικές πρακτικές στο μοντέλο	16
2.4. Φράγματα.....	16
2.4.1 Γενικά.....	16
2.4.1. Υδρολογικός Σχεδιασμός	18
2.4.2. Επιπτώσεις των φραγμάτων	19
2.5 Η κλιματική αλλαγή και ο IPCC.....	20
2.6 Μοντέλα σεναρίων	21
3. Περιγραφή της περιοχής μελέτης	26
3.1. Γενικά	26
3.2. Γεωμορφολογία	27
3.3. Γεωλογία	28
3.4. Υδρολογικά χαρακτηριστικά και υδρολογική κατάσταση.....	29
3.5. Κλιματολογικά στοιχεία.....	31
3.6. Η μελέτη του 1991 και προηγούμενες μελέτες για τον Ταυρωνίτη	31
4. Ανάπτυξη του Υδρολογικού Μοντέλου	34
4.1. Πρόγραμμα - Δεδομένα Εισόδου	34

4.2 Βαθμονόμηση-Επαλήθευση του μοντέλου	37
4.3 Αποτελέσματα Μοντελοποίησης	40
5. Προσομοίωση ταμιευτήρα	50
5.1 Εισαγωγή	50
5.2 Μηνιαίο Ισοζύγιο.....	51
5.3 Αποτελέσματα	56
6. Εφαρμογή σεναρίων για την κλιματική αλλαγή	58
6.1 Αποτελέσματα για τη λεκάνη απορροής	58
6.2 Αποτελέσματα για την υπολεκάνη και το φράγμα Σεμπρωνιώτη	64
7. Συμπεράσματα-Προτάσεις	71
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	74
Διεθνής Βιβλιογραφία.....	74
Ελληνική Βιβλιογραφία	77
Ηλεκτρονικές Πηγές	80
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	81
I. Διαγράμματα Παροχής-Όγκου φράγματος	81
II. Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιήθηκαν στο Microsoft Office Excel για την προσομοίωση του φράγματος:	82
III. Πίνακες	84
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΕΙΚΟΝΩΝ	86

1. Εισαγωγή-Ανάλυση του Προβλήματος

1.1 Γενικά

Το νερό είναι η πηγή της ζωής και συνεπώς, ένα από τα πολυτιμότερα αγαθά για τον άνθρωπο. Λόγω των μοναδικών ιδιοτήτων του, η πυκνότητά του σε στερεή κατάσταση να είναι μικρότερη από της υγρής κατάστασης και λόγω του πολικού χαρακτήρα του, υπάρχει ακόμα ζωή στον πλανήτη. Καλύπτει το 71% της επιφάνειας της γης, ενώ συνιστά τουλάχιστον το 65% του ανθρώπινου οργανισμού.

Παρ'ότι όμως είναι άφθονο, η διαθέσιμη ποσότητά του είναι περιορισμένη και η κατανομή του στο χώρο και στο χρόνο άνιση. Τα παραπάνω σε συνδυασμό με τη ρύπανσή του από ανθρωπογενείς δραστηριότητες, καθιστούν την ορθή διαχείρισή του όχι μόνο μεγάλη ευθύνη για κάθε άνθρωπο και φορέα, αλλά και ιδιαίτερα κρίσιμη.

Για την εύρεση λύσεων όσον αφορά τη διαχείριση των υδάτων και των υδάτινων οικοσυστημάτων, απαιτείται η συνολική εξέταση του ζητήματος. Μια προσέγγιση που επιπλέον λαμβάνει σοβαρά υπόψη, όχι μόνο τις ανθρώπινες απαιτήσεις σε νερό, αλλά και το περιβάλλον και την αειφορία του, δηλαδή τη διατήρηση του ύψους του υδροφόρου ορίζοντα και των υπόγειων υδροφορέων, τη συντήρηση των δασών και των οικοσυστημάτων, τα οποία συγκρατούν το νερό.

Οι υδατικοί πόροι της Ελλάδας στο σύνολό τους είναι επαρκείς, το κυριότερο πρόβλημα έγκειται στην υπερβολική ζήτησή τους κατά τους θερινούς μήνες και έτσι παρ'ότι το ισοζύγιο είναι πλεονασματικό, συχνά παρουσιάζεται λειψυδρία, που οφείλεται κυρίως στις πρακτικές εντατικής ανάπτυξης των αγροτικών καλλιεργειών, οι οποίες απαιτούν μεγάλες ποσότητες νερού ικανοποιητικής ποιότητας. Επίσης, η κλιματική αλλαγή δείχνει να επηρεάζει σταδιακά τον υδρολογικό κύκλο τοπικά και εν δυνάμει σε παγκόσμιο επίπεδο. Οι αρνητικές συνέπειες της κλιματικής αλλαγής πιστεύεται ότι θα είναι πιο δυσμενείς στην περιοχή της Μεσογείου, όπου υπάρχουν αυξημένες πιθανότητες ερημοποίησης μεγάλων εκτάσεων (Alpert et al., 2008). Η Ευρωπαϊκή Ένωση, αντιλαμβανόμενη τη ζωτική σημασία της διατήρησης και προστασίας των υδατικών πόρων εντός των συνόρων της, προχώρησε και συνεχίζει να καταστρώνει και εφαρμόζει περιβαλλοντικά προγράμματα σχετικά με τη βιώσιμη διαχείριση του νερού. Το 2000 με την Οδηγία Πλαίσιο για τα Νερά (2000/60/EK) και των επιμέρους θυγατρικών Οδηγιών, δίνει την κατεύθυνση για ενιαία διαχείριση των υδατικών πόρων, με κύριο σκοπό την επίτευξη καλής ποιότητας των υπόγειων και επιφανειακών υδάτων. (ΕΕ, 2000). Αυτή η Οδηγία αποτελεί ένα νομοθετικό πλαίσιο που αρχικά θέτει την έννοια της λεκάνης απορροής ποταμού (river basin) ως ουσιώδη για την ολοκληρωμένη διαχείριση και προστασία των υδάτων. Ακόμη, προβλέπει ότι τα κράτη-μέλη θα πρέπει να ορίσουν τα υδατικά διαμερίσματα που χαρακτηρίζονται ως περιοχές

λεκάνης απορροής ποταμού και καθορίζει τις ενέργειες που θα πρέπει να ακολουθηθούν, ώστε να αποφευχθεί η περαιτέρω υποβάθμιση των υδάτων και να επιτευχθεί η «καλή κατάσταση» μέχρι το 2015.

Επίσης τίθεται απαραίτητη η μαθηματική προσομοίωση των υδραυλικών και γεωχημικών στοιχείων με την εφαρμογή διαφόρων τύπων μοντέλων. Η χρήση τους για την εκτέλεση της Οδηγίας κρίνεται απαραίτητη γιατί τα μοντέλα είναι ικανά να προσομοιώσουν την κατάσταση των επιφανειακών και υπογείων υδάτων της περιοχής για την οποία καταρτίζεται το Διαχειριστικό Σχέδιο Υδάτων. Το μοντέλο SWAT θεωρείται ότι ανταποκρίνεται ικανοποιητικά στις απαιτήσεις που επιβάλλει η Οδηγία για τα νερά (Dilks et al., 2005). Την ευθύνη της εφαρμογής της Οδηγίας Πλαίσιο για τα Νερά στη χώρα μας την έχει το Υπουργείο Παραγωγικής Ανασυγκρότησης, Περιβάλλοντος και Ενέργειας.

1.2. Σκοπός της εργασίας

Η υπερεκμετάλλευση των περιορισμένων υδατικών πόρων στην περιοχή της Μεσογείου σε συνδυασμό με τις ενδεχόμενες επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, έχει προκαλέσει έντονη ανησυχία όσον αφορά τη βιωσιμότητα των πόρων και τον κίνδυνο ερημοποίησης της περιοχής (Fantechi et al., 1995). Στο νομό Χανίων, οι περιοχές γύρω από τον ποταμό Ταυρωνίτη τροφοδοτούνται με νερό για άρδευση, κυρίως από την πηγή Καλαμιώνα και τη λίμνη Αγκιάς (8.5εκ. m³), αλλά αυτές οι πηγές δεν είναι απεριόριστες και βιώνουν τον προαναφερθέντα κίνδυνο. Ταυτόχρονα, από τα συνολικά 65 εκ. m³ που κατά μέσο όρο έχει ο Ταυρωνίτης το χρόνο, αξιοποιούνται μόνο τα 4-5 εκ. m³. Η κατασκευή ενός ταμιευτήρα θα βοηθούσε στη συγκράτηση μέρους της παροχής του ποταμού Ταυρωνίτη, ώστε να ανεξαρτητοποιηθεί σε ένα βαθμό η περιοχή.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μοντελοποίηση της υδρορροής του ποταμού Ταυρωνίτη, με χρήση του υδρολογικού μοντέλου SWAT (Soil and Water Assessment Tool – Εργαλείο Αξιολόγησης Εδαφών και Νερού). Επιπλέον, μέσω των αποτελεσμάτων της μοντελοποίησης διερευνούνται οι συνθήκες λειτουργίας ταμιευτήρα στο Σεμπρωνιώτη, παραπόταμο του Ταυρωνίτη. Τέλος, χρησιμοποιώντας δεδομένα από σενάρια κλιματικής αλλαγής και με τη χρήση του βαθμονομημένου μοντέλου, γίνεται εκτίμηση της παροχής και του ενδεχομένου αστοχίας του προτεινόμενου φράγματος σε συνθήκες κλιματικής αλλαγής.

2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Για την περιγραφή και την πρόβλεψη της παρουσίας και κυκλοφορίας του νερού στη γη, σημαντικό αντικείμενο μελέτης είναι ο υδρολογικός κύκλος. Για την καλύτερη κατανόησή του, υπάρχουν τα μοντέλα:

2.1 Περιβαλλοντικά μοντέλα:

Η συμπεριφορά των περισσότερων φυσικών ή μη φαινομένων μπορεί να εκφραστεί με κάποια μαθηματική σχέση, η οποία συνήθως προκύπτει από ορισμένες υποθέσεις. Στη συνέχεια, εφαρμόζοντας διαφορετικές συνθήκες (τιμές) στη σχέση, μπορούν να βρεθούν διάφορα αποτελέσματα ή να πραγματοποιηθούν προβλέψεις. Όσο ακριβέστερη γίνεται η περιγραφή αυτών των μεταβολών, τόσο περιπλοκότερες γίνονται οι σχέσεις και τόσο προσεγγίζονται οι πραγματικές συνθήκες. Στο περιβάλλον, η μαθηματική περιγραφή αυτών των φαινομένων ειδικά σήμερα κρίνεται απαραίτητη, για τρεις κυριότερους λόγους (Schnoor, 2005):

- Για να αποκτήσουμε μία καλύτερη κατανόηση του αποτελέσματος και της μεταφοράς των χημικών ενώσεων με την ποσοτικοποίηση των αντιδράσεών τους, των μορφών τους και της μεταφοράς τους
- Για να προσδιορίσουμε τις συγκεντρώσεις έκθεσης σε χημικές ενώσεις για υδρόβιους οργανισμούς ή και ανθρώπους στο παρελθόν, στο παρόν ή στο μέλλον
- Για να προσδιορίσουμε τις μελλοντικές συνθήκες για διάφορα σενάρια επιβάρυνσης ή και εναλλακτικών ενεργειών διαχείρισης

Ο ορισμός «μοντέλου περιβάλλοντος» (Νικολαΐδης, 2013) δίνεται ως ακολούθως:

1. Μοντέλο είναι ένα κατασκευάσμα που ποσοστοποιεί, και που περιγράφει ή είναι ανάλογο χημικών, φυσικών ή βιολογικών φαινομένων.
2. Μοντέλο είναι μια μαθηματική περιγραφή της συμπεριφοράς ενός φυσικού συστήματος.

2.2 Υδρολογικά μοντέλα

2.2.1 Γενικά-Ορισμοί

Παρ' ότι ο υδρολογικός κύκλος είναι ένα εύκολα κατανοητό σύστημα, υπάρχουν τόσοι πολλοί διαφορετικοί παράγοντες που επιδρούν στην ποιότητα, στις ροές και τις διάφορες κατανομές του νερού, που είναι σχεδόν αδύνατο να ποσοτικοποιηθούν οι διεργασίες οι οποίες επιδρούν σε αυτόν. Σε αυτό βοηθούν τα υδρολογικά μοντέλα, τα οποία συνδυάζουν τα

πολλά δεδομένα (υδρολογικά, γεωμορφολογικά, μετεωρολογικά, χημικά κ.α.) που χρειάζονται, υπολογίζουν πως επιδρά ο κάθε παράγοντας στο σύνολο (συνήθως μια συγκεκριμένη χωρική ενότητα) και έτσι βρίσκουμε τις πληροφορίες που χρειαζόμαστε.

Ο όρος υδρολογικό μοντέλο, αναφέρεται σε ένα ευρύ φάσμα μαθηματικών μετασχηματισμών που χρησιμοποιούν δεδομένα πεδίου και εύλογες υποθέσεις σχετικά με τους φυσικούς μηχανισμούς, με στόχο την ποσοτική εκτίμηση υδρολογικών μεταβλητών που είναι πρακτικά αδύνατο να μετρηθούν στο πεδίο (Εργαστήριο Υδρολογίας και αξιοποίησης υδατικών πόρων, ΕΜΠ, 2009).

Ανάμεσα στα μοντέλα που έχουν δημιουργηθεί για την προσομοίωση επιφανειακής και υπόγειας υδρολογίας, είναι και τα παρακάτω:

- Anuga: (Geoscience Australia and the Australian National University) Υδροδυναμικό μοντέλο δύο διαστάσεων για την πρόβλεψη επιπτώσεων από υδρολογικές καταστροφές
- MODFLOW: (Modular Three – Dimensional Finite – Difference Ground – Water Flow Model) (Harbaugh and McDonald, 1996) Μοντέλο πεπερασμένων διαφορών για έδαφος-νερό, τριών διαστάσεων
- Topoflow: (Peckham et al., 2007) Χωρικά κατανομημένο μοντέλο, για τη μελέτη φυσικών διαδικασιών σε κλιματικές αλλαγές
- HSPE (Hydrological Simulation Program-Fortran)(Johanson et al., 1980; Bicknell et al., 2001) Προσομοιώνει την υδρολογία για μεγάλες χρονικές περιόδους, με δυνατότητα και για αστικές περιοχές
- MIKE-SHE: (European Hydrological System Model)(Refsgaard 1997; Demetriou and Punthakey, 1998) Προσομοιώνει τον υδρολογικό κύκλο
- ETD: (Enhanced Trickle – Down Model) (Schoor et al., 1984; Nikolaidis et al., 1988): Με τη δυνατότητα επαρκούς περιγραφής όλων των τύπων υδρολογικών συστημάτων σε συστήματα απορροής και αποστράγγισης
- SWIM : (Soil and Water Integrated Model) (Kryanova et al., 1998)
- MT3D: (Modular 3 – D Multi-Species Transport Model) (Zheng, 1990),

Η ανάπτυξη ενός υδρολογικού μοντέλου περιλαμβάνει τα εξής στάδια(Chong – γυ, 2002):

1. Επιλογή του τρόπου προσομοίωσης (Conceptualization)
2. Κωδικοποίηση – δημιουργία μοντέλου

3. Βαθμονόμηση μοντέλου (Calibration)
4. Επαλήθευση μοντέλου (Verification)
5. Αξιοπιστία μοντέλου (Validation)
6. Ανάλυση ευαισθησίας (Sensitivity analysis)
7. Ανάλυση αβεβαιότητας (Uncertainty analysis)
8. Εφαρμογή μελλοντικών σεναρίων στο μοντέλο.

2.2.2 Κατηγορίες μοντέλων

Χωρική Κλίμακα

Η χωρική διακριτότητα αποτελεί θεμελιώδες χαρακτηριστικό των υδρολογικών μοντέλων, με βάση την οποία προκύπτουν οι παρακάτω κατηγορίες:

- Αδιαμέριστα μοντέλα (lumped):

Οι χρονοσειρές φόρτισης ολοκληρώνονται σε όλη την επιφάνεια της λεκάνης, ενώ οι παράμετροι του μοντέλου έχουν τις ίδιες τιμές. Η εκτίμηση της απορροής στην έξοδο της λεκάνης βασίζεται στις κύριες μεταβλητές του υδατικού ισοζυγίου της.

- Ημι-αδιαμέριστα μοντέλα (semi-lumped):

Το ενδιαμέσο της αδιαμέριστης και της ημικατανεμημένης σχηματοποίησης, όπου 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.

Χρονική Διακριτότητα

Η χρονική διακριτότητα εξαρτάται άμεσα 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. Γενικά, όσο πιο λεπτή είναι η χρονική κλίμακα, τόσο πιο μικρή πρέπει να είναι η διακριτότητα των μεταβλητών.

Τα υδρολογικά μοντέλα μπορούν να διακριθούν σε δύο κατηγορίες με βάση την χρονική τους διακριτότητα:

- Συνεχή μοντέλα

Τα μοντέλα αυτά περιγράφουν τη διαχρονική εξέλιξη του ισοζυγίου υδατικών πόρων μιας πεπερασμένης χωρικής ενότητας.

- Μοντέλα μεμονωμένου υδρολογικού γεγονότος:

Περιγράφουν μεμονωμένα γεγονότα, όπως ένα υδρογράφημα ή την αιχμή μιας πλημμύρας.

Μαθηματική Δομή

Με κριτήριο τη στοχαστικότητα, τα υδρολογικά μοντέλα μπορούν να καταταχθούν στα:

- Προσδιοριστικά:

Τα προσδιοριστικά μοντέλα προσομοιώνουν πλήρως τον υδρολογικό κύκλο και τις συνιστώσες του, ενώ δίνουν μια αρκετά αξιόπιστη αναπαράσταση της συμπεριφοράς του φυσικού συστήματος, δίνοντας σαφή και μονοσήμαντα αποτελέσματα εξόδου.

- Στοχαστικά:

Τα στοχαστικά μοντέλα βασίζονται στην πιθανοτική προσέγγιση των υδρολογικών διεργασιών, τις οποίες αντιμετωπίζουν ως τυχαίες μεταβλητές, είτε μεμονωμένες, είτε από κοινού. Το προτέρημά τους είναι ότι δεν δίνουν μονοσήμαντες προγνώσεις των μεταβλητών που αναπαριστούν, αλλά ποσοτικοποιούν την αβεβαιότητα των προγνώσεων.

Με κριτήριο το βαθμό προσέγγισης των φυσικών διεργασιών τα μοντέλα βασίζονται στις κατηγορίες:

α. Φυσικής Βάσης (physically based):

Τα μοντέλα φυσικής βάσης είναι καταναμεμένα, 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. Παρ'όλα 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.

β. Εννοιολογικά Μοντέλα(conceptual):

Διατυπώνουν όχι τους φυσικούς νόμους, αλλά παραμετρικές σχέσεις σε υδραυλικά ανάλογα, που αναπαριστούν τις υδρολογικές διεργασίες στην ελάχιστη χωρική ενότητα που υποστηρίζεται από τη σχηματοποίηση (λεκάνη, υπολεκάνη). Συγκεκριμένα, θεωρούν όγκους ελέγχου στους οποίους ολοκληρώνονται χωρικά και χρονικά οι μεταβλητές κατάστασης και οι ροές του συστήματος, αποφεύγοντας έτσι τα προβλήματα κλίμακας που εισάγουν τα μοντέλα φυσικής βάσης(Nash & Sutcliffe, 1970).

Το κύριο πλεονέκτημα των εννοιολογικών σχημάτων είναι η απλότητά τους που επιτρέπει την προσομοίωση πολύπλοκων διεργασιών με έντονη χωρική ανομοιογένεια, μέσω μικρού αριθμού παραμέτρων.

γ. Μοντέλα Μαύρου Κουτιού (Black Box):

Το πλεονέκτημά τους είναι ότι έχουν εξισώσεις που δεν αναπαριστούν τις ενδιάμεσες διεργασίες του υδρολογικού κύκλου, αλλά περιγράφουν πολύπλοκα συστήματα με πολύ μικρό υπολογιστικό φόρτο σε σχέση με τα αναλυτικά μοντέλα προσομοίωσης.

2.2.3. Βαθμονόμηση και Επαλήθευση Υδρολογικού Μοντέλου

2.2.3.1. Ορισμός Βαθμονόμησης

Ο όρος βαθμονόμηση (calibration) υποδηλώνει μια συστηματική διαδικασία προσαρμογής των τιμών των παραμέτρων ενός υδρολογικού μοντέλου, έτσι ώστε οι προσομοιωμένες αποκρίσεις του να προσεγγίζουν όσο το δυνατόν περισσότερο τις παρατηρημένες τιμές. Διαφοροποιείται από τον γενικότερο όρο «εκτίμηση παραμέτρων», που μπορεί να αναφέρεται σε μια εμπειρική ή διαισθητική διαδικασία «εκ των προτέρων» ορισμού των παραμέτρων του μοντέλου, χωρίς «εκ των υστέρων» έλεγχο της επίδοσής του, με βάση πραγματικά δεδομένα. Για το λόγο αυτό, η βαθμονόμηση ενός μοντέλου προϋποθέτει ένα επαρκές χρονικό διάστημα για το οποίο διατίθενται συστηματικές μετρήσεις (χρονοσειρές) απόκρισης του φυσικού συστήματος, ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση των ιστορικών με τα προσομοιωμένα δεδομένα. Προσομοιωμένες αποκρίσεις μπορεί να αναφέρονται σε παροχές νερού, εξατμισοδιαπνοή, στερεοπαροχές και φορτία αζώτου (N) και φωσφόρου (P).

Το πρόβλημα της βαθμονόμησης υδρολογικών μοντέλων, αν και έχει διερευνηθεί διεξοδικά εδώ και παραπάνω από τρεις δεκαετίες, όχι μόνο δεν έχει αντιμετωπιστεί αλλά παραμένει επίκαιρο όσο ποτέ, δεδομένου ότι τα μοντέλα τείνουν να γίνουν όλο και πιο σύνθετα στη δομή και τον αριθμό

των παραμέτρων τους, αλλά και όλο και πιο απαιτητικά σε δεδομένα και σε υπολογιστικό φόρτο.

2.2.3.2. Τύποι Βαθμονόμησης

Η βαθμονόμηση των υδρολογικών μοντέλων μπορεί να γίνει εμπειρικά, αυτόματα ή ημιαυτόματα.

- Εμπειρική βαθμονόμηση:

Γίνεται «χειρωνακτικά» και γι' αυτό δεν είναι μια αυστηρά συστηματική διαδικασία, αλλά βασίζεται στη διερεύνηση εναλλακτικών συνδυασμών παραμέτρων που επιλέγει σύμφωνα με την κρίση και εμπειρία του ο μελετητής. Η τελική επιλογή των παραμέτρων γίνεται ελέγχοντας εμπειρικά μέσω γραφημάτων ή στατιστικά με χρήση κάποιου δείκτη ή δεικτών τα αποτελέσματα. Αν και η εμπειρική μέθοδος είναι μη αντικειμενική (αφού η επιλογή δεν βασίζεται σε κάποιο αριθμητικό κριτήριο σφάλματος) και εξαιρετικά επίπονη (ιδιαίτερα όταν ο αριθμός των παραμέτρων είναι σχετικά μεγάλος), εφαρμόζεται ακόμη και σήμερα από ορισμένους υδρολόγους, με το σκεπτικό ότι η εν λόγω διαδικασία ενσωματώνει την υδρολογική εμπειρία, οδηγώντας έτσι σε τιμές παραμέτρων που είναι ρεαλιστικές και αντιπροσωπευτικές των φυσικών χαρακτηριστικών της λεκάνης.

- Αυτόματη 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 τελική επιλογή των παραμέτρων προκύπτει ως αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης. Πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η αντικειμενικότητά που έχει, καθώς και η δυνατότητα πολλαπλών δοκιμών με τυχαίες αλλαγές στις παραμέτρους, με σκοπό τα αποτελέσματα του μοντέλου να παρουσιάζουν την επιθυμητή συνέπεια με τα παρατηρημένα. Το κύριο μειονέκτημά 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. Για τους παραπάνω λόγους, σε ορισμένες περιπτώσεις ένα υδρολογικό μοντέλο, παρ' όλο που δείχνει να προσαρμόζεται ικανοποιητικά στις μετρήσεις, στην πραγματικότητα μπορεί να λειτουργεί υπό μορφή «μαύρου κουτιού», με παραμέτρους που δεν έχουν φυσικό νόημα και χωρίς να μπορεί να αναπαράξει όλο το επιθυμητό φάσμα των δυνατών αποκρίσεων της λεκάνης.

- Ημιαυτόματη βαθμονόμηση:

Πρόκειται για μια διαδραστική μέθοδο, βάσει της οποίας ο 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. Η μέθοδος αυτή αποσκοπεί να συνδυάσει τα πλεονεκτήματα της εμπειρικής και αυτόματης βαθμονόμησης, και θεωρείται ως η πλέον ορθή, ιδιαίτερα στην περίπτωση των σύνθετων σχημάτων, στα οποία είναι και πιο έντονη η αβεβαιότητα στην εκτίμηση των παραμέτρων, λόγω της ύπαρξης πολλών ισοδύναμα καλών λύσεων (Boyle et al., 2000· Mazi et al., 2004· Efstratiadis et al., 2008).

Ωστόσο ανεξάρτητα από τη στρατηγική που υιοθετείται, η βαθμονόμηση ενός υδρολογικού μοντέλου κρίνεται αξιόπιστη εφόσον:

- το μοντέλο διαθέτει επαρκή προγνωστική ικανότητα, δηλαδή μπορεί να αναπαράξει 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.

Αυτές οι δύο απαιτήσεις εξασφαλίζουν ότι το μοντέλο αναπαριστά με συνέπεια τους υδρολογικούς μηχανισμούς της λεκάνης και συνεπώς, ότι το πεδίο εφαρμογής του δεν περιορίζεται στο διάστημα που υπάρχουν ιστορικές παρατηρήσεις (βάσει των οποίων έχει γίνει η προσαρμογή των παραμέτρων του) αλλά επεκτείνεται για οποιοδήποτε χρονικό ορίζοντα, είτε στο παρελθόν είτε στο μέλλον. Είναι προφανές ότι αυτό προϋποθέτει ότι τα ιστορικά δείγματα φορτίσεων και αποκρίσεων που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των παραμέτρων του μοντέλου είναι αντιπροσωπευτικά της υδρολογικής δίαιτας της λεκάνης.

Για το λόγο αυτό, 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

χρησιμοποιηθεί στην προσομοίωση εναλλακτικών διαχειριστικών πρακτικών σε τμήματα της λεκάνης απορροής.

2.2.3.3. Ορισμός επαλήθευσης

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

Συνήθως η επαλήθευση ενός υδρολογικού μοντέλου γίνεται για το βέλτιστο σύνολο παραμέτρων που έχει προκύψει από τη 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 είναι γνωστή ως διαχωρισμός δεδομένων (data-split), και για να έχει νόημα πρέπει τα χαρακτηριστικά του συστήματος να έχουν διατηρηθεί αμετάβλητα για το σύνολο του χρονικού ορίζοντα ελέγχου του μοντέλου (περίοδος βαθμονόμησης και επαλήθευσης μαζί), ώστε να εξασφαλιστεί ότι στη λεκάνη ισχύουν συνθήκες στασιμότητας (stationarity). Διαφορετικά οι παράμετροι πρέπει να θεωρηθούν διαχρονικά μεταβαλλόμενες, γεγονός που περιορίζει δραστικά την επιχειρησιακή χρησιμότητα του μοντέλου.

Μια 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 (στοχική συνάρτηση) είναι κατά πολύ χαμηλότερη. Με την προϋπόθεση της μονιμότητας, αυτό υποδηλώνει εμφανώς ότι οι βελτιστοποιημένες παράμετροι του μοντέλου δεν αντιπροσωπεύουν χαρακτηριστικά του φυσικού συστήματος (έστω και σε μακροσκοπική κλίμακα), αλλά το μοντέλο λειτουργεί ως «μαύρο» κουτί, χωρίς φυσικό νόημα. Έτσι, ενώ 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.

Ορισμένοι ερευνητές πιστεύουν ότι η παραδοσιακή προσέγγιση, που βασίζεται στον διαχωρισμό των δεδομένων, δεν αποτελεί ιδιαίτερα

αξιόπιστη πρακτική για την αξιολόγηση της προγνωστικής ικανότητας ενός μοντέλου (Klemeš, 1986).

2.3. 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. Έχει δυνατότητες για προσομοίωση πολλών και διαφορετικών καταστάσεων και για την χρήση πολλών παραμέτρων. Η αποτελεσματικότητά του, 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; Gassman et al., 2007a). Πρόκειται για ένα καταμετρημένο υδρολογικό μοντέλο λεκάνης απορροής, φυσικής βάσης (physically-based) και συνεχούς χρόνου, που λειτουργεί με ημερήσιο βήμα (Arnold et al., 1998, Neitsch et al., 2001).

Επιτρέπει έναν αριθμό από διαφορετικές φυσικές διαδικασίες να προσομοιωθούν σε μια λεκάνη απορροής, όπως τη διαδρομή των νιτρικών, των φυτοφαρμάκων, των ιζημάτων, του μικροβιακού φορτίου, της διάβρωσης που προκαλείται από τη ροή του νερού και τις γεωργικές πρακτικές, και πολλών ακόμη. Έτσι, μέσω των σχέσεων για το κάθε ζητούμενο, δίνει τα αποτελέσματα για την έξοδο της λεκάνης αλλά και για ενδιάμεσα σημεία.

Τέλος, το μοντέλο SWAT παρέχει μεταξύ άλλων τη δυνατότητα:

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

2.3.1. Δεδομένα Εισόδου

Στα δεδομένα εισόδου του μοντέλου συγκαταλέγονται 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 (Gassman et al., 2007b).

Ο μέσος όρος της ημερήσιας θερμοκρασίας 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.

2.3.2. Μεθοδολογία του Μοντέλου

Ανεξαρτήτως του συγκεκριμένου αποτελέσματος που θέλουμε να βρούμε με το SWAT, η υδατική ισορροπία είναι η δύναμη πίσω από όσα συμβαίνουν στη λεκάνη απορροής. Για μια ακριβή πρόβλεψη της κίνησης των φυτοφαρμάκων, ιζημάτων και θρεπτικών, ο υδρολογικός κύκλος στο μοντέλο πρέπει να προσεγγίζει την πραγματική κίνηση του νερού. Η προσομοίωση της υδρολογίας σε μια λεκάνη απορροής μπορεί να χωριστεί σε δύο κατηγορίες:

- Στην εδαφική φάση, που ελέγχει την ποσότητα του νερού, ιζημάτων, θρεπτικών και φυτοφαρμάκων που θα καταλήξουν στο κεντρικό κανάλι και
- στη διαδρομή του νερού και τις κινήσεις του νερού, ιζημάτων κλπ μέσα από το κανάλι.

Για τη μοντελοποίηση, μια λεκάνη απορροής μπορεί να διαχωριστεί σε υπό-λεκάνες. Η χρήση των υπολεκανών σε μία προσομοίωση χρησιμεύει όταν διαφορετικές της λεκάνης απορροής έχουν χαρακτηριστικά όπως γεωργικές πρακτικές ή εδάφη που επηρεάζουν με διαφορετικό τρόπο την υδρολογία. Κατ'αυτόν τον τρόπο, ο χρήστης μπορεί να εξετάσει το κάθε διαμέρισμα ξεχωριστά, καθώς και το ένα με το άλλο.

Ο Υδρολογικός κύκλος στο SWAT

Η διαίρεση της λεκάνης απορροής στις υδρολογικές μονάδες απόκρισης (HRU) επιτρέπει στο μοντέλο να βρίσκει την εξατμισοδιαπνοή για διαφορετικές σοδειές και εδάφη. Η απορροή βρίσκεται ξεχωριστά για κάθε HRU και στη συνέχεια στο σύνολο της απορροής.

Το νερό της βροχόπτωσης πέφτει στα φύλλα ή στο έδαφος. Στο έδαφος, ή θα απορροφηθεί, ή θα γίνει επιφανειακή απορροή. Το ποσοστό του νερού απορροής ρυθμίζεται από τον συντελεστή απορροής, ανάλογα με τον τύπο του εδάφους και τη χρήση γης. Το τελευταίο κατευθύνεται πολύ γρήγορα προς ένα κανάλι και συνεισφέρει στην άμεση και μικρής διάρκειας αύξηση της παροχής του ποταμού. Το εδαφικό νερό προσλαμβάνεται από τη βλάστηση και διαπνέεται (διαπνοή), 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 κινούμενο στο ποτάμι συναντά πιθανούς ταμιευτήρες και λίμνες, όπου η εξίσωση υδατικού ισοζυγίου διέπει την αποθήκευση και την απελευθέρωση νερού στο εκάστοτε χρονικό βήμα. Το νερό που τελικά καταλήγει στο ποτάμι είναι το άθροισμα της επιφανειακής, ενδιάμεσης και υπόγειας απορροής και διοδεύεται μέχρι τον επόμενο ταμιευτήρα ή λίμνη ή μέχρι την έξοδο της λεκάνης. Το μοντέλο επιτρέπει ακόμα την αφαίρεση νερού από κάθε σημείο του συστήματος (υδατόρρευμα, ταμιευτήρας, λίμνη, αβαθής και βαθύς υδροφορέας) για ανθρωπογενείς χρήσεις (Μιμίκου, 2006).

Ο προσομοιωμένος υδρολογικός κύκλος στο SWAT βασίζεται στην εξίσωση:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw})$$

όπου

SW_t : η τελική περιεκτικότητα υγρασίας του εδάφους την ημέρα t (mm H_2O)

SW_0 : η αρχική περιεκτικότητα υγρασίας του εδάφους την χρονική στιγμή 0

R_{day} : η ημερήσια κατακρήμνιση την ημέρα i (mm H_2O)

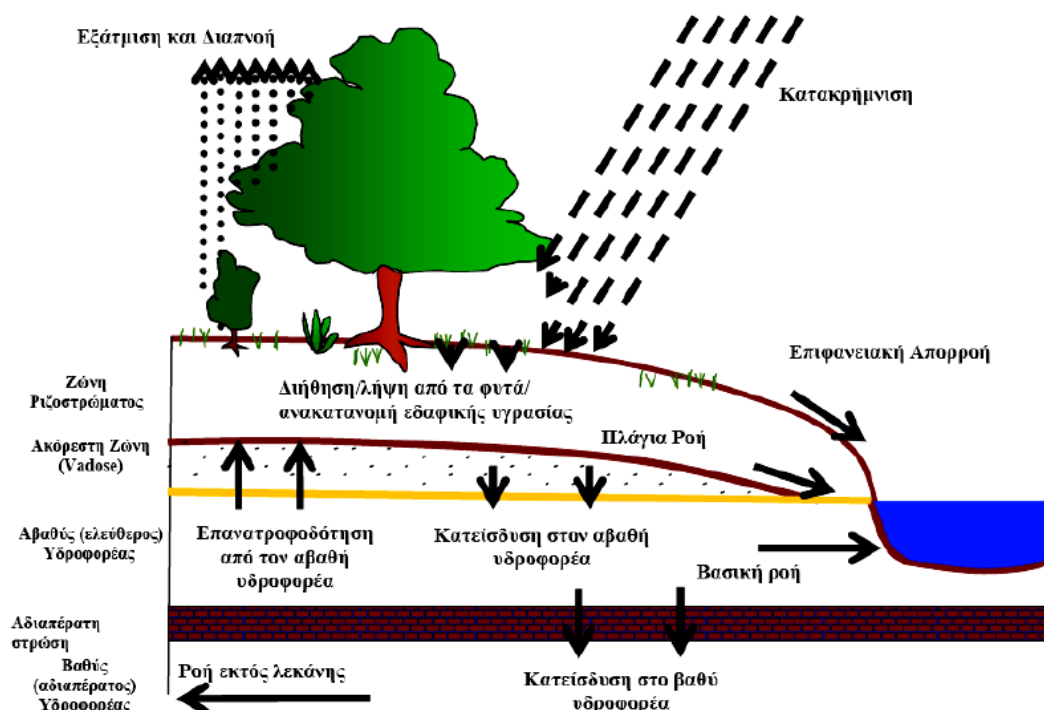
Q_{surf} : η ημερήσια επιφανειακή απορροή την ημέρα i (mm H_2O)

E_a : η ημερήσια εξατμισοδιαπνοή την ημέρα i

W_{seep} : η ποσότητα νερού που εξέρχεται από την ζώνη ριζοστρώματος και εισέρχεται στη ζώνη vadose την ημέρα i (mm H_2O)

Q_{gw} : η υπόγεια ροή την ημέρα i ($\text{mm H}_2\text{O}$)

Στην εικόνα 2.1 παρουσιάζεται ο υδρολογικός κύκλος, όπως τον υπολογίζει το Swat.



Εικόνα 2.1 : Ο υδρολογικός κύκλος στο SWAT (Πηγή: Neitsch et al., 2005)

2.3.3 Δημιουργία υδρολογικού ισοζυγίου

Το μοντέλο SWAT ενσωματώνει όλες τις σχετικές υδρολογικές διεργασίες συμπεριλαμβανομένης της 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. Ο αριθμός και το μέγεθος των υπολεκανών ποικίλει ανάλογα με το υδρογραφικό δίκτυο και το μέγεθος της λεκάνης απορροής.

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, τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση όλου του ποτάμιου συστήματος συνολικά. 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. Επίσης, αθροίζονται τα φορτία ή οι συγκεντρώσεις από τα ιζήματα, τα θρεπτικά, τα φυτοφάρμακα και τα βακτήρια των υδρολογικών μονάδων απόκρισης της κάθε υπολεκάνης (αφού συνυπολογιστεί η απομάκρυνση) 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 αστικές περιοχές (Gassman et al., 2007b).

2.3.4. 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, άροση, 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.

2.4. Φράγματα

2.4.1 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 αναγκαιότητά 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 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:

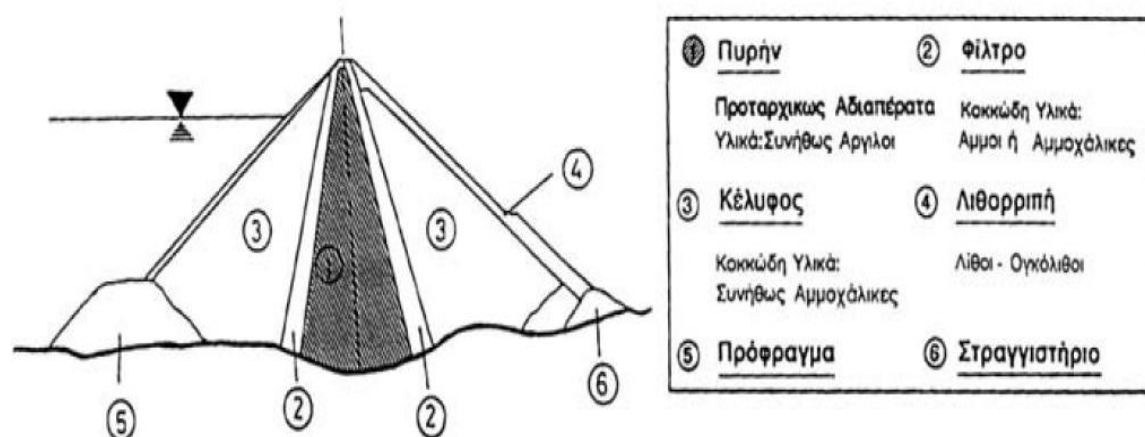
Εύκαμπτα: Κατασκευάζονται από γαιώδη υλικά(αργίλους, άμμους κροκάλες) και τεμάχια βράχων και διακρίνονται κύριως σε χωμάτινα και λιθόρριπτα

Άκαμπτα: Παρασκευάζονται από σκυρόδεμα και διακρίνονται κυρίως στα βαρύτητας και τα τοξωτά

Μεικτά: Συνδυασμός των δύο παραπάνω

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

Στην εικόνα 2.2 φαίνονται τα βασικά τμήματα χωμάτινου φράγματος:



Εικόνα 2.2 : Σκαρίφημα χωμάτινου φράγματος (Υλικά - Ζώνες) (Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων)

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

Κυριότερο κομμάτι για ένα φράγμα είναι ο υπερχειλιστής, που κατασκευάζεται με ισχυρά οπλισμένο σκυρόδεμα και γι' αυτό το λόγο

απορροφά σημαντικό τμήμα του προϋπολογισμού του έργου. 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).

2.4.1. Υδρολογικός Σχεδιασμός

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

$$V_i = V_{i-1} + Q_{in_i} + P \cdot A - PET \cdot A - Q_{eco} - Q_{irr}$$

όπου

V_i, V_{i-1} : ο αποθηκευμένος όγκος νερού στον ταμιευτήρα τους μήνες i και $i-1$ αντίστοιχα, (m^3)

Q_{in_i} : η εισροή στον ταμιευτήρα το μήνα i , (m^3)

A : Η επιφάνεια του φράγματος (m^2)

P : Η ποσότητα βροχόπτωσης το μήνα i , (m)

PET : Η δυνητική εξατμισοδιαπνοή το μήνα i , (m)

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

Q_{irr} : Η ποσότητα που μαστεύεται για ύδρευση και άρδευση το μήνα i , (m^3)

Οι ταμιευτήρες γενικά υπολογίζονται για ετήσιο κύκλο λειτουργίας, δηλαδή για αποθήκευση νερού κατά τους υγρούς μήνες και απόδοση του αποθηκευμένου νερού κατά τους ξηρούς μήνες. Ο συνολικός όγκος του ταμιευτήρα είναι πάντοτε μεγαλύτερος από τον ωφέλιμο όγκο του, διότι προβλέπεται ένας νεκρός όγκος στον πυθμένα που θα γεμίσει με το χρόνο από τα φερτά υλικά, και ένας επιπλέον όγκος πάνω από τον ωφέλιμο, για ανάσχεση πλημμυρών, όπως στην εικόνα 2.3:



Εικόνα 2.3. : Φράγμα και ανάντη ταμιευτήρας (ΠΗΓΗ:Μ.Βαφειάδης,Σημειώσεις «Ταμιευτήρες»).

Το μέγεθος και η μορφή του ταμιευτήρα μπορεί να καθοριστεί από έναν τοπογραφικό χάρτη. Ο συνολικός όγκος του ταμιευτήρα, 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.

Τέλος, βαθμός 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 υδατορεύματος στον ταμιευτήρα (V_e).

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

2.4.2. Επιπτώσεις των φραγμάτων

Σήμερα τα φράγματα χρησιμοποιούνται για πολλαπλούς σκοπούς. Συγκεκριμένα παγκοσμίως, χρησιμοποιούνται για άρδευση(37%), παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας(16%), ύδρευση(12%), για αντιπλημμυρικό έλεγχο(6%),για σκοπούς αναψυχής(3%)και για λοιπούς σκοπούς(4%).

Οι επιπτώσεις κάθε φράγματος είναι διαφορετικές και εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες όπως η δομή του φράγματος και η λειτουργία του, η τοπική υδρολογία, οι ποτάμιες διαδικασίες, ο όγκος των φερτών υλών, οι γεωμορφολογικοί περιορισμοί, το κλίμα και οι βασικές ιδιότητες του τοπικού βιόκοσμου.

Τα θετικά αποτελέσματα των φραγμάτων μπορεί να είναι:

- Ο έλεγχος των πλημμυρών
- Η ύδρευση οικισμών
- Η αύξηση του παραγόμενου γεωργικού προϊόντος λόγω της δυνατότητας άρδευσης γεωργικών εκτάσεων και αύξηση της παραγωγικότητας του αγροτικού τομέα
- Το οικονομικό όφελος από πιθανή ιχθυοκαλλιέργεια στον ταμιευτήρα
- Μπορεί να γίνει χώρος αναψυχής, αυξάνεται η τουριστική ελκυστικότητα

Οι αρνητικές επιπτώσεις μπορεί να είναι:

- Διαβρώσεις στο έδαφος
- Μείωση των φερτών υλών κατάντη, αφού συγκρατούνται στο φράγμα(έχουν σημασία για τον βιότοπο στην ένωση του ποταμού με τη θάλασσα)
- Αλλαγή στη θρεπτική ισορροπία αφού αυξάνεται ο χρόνος παραμονής και η θερμοκρασία του νερού, ενώ στα κατάντη μειώνεται η θολερότητα
- Μπορεί να καλυφθούν χώροι με αρχαιολογική, τοπογραφική, γεωλογική, ή αισθητική αξία
- Παρεμπόδιση της αναπαραγωγής των ψαριών

Όμως είναι δυνατόν με την επιλογή της κατάλληλης θέσης για ένα φράγμα και με καλό σχεδιασμό να αποφευχθούν ή ελαχιστοποιηθούν οι παραπάνω συνέπειες και να υπάρξει μεγιστοποίηση των ωφελειών.

2.5 Η κλιματική αλλαγή και ο IPCC

Με τον όρο κλιματική αλλαγή αναφερόμαστε στη μεταβολή του παγκόσμιου κλίματος και ειδικότερα σε μεταβολές των μετεωρολογικών συνθηκών που εκτείνονται σε μεγάλη χρονική κλίμακα. Οφείλονται σε φυσικές διαδικασίες, καθώς και σε ανθρώπινες δραστηριότητες με επιπτώσεις στο κλίμα, όπως η τροποποίηση της σύνθεσης της ατμόσφαιρας. Στη Σύμβαση-Πλαίσιο των Ηνωμένων Εθνών για τις Κλιματικές Μεταβολές (UNFCCC), 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 Nations, 1992)

Έτσι, 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 των κλιματικών αλλαγών. Η επιτροπή αξιολογεί επίσης τις συνέπειες των κλιματικών μεταβολών που προέρχονται από ανθρώπινη δραστηριότητα, μελετώντας πιθανές πολιτικές και δράσεις για την αντιμετώπιση των ενδεχόμενων κινδύνων, συντονίζοντας επιστήμονες από ολόκληρο τον κόσμο και συχνά δημοσιεύει εκθέσεις, σχετικά με τις κλιματικές αλλαγές που παρατηρούνται και τις πιθανές επιπτώσεις τους. Οι εκθέσεις της IPCC αποτελούν σημείο αναφοράς για τα ζητήματα που άπτονται της παγκόσμιας θέρμανσης και βασίζονται σε επιστημονικές δημοσιεύσεις ειδικών ερευνητών.

Στοιχεία από την τελευταία έκθεση της IPCC(2014) είναι :

- Η μέση θερμοκρασία αυξάνεται, κυρίως στα υψηλά υψόμετρα. Από το 1980, οι χειμώνες είναι πιο θερμοί κυρίως στη Σκανδιναβία, ενώ τα καλοκαίρια είναι πιο καυτά κυρίως στην Ιβηρική χερσόνησο(EEA, 2012). Οι μέση θερμοκρασία της δεκαετίας 2002-2011 είναι κατά $1.3^{\circ}\text{C} \pm 0.11^{\circ}\text{C}$ υψηλότερη των ετών 1850-1899(HadCRUT3;Brohan et al., 2006)
- Από το 1950, τα ακραία φαινόμενα υψηλών θερμοκρασιών (καύσωνες, τροπικές νύχτες) έχουν γίνει πιο συχνά ενώ τα επεισόδια χαμηλών θερμοκρασιών(κύματα ψύχους, παγετοί) πιο σπάνια
- Από μία παγκόσμια ανάλυση προσομοιωμένων ροών(1948-2004) 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).
- Οι ροές των ποταμών έχουν μειωθεί στη νότια και ανατολική Ευρώπη, ενώ έχουν αυξηθεί στη βόρεια Ευρώπη(Stahl et al., 2010;Wilson et al., 2010;).
- Οι περισσότερες τοπικές αλλαγές στη βροχόπτωση αιτιολογούνται είτε στην τοπική μεταβλητότητα της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας, ή στην παγκόσμια θέρμανση(Lambert et al., 2004; Stott et al., 2010). Εκτιμήθηκε ότι τον 20^ο αιώνα ο ανθρωπογενής παράγοντας επηρέασε σημαντικά στις αλλαγές στην παγκόσμια και τοπική βροχόπτωση(Zhang et al., 2007)
- Επίσης από το 1960 έχει παρατηρηθεί αύξηση στις ξηρές ημέρες και επιμήκυνση περιόδων ξηρασίας(Fischer et al., 2011).

2.6 Μοντέλα σεναρίων

Στα πλαίσια της μελέτης των προβλεπόμενων ανθρωπογενών κλιματικών αλλαγών, βασικός παράγων των προσομοιώσεων του μελλοντικού κλίματος είναι η εξέλιξη των συγκεντρώσεων στην ατμόσφαιρα των αερίων

του θερμοκηπίου, (CO₂, CH₄, N₂O, PFCs, SF₆, HFCs, NO_x, CO, VOC, SO₂, BC, OC). Βεβαίως ο ρυθμός με τον οποίο θα εξελιχθούν στο μέλλον οι εκπομπές και κατά συνέπεια και οι συγκεντρώσεις των θερμοκηπικών αερίων στην ατμόσφαιρα δεν μπορεί να προσδιορισθεί επακριβώς.

Για το σκοπό αυτό στα πλαίσια της τρίτης έκθεσης της IPCC διαμορφώθηκαν από ειδική ομάδα επιστημόνων ένας μεγάλος αριθμός σεναρίων (συνολικά 40 σενάρια) σχετικών με τη μελλοντική εξέλιξη των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου (emission scenarios) (Nakicenović et al., 2000) που ταξινομήθηκαν σε έξι ομάδες σεναρίων, η καθεμία των οποίων περιλαμβάνει παρόμοια σενάρια εκπομπών. Οι κατηγορίες αυτές είναι οι εξής: η οικογένεια σεναρίων A1 που χωρίζεται σε 3 υποκατηγορίες: τις A1F, A1B και A1T, η οικογένεια σεναρίων A2, η οικογένεια σεναρίων B1 και η οικογένεια σεναρίων B2.

Στο Κέντρο Ερεύνης Φυσικής της Ατμόσφαιρας και Κλιματολογίας της Ακαδημίας Αθηνών (ΚΕΦΑΚ) έχουν αναπτυχθεί βάσεις δεδομένων και προσομοιώσεων μοντέλων με βάση τα σενάρια εκπομπών A2, A1B, B2 και B1 (Εικόνα 2.4).

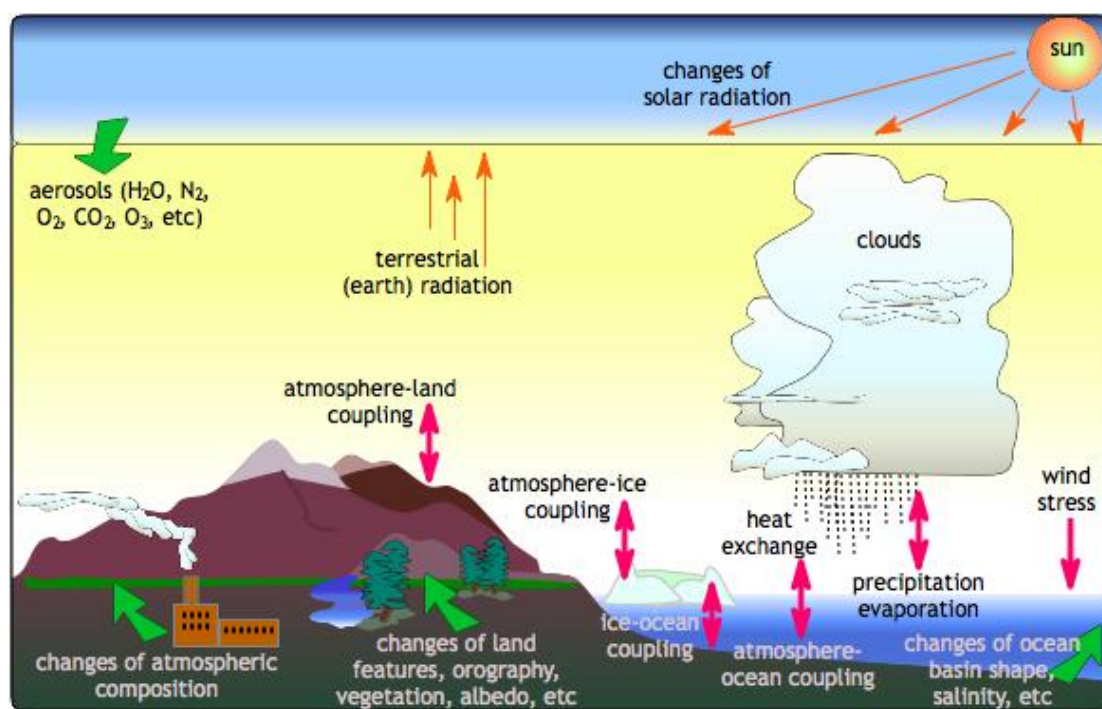
Σενάριο A2	Μέτρια αύξηση του μέσου παγκόσμιου κατά κεφαλήν εισοδήματος. Ιδιαίτερα έντονη κατανάλωση ενέργειας. Ραγδαία αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού. Αργή και τμηματική τεχνολογική ανάπτυξη και μέτριες έως μεγάλες αλλαγές στη χρήση γης. Ραγδαία αύξηση της συγκέντρωσης του CO ₂ στην ατμόσφαιρα η οποία 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 2.4: Σενάρια εκπομπών (Επιτροπή Μελέτης της Κλιματικής Αλλαγής, Τράπεζα της Ελλάδος) (IPCC, 2000)

Τα σενάρια που χρησιμοποιούνται παρακάτω έχουν προκύψει στο σενάριο A1B της IPCC. Οι τιμές των συγκεντρώσεων των αερίων του θερμοκηπίου για το σενάριο A1B φαίνονται στο παράρτημα.

Μοντέλα Γενικής Κυκλοφορίας (Global Circulation Models, GCM)

Τα μοντέλα γενικής κυκλοφορίας είναι αριθμητικά μοντέλα που εκφράζουν φυσικές διαδικασίες για τον πλανήτη, στην ατμόσφαιρα, στον ωκεανό, στην κρυόσφαιρα και στο έδαφος. Είναι τα πιο εξελιγμένα εργαλεία για την προσομοίωση της ανταπόκρισης του κλίματος στην αύξηση των θερμοκηπιακών αερίων. Χρησιμοποιούν ένα πλέγμα τριών διαστάσεων με οριζόντια ανάλυση 250-600 Km και 10-20 κάθετα επίπεδα στην ατμόσφαιρα και 30 στους ωκεανούς και η τιμή της κάθε παραμέτρου όπως ο άνεμος, η θερμοκρασία κλπ υπολογίζονται σε κάθε χωρισμένο τμήμα, η κυψελίδα. Η χωρική τους ανάλυση σήμερα, εξαιτίας των περιορισμένων υπολογιστικών δυνατοτήτων, είναι της τάξης των εκατοντάδων χιλιομέτρων (Mearns et al., 2001). Στην εικόνα 2.5 απεικονίζονται κάποιες από τις διεργασίες που επηρεάζουν το κλίμα, όπως υπολογίζονται από τα γενικά μοντέλα κυκλοφορίας:

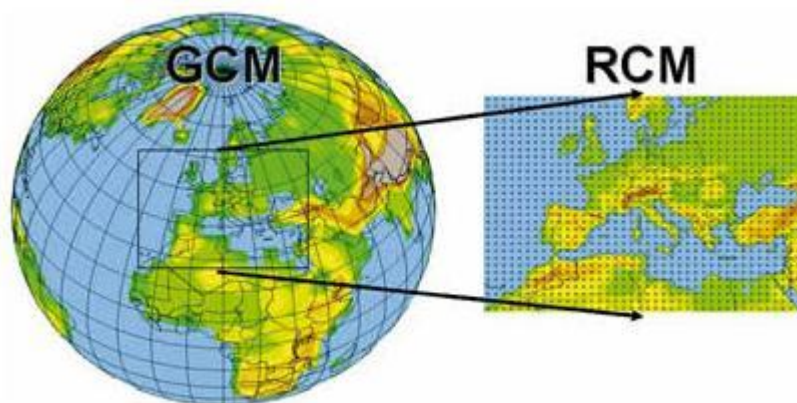


Εικόνα 2.5: Κάποιες από τις διεργασίες που επηρεάζουν το κλίμα, που υπολογίζουν τα GCMs (<http://www.cmmar.org/learn/modeling/whatis1.html>)

Ωστόσο δεν είναι δυνατόν να προσομοιωθούν με ακρίβεια φαινόμενα που σχετίζονται με την επίδραση της τοπογραφίας σε τοπική και περιοχική κλίμακα, γι'αυτό αναπτύσσονται και τα τοπικά μοντέλα κυκλοφορίας.

Τοπικά αριθμητικά μοντέλα κυκλοφορίας (Regional Circulation Model-RCM)

Οι τεχνικές με τις οποίες εισάγεται η περιοχική πληροφορία στις κλιματικές προσομοιώσεις ονομάζονται τεχνικές υποβιβασμού κλίμακας (υποκλιμάκωσης) και χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: 1) Τα υψηλής ή μεταβλητής ανάλυσης παγκόσμια ατμοσφαιρικά μοντέλα γενικής κυκλοφορίας, 2) τις στατιστικές ή εμπειρικές μεθόδους υποκλιμάκωσης (Statistical/Empirical Downscaling) και 3) τη δυναμική υποκλιμάκωση. Η δυναμική υποκλιμάκωση βασίζεται στη χρήση των περιοχικών κλιματικών μοντέλων (Regional Climate Models, RCMs). Πρόκειται για μοντέλα περιορισμένου πεδίου και υψηλής ανάλυσης τα οποία βασίζονται στη δυναμική υποκλιμάκωση και αναπτύχθηκαν προκειμένου να εισαχθεί η περιοχική πληροφορία στα μεγάλης κλίμακας πεδία που παρέχονται από τα GCMs ή που προκύπτουν από επανα-ανάλυση (NCEP/ ERA-40) (Dickinson et al., 1989, Giorgi, 1990). Στην εικόνα 2.6 απεικονίζεται η προσέγγιση του τοπικού κλιματικού μοντέλου, από γενικό κλιματικό μοντέλο.



Εικόνα 2.6: Η προσέγγιση του τοπικού κλιματικού μοντέλου (Πηγή: https://www.wmo.int/pages/themes/climate/climate_models.php)

Τα κλιματικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν προήλθαν από το Ευρωπαϊκό πρόγραμμα ENSEMBLES που η εκτίμηση του μελλοντικού κλίματος έγινε υπό το σενάριο A1B και όλα περιέχουν δεδομένα μέχρι 31-12-2100. Το τοπικό μοντέλο κυκλοφορίας που έδωσε τα παρακάτω σενάρια είναι το ECHAM5, μοντέλο 5^{ης} γενιάς για την κλιματική αλλαγή, το οποίο αναπτύχθηκε στο Ινστιτούτο Max Planck (Max Planck Institute for Meteorology, MPIM). Το κατασκεύασαν τροποποιώντας παγκόσμια προγνωστικά μοντέλα της ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts), για να μελετήσουν τις κλιματικές αλλαγές.

Οι τελικοί συνδυασμοί είναι:

- KNMI-RACMO2-ECHAM5

Το μοντέλο Knmi-Racmo2-Echam5 το έτρεξε το μετεωρολογικό Ινστιτούτο της Ολλανδίας (KNMI), ή αλλιώς εθνική μετεωρολογική υπηρεσία της Ολλανδίας. Το Ινστιτούτο αυτό συμβάλλει στην παγκόσμια κλιματική έρευνα και στις εκθέσεις του IPCC. (http://ensemblesrt3.dmi.dk/metadata/KNMI-RACMO2-EUR-domain_spec_25km_Dec2008.pdf)

- MPI-REMO-ECHAM5

Το ανέπτυξε το Ινστιτούτο Max Planck (Max Planck Institute for Meteorology, MPIM) και χρησιμοποιήθηκε πρόσφατα στην 4^η Έκθεση της IPCC.

- SMHI-RCA-ECHAM5

Οι ερευνητές του Σουηδικού μετεωρολογικού και υδρολογικού ινστιτούτου, SMHI έφτιαξαν το τοπικό ατμοσφαιρικό μοντέλο RCA.

Στον πίνακα 2.1 φαίνονται τα κλιματικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία και η προέλευσή τους:

Πίνακας 2.1: Κλιματικά μοντέλα προσομοίωσης

Ακρωνύμιο του RCM	Μοντέλο	Ινστιτούτο Ανάπτυξης του RCM	GCM από όπου προέρχεται το RCM	Βασική Βιβλιογραφική Αναφορά
KNMI-RACMO2	RACMO2	KNMI, Netherlands	ECHAM5-r3	Christensen et al., 2008, Meijgaard et al., 2008
MPI-M-REMO	REMO	MPI, Germany	ECHAM5	Jacob et al., 2001
SMHIRCA	RCA	SMHI, Sweden	ECHAM5-r3	Kjellström et al., 2005

3. Περιγραφή της περιοχής μελέτης

3.1. Γενικά

Ο ποταμός Ταυρωνίτης βρίσκεται στα Χανιά και είναι από τα ποτάμια διαλείπουσας ροής. Η συνολική έκταση της υδρολογικής λεκάνης του είναι περίπου 173 km².

Στο δέλτα του ποταμού Ταυρωνίτη έχει σχηματιστεί ένας φυσικός υδροβιότοπος, ο οποίος αποτελεί φυσικό ενδιαίτημα για πολλά είδη πανίδας αλλά και σημαντικό σταθμό για αποδημητικά πουλιά. Μικρά τμήματα της λεκάνης απορροής του ποταμού Ταυρωνίτη, στη Βόρεια και Νοτιανατολική πλευρά της λεκάνης, ανήκουν σε προστατευμένες περιοχές Natura 2000. Στην εικόνα 3.1 απεικονίζεται η λεκάνη απορροής του Ταυρωνίτη στην Κρήτη:



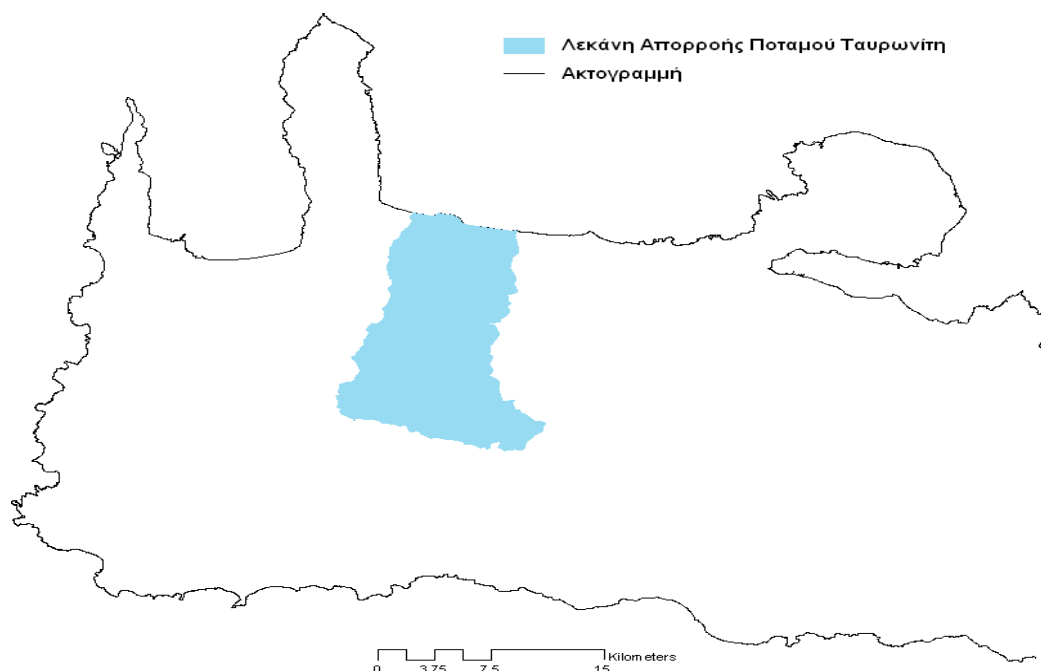
Εικόνα 3.1: Η λεκάνη απορροής του Ταυρωνίτη στην Κρήτη (Πηγή: Google Earth)

Το υδρογραφικό δίκτυο του ποταμού Ταυρωνίτη ξεκινάει από τα Λευκά Όρη σε υψόμετρο 1400m και εκβάλλει στο Κρητικό πέλαγος (Εικόνα 3.2). Αποτελείται από τρεις κύριες υπολεκάνες παραποτάμων-χειμάρρων:

- α) του παραπόταμου Σεμπρωνιώτη(22Km²) όπου ξεκινάει-πηγάζει από το χωριό Σέμπρωνας,
- β) του παραπόταμου Ρουματιανού(28Km²) όπου ξεκινάει από το χωριό Παλαιά Ρούματα, και
- γ) του παραπόταμου Ντεριανού(57Km²) όπου οι πηγές του βρίσκονται στο χωριό Πρασές.

Οι δυο πρώτοι παραπόταμοι καταλήγουν να ενώνονται κοντά στο χωριό Βουκολιές όπου διαμορφώνεται η κύρια κοίτη του ποταμού Ταυρωνίτη. Ο

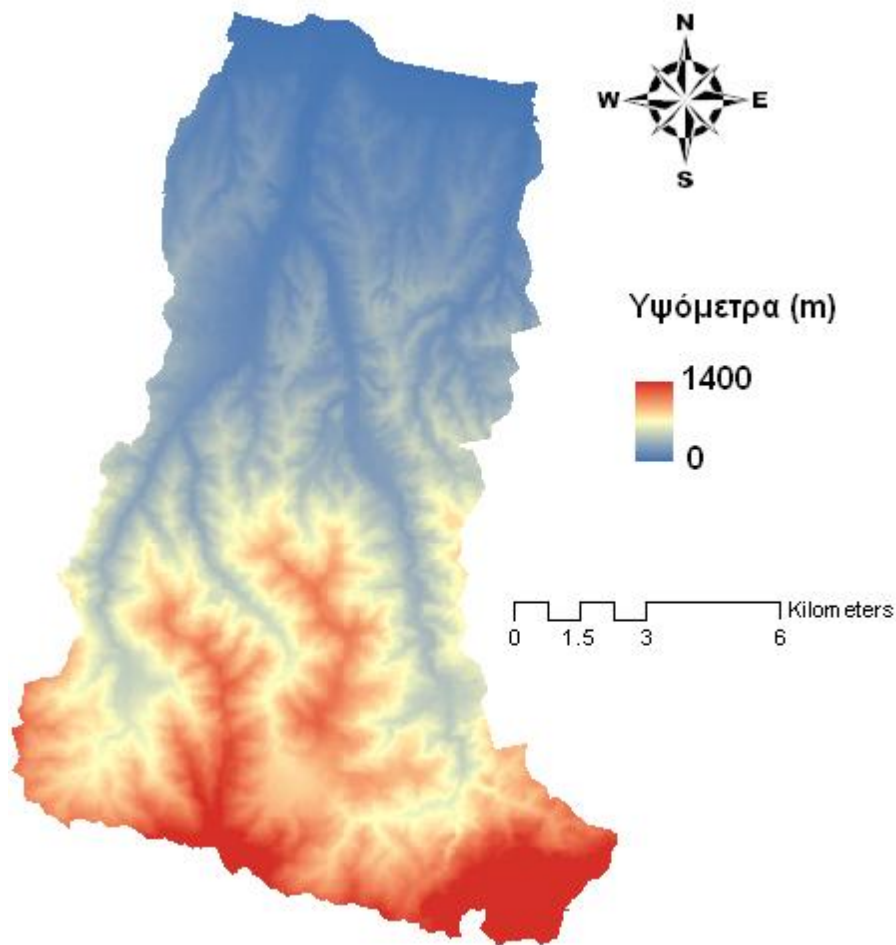
Ντεριανός εκφορτίζεται στο χωριό Συρίλι όπου ενώνεται με την κύρια κοίτη του ποταμού Ταυρωνίτη 3 χιλιόμετρα πριν την θάλασσα.



Εικόνα 3.2: Η θέση της λεκάνης απορροής στο Νομό Χανίων (Πηγή: Νικολαΐδης και Καρατζάς)

3.2. Γεωμορφολογία

Όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα, στην ευρύτερη περιοχή της λεκάνης απορροής του ποταμού Ταυρωνίτη το τοπογραφικό ανάγλυφο ποικίλει (Εικόνα 3.3), με το μέγιστο υψόμετρο να φτάνει γύρω στα 1400 m στο νότιο τμήμα της (πρόποδες Λευκών Ορέων) και το ελάχιστο στο βόρειο κομμάτι της (ακτογραμμή) με υψόμετρο 0 m, όπου και εκβάλει ο ποταμός Ταυρωνίτης. Το βόρειο τμήμα της λεκάνης απορροής έχει χαμηλό υψόμετρο, πλούσια βλάστηση και υδροφορία. Στο ενδιάμεσο τμήμα το υψόμετρο σταδιακά ανεβαίνει και γίνεται ημιορεινό και λοφώδες, με αραιότερο υδρογραφικό δίκτυο και βλάστηση και τέλος, το νότιο τμήμα της λεκάνης απορροής είναι κομμάτι του ορεινού όγκου των Λευκών Ορέων. Το υδρογραφικό δίκτυο σε αυτό το τμήμα είναι αραιό με βαθιές χαραδρώσεις και η βλάστηση είναι ελάχιστη.

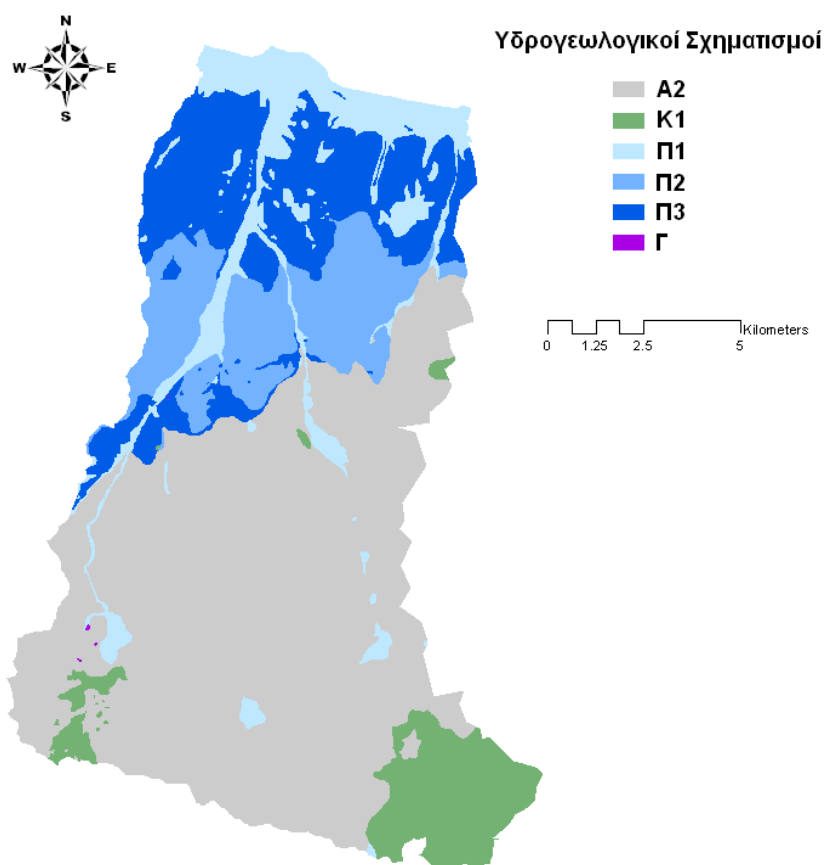


Εικόνα 3.3. : Τοπογραφικό ανάγλυφο λεκάνης απορροής Ταυρωνίτη (Πηγή: Ειδικό Σχέδιο Διαχείρισης των Υδατικών Πόρων για τη Λεκάνη Απορροής του Ποταμού Ταυρωνίτη, Νικολαΐδης και Καρατζάς)

3.3. Γεωλογία

Το μεγαλύτερο τμήμα της υδρολογικής λεκάνης του ποταμού Ταυρωνίτη, περίπου 93 km², βρίσκεται εντός φυλλιτικών χαλαζιτικών σχηματισμών, οι οποίοι τοπικά καλύπτονται από αλλούβια και υλικά τεταρτογενών αναβαθμίδων μικρής έκτασης και πάχους. Οι σχηματισμοί αυτοί πρακτικά είναι αδιαπέρατοι ή εκλεκτικής κυκλοφορίας μικρής έως πολύ μικρής διαπερατότητας (A2), (Εικόνα 3.4). Οι ανθρακικοί σχηματισμοί που συναντώνται στα ανάντη νότια τμήματα της λεκάνης καλύπτουν περίπου 14 km². Οι σχηματισμοί αυτοί είναι υψηλής έως μέτριας υδροπερατότητας (K1), (Εικόνα 3.4). Στο κατάντη τμήμα της λεκάνης αναπτύσσονται νεογενείς σχηματισμοί, κυρίως μάργες σε έκταση περίπου 28 km². Οι σχηματισμοί αυτοί είναι κοκκώδεις μη προσχωματικές αποθέσεις μικρής έως πολύ μικρής υδροπερατότητας (Π3), (Εικόνα 3.4). Επίσης έκταση περίπου 20.8 km² καλύπτεται από αποθέσεις μέτριας έως μικρής υδροπερατότητας (Π2). Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται τα κροκαλοπαγή και οι μαργαϊκοί

ασβεστόλιθοι των νεογενών σχηματισμών που φιλοξενούν επιμέρους υπόγειες υδροφορίες μέσου έως μικρού δυναμικού. Έκταση επίσης 17.5 km² αντιστοιχεί σε ψαμμίτες, κροκαλοπαγή και τεταρτογενείς αποθέσεις αναβαθμίδων και σύγχρονων αλλούβιων σχηματισμών οι οποίοι καταλαμβάνουν τα όρια της ευρύτερης κοίτης του ποταμού Ταυρωνίτη μέχρι το ύψος των Βουκολιών και του παραπόταμου Ντεριανού. Οι σχηματισμοί αυτοί χαρακτηρίζονται από αποθέσεις κυμαινόμενης υδροπερατότητας (Π1), (Εικόνα 3.4). Στις νεογενείς αποθέσεις επίσης συναντώνται στρώματα και παρεμβολές γύψων (Γ) ικανού πάχους. Οι ενστρώσεις αυτές καθιστούν τις υδροφορίες που αναπτύσσονται στους σχηματισμούς αυτούς, ποιοτικά υποβαθμισμένες εξαιτίας της υψηλής περιεκτικότητας σε θειικά άλατα (Νομαρχιακή Αυτοδιοίκηση Χανίων, 1996).



Εικόνα 3.4. Υδρογεωλογικοί σχηματισμοί περιοχής λεκάνης απορροής ποταμού Ταυρωνίτη. (Πηγή: Ειδικό Σχέδιο Διαχείρισης των Υδατικών Πόρων για τη Λεκάνη Απορροής του Ποταμού Ταυρωνίτη, Νικολαΐδης και Καρατζάς)

3.4. Υδρολογικά χαρακτηριστικά και υδρολογική κατάσταση

Στην περιοχή της λεκάνης του Ταυρωνίτη έχουν απογραφεί 55 σημεία εμφάνισης νερού από τα οποία τα 16 αναφέρονται σε γεωτρήσεις, τα 38 σε πηγάδια και το 1 σε πηγή. Πολλά από τα πηγάδια κατά την ξηρή περίοδο

στερεύουν. Από μετρήσεις στάθμης που πραγματοποιήθηκαν συντάχθηκαν πιεζομετρικοί χάρτες διακύμανσης υπόγειας στάθμης τόσο ετήσιας όσο και υπερετήσιας περιόδου. Η υπόγεια αποστράγγιση της λεκάνης γίνεται προς βορρά, ενώ η κλίση της υπόγειας πιεζομετρίας δεν είναι ίδια κατά μήκος της πεδινής ζώνης. Στο τμήμα μεταξύ του οικισμού Σιριλίου και της παραλιακής ζώνης είναι περίπου 0.5 %, στο τμήμα μεταξύ των Ντεριανών και Βουκολιών είναι περίπου 1.1% ενώ στο ανάντη τμήμα ανέρχεται στο 1.7%. Σημειώνεται ότι η πιεζομετρία είναι έμμεσα συνδεδεμένη με την τροφοδοσία της επιφανειακής απορροής. Με βάση τις παρατηρήσεις της ετήσιας διακύμανσης της υπόγειας στάθμης παρατηρείται ότι στο κατάντη τμήμα (Σιρίνη – Ταυρωνίτη) έχουμε μια πτώση της στάθμης περί τα 5 m μεταξύ ξηρής και υγρής περιόδου, στο τμήμα (Σιρίλι – Βουκολίες) κατά θέσεις 2-5 m και τέλος στο τμήμα ανάντη των Βουκολιών 0-1 m (Υπουργείο Γεωργίας, 2001; Καλημέρη, 2004).

Υδατικό δυναμικό

Το υδατικό δυναμικό της περιοχής σύμφωνα με την μοντελοποίηση εκτιμάται στα 65 εκ. m³ τον χρόνο. Η περιοχή τροφοδοτείται με 3,5 εκ m³ τον χρόνο νερό ύδρευσης και 5,0 εκ m³ τον χρόνο νερό άρδευσης από τον ΟΑΚ που προέρχονται από την πηγή Καλαμιώνα και την πηγή Αγιάς. Τα κύρια υδραυλικά έργα της περιοχής είναι τα ακόλουθα:

- a) Υδρομάστευση Ντεριανού από τον Δήμο Πλατανιά που προορίζεται για ύδρευση και άρδευση (περίπου 100 m³/hr)
- b) Υδρομάστευση Σεμπρενιώτη για την ύδρευση Βουκολιών (περίπου 100 m³/hr)
- c) Υδρομάστευση Ρουματιανού από τον Σύνδεσμο Κολυμβαρίου
- d) Υδρομάστευση ΟΑΚ μετά την συμβολή Ρουματιανού και Σεμπρενιώτη για άρδευση (600,000 m³/yr)
- e) Γεωτρήσεις (5-6) στον Ταυρωνίτη για άρδευση με δυνατότητα 40-100 m³/hr η κάθε μία.
- f) 2-3 μικρές ιδιωτικές γεωτρήσεις 20-30 m³/hr η κάθε μία.
- g) Περίπου 100 πηγάδια στην περιοχή

Το σύνολο των απολήψεων από τα υδραυλικά έργα της περιοχής υπολογίζονται στα 4-5 εκ m³ τον χρόνο. Επομένως οι ανάγκες της περιοχής καλύπτονται με 12,5-13,5 εκ m³ τον χρόνο. Η περιοχή θα είχε αυτόνομη

επάρκεια νερού αν είχαν κατασκευαστεί τα φράγματα Ντεριανού και Σεμπρωνιώτη χωρητικότητας 18 και 7 εκ. m³ αντιστοίχως.

3.5. Κλιματολογικά στοιχεία

Το κλίμα της συγκεκριμένης περιοχής χαρακτηρίζεται ως εύκρατο-μεσογειακό και ιδιαίτερα ξηροθερμικό, με το ποσοστό ηλιοφάνειας στο 70% του συνόλου των ημερών ενός έτους. Ο χειμώνας χαρακτηρίζεται ήπιος και οι μήνες από το Νοέμβριο έως και το Μάρτιο είναι σχετικά κρύοι, όχι όμως παγεροί. Συγκεκριμένα ο χειμώνας αρχίζει συνήθως το δεύτερο δεκαήμερο του Νοεμβρίου και συνεχίζει μέχρι το Μάρτιο με πολλές βροχοπτώσεις. Η άνοιξη είναι μικρής διάρκειας, από τον Απρίλιο έως αρχές Μαΐου και παρουσιάζει μικρές βροχοπτώσεις. Το καλοκαίρι αρχίζει συνήθως μέσα Μαΐου και διαρκεί ως τέλη Σεπτεμβρίου με λίγες βροχές κατά το μήνα αυτό. Ολικό παγετοί δεν εμφανίζονται στην περιοχή ενώ οι μερικοί ή λευκοί αποτελούν σπάνιο φαινόμενο. Οι χιονοπτώσεις και οι χαλαζοπτώσεις είναι σπάνιες και δεν δημιουργούν πρόβλημα στα χαμηλά υψόμετρα. Η θερμοκρασία ελάχιστες φορές πέφτει υπό το μηδέν με εξαίρεση τα μεγάλα υψόμετρα. Οι άνεμοι που συνήθως παρατηρούνται στην περιοχή είναι κυρίως Δυτικοί και Βορειοδυτικοί μέσης έντασης.

3.6. Η μελέτη του 1991 και προηγούμενες μελέτες για τον Ταυρωνίτη

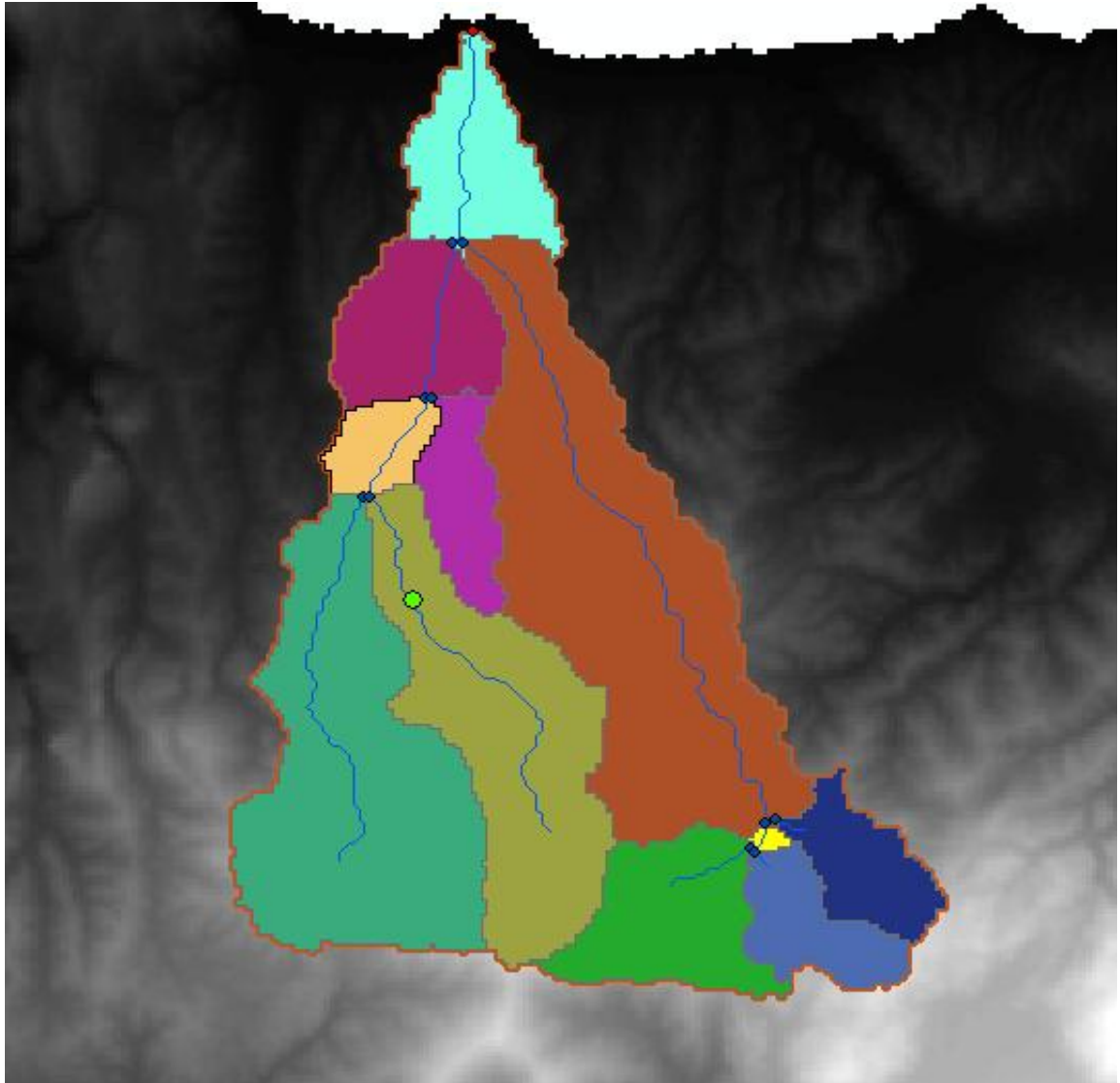
Από το 1959 υπήρχαν σκέψεις για την κατασκευή ενός φράγματος στον Ταυρωνίτη. Το 1960 εκπονήθηκε από τον Α.Χατζιδάκη η “Προμελέτη Αξιοποίησης Πεδιάδων Κερίτη-Ταυρωνίτη Χανίων”, που περιελάμβανε και τη μελέτη αντηριδωτού(βαρύτητος) φράγματος στη θέση “Νεροτριβή”, ύψους περίπου 60m και χωρητικότητας ταμιευτήρα 5 εκ. m³ περίπου.

Ακόμη το 1962 πραγματοποιήθηκε γεωλογική μελέτη για το φράγμα Ταυρωνίτη Ν.Χανίων, των Ι.Φραγκοπούλου και Σ.Σκουνάκη.

Η μελέτη του 1991, εκπονήθηκε σύμφωνα με την από 4'/1/1991 1η συμπληρωματική σύμβαση της “Μελέτης Φραγμάτων στον χείμαρρο Ταυρωνίτη Νομού Χανίων” από τον Ειδικό Συνεργάτη του Αναδόχου της μελέτης “ΥΔΡΟΣΥΣΤΗΜΑ, Σύμβουλοι Μηχανικοί Ε.Π.Ε”, γεωλόγο μελετητή Βασ.Παρασχούδη.

Στη μελέτη αυτή, προτείνεται η δημιουργία ενός μεγάλου ταμιευτήρα στον Ντεριανό όπου θα καταλήγουν και τα νερά των γειτονικών λεκανών Ταυρωνίτη και Ρουματιανού, ύστερα από την κατασκευή μικρών φραγμάτων εκτροπής και τη διάνοιξη προσαγωγών σηράγγων. Με την πρόταση αυτή θα επιτυγχανόταν η εκμετάλλευση και των τριών λεκανών, με συγκέντρωση στον ταμιευτήρα Ντεριανού όγκο νερού ίσο με 45 εκ. m³.

Όσον αφορά τον ποταμό Σεμπρωνιώτη, μελετήθηκε η κατασκευή μικρού φράγματος με σκοπό τη σύλληψη και εκτροπή των υδάτων του προς τον ταμιευτήρα αποθήκευσης του Ντεριανού. Στην εικόνα 3.5 φαίνεται η προτεινόμενη θέση του φράγματος (Συντεταγμένες: 5578832.281, 1.488177.283), στην τοποθεσία 'Νεροτριβή'



Εικόνα 3.5: Θέση προτεινόμενου φράγματος Σεμπρωνιώτη στη λεκάνη απορροής του ποταμού Ταυρωνίτη

Συμπεράσματα-προτάσεις της μελέτης αυτής για τον Σεμπρωνιώτη είναι ότι:

- Οι γεωλογικές συνθήκες για την κατασκευή φράγματος είναι πολύ καλές, αλλά λόγω της ύπαρξης μεγάλης κατάπτωσης-κατολίσθησης περί τα 100m ανάντη του φράγματος, το ύψος του δεν μπορεί να ξεπεράσει τα 20-30m, σε συνδυασμό με έργα ενίσχυσης της ευστάθειας της εν λόγω κατάπτωσης

- Ο μέσος ετήσιος όγκος νερού της επιφανειακής απορροής της λεκάνης απορροής είναι 11.5εκ. m³
- ο όγκος των φερτών υλών(συρόμενες και αιωρούμενες) αναμένεται ελάχιστος
- κρίνεται σκόπιμη η κτίση ενός-δύο(1-2) αναβαθμών ανάντη του ταμιευτήρα για τη συγκράτηση των έστω και λίγων φερτών υλών, κυρίως κατά την περίοδο των πλημμυρών
- στην ευρύτερη περιοχή υπάρχουν υλικά κατασκευής για οποιονδήποτε τύπο φράγματος

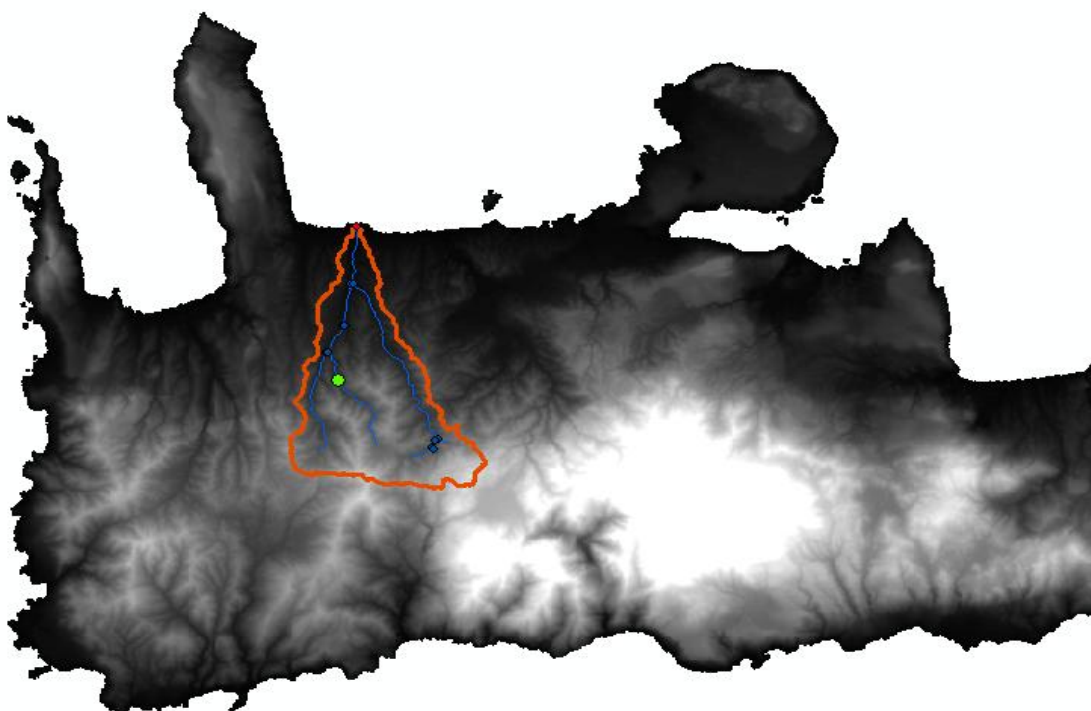
Τέλος, το 2013 ο κ. Νικολαΐδης με τον κ. Καρατζά, καθηγητές του Πολυτεχνείου Κρήτης, συνέγραψαν τεχνική έκθεση προς τον ΟΑΔΥΚ με τίτλο “Ειδικό Σχέδιο Διαχείρισης των Υδατικών Πόρων για τη Λεκάνη Απορροής του Ποταμού Ταυρωνίτη”. Σε αυτή την εργασία ανέλυσαν την υδρολογική, χημική, οικολογική και περιβαλλοντική κατάσταση του ποταμού Ταυρωνίτη και μεταξύ άλλων, πρότειναν τα ακόλουθα:

- τη δημιουργία δικτύου συνεχούς τηλεμετρικής παρακολούθησης των υπόγειων και επιφανειακών υδάτων της λεκάνης,
- την κατασκευή των φραγμάτων Ντεριανού και Σεμπρωνιώτη χωρητικότητας 18 και 7 εκ. m³ αντιστοίχως και αν δεν προβλέπεται η υλοποίησή τους, τη δημιουργία μικρών ανασχετικών φραγμάτων(8-12 ανά παραπόταμο) για τη μείωση της διαβρωτικής ικανότητας του ποταμού.
- την απαγόρευση των αμμοληψιών από την κοίτη του Ταυρωνίτη διότι προκαλούν προβλήματα στην βιοποικιλότητα του ποταμού καθώς και στη διάβρωση της παράκτιας ζώνης.
- την εφαρμογή συστημάτων ολοκληρωμένης γεωργίας , δηλαδή την αειφορική και βέλτιστη χρήση όλων των μέσων όπως το νερό, το έδαφος, τις μηχανές κλπ
- τη συντονισμένη αντιμετώπιση πλημμυρών και ξηρασίας

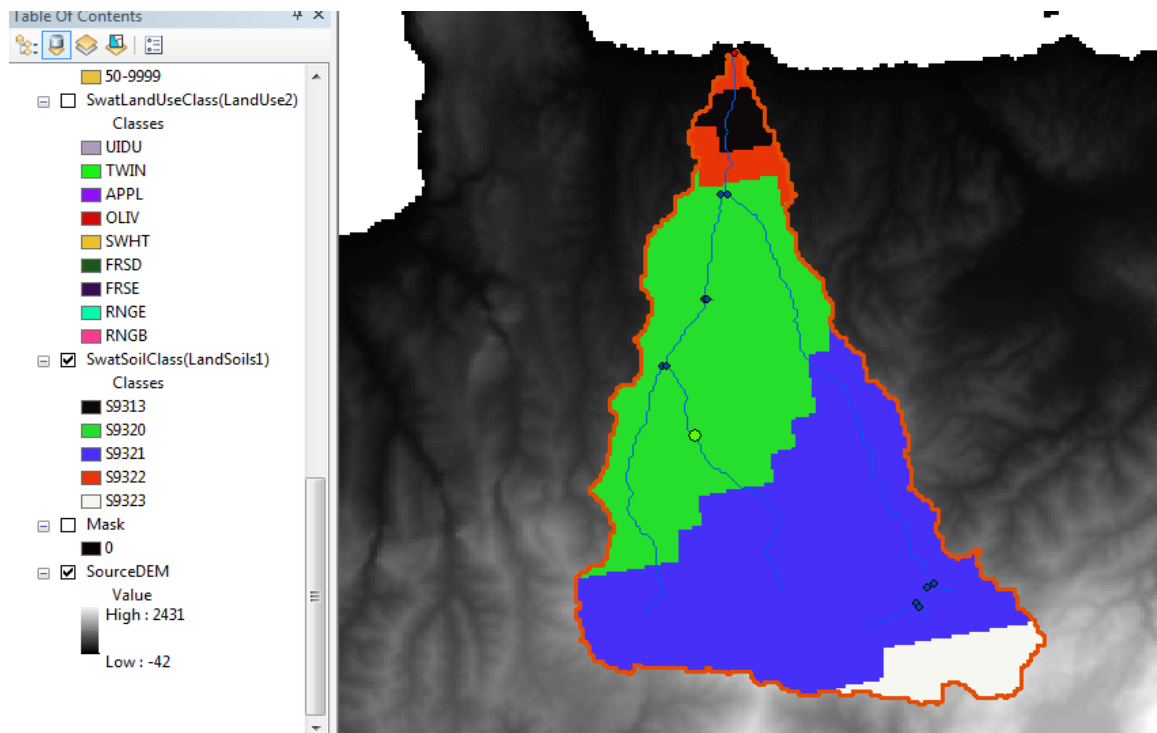
4. Ανάπτυξη του Υδρολογικού Μοντέλου

4.1. Πρόγραμμα - Δεδομένα Εισόδου

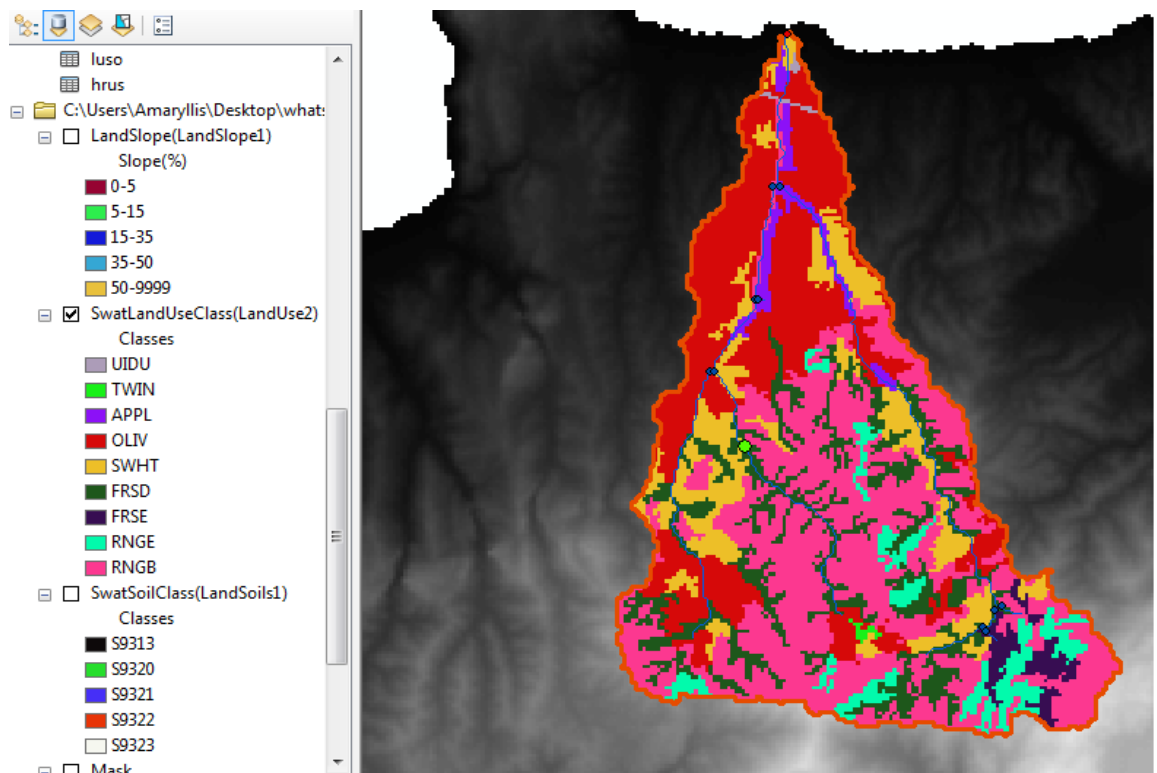
Για τη μοντελοποίηση χρησιμοποιήθηκε η έκδοση του ArcMap 10, Service Pack 5 (Build 4400) και η έκδοση του SWAT 2012.10_0.15. Αρχικά εισήχθησαν ο τοπογραφικός (Εικόνα 4.1) και ο εδαφολογικός χάρτης (Εικόνα 4.2) της λεκάνης απορροής και ο χάρτης χρήσεων γης (Εικόνα 4.3) και στη συνέχεια, οι ημερήσιες μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασιακές μετρήσεις καθώς και οι βροχομετρικές μετρήσεις των σταθμών από το 1973 έως το 2010. Το SWAT με τα παραπάνω δεδομένα μοντελοποιεί την ταχύτητα του ανέμου, ηλιακή ακτινοβολία και σχετική υγρασία για τις χρονιές αυτές και χωρίζει τη λεκάνη απορροής σε μέχρι και 5 διαφορετικές κλίσεις(%) εδάφους (Εικόνα 4.4). Έτσι, η λεκάνη χωρίστηκε σε υπο-λεκάνες (Εικόνα 4.5) και σε HRUs (Hydrologic Response Units-Εικόνα 4.6) τα οποία είναι ο συνδυασμός τύπου εδάφους, χρήσης γης και κλίσης. Η έκταση της λεκάνης που μοντελοποιήθηκε ήταν 132.99 km² και χωρίστηκε σε 11 υπο-λεκάνες και 69 HRUs.



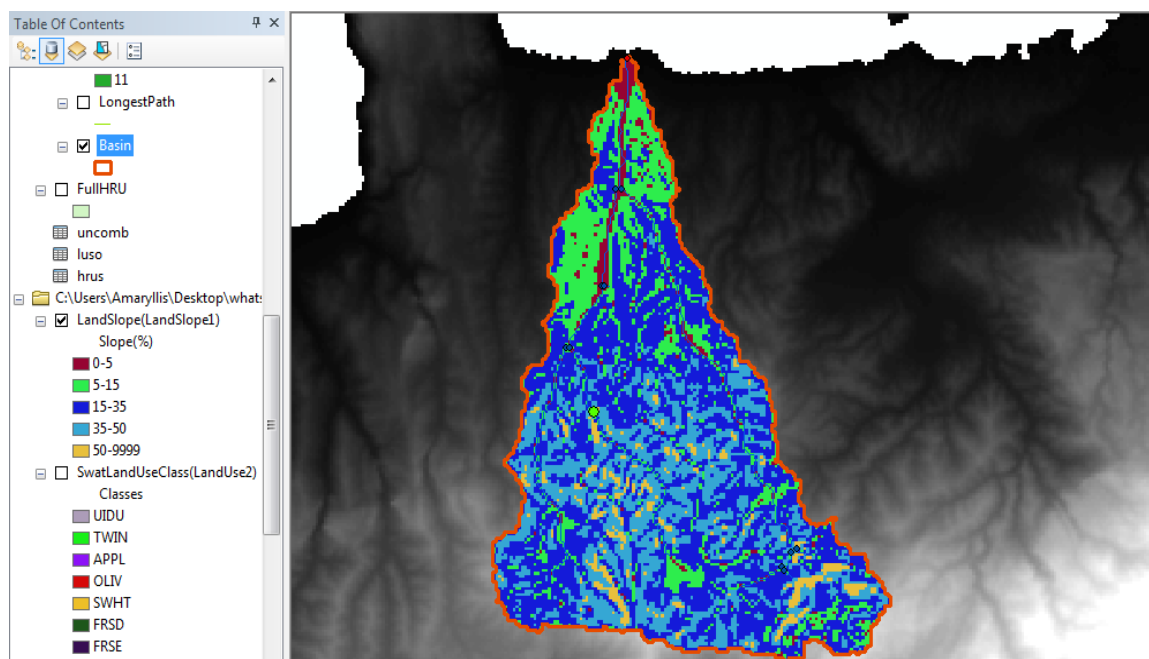
Εικόνα 4.1: Τοπογραφικός χάρτης της λεκάνης απορροής Ταυρωνίτη (DEM-Digital Elevation Model)



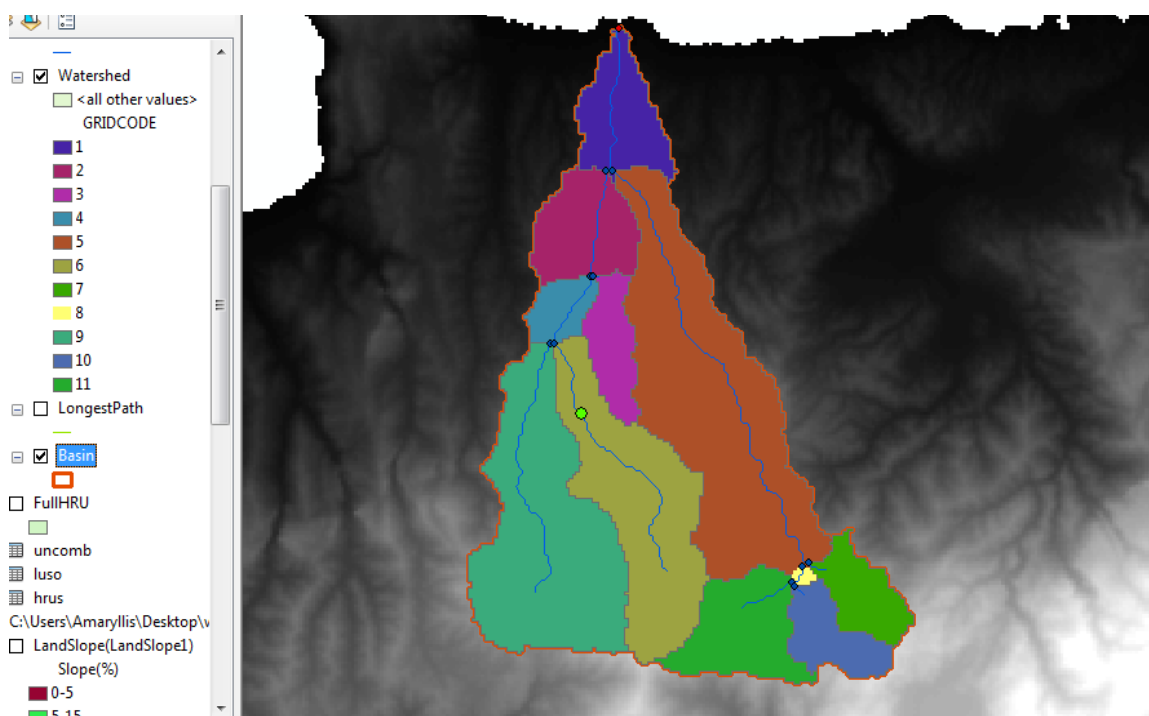
Εικόνα 4.2: Εδαφολογικός χάρτης της λεκάνης απορροής του Ταυρωνίτη



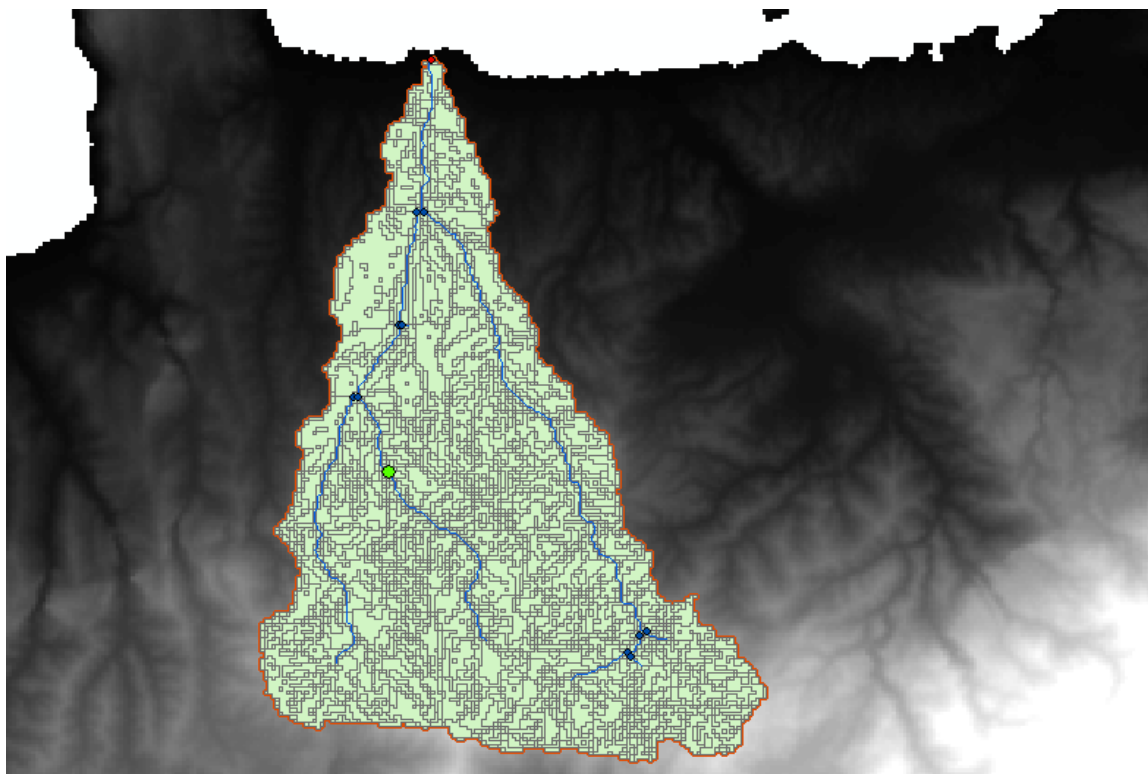
Εικόνα 4.3: Χάρτης χρήσεων γης της λεκάνης απορροής (Δεδομένα από CORRINE 2001)



Εικόνα 4.4: Χάρτης κλίσεων(%) της λεκάνης απορροής



Εικόνα 4.5: Προσδιορισμός των υπο-λεκανών της λεκάνης



Εικόνα 4.6: Η πλήρης κατανομή των HRU μετά την κατηγοριοποίηση του SWAT

4.2 Βαθμονόμηση-Επαλήθευση του μοντέλου

Η βαθμονόμηση (calibration) ενός μοντέλου επιτυγχάνεται με μεταβολή των τιμών των παραμέτρων του, ώστε να υπάρχει ικανοποιητική σύγκλιση μεταξύ των προβλέψεων του μοντέλου και των αντίστοιχων παρατηρήσεων. Η βαθμονόμηση έγινε χρησιμοποιώντας δεδομένα πεδίου για τα έτη 1995-2006 από τους παραποτάμους Σεμπρωνιώτη και Ρουματιανό. Από την αρχή το μοντέλο έδινε προβλέψεις αρκετά κοντά στις πραγματικές τιμές. Η μέθοδος βαθμονόμησης που επιλέχθηκε είναι η χειροκίνητη, κατά την οποία συντελείται μία μεταβολή τη φορά που 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).

Στη συνέχεια υπήρχε συνεχής επαναξιολόγηση, ώστε να αποδοθεί κατά το δυνατόν καλύτερα η παροχή του ποταμού. Επίσης, κάποιες μετρήσεις ήταν ημερήσιες και κάποιες ανά δέκα ημέρες και αυτό δεν επέτρεπε την πραγματοποίηση μιας τόσο ακριβούς βαθμονόμησης. Τέλος, η βαθμονόμηση ελέγχεται χρησιμοποιώντας τη χρονοσειρά επαλήθευσης για

τη διαπίστωση ελλείψεων και γίνεται επαναβαθμονόμηση έχοντας πληρέστερη εικόνα των φυσικών διεργασιών της λεκάνης απορροής.

Για τον Σεμπρωνιώτη, ως περίοδος βαθμονόμησης χρησιμοποιήθηκε το διάστημα 1995-2001 σε ημερήσιο βήμα, και ως επαλήθευσης το διάστημα 2001-2005. Έπειτα έγινε βαθμονόμηση και για τον Ρουματιανό για το διάστημα 1995-2001 και οι τιμές των παραμέτρων που άλλαξαν εφαρμόστηκαν και στην υπόλοιπη λεκάνη απορροής, που έχει παρόμοια χαρακτηριστικά με την υπο-λεκάνη του Ρουματιανού.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι παράμετροι και οι τιμές που επιλέχθηκαν για τον Σεμπρωνιώτη και την υπόλοιπη λεκάνη απορροής:

Πίνακας 4.1: Οι παράμετροι που τροποποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση του Σεμπρωνιώτη

Παράμετρος	Επεξήγηση	Εύρος στο SWAT	Τιμή που επιλέχθηκε
Πίνακας εισαγωγής δεδομένων : Soils (.Sol)			
SOL_AWC	Διαθέσιμη υγρασία Available water capacity in soil layer (mm H ₂ O/mm εδάφους)	0-1	0.3
SOL_K	Κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα (mm/hr)	0 - 2000	20
Πίνακας εισαγωγής δεδομένων : Subbasin (.Sub)			
TLAPS	Θερμοβαθμίδα, Temperature lapse rate (°C/km)	0 - 50	-5.7
CH_K1	Effective hydraulic conductivity in tributary channel alluvium (mm/hr)	0 - 300	20
CH_N1	Manning's "n" value for the tributary channels.	0.01 - 30	30
Πίνακας εισαγωγής δεδομένων : HRU (.Hru)			
OV_N	Manning's "n" value for overland flow.	0.01 - 30	30
ESCO	Συντελεστής εξάτμισης εδάφους, Soil evaporation compensation factor	0 - 1	0.5
EPCO	Plant uptake compensation factor	0 - 1	0.9
SLSOIL	Slope length for lateral sub-surface flow (m)	0 - 150	100
CANMX	Maximum canopy storage (mm)	0 - 100	20
Πίνακας εισαγωγής δεδομένων : Routing (.Rte)			
CH_N2	Manning's "n" value for the main channel	-0.01 - 0.3	0.3
Πίνακας εισαγωγής δεδομένων : Groundwater (.Gw)			
GW_DELAY	Συντελεστής καθυστέρησης υπόγειου νερού, Groundwater delay (days)	0 - 500	31
ALPHA_BF	Παράγοντας ύφεσης της παροχής του	0 - 1	0.9

	υπόγειου νερού, Baseflow alpha factor (days)		
GW_REVAP	Συντελεστής επανατροφοδότησης υπ. νερού, Groundwater revap coefficient	0.02 - 0.2	0.2
REVAPMN	Ελάχιστο βάθος νερού στον αβαθή υδροφορέα για να επιτραπεί η επανατροφοδότηση, Threshold depth of water in the shallow aquifer for revap to occur (mm)	0 - 1000	10
Πίνακας εισαγωγής δεδομένων : Management (.Mgt)			
CN2	Initial SCS runoff curve number for moisture condition II	35 - 98	45

Οι τιμές των παραμέτρων που εισήχθησαν στον παραπόταμο Ρουματιανό είναι στον πίνακα 4.2:

Πίνακας 4.2: Οι παράμετροι που τροποποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση του Ρουματιανού

Παράμετρος	Επεξήγηση	Εύρος στο SWAT	Τιμή που επιλέχθηκε
Πίνακας εισαγωγής δεδομένων : Soils (.Sol)			
SOL_AWC	Διαθέσιμη υγρασία Available water capacity in soil layer (mm H ₂ O/mm εδάφους)	0-1	0.3
SOL_K	Κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα (mm/hr)	0 - 2000	20
Πίνακας εισαγωγής δεδομένων : Subbasin (.Sub)			
TLAPS	Θερμοβαθμίδα, Temperature lapse rate (°C/km)	0 - 50	-5.7
CH_K1	Effective hydraulic conductivity in tributary channel alluvium (mm/hr)	0 - 300	0
CH_N1	Manning's "n" value for the tributary channels.	0.01 - 30	30
Πίνακας εισαγωγής δεδομένων : HRU (.Hru)			
OV_N	Manning's "n" value for overland flow.	0.01 - 30	30
ESCO	Συντελεστής εξάτμισης εδάφους, Soil evaporation compensation factor	0 - 1	0.5
EPCO	Plant uptake compensation factor	0 - 1	0.9
SLSOIL	Slope length for lateral sub-surface flow (m)	0 - 150	100
CANMX	Maximum canopy storage (mm)	0 - 100	20
Πίνακας εισαγωγής δεδομένων : Routing (.Rte)			
CH_N2	Manning's "n" value for the main channel	-0.01 - 0.3	0.3
Πίνακας εισαγωγής δεδομένων : Groundwater (.Gw)			
GW_DELAY	Συντελεστής καθυστέρησης υπόγειου νερού, Groundwater delay (days)	0 - 500	15
RCHRG_DP	Ποσοστό ποσότητας νερού που από	0 - 1	0.5

	τον αβαθή κατεισδύει στον βαθύ υδροφορέα Deep aquifer percolation fraction		
ALPHA_BF	Παράγοντας ύφεσης της παροχής του υπόγειου νερού, Baseflow alpha factor (days)	0 - 1	0.9
GW_REVAP	Συντελεστής επανατροφοδότησης υπ. νερού, Groundwater revap coefficient	0.02 - 0.2	0.2
REVAPMN	Ελάχιστο βάθος νερού στον αβαθή υδροφορέα για να επιτραπεί η επανατροφοδότηση, Threshold depth of water in the shallow aquifer for revap to occur (mm)	0 - 1000	10
Πίνακας εισαγωγής δεδομένων : Management (.Mgt)			
CN2	Initial SCS runoff curve number for moisture condition II	35 - 98	55

4.3 Αποτελέσματα Μοντελοποίησης

Για την αξιολόγηση της μοντελοποίησης χρησιμοποιήθηκαν οι δείκτες NSE(δείκτης αποδοτικότητας Nash–Sutcliffe Efficiency), η ποσοστιαία απόκλιση (Percent BIAS - PBIAS), ο λόγος του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (Root Mean Square Error – RMSE) καθώς και ο λόγος του μέσου τετραγωνικού σφάλματος προς την τυπική απόκλιση των μετρήσεων (Root Mean Square Error – Standard deviation of measured data Ratio - RSR). Οι δείκτες αυτοί υπολογίστηκαν κατά την σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών παροχής στις θέσεις Σεμπρωνιώτη και Ρουματιανού.

- Δείκτης NSE

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

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y^{mean})^2}$$

όπου,

Y_i^{sim} : η προσομοιωμένη χρονοσειρά,

Y_i^{obs} : η παρατηρημένη χρονοσειρά,

Y^{mean} : ο αριθμητικός μέσος όρος της παρατηρημένης χρονοσειράς και

n : το μήκος της χρονοσειράς

Οι τιμές που παίρνει είναι από το $-\infty$ έως τη μονάδα, με βέλτιστη τιμή τη μονάδα, όταν οι προσομοιωμένες τιμές ταυτίζονται πλήρως με τις παρατηρημένες τιμές. Για να θεωρούνται έμπιστα τα αποτελέσματα του μοντέλου για την παροχή, πρέπει να είναι μεγαλύτερο ή ίσο του 0.5.

- Δείκτης PBIAS

Ο δείκτης PBIAS μετρά την μέση τάση των προσομοιωμένων τιμών να είναι μεγαλύτερες ή μικρότερες απ' ότι οι αντίστοιχες παρατηρημένες και έχει την δυνατότητα να καταδεικνύει ξεκάθαρα την μικρή αποδοτικότητα ή προγνωστική ικανότητα του μοντέλου (Gurta et al., 1999). Η βέλτιστη τιμή του δείκτη είναι το 0, με κοντινές τιμές σε αυτό να προδίδουν επιτυχή και ακριβή προσομοίωση, ενώ οι θετικές τιμές υποδηλώνουν ότι το μοντέλο έχει την τάση να υποεκτιμά τις πραγματικές τιμές των μεταβλητών και οι αρνητικές το αντίστροφο (Gurta et al., 1999). Ο δείκτης έχει τη μορφή της ακόλουθης εξίσωσης:

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim}) * (100)}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs})} \right]$$

όπου,

PBIAS: η ποσοστιαία απόκλιση μεταξύ των δεδομένων,

Y_i^{sim} : η προσομοιωμένη χρονοσειρά και

Y_i^{obs} : η παρατηρημένη χρονοσειρά

Για να θεωρηθεί βαθμονομημένο το μοντέλο, πρέπει η απόλυτη τιμή του δείκτη να είναι μικρότερη του 25.

- Δείκτες RMSE και RSR

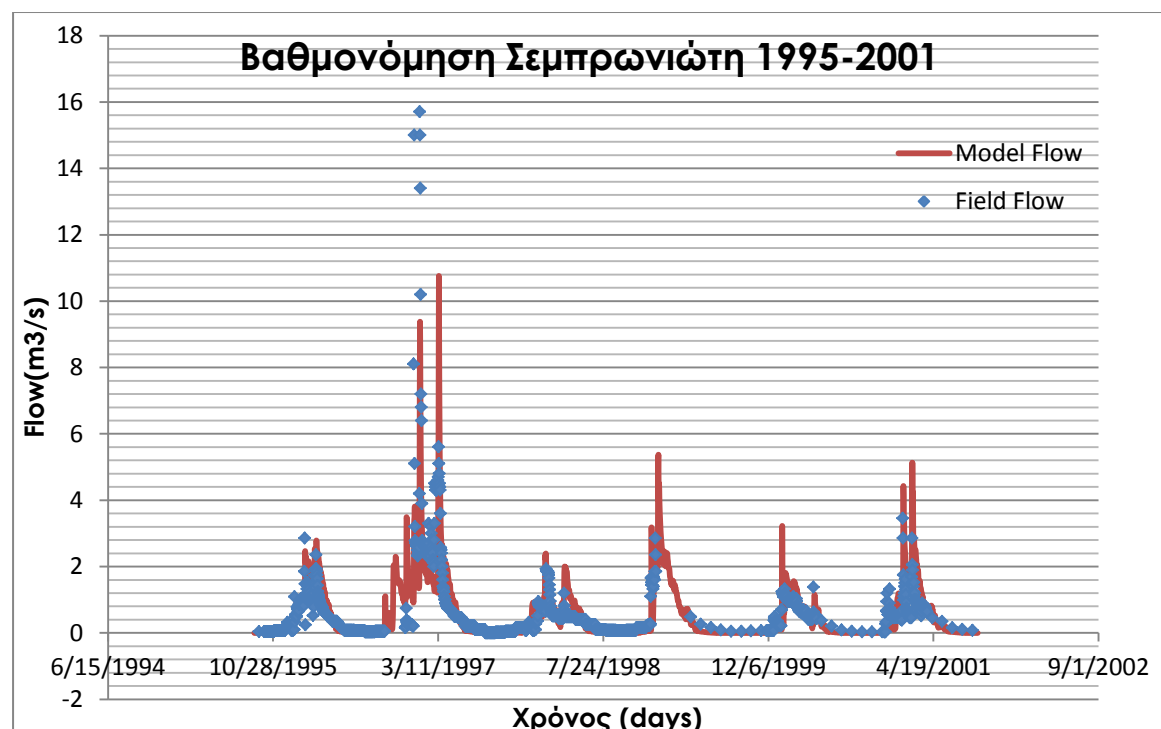
Το μέσο υπολειμματικό σφάλμα (RMSE) είναι από τους πιο συχνά χρησιμοποιούμενους στατιστικούς δείκτες με τις μικρές τιμές να υποδηλώνουν καλή αποδοτικότητα του μοντέλου (Moriasi et al., 2007). Ωστόσο, οι τιμές που υπολογίζει η στατιστική αυτή φόρμουλα εξαρτώνται

από την κλίμακα των μεγεθών στα οποία αναφέρεται, οπότε σε συνδυασμό με τον δείκτη RSR (Singh et al. 2004) γίνεται η αξιολόγηση του μοντέλου. Ο δείκτης RSR μεταβάλλεται από την τιμή 0, η οποία αντιστοιχεί σε μηδενική τιμή του RMSE ή μηδενική απόκλιση των σφαλμάτων και επομένως τέλεια προσομοίωση, έως μία μεγάλη θετική τιμή. Όσο μικρότερο είναι το RSR, τόσο μικρότερο το RMSE, και επομένως τόσο καλύτερη η προγνωστική ικανότητα του μοντέλου. Η σχέση για τον υπολογισμό τους είναι:

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \frac{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2} \right]}{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y^{mean})^2} \right]}$$

Για να είναι αποδεκτές οι προσομοιώσεις του μοντέλου για τη ροή του ποταμού, πρέπει να είναι μικρότερο ή ίσο του 0.7.

Το διάγραμμα 4.1 παρουσιάζει τη σύγκριση παροχών πεδίου με τις παροχές μοντέλου, για την περίοδο βαθμονόμησης 1995-2001, του ποταμού Σεμπρωνιώτη:



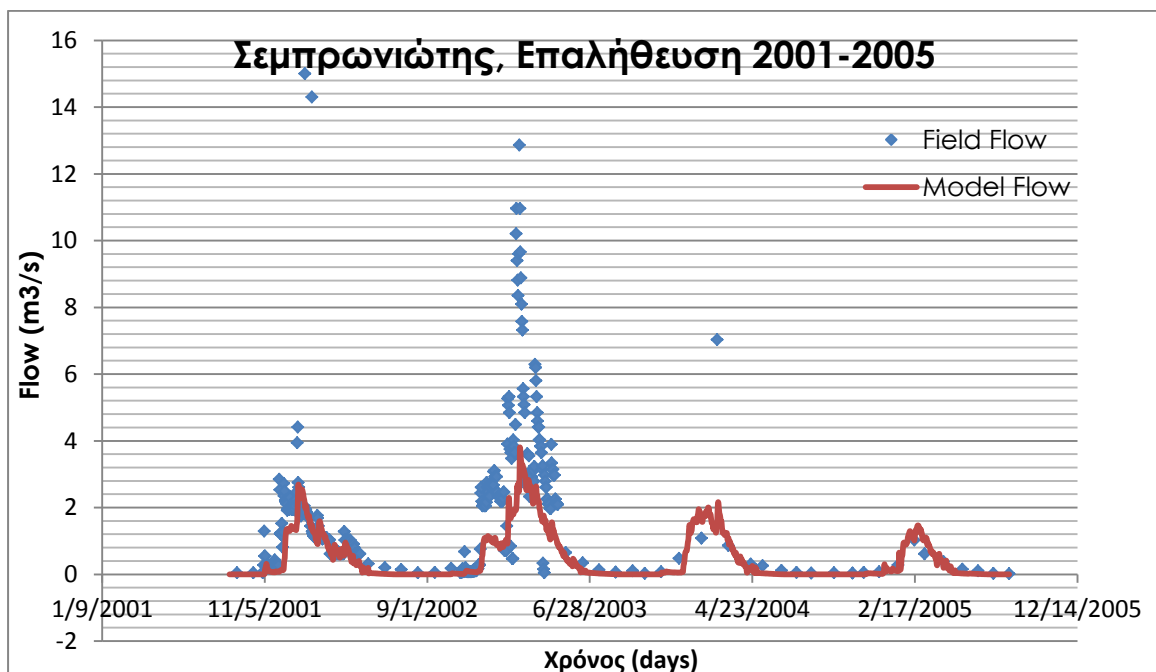
Διάγραμμα 4.1: Προσομοιωμένες και παρατηρημένες ημερήσιες παροχές για το Σεμπρωνιώτη, περίοδος βαθμονόμησης 1995-2001

Οι τιμές των δεικτών είναι:

- NSE: 0.56
- PBIAS: -7.58
- RSR: 0.0175

Από το διάγραμμα 4.1 φαίνεται ότι το μοντέλο ακολουθεί ικανοποιητικά το υδρογράφημα, εκτός από τις ακραίες παροχές, όπως τη χρονιά του 1997 που έχουν μετρηθεί υψηλότερες παροχές από τις προσομοιωμένες, ενώ τις υπόλοιπες χρονιές οι κορυφές του μοντέλου είναι σταθερά υψηλότερες από τις παρατηρημένες. Επίσης το Σεπτέμβριο 1996 το μοντέλο δίνει αύξηση της βασικής παροχής κατά $\sim 2\text{m}^3/\text{s}$, ενώ οι μετρήσεις του πεδίου δεν αυξάνονται. Ωστόσο εκείνη την περίοδο είχε βροχοπτώσεις, που θα είχαν αυξήσει την παροχή του ποταμού, επομένως πιθανώς να υπήρξε κάποιο σφάλμα στις μετρήσεις. Ο μέσος όρος της προσομοιωμένης παροχής για το 1995-2001 είναι $\sim 0.544\text{m}^3/\text{s}$.

Την περίοδο επαλήθευσης 2001-2005 δείχνει το διάγραμμα 4.2:



Διάγραμμα 4.2: Προσομοιωμένες και παρατηρημένες τιμές για τον Σεμπρωνιώτη, περίοδος επαλήθευσης 2001-2005

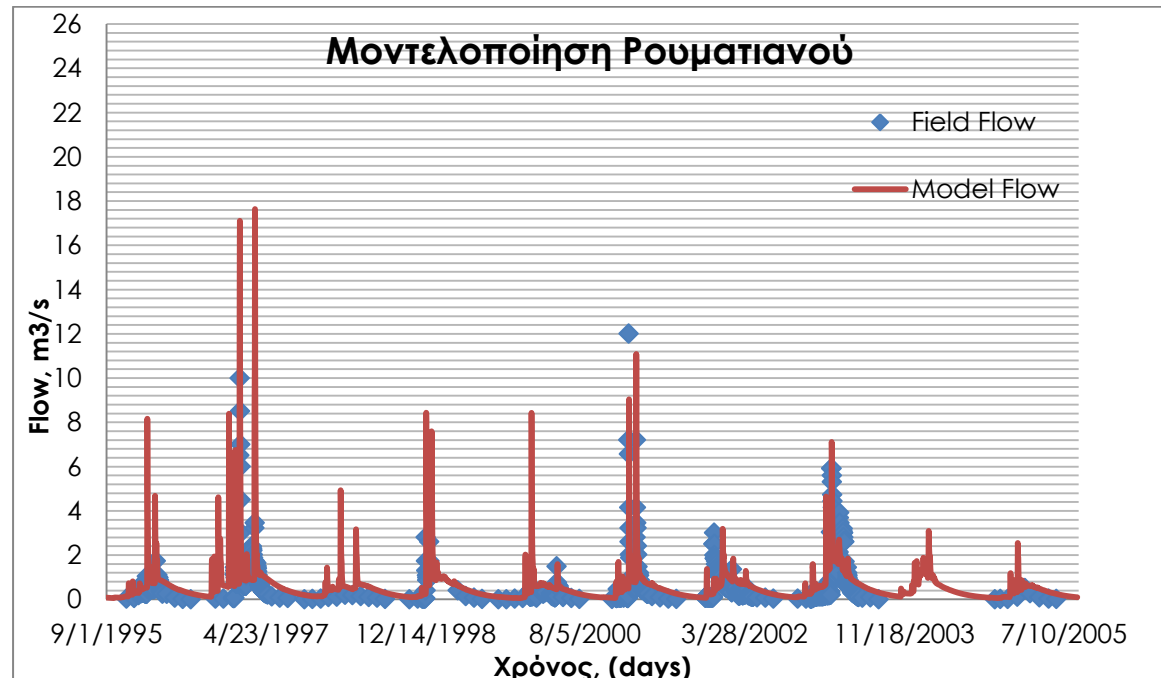
Οι τιμές των δεικτών είναι:

- NSE: 0.38
- PBIAS: 45.75
- RSR: 0.039

Από το γράφημα φαίνεται ότι το μοντέλο προσομοιώνει αρκετά καλά τη βασική παροχή, αλλά ή δεν δίνει σωστές παροχές τις περιόδους των βροχοπτώσεων, ή τα δεδομένα του πεδίου δεν είναι σωστά. Ακόμη, κάποιες χρονιές έλειπαν δεδομένα ή υπήρχαν μετρήσεις ανά δέκα ημέρες. Ήταν δύσκολη η επιλογή για τη βαθμονόμηση, γιατί στην περίοδο επαλήθευσης οι παροχές είναι πολύ υψηλότερες απ' ό,τι της περιόδου βαθμονόμησης.

Για τη δημιουργία του φράγματος έχει σημασία να προσομοιώνεται καλά η βασική παροχή, γιατί με εκείνη γεμίζει το φράγμα τις περιόδους που δεν έχει τόσο έντονη βροχόπτωση, τότε που υπάρχουν περισσότερες απαιτήσεις νερού.

Στον ποταμό Ρουματιανό υπήρχε πρόβλημα από πλευράς χρονοσειρών, όπως για παράδειγμα τα υδρολογικά έτη 1995-1996, 1997-1998, 2004-2005 υπήρχε βροχόπτωση, αλλά οι μετρήσεις της παροχής δείχνουν μια ελάχιστη αύξηση. Για το λόγο αυτό η βαθμονόμηση πραγματοποιήθηκε με σύγκριση τιμών μόνο από τα έτη 2000-2003, και με αυτά τα έτη έγινε η αξιολόγηση της απόκρισης με στατιστικούς δείκτες. Παρ' όλ' αυτά, η βαθμονόμηση αυτή δεν είναι ολοκληρωμένη, λόγω έλλειψης τιμών, και μας δείχνει ότι πρέπει να έχουμε πιο πολλές και αξιόπιστες μετρήσεις. Η προσομοίωση φαίνεται στο διάγραμμα 4.3.



Διάγραμμα 4.3: Προσομοιωμένες και παρατηρημένες ημερήσιες παροχές για το Ρουματιανό, περίοδος 1995-2006

Οι τιμές των δεικτών είναι:

NSE: 0.51

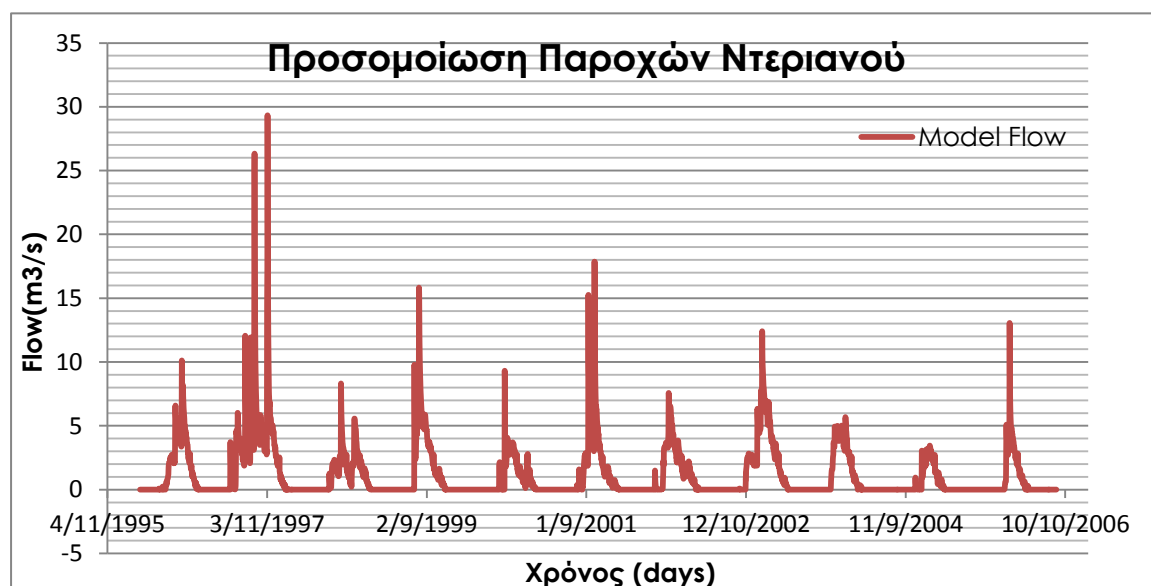
PBIAS: -19.5

RSR: 0.03

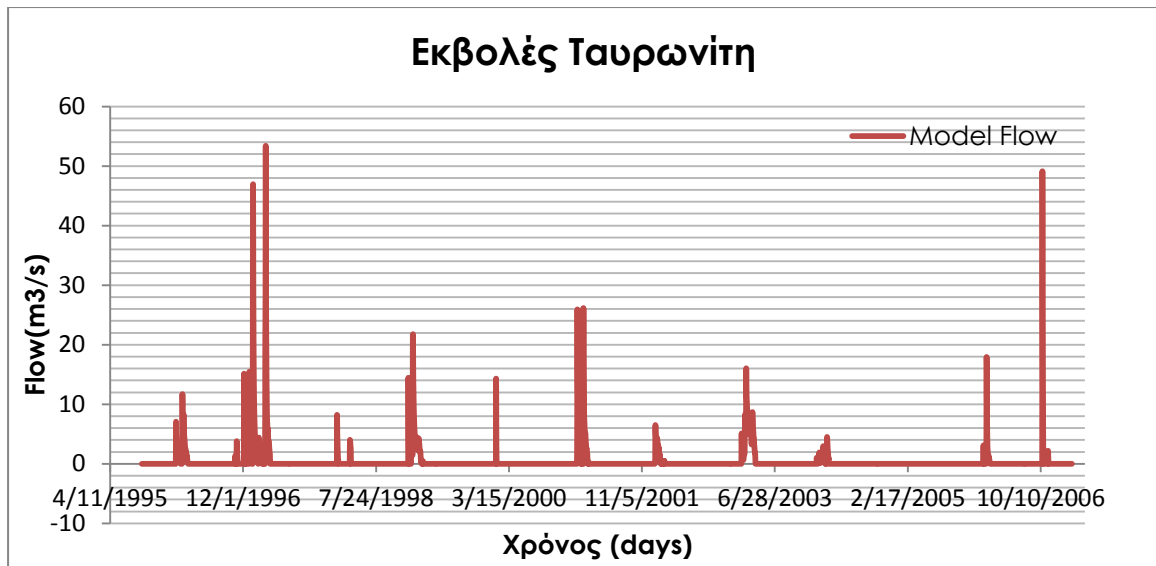
Στο διάγραμμα 4.3 η προσομοίωση της βασικής παροχής είναι ικανοποιητική τις περισσότερες χρονιές, κάποιες είναι λίγο υψηλότερη. Επίσης, οι ακραίες τιμές που δίνει το μοντέλο είναι υψηλότερες των μετρήσεων.

Παρατηρώντας όλα τα διαγράμματα καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι το μοντέλο SWAT κατάφερε να προσομοιώσει ικανοποιητικά την υδρολογία της λεκάνης απορροής του ποταμού Ταυρωνίτη καθ' όλη την χρονική περίοδο προσομοίωσης, παρά τις σχετικές αποκλίσεις των τιμών των διαφόρων δεικτών μεταξύ των προσομοιωμένων και παρατηρημένων παροχών σε ορισμένες θέσεις και χρονικά διαστήματα.

Στα διαγράμματα 4.4 και 4.5 φαίνονται τα αποτελέσματα που δίνει το SWAT για την παροχή του Ντεριανού και για τις εκβολές του Ταυρωνίτη.



Διάγραμμα 4.4: Προσομοιωμένες ημερήσιες παροχές για τον Ντεριανό, περίοδος 1995-2006



Διάγραμμα 4.5: Προσομοιωμένες ημερήσιες παροχές για τις εκβολές του Ταυρωνίτη, περίοδος 1995-2006

Τέλος, τα αποτελέσματα αυτά τα δίνει το SWAT αφότου από τις παροχές των ποταμών έχουν πραγματοποιηθεί οι παρακάτω υδρομαστεύσεις:

- 100 m³/hr από τον Ντεριανό, υπολεκάνη 5
- 100 m³/hr από τον Σεμπρωνιώτη, υπολεκάνη 6
- 500 m³/d από τον Ρουματιανό, υπολεκάνη 9
- 1644 m³/d μετά τη συμβολή Σεμπρωνιώτη με Ρουματιανό
- 60 m³/hr το χειμώνα και 130 m³/hr το καλοκαίρι από την πεδιάδα του Ταυρωνίτη, υπολεκάνη 1.

Από τον ποταμό Ταυρωνίτη στη θάλασσα εισέρχονται τα 10.36 εκ. m³/yr. Η μέση ετήσια παροχή του Ντεριανού είναι 32.7 εκ. m³/yr, του Σεμπρωνιώτη 13.67 εκ. m³/yr και του Ρουματιανού 14.87 εκ. m³/yr. Η μέση βροχόπτωση στην περιοχή το 1995-2009 ήταν 156.5 εκ. m³/yr (1174 mm), επομένως ο συντελεστής επιφανειακής απορροής (Runoff Coefficient) είναι 0,42, δηλαδή η επιφανειακή απορροή είναι το 42% της βροχόπτωσης. Η διήθηση προς τη βροχόπτωση είναι 0.56, η επανατροφοδότηση στον υπόγειο υδροφόρα από τη συνολική βροχόπτωση είναι 0.06 και η εξάτμισοδιαπνοή προς τη βροχόπτωση είναι 0.31. Η ετήσια απόληψη από τα φυτά (ET και Renap) είναι 83.7 εκ. m³/yr.

Ο πίνακας 4.3 παρουσιάζει την ετήσια μέση παροχή, βροχόπτωση και την εξάτμιση για κάθε υπολεκάνη του ποταμού Ταυρωνίτη.

Πίνακας 4.3: Το ισοζύγιο των υπολεκανών της λεκάνης απορροής του Ταυρωνίτη για τα έτη 1995-2009

Υπολεκάνη	Qout(εκ.μ ³ /yr)	P(εκ.μ ³ /yr)	ET(εκ.μ ³ /yr)	Revar (εκ.μ ³ /yr)
1^η (Εκβολές Ταυρωνίτη)	10.36	5.42	3	1.78
2^η	31.94	5.97	3.93	1.77
3^η	1.71	5.6	2.55	1.37
4^η	30.28	3.33	1.58	0.84
5^η (Ντεριανός)	32.71	46.25	13.53	9.92
6^η (Σεμπρωνιώτης)	13.67	27.57	7.45	5.79
7^η	3.9	6.85	1.52	1.44
8^η	10.98	0.39	0.09	0.08
9^η (Ρουματιανός)	14.87	33.42	11.13	7.67
10^η	3.82	6.74	1.51	1.41
11^η	6.95	12.29	2.76	2.58

Το ετήσιο ισοζύγιο της λεκάνης απορροής, προς την επιφάνεια είναι το εξής:

$$\Delta S = P - (Q_{sur} + Q_{lat} + Q_{rtn} + ET + Revar + Q_{deep})$$

$$= 1176 - (74.25 + 93.85 + 324.29 + 368 + 258.7 + 67.51)$$

$$= - 10.6 \text{ mm, δηλαδή η ποσότητα νερού στο σύστημα μειώθηκε,}$$

όπου

P : η βροχόπτωση

Q_{sur} : η επιφανειακή συμβολή στο κανάλι

Q_{lat} : η πλευρική ροή στο κανάλι

Q_{rtn} : η συμβολή του ρηχού υδροφορέα στο κανάλι

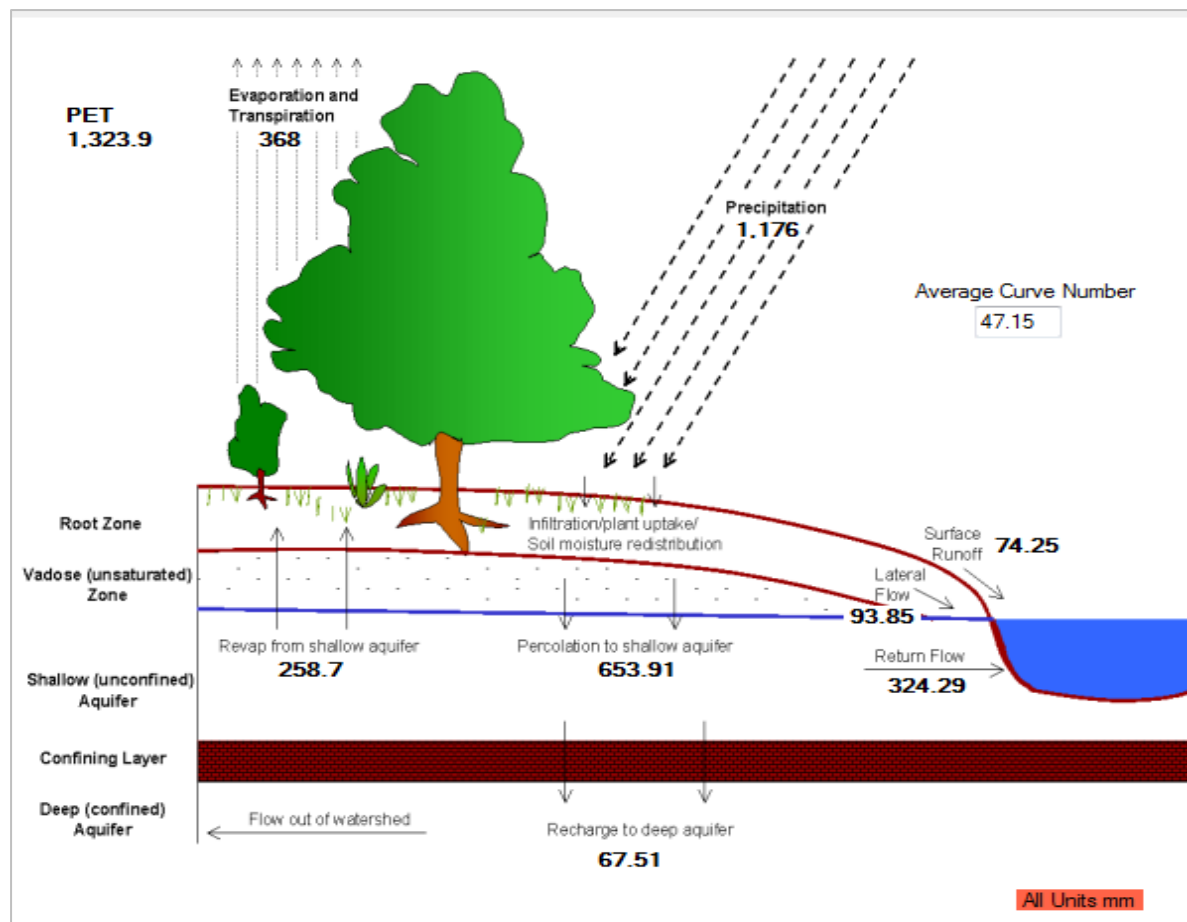
ET : η εξατμισοδιαπνοή

Revar : η επιστροφή νερού στην ακόρεστη ζώνη

ET + Revar : Η ετήσια πρόσληψη από τα φυτά

Q_{deep} : η ποσότητα νερού που απορρέει στον υπόγειο υδροφορέα

Στην εικόνα 4.7 φαίνεται σχηματικά το υδρολογικό ισοζύγιο της λεκάνης απορροής.



Εικόνα 4.7: Το υδρολογικό ισοζύγιο της λεκάνης απορροής

Η βροχόπτωση έχει τη μεγαλύτερη μεταβλητότητα από όλους τους παράγοντες, με τυπική απόκλιση 384.89 mm/yr, μέγιστη ετήσια τιμή τα 1984 mm/yr και ελάχιστη τα 265 mm/yr, που δείχνει πόσο μεγάλη διαφορά υπάρχει μεταξύ των ξηρών και υγρών ετών. Υψηλή είναι η τυπική απόκλιση επίσης στην διήθηση νερού (298 mm/yr), στην απορροή στο ρηχό και βαθύ υδροφορέα (268.29mm/yr) και στην ποσότητα νερού που εισέρχεται από το ρηχό υδροφορέα στο κανάλι (261.92 mm/yr). Ακόμη, μεγάλη διαφορά στη μέγιστη και στην ελάχιστη ετήσια τιμή υπάρχει στην ποσότητα που μένει στον ρηχό υδροφορέα στο τέλος του έτους(Μέγιστη ποσότητα: 1004.56mm.yr και ελάχιστη: 10 mm.yr).

Πιο αναλυτικά φαίνονται οι τιμές και η μεταβλητότητα των παραμέτρων του συστήματος, στον πίνακα 4.4.

Πίνακας 4.4: Υδρολογικό ισοζύγιο λεκάνης απορροής ποταμού Ταυρωνίτη για την περίοδο 1995 - 2010 σύμφωνα με το SWAT

Υδρολογικό Ισοζύγιο Ταυρωνίτη 1995-2010				
	Μέσος Όρος, mm/yr	Τυπική Απόκλιση, mm/yr	Μέγιστο, mm/yr	Ελάχιστο, mm/yr
Βροχόπτωση	1130	384.89	1984	265
Εξατμισοδιαπνοή	361	118.05	650.35	98.37
Διήθηση	619.75	298.2	1506	298.2
Επιστροφή νερού στην ακόρεστη ζώνη (Revar)	233.32	28.56	300.4	11.94
Ποσότητα που μένει στον ρηχό υδροφορέα στο τέλος του έτους	836.62	196.11	1004.56	10
Ποσότητα που αποθηκεύεται στον υπόγειο υδροφορέα στο τέλος του έτους	2008.86	17.16	2120.23	2000
Απορροή στον ρηχό και βαθύ υδροφορέα	686.81	268.29	1338.44	11.94
Απορροή στον υπόγειο υδροφορέα(από τον Ρουματιανό)	41.91	74.7	376.51	0
Επιφανειακή συμβολή στο κανάλι	61.13	77.83	429.78	0
Πλευρική ροή στο κανάλι	91.17	49.67	130.1	56.12
Συμβολή του ρηχού υδροφορέα στο κανάλι	338.64	261.92	1093.8	0

Με το υδρολογικό ισοζύγιο λεκάνης απορροής του ποταμού μπορούν να ληφθούν πιο συνειδητές αποφάσεις για τη διαχείριση των υδάτινων πόρων, όπως για τη δημιουργία φράγματος ή για προγραμματισμό άρδευσης. Επίσης μπορούν να γίνουν προβλέψεις και κατασκευές σεναρίων. Για την καλύτερη μοντελοποίηση της περιοχής και τη δημιουργία αξιόπιστου διαχειριστικού μοντέλου πρέπει να εγκατασταθούν μόνιμοι σταθμοί μέτρησης στην λεκάνη.

5. Προσομοίωση ταμιευτήρα

5.1 Εισαγωγή

Το προτεινόμενο φράγμα προβλέπει τη δημιουργία ταμιευτήρα στον παραπόταμο του Ταυρωνίτη Σεμπρωνιώτη, με έκταση λεκάνης απορροής 21.89 km². Αποσκοπεί στην συγκράτηση ορισμένης ποσότητας νερού κατά τον χειμώνα, που ο ποταμός έχει ροή μέχρι και 20 m³/s, έτσι ώστε να ικανοποιήσει ποσοστό της ζήτησης για άρδευση που υπάρχει κάθε καλοκαίρι, στην περιοχή της λεκάνης απορροής του Ταυρωνίτη.

Ως αρχικός στόχος τέθηκε η ετήσια μάστευση 4,982,500 m³, για την άρδευση 20,000 στρεμμάτων ελιάς(από τα 37,450 στρέμματα ελιάς που υπάρχουν στη λεκάνη απορροής του Ταυρωνίτη), καθώς και για την ύδρευση 2,500 κατοίκων της περιοχής Ταυρωνίτη.

Η προσομοίωση του φράγματος πραγματοποιήθηκε στο Excel, Microsoft Office. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν είναι:

- Καμπύλη επιφάνειας-όγκου
- Υδρολογικά δεδομένα:
 - Κατακρήμνιση
 - Δυνητική εξατμισοδιαπνοή
 - Εισροή ανά μήνα (m³/month)
- Απαιτούμενη ετήσια ποσότητα απόληψης (m³/yr)
- Συντελεστές κατανομής της απόληψης
- Όγκοι λειτουργίας(m³), κατώτερος και ανώτερος
- Οικολογική παροχή

Τα ζητούμενα που δίνουν τα κελιά του excel είναι:

- Ποσότητα υπερχείλισης (m³/month)
- Τελική ποσότητα απόληψης(m³/month)
- Ποσοστό αστοχίας-έλλειψη νερού
- Αποθηκευμένος όγκος(m³)

Στην εικόνα 5.1 παρατίθεται ένα τμήμα του μοντέλου για την προσομοίωση του ισοζυγίου του νερού του φράγματος.

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	Date	V	Qin/month	P*A	PET*A	Qout(m3/month)	Qirr final	Irrigation Deficit	Failure (%)	METABAHTES	Qirr απαιτ	Qeco	Ζήτηση/Μήν	α	Υδρευση Ν Ζήτηση
2	Sep-95	0	408	14,717	2,569	12,556	0			Qeco(m3)	Vmax(m3)	515048.531	90720	0.103371507	0.1216285
3	Oct-95	-56,263	11,314	14,081	1,306	80,352	0			0.035	5000000	170167.806	93744	0.034153097	0.0611353
4	Nov-95	12,412	114,981	34,939	892	80,352	0			Vmin(m3)	και λ.α.Ταυρ	8813.25456	90720	0.001768842	0.0482918
5	Dec-95	378,979	421,580	26,977	1,639	80,352	0			150000	2500	9094.52864	93744	0.001825294	0.0498330
6	Jan-96	2,803,045	2,479,663	51,603	4,361	93,744	9,095	0	0	Κατάν(m3/d)		9094.52864	93744	0.001825294	0.0498330
7	Feb-96	5,000,000	4,422,298	65,409	8,020	2,274,505	8,227	0	0	0.2		8227.26689	84672	0.001651233	0.0450805
8	Mar-96	5,000,000	5,212,166	54,779	8,208	5,249,644	9,095	0	0	Σ.Υδρευσης(m3/)		9094.52864	93744	0.001825294	0.0498330
9	Apr-96	5,000,000	1,749,082	2,816	20,562	1,542,308	189,028	0	0	182,500		189027.956	90720	0.037938375	0.0592088
10	May-96	4,543,377	306,141	9,296	25,925	93,744	651,790	0	0	Σ.Αρδευσης(m3/)		651790.377	93744	0.130815931	0.1256100
11	Jun-96	3,424,687	71,487	0	27,546	90,720	1,072,512	0	0	20000*σπ	4,800,000	1072511.99	90720	0.215255793	0.1271512
12	Jul-96	2,083,616	10,491	0	23,180	93,744	1,234,637	0	0	Σ.ολικό Απαιτούμ		1234637.43	93744	0.247794767	0.1312612
13	Aug-96	873,550	0	0	11,421	93,744	1,104,901	0	0	4,982,500		1104901.09	93744	0.221756364	0.1312612
14	Sep-96	400,045	89,554	47,771	5,061	90,720	515,049	0	0	(%)Υδρευση		515048.531	90720	0.103371507	0.1216285
15	Oct-96	1,854,537	1,653,912	74,006	9,515	93,744	170,168	0	0	0.0366282		170167.806	93744	0.034153097	0.0611353
16	Nov-96	4,045,251	3,657,312	21,641	16,501	1,462,925	8,813	0	0	(%)Αρδευση		8813.25456	90720	0.001768842	0.0482918
17	Dec-96	5,000,000	4,920,221	92,788	9,624	4,039,541	9,095	0	0	0.9633718		9094.52864	93744	0.001825294	0.0498330
18	Jan-97	5,000,000	7,737,898	82,222	10,607	7,800,418	9,095	0	0	Wet Season Parameters		9094.52864	93744	0.001825294	0.0498330
19	Feb-97	5,000,000	4,354,560	36,866	10,332	4,372,866	8,227	0	0	Qout	40%	8227.26689	84672	0.001651233	0.0450805
20	Mar-97	5,000,000	8,161,085	113,794	16,426	8,249,358	9,095	0	0	Qstorage	60%	9094.52864	93744	0.001825294	0.0498330
21	Apr-97	5,000,000	3,571,776	13,531	17,978	3,378,301	189,028	0	0			189027.956	90720	0.037938375	0.0592088

Εικόνα 5.1: Το μοντέλο του φράγματος στο Excel, Microsoft Office

5.2 Μηνιαίο Ισοζύγιο

Το ισοζύγιο για την προσομοίωση του φράγματος Σεμπρωνιώτη με μηνιαίο χρονικό βήμα είναι:

$$V_i = V_{i-1} + Q_{in_i} + P \cdot A - PET \cdot A - Q_{out} - Q_{irr_{final}}$$

όπου

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

Q_{in_i} : η εισροή στον ταμιευτήρα το μήνα i , (m^3)

A : Η επιφάνεια του φράγματος(m^2)

P : Η ποσότητα βροχόπτωσης το μήνα i , (m)

PET : Η δυνητική εξατμισοδιαπνοή το μήνα i , (m)

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

$Q_{irr_{final}}$: Η τελική ποσότητα που μαστεύεται για ύδρευση και άρδευση το μήνα i , (m^3)

Στη συνέχεια, αναλύονται περισσότερο τα παραπάνω βήματα.

Ο όγκος του φράγματος

Η απόφαση για τον όγκο ενός φράγματος βασίζεται σε ανάλυση των υδρολογικών δεδομένων της λεκάνης απορροής που θα τον

τροφοδοτήσει και σε οικονομοτεχνικά κριτήρια που προσδιορίζουν τις χρήσεις και το προσδοκώμενο επίπεδο εξυπηρετήσεως και ασφάλειας που θα πρέπει να ικανοποιήσει ο ταμιευτήρας (Μ.Βαφειάδης, Σημειώσεις «Ταμιευτήρες», ΤΥΤΠ-ΑΠΘ, 2004). Η γεωλογική μελέτη φραγμάτων στον χείμαρρο Ταυρωνίτη του Ν. Χανίων του 1991 έδινε μέγιστο ύψος φράγματος τα 30m (μαζί με έργα ενίσχυσης της ευστάθειας), επομένως ως μέγιστος όγκος επιλέχθηκαν για το ένα σενάριο τα 5 εκ. m³ (H=24.5m) και για το άλλο τα 6 εκ. m³ (H=28m). Ως ελάχιστος όγκος επιλέχθηκε η τιμή των 150000m³, διότι πάντα πρέπει να υπάρχει ποσότητα νερού στον ταμιευτήρα, τέτοια ώστε να μην στεγνώνουν τα ιζήματα στον πάτο, διότι η οξείδωσή τους θα προκαλέσει προβλήματα στη γεύση και οσμή του νερού.

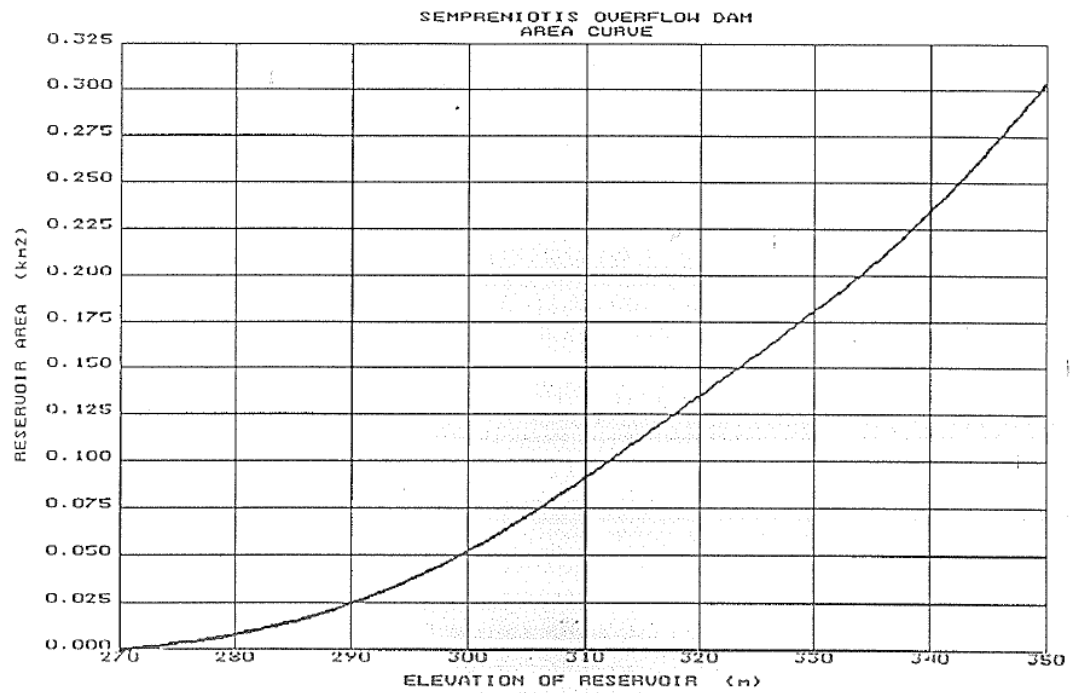
Εισερχόμενη Παροχή- Δυνητική Εξατμισοδιαπνοή

Η παροχή (Q_{in}) που εισέρχεται κάθε μήνα και η δυνητική εξατμισοδιαπνοή (PET) βρίσκονται από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του SWAT. Στη συνέχεια η δυνητική εξατμισοδιαπνοή πολλαπλασιάζεται με την εκάστοτε επιφάνεια του φράγματος.

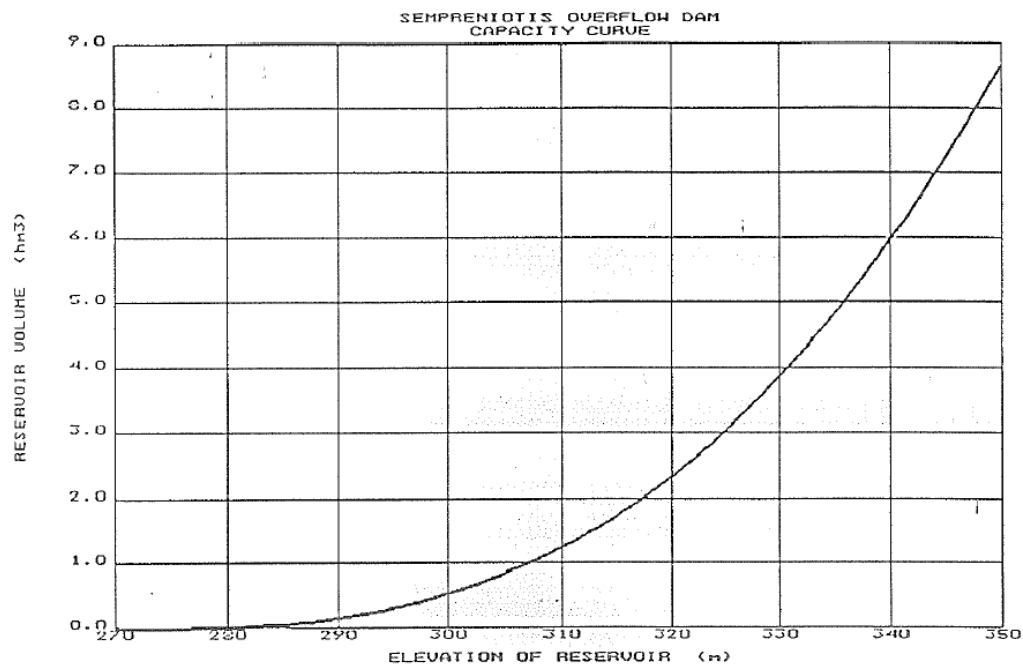
Η επιφάνεια του φράγματος σε σχέση με τον όγκο του

Η σχέση αυτή χρειάζεται για τον υπολογισμό της ποσότητας νερού που αφαιρείται μηνιαία από τον ταμιευτήρα λόγω της εξάτμισης, διότι η ποσότητα που εξατμίζεται εξαρτάται από την επιφάνεια του ταμιευτήρα, η οποία δεν είναι σταθερή, αλλά μεταβάλλεται ανάλογα με το ύψος ή τον όγκο του ταμιευτήρα.

Στη μελέτη του 1991 δεν έδινε τη σχέση επιφάνειας ως προς τον όγκο, είχε όμως τα γραφήματα επιφάνειας-ύψους (Εικόνα 5.2) και όγκου-ύψους (Εικόνα 5.3). Παίρνοντας σημεία από τα γραφήματα, τα οποία φαίνονται στον Πίνακα 5.1 και σχηματίζοντας την πολυωνυμική καμπύλη που προσεγγίζει τη σχέση της επιφάνειας με τον όγκο, προέκυψε η σχέση που χρησιμοποιήθηκε στην προσομοίωση, $A(m^2) = - 0.000000004 \cdot V^2 + 0.0572 \cdot V + 18149$ (Διάγραμμα 5.1).



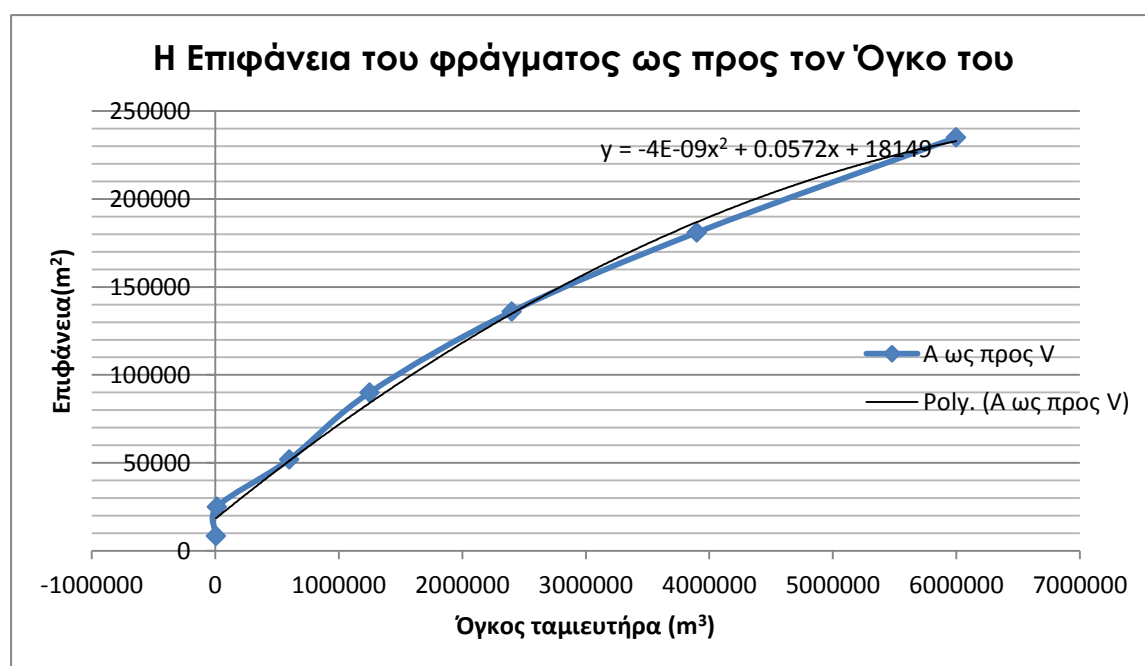
Εικόνα 5.2: Η επιφάνεια που καταλαμβάνει το φράγμα ως προς το ύψος του, σύμφωνα με τη μελέτη του 1991



Εικόνα 5.3: Ο όγκος του φράγματος ως προς το ύψος του, σύμφωνα με τη μελέτη του 1991

Πίνακας 5.1: Η σχέση του όγκου με την επιφάνεια στη λεκάνη κατάκλισης

Υψόμετρο H(m)	V(hm ³)	A(km ²)	V(m ³)	A(m ²)
280	0.005	0.00834	5000	8340
290	0.015	0.025	15000	25000
300	0.6	0.052	600000	52000
310	1.25	0.09	1250000	90000
320	2.4	0.136	2400000	136000
330	3.9	0.181	3900000	181000
340	6	0.235	6000000	235000



Διάγραμμα 5.1: Καμπύλη επιφάνειας-όγκου που χρησιμοποιήθηκε στο Excel και η σχέση που προκύπτει, $A(m^2) = -0.000000004 \cdot V^2 + 0.0572 \cdot V + 18149$

Κατακρήμνιση-Θερμοκρασία

Η κατακρήμνιση και η θερμοκρασία ανά ημέρα έχουν μετρηθεί από τους μετεωρολογικούς σταθμούς στις πλησιέστερες τοποθεσίες (Παλαιά Ρούματα, Ασκήφου, Αλικιανό, Ψυχρό Πηγάδι, Ταυρωνίτη, Ζυμβραγού), από το 1973 έως το 2010. Η ποσότητα που εισέρχεται στο φράγμα μέσω της βροχόπτωσης υπολογίζεται από τη μέγιστη επιφάνεια του φράγματος. Μέσω της θερμοκρασίας, το SWAT υπολογίζει τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή. Στη συνέχεια στα σενάρια η προσομοίωση γίνεται μέχρι το 2100.

Η υπερχειλίση - οικολογική παροχή

Μία μέθοδος για τον υπολογισμό της οικολογικής παροχής είναι το γινόμενο του μέσου όρου των παροχών του Ιουνίου-Ιουλίου-Αυγούστου με

τον συντελεστή 0.3. Για περισσότερη αξιοπιστία υπολογίστηκε από τις τιμές πεδίου και όχι από τις τιμές του μοντέλου. Ο υπολογισμός της φαίνεται στον πίνακα 5.2:

Πίνακας 5.2: Υπολογισμός Οικολογικής Παροχής

Έτος	Μέσος Όρος τιμών Πεδίου(m ³ /s)	0.3*Μέσο όρο τιμών Πεδίου(m ³ /s)
1996	0.0598	0.018
1997	0.098	0.029
1998	0.142	0.0426
1999	0.1	0.03
2000	0.113	0.034
2001	0.113	0.034
2002	0.129	0.039
2003	0.183	0.055
	Τελική Τιμή :	0.035

Από κάθε μηνιαίο ισοζύγιο μένει μια ποσότητα νερού, από την οποία κάποια ποσότητα φεύγει ως οικολογική παροχή, κάποια δίνεται για άρδευση και ύρδευση. Τέλος από τα παραπάνω μένει μια ποσότητα η οποία αποθηκεύεται, με όριο τη μέγιστη τιμή του φράγματος. Η ποσότητα νερού που μένει υπερχειλίζει($Q_{in} \geq \frac{2}{3} \cdot V_{max}$ ή $V_{i-1} \geq 0.7 \cdot V_{max}$) επιτρέπεται περισσότερη υπερχείλιση από την προκαθορισμένη, ώστε να διατηρείται σε κάποιο βαθμό η αυξομείωση της παροχής του ποταμού που θα υπήρχε χωρίς το φράγμα.

Απαιτούμενη-Τελική ετήσια ποσότητα απόληψης

Υπάρχει μια ποσότητα που έχει αποφασιστεί σύμφωνα με τη χωρητικότητα του φράγματος και τις ανάγκες της περιοχής, η οποία θα δίνεται το χρόνο. Οι μηνιαίοι συντελεστές κατανομής της ζήτησης για την άρδευση και την ύδρευση που χρησιμοποιήθηκαν δίνονται στο Παράρτημα II. Από τα 37,450 στρέμματα ελιάς που είναι στη λεκάνη απορροής του Ταυρωνίτη, ως αρχικός στόχος τέθηκε η άρδευση των 20,000 στρεμμάτων, καθώς και η ύδρευση 2,500 κατοίκων, που μένουν στις περιοχές γύρω από τον ποταμό και το επιθυμητό φράγμα. Ωστόσο, κάποιους μήνες το φράγμα δε μπορεί να διαθέσει αυτή την ποσότητα και τότε υπάρχει αστοχία. Αυτή η αστοχία υπολογίζεται σύμφωνα με τα σημερινά μετεωρολογικά δεδομένα για 2 διαφορετικούς μέγιστους όγκους του φράγματος και στη συνέχεια βλέπουμε πόσο αλλάζει με τα τρία σενάρια των κλιματικών αλλαγών.

Στον πίνακα 5.3 φαίνεται ο πληθυσμός που θα υδρεύεται από το φράγμα:

Πίνακας 5.3: Πληθυσμός γύρω από την περιοχή του Ταυρωνίτη (ΕΛΣΤΑΤ)

Τοπικές Κοινότητες	Πληθυσμός
Παλαιών Ρουμάτων	314
Ταυρωνίτη	973
Βουκολιών	1007
Σέμπρωνα	93
Σύνολο	2386≈2500

5.3 Αποτελέσματα

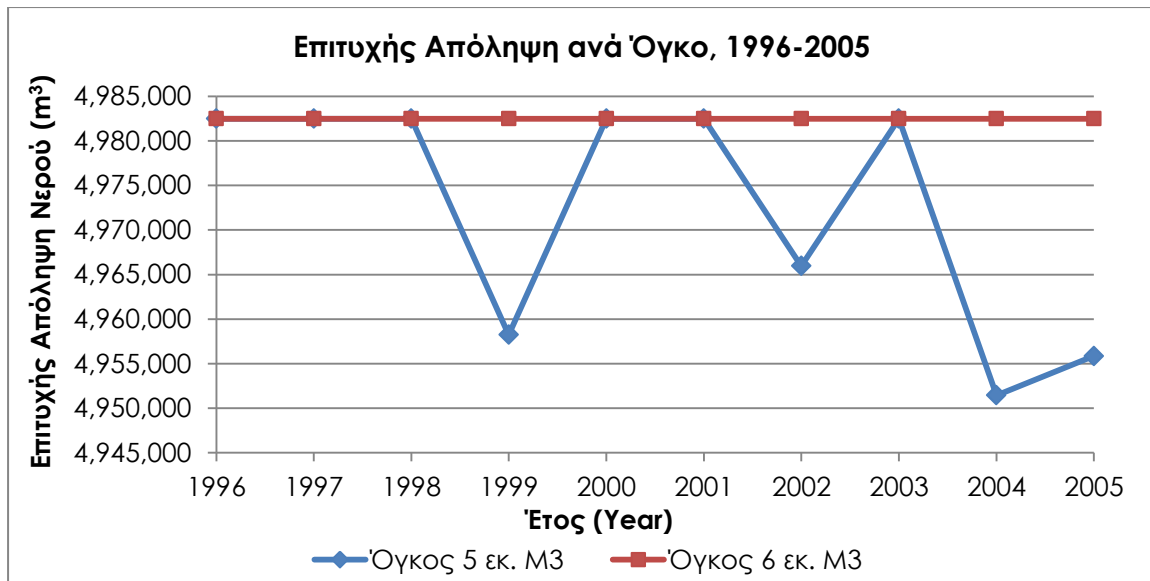
Η μελέτη του 1991 προτείνει να γίνει φράγμα με όγκο περίπου 5 εκ. m³, αλλά υπάρχει και η δυνατότητα δημιουργίας φράγματος με όγκο 6 εκ. m³, μαζί με έργα ενίσχυσης της ευστάθειας.

Η προσομοίωση για την περίοδο 10 ετών (9/1995→8/2006) έδειξε ότι η λειτουργία του ταμιευτήρα είναι γενικώς ικανοποιητική, εφόσον στις περισσότερες των περιπτώσεων ο απαιτούμενος όγκος νερού καλύπτεται.

Πιο συγκεκριμένα, στο σενάριο για τα 5 εκ. m³ από τα 10 έτη προσομοίωσης τα 6 είχαν 100% επιτυχία στον αρχικό στόχο απόληψης και τα 4 είχαν αστοχία με ποσοστό αποτυχίας 7.9%, δηλαδή από τα 4,982,500m³/yr δόθηκαν επιτυχώς τα 4,588,882m³/yr . Ακόμη, εκείνα τα 4 χρόνια το φράγμα έδωσε το 85.5% της απαιτούμενης ποσότητας νερού. Η προσομοίωση με όγκο φράγματος 6 εκ. m³ είχε επιτυχία 100% και τα 10 έτη, το οποίο σημαίνει ότι αν κατασκευαστεί φράγμα όγκου 6 εκ. m³ με τις σημερινές συνθήκες, θα έχει ~100% επιτυχία.

Συνολικά με ελάχιστες εξαιρέσεις, το φράγμα ανταποκρίνεται στην παροχή νερού τους καλοκαιρινούς μήνες (μέχρι τον Αύγουστο δηλαδή). Αλλά επειδή οι απαιτήσεις σε ύδρευση και άρδευση εκείνους τους μήνες διπλασιάζονται, την ίδια περίοδο που μειώνονται οι εισροές νερού, η δυσκολία στην απόληψη εμφανίζεται τους μήνες Σεπτέμβριο και Οκτώβριο.

Η ετήσια επιτυχής απόληψη που πραγματοποιείται από κάθε φράγμα διαφορετικού όγκου φαίνεται στο διάγραμμα 5.2. Η κόκκινη ευθεία γραμμή δείχνει ότι η απαιτούμενη ποσότητα νερού (4,982,500m³) δόθηκε χωρίς να αδειάσει το φράγμα, ενώ η μπλε γραμμή είναι του μικρότερου φράγματος, όπου το εμβαδό των τριγώνων που σχηματίζει η μπλε με την κόκκινη γραμμή είναι πόσα m³ νερού δεν έδωσε το φράγμα.



Διάγραμμα 5.2: Η επιτυχής απόληψη όπως προσομοιώθηκε στο *Reservoir Excel* για όγκους φράγματος 5 και 6 εκ. m^3 , όπου επιθυμητή απόληψη είναι τα 4,982,500 m^3/yr .

6. Εφαρμογή σεναρίων για την κλιματική αλλαγή

6.1 Αποτελέσματα για τη λεκάνη απορροής

Οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στη λεκάνη απορροής του Ταυρωνίτη θα είναι εξαιρετικά σημαντικές. Η αύξηση της μέσης θερμοκρασίας και για τα τρία σενάρια είναι $\sim 3^\circ\text{C}$, ενώ μέχρι το 2020 κυμαίνεται στους 15°C και μετά έχει μια συνεχόμενη αυξητική τάση μέχρι το 2100 και φτάνει τους 18°C . Ακόμη, η βροχόπτωση μειώνεται κατά 29.7% και συνεπώς, υπάρχει μείωση στη μέση παροχή του Ταυρωνίτη κατά 48% και στην εξατμισοδιαπνοή κατά 13.6%. Αν αυτά τα σενάρια πραγματοποιηθούν, τα υδατικό δυναμικό της περιοχής θα μειωθεί από τα 65 εκ. m^3/yr περίπου στα 34 εκ. m^3/yr και οι συνέπειες θα είναι τεράστιες.

Τα αποτελέσματα του βαθμονομημένου μοντέλου για τα τρία διαφορετικά μοντέλα κλιματικής αλλαγής φαίνονται παρακάτω. Όλα τα σενάρια τρέξανε θεωρώντας ότι οι αρδευτικές και υδρευτικές απολήψεις παρέμειναν σταθερές.

Μεταβολή θερμοκρασίας

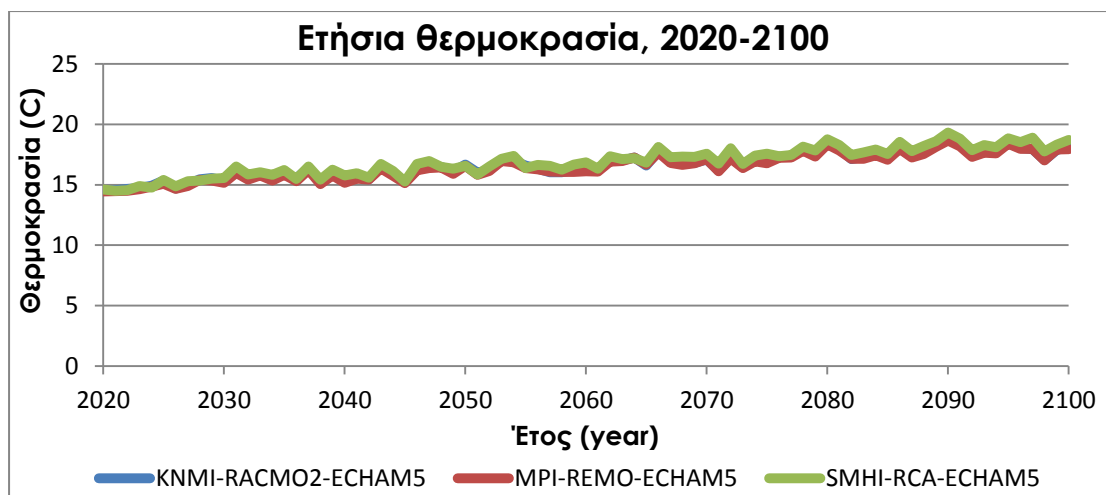
Οι τιμές της θερμοκρασίας στο μοντέλο Knnmi-rasmo2-echam5 σχεδόν ταυτίζονται με του Mpi-remo-echam5. Παρατηρείται σταδιακή αύξηση της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας, κατά 3°C συνολικά μέσα στην περίοδο μελέτης, χωρίς ιδιαίτερες διαφοροποιήσεις και αλλαγές στη συμπεριφορά του γραφήματος ανά υποπερίοδο ή εποχιακά (Διάγραμμα 6.1). Η τελική διαφορά θερμοκρασίας είναι:

$$\Delta T = T_{2100} - T_{2020} = 17.93 - 14.96 = 2.97^\circ\text{C}$$

Στον πίνακα 6.1 παρατίθεται ο μέσος όρος των θερμοκρασιών ανά 20 χρόνια στη λεκάνη απορροής Ταυρωνίτη σύμφωνα με τα τρία μοντέλα.

Πίνακας 6.1: Ο μέσος όρος των θερμοκρασιών ανά 20 χρόνια στη λεκάνη απορροής Ταυρωνίτη σύμφωνα με τα τρία μοντέλα και η αύξησή τους.

	Μέση θερμοκρασία ανά 20ετία ($^\circ\text{C}$)			
Έτη	Μέσος Όρος	KNMI-RACMO2-ECHAM5	MPI-REMO-ECHAM5	SMHI-RCA-ECHAM5
2000-2020	14.96	14.95	14.92	15.01
2020-2040	15.14	14.75	15.20	15.48
2040-2060	16.25	16.18	16.12	16.45
2060-2080	17.12	16.99	16.97	17.40
2080-2100	17.93	17.82	17.71	18.27
Διαφορά	2.97	2.87	2.79	3.26
Αύξηση	19.8 %	19 %	18.7 %	21.7 %



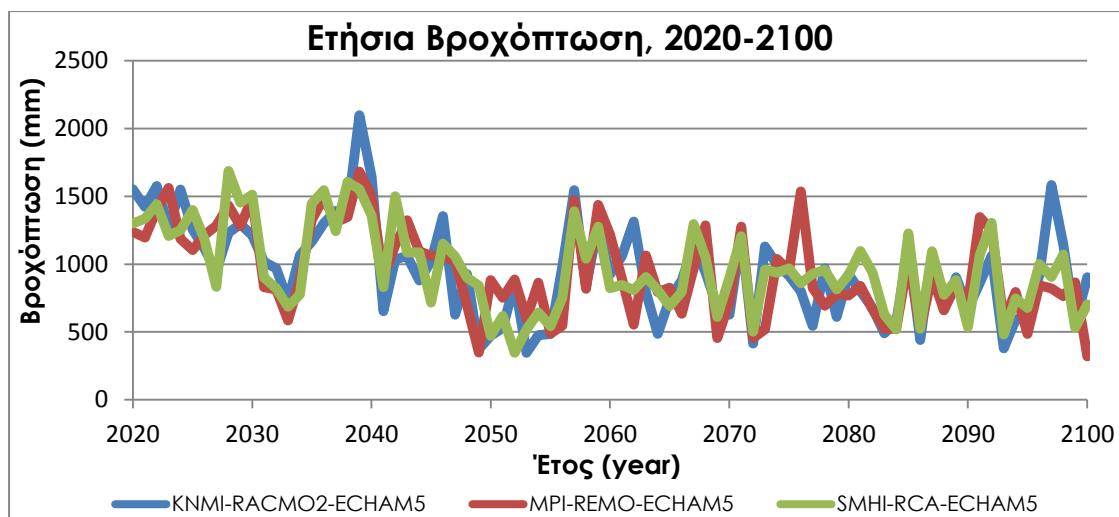
Διάγραμμα 6.1: Η θερμοκρασία ανά έτος στη λεκάνη απορροής του Ταυρωνίτη μέχρι το 2100 σύμφωνα με τα τρία μοντέλα

Μεταβολή βροχόπτωσης

Σύμφωνα με τα τρία μοντέλα η βροχόπτωση στη λεκάνη απορροής του Ταυρωνίτη έχει μεγάλη διακύμανση, αλλά με σταθερή μείωση, της τάξης των 340mm μέχρι το 2100. Την εικοσαετία 2020-2040 υπάρχει αύξηση (~120mm) στη βροχόπτωση, αλλά την εικοσαετία 2040-2060 υπάρχει απότομη μείωση, κατά 390mm, η οποία αυξάνεται κατά 30mm το 2060-2080 και την εικοσαετία 2080-2100 πέφτει στα 800mm. Μεταξύ του κάθε έτους, υπάρχει μεγάλη μεταβλητότητα, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 6.2. Στον πίνακα 6.2 απεικονίζεται η μέση βροχόπτωση ανά 20ετία στη λεκάνη απορροής Ταυρωνίτη, σύμφωνα με τα τρία μοντέλα.

Πίνακας 6.2: Η μέση βροχόπτωση ανά 20ετία στη λεκάνη απορροής Ταυρωνίτη σύμφωνα με τα τρία μοντέλα

Έτη	Μέση βροχόπτωση ανά 20ετία (mm)			
	Μέσος όρος	KNMI-RACMO2-ECHAM5	MPI-REMO-ECHAM5	SMHI-RCA-ECHAM5
2000-2020	1141.6	1169.4	1151	1104.3
2020-2040	1268.5	1295.5	1245.8	1264.2
2040-2060	881.8	834.7	930.7	880
2060-2080	872.9	863.7	869.4	885.7
2080-2100	801.7	803	766.5	835.5
Διαφορά	339.9	366.4	384.5	268.8
Μείωση	29.7 %	31.3 %	33.4 %	24.3 %



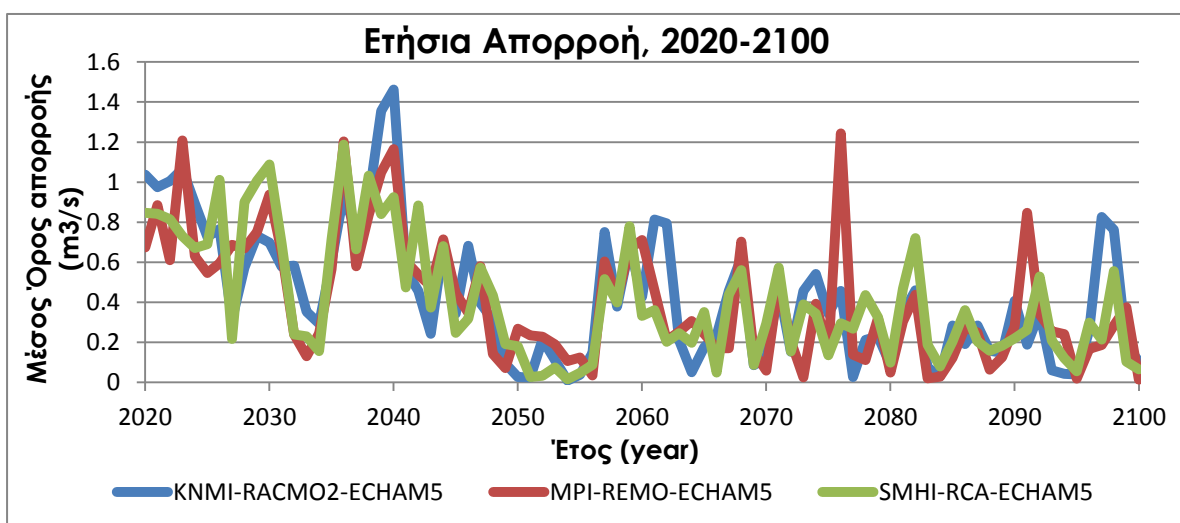
Διάγραμμα 6.2: Η βροχόπτωση ανά έτος στη λεκάνη απορροής του Ταυρωνίτη μέχρι το 2100 σύμφωνα με τα τρία μοντέλα

Μεταβολή απορροής

Οι μεταβολές στην απορροή του ποταμού εξαρτώνται άμεσα από τη βροχόπτωση, γι' αυτό και υπάρχει αντίστοιχα μεγάλη απότομη μείωση (~0.4 m³/s) (Διάγραμμα 6.3) την εικοσαετία 2040-2060 σε σχέση με την προηγούμενη, 2020-2040. Η συνολική μείωση στη μέση ετήσια παροχή είναι 0.23 m³/s (που ισοδυναμεί με διαφορά 7,253,280 m³/yr), με μεγάλη διακύμανση ανά έτος, ανάλογη της βροχόπτωσης. Ακόμη, η απορροή μειώνεται σε μεγαλύτερο ποσοστό (40%) από τη βροχόπτωση (30%) λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας, που επιδρά στην αύξηση της εξάτμισης και των αναγκών σε νερό των φυτών. Στον πίνακα 6.3 απεικονίζεται ο μέσος όρος της παροχής του ποταμού Ταυρωνίτη ανά 20ετία, σύμφωνα με τα τρία μοντέλα.

Πίνακας 6.3: Ο μέσος όρος της απορροής ανά 20 χρόνια του ποταμού Ταυρωνίτη σύμφωνα με τα τρία μοντέλα

Έτη	Μέση ετήσια απορροή ανά 20ετία (m ³ /s)			
	Μέσος Όρος	KNMI-RACMO2-ECHAM5	MPI-REMO-ECHAM5	SMHI-RCA-ECHAM5
2000-2020	0.485	0.515	0.496	0.443
2020-2040	0.745	0.791	0.707	0.738
2040-2060	0.346	0.329	0.376	0.333
2060-2080	0.312	0.332	0.312	0.292
2080-2100	0.251	0.260	0.232	0.26
Διαφορά	0.234	0.255	0.264	0.183
Μείωση	48 %	49.5 %	53.2 %	41.3 %



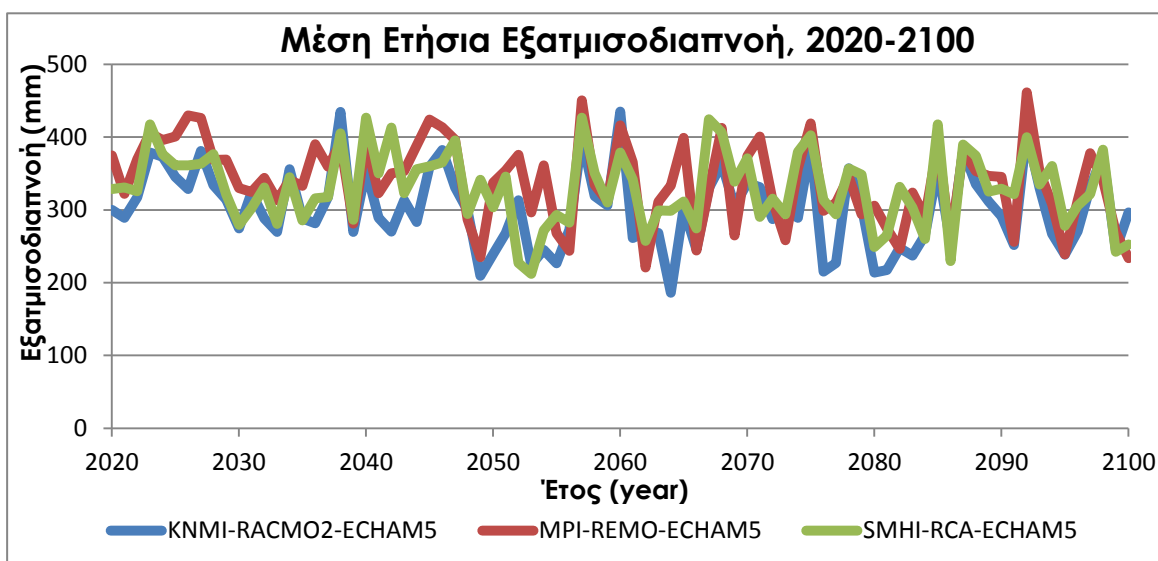
Διάγραμμα 6.3: Η μέση παροχή ανά έτος του Ταυρωνίτη μέχρι το 2100, σύμφωνα με τα τρία μοντέλα

Μεταβολή εξατμισοδιαπνοής

Η εξατμισοδιαπνοή το αναμενόμενο θα ήταν να αυξηθεί με την αύξηση της θερμοκρασίας, μειώνεται όμως η ποσότητα που εξατμίζεται κατά 13.6%, λόγω της μείωσης διαθέσιμου νερού σε όλη τη λεκάνη απορροής για εξατμισοδιαπνοή (Διάγραμμα 6.4). Στον πίνακα 6.4 παρατίθεται ο μέσος όρος της εξατμισοδιαπνοής ανά 20ετία για κάθε μοντέλο, η διαφορά και η τελική μείωσή της.

Πίνακας 6.4: Ο μέσος όρος της εξατμισοδιαπνοής ανά 20 χρόνια στη λεκάνη απορροής Ταυρωνίτη σύμφωνα με τα τρία μοντέλα

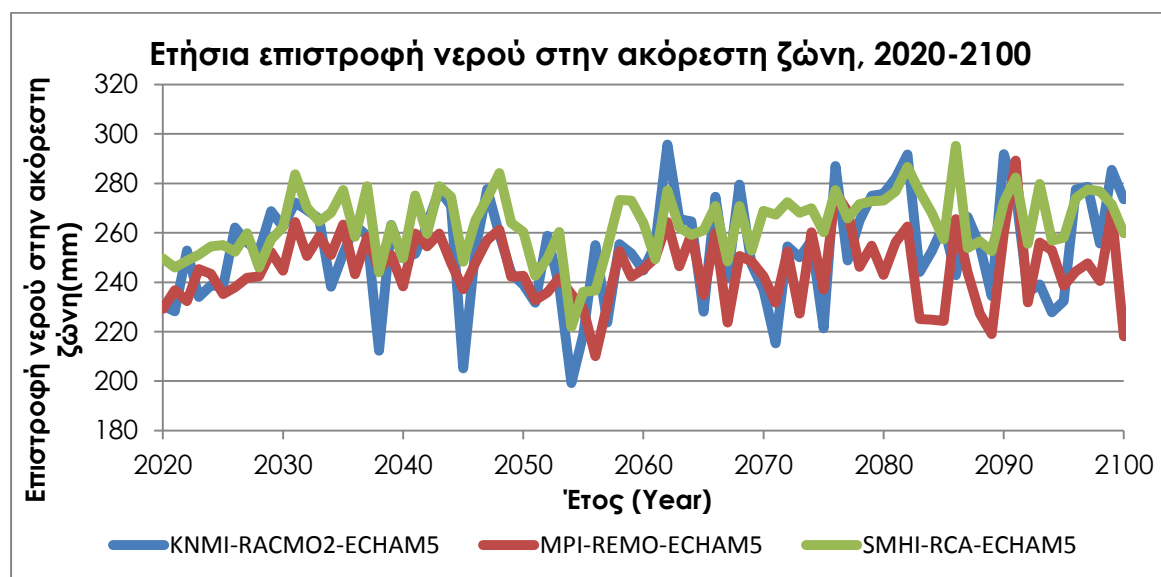
	Μέσος Όρος πραγματικής εξατμισοδιαπνοής(ΕΤ) ανά 20 χρόνια (mm)			
Έτη	Μέσος Όρος	KNMI-RACMO2-ECHAM5	MPI-REMO-ECHAM5	SMHI-RCA-ECHAM5
2000-2020	361.03	356.32	368.05	358.72
2020-2040	343.27	324.84	365.03	339.94
2040-2060	325.13	299.29	346.05	330.06
2060-2080	319.65	296.16	332	330.79
2080-2100	311.72	295.64	318.18	321.34
Διαφορά	49.31	60.68	49.87	37.38
Μείωση	13.6 %	17 %	13.5 %	10.4 %



Διάγραμμα 6.4: Η εξατμισοδιαπνοή ανά έτος στη λεκάνη απορροής του Ταυρωνίτη μέχρι το 2100 σύμφωνα με τα τρία μοντέλα

Μεταβολή επιστροφής νερού στην ακόρεστη ζώνη (Revar)

Αυτή η παράμετρος είναι σημαντική γιατί δείχνει πόση ανάγκη έχουν τα φυτά να αναζητήσουν νερό σε μεγαλύτερο βάθος, που σημαίνει ότι δεν επαρκεί η υγρασία του εδάφους. Ακόμη, είναι ένας παράγοντας για τη μείωση της παροχής στον ποταμό, γιατί αυτή η ποσότητα νερού που επιστρέφει λόγω των φυτών, θα επέστρεφε στο κανάλι. Στο διάγραμμα 6.5 φαίνεται η αύξηση για κάθε μοντέλο, περίπου 12 mm ανά m^2 , από το 2020 μέχρι το 2100.



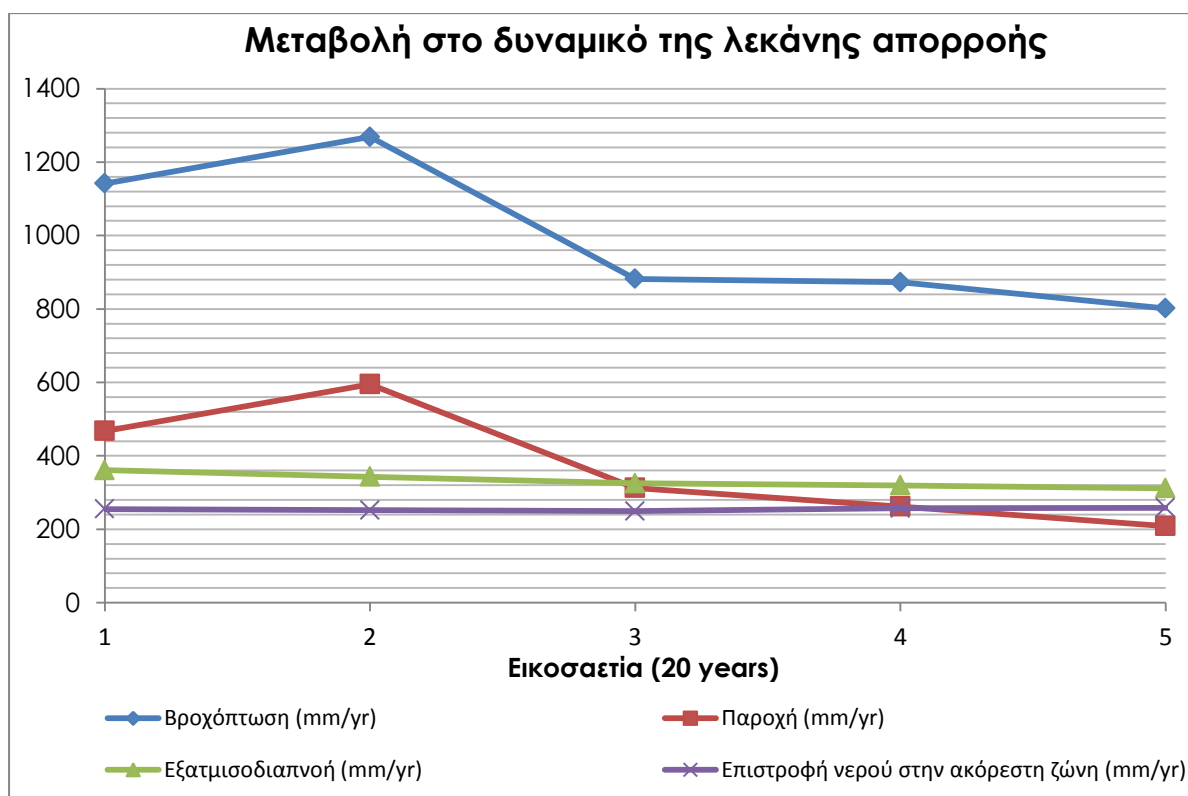
Διάγραμμα 6.5: Η επιστροφή νερού ανά έτος στην ακόρεστη ζώνη, στη λεκάνη απορροής Ταυρωνίτη μέχρι το 2100 σύμφωνα με τα τρία μοντέλα

Συνολική αλλαγή στο δυναμικό

Βλέπουμε ότι η απορροή μειώνεται σχεδόν ανάλογα με τη μείωση της βροχόπτωσης, ενώ ταυτόχρονα μειώνεται σταδιακά και σταθερά η εξατμισοδιαπνοή, ενώ αντίστοιχα αυξάνεται η ποσότητα νερού που επιστρέφει στην ακόρεστη ζώνη. Στον πίνακα 6.5 παρατίθεται η μεταβολή κάθε παραμέτρου ανά 20ετία μέχρι το 2100, ενώ στο διάγραμμα 6.6 απεικονίζεται σχηματικά.

Πίνακας 6.5: Η μεταβολή της βροχόπτωσης, της παροχής, της εξατμισοδιαπνοής και η επιστροφή νερού στην ακόρεστη ζώνη ανά 20ετία στη λεκάνη απορροής Ταυρωνίτη σύμφωνα με τα τρία μοντέλα

Εικοσαετία	Βροχόπτωση (mm/yr)	Παροχή (mm/yr)	Εξατμισοδιαπνοή (mm/yr)	Επιστροφή νερού στην ακόρεστη ζώνη (mm/yr)
2000-2020	1141.6	459.1	361.03	255.21
2020-2040	1268.5	575.56	343.27	251.97
2040-2060	881.8	289.14	325.13	249.49
2060-2080	872.9	247.42	319.65	256.99
2080-2100	801.7	215.03	311.72	258.47



Διάγραμμα 6.6: Η μεταβολή των τεσσάρων παραμέτρων ανά 20ετία, στη λεκάνη απορροής Ταυρωνίτη μέχρι το 2100 σύμφωνα με τα τρία μοντέλα

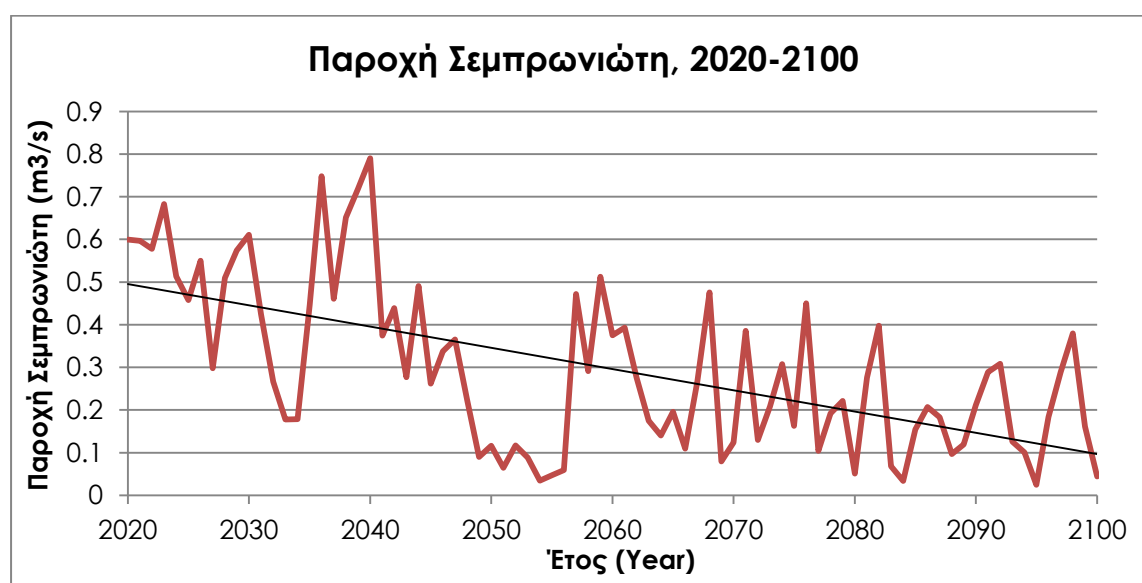
6.2 Αποτελέσματα για την υπολεκάνη και το φράγμα Σεμπρωνιώτη

Αποτελέσματα για την υπολεκάνη 6, Σεμπρωνιώτη

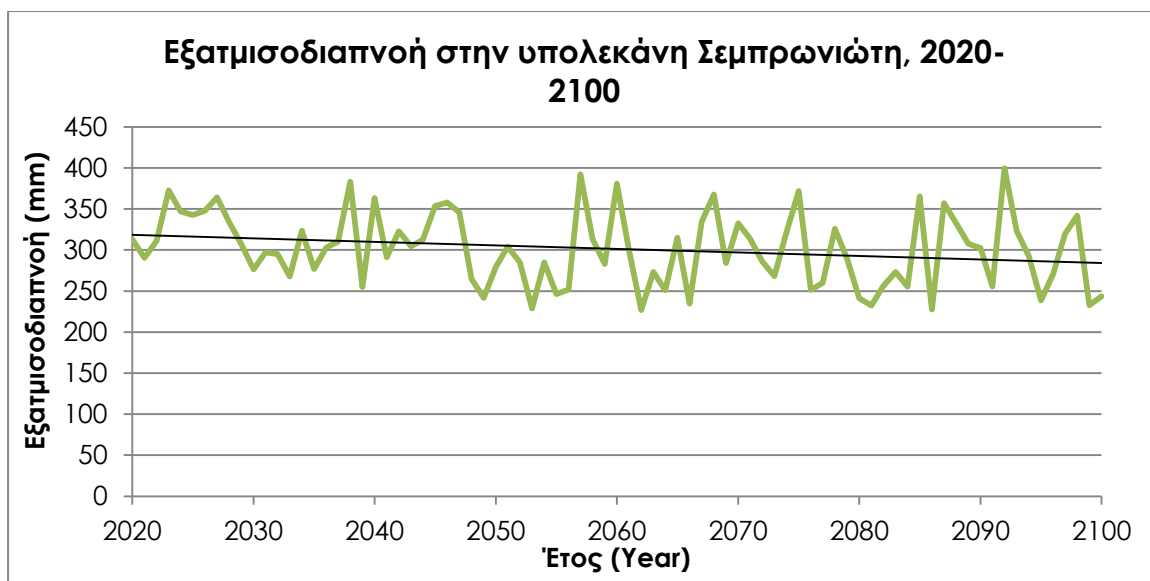
Η βροχόπτωση (Διάγραμμα 6.7) στην υπολεκάνη που βρίσκεται ο παραπόταμος του Ταυρωνίτη, Σεμπρωνιώτης έχει μείωση της τάξης των 550mm(42%) μέχρι το 2100, το οποίο οδηγεί σε μείωση της παροχής του ποταμού κατά 0.4m³/s(80%), που φαίνεται στο διάγραμμα 6.8. Επειδή η παροχή είναι μικρή, η μείωση που υπάρχει είναι μεγάλο ποσοστό της παροχής. Τέλος, η εξατμισοδιαπνοή μειώνεται στο σύνολο της υπολεκάνης κατά 40mm (Διάγραμμα 6.9).



Διάγραμμα 6.7: Ο μέσος όρος της ετήσιας βροχόπτωσης στην υπολεκάνη Σεμπρωνιώτη μέχρι το 2100, από τα τρία μοντέλα



Διάγραμμα 6.8: Ο μέσος όρος της ετήσιας παροχής του Σεμπρωνιώτη μέχρι το 2100, από τα τρία μοντέλα



Διάγραμμα 6.9: Ο μέσος όρος της ετήσιας εξατμισοδιαπνοής στην υπολεκάνη Σεμπρωνιώτη μέχρι το 2100, από τα τρία μοντέλα

Αποτελέσματα για το προτεινόμενο φράγμα Σεμπρωνιώτη

Στους πίνακες 6.5, 6.6, 6.7, αριστερά απεικονίζεται η ποσότητα άρδευσης η οποία δεν δόθηκε και στα δεξιά φαίνεται το ποσοστό των θερινών μηνών που το φράγμα δεν κάλυψε το 100% των αναγκών, για το κάθε τοπικό κλιματικό μοντέλο. Στην προσομοίωση διατηρήθηκε η αρχική οικολογική παροχή.

Πίνακας 6.5: Η έλλειψη νερού και η αστοχία του φράγματος στο σενάριο Kηmí-Racmo2-Echam5 ανά 20 χρόνια, για όγκο 5 και 6 εκ. m³ αντίστοιχα.

Όγκος Φράγματος	Έλλειψη νερού στο φράγμα ανά έτος (m ³)		Θερινοί μήνες (%) που υπάρχει αστοχία	
	5 εκ. m ³	6 εκ. m ³	5 εκ. m ³	6 εκ. m ³
1995-2006	1,182,396	0	15	0
2020-2040	153,886	9,526	22	2
2040-2060	1,760,297	1,509,064	56	44
2060-2080	1,244,525	1,104,050	39	25
2080-2100	1,343,122	1,296,205	53	52
Άθροισμα	5,684,226	5,101,241	185	123
Διαφορά	582,985 m³/yr		62%	

Αποτελέσματα για όγκο 5 εκ. m³:

Από τον παραπάνω συνοπτικό πίνακα και κυρίως το σύστημα στο excel στην πρώτη εικοσαετία (2020-2040) ότι το φράγμα θα γεμίζει, αλλά κρίσιμοι μήνες είναι ο Σεπτέμβρης και ο Οκτώβρης, που στους μισούς περίπου, το φράγμα αδειάζει. Στις υπόλοιπες εικοσαετίες θα υπάρχουν σχεδόν κάθε 5-10 χρόνια περίοδοι ξηρασίας, δηλαδή 5-6 συνεχόμενοι μήνες τουλάχιστον,

που το φράγμα έχει αδειάσει. Συνεπώς με αυτό τον όγκο σύμφωνα με αυτό το μοντέλο, με αυτές τις απαιτήσεις άρδευσης το φράγμα δεν θα γεμίζει.

Αποτελέσματα για όγκο 6 εκ. m³:

Με αυτό τον όγκο το φράγμα παρουσιάζει μεγαλύτερη επιτυχία, αλλά από το 2049 και μετά παραμένει άδειο σχεδόν για το ίδιο διάστημα που μένει και το φράγμα των 5 εκ. m³, γιατί από τη στιγμή που αδειάζουν, έχουν και τα δύο την ίδια συμπεριφορά, είναι δύσκολο να γεμίσουν.

Πίνακας 6.6: Η έλλειψη νερού στο φράγμα και η αστοχία του φράγματος στο σενάριο Mpi-Remo-Echam5 ανά 20 χρόνια, για όγκο 5 και 6 εκ. m³ αντίστοιχα.

Όγκος Φράγματος	Έλλειψη νερού στο φράγμα ανά έτος (m ³)		Θερμοί μήνες (%) που υπάρχει αστοχία	
	5 εκ. m ³	6 εκ. m ³	5 εκ. m ³	6 εκ. m ³
1995-2006	1,182,396	0	15	0
2020-2040	200,420	97,740	21	7
2040-2060	1,031,036	988,084	24	23
2060-2080	729,590	564,770	40	37
2080-2100	2,106,752	1,918,250	84	62
Άθροισμα	4,067,798	3,568,844	169	129
Διαφορά	498,954 m³/yr		40%	

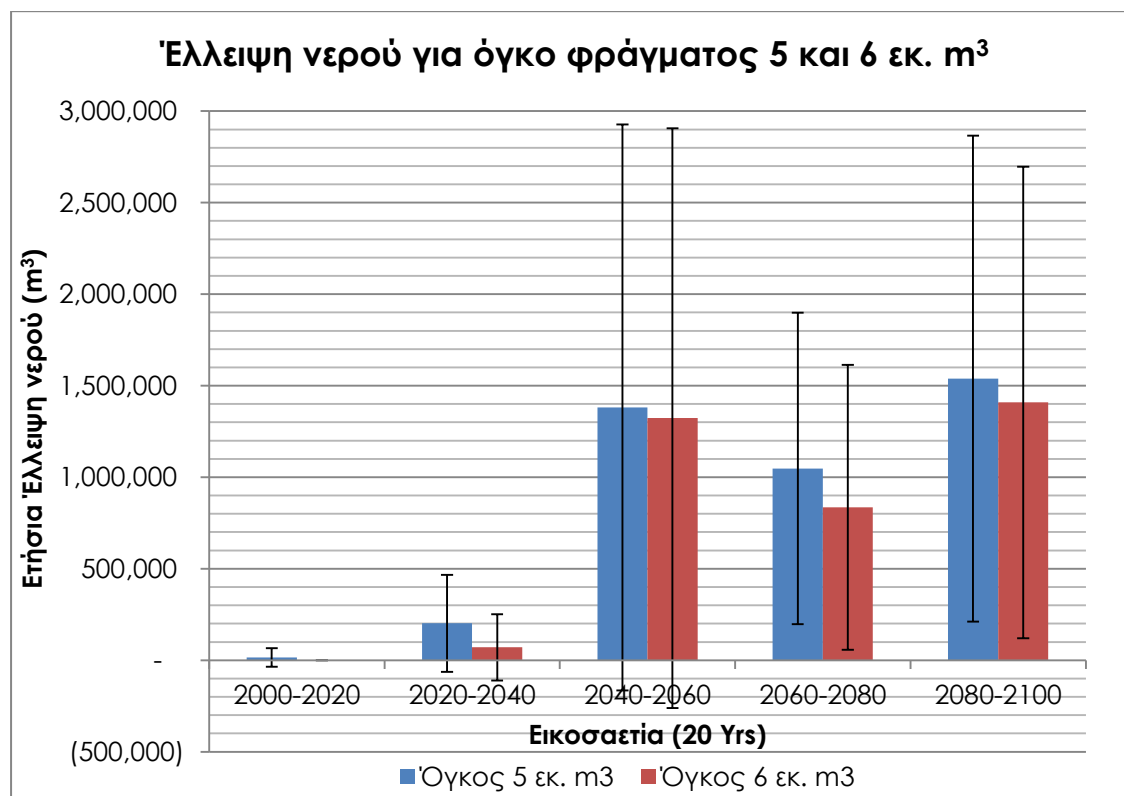
Στις δύο πρώτες εικοσαετίες τα αποτελέσματα είναι λιγότερο ακραία απ'ότι στο Kηmī μοντέλο, η ξηρασία και η αστοχία έρχονται πιο γραμμικά, αλλά από το 2070 και μετά σύμφωνα με το μοντέλο η βροχόπτωση μειώνεται τόσο πολύ που το φράγμα δεν μπορεί να παρέχει νερό με καμία σιγουριά. Όταν το φράγμα έχει μεγαλύτερο όγκο υπάρχει κάποια βελτίωση, αλλά από τη στιγμή που αδειάσει από νερό, τα δύο φράγματα έχουν την ίδια συμπεριφορά.

Πίνακας 6.7: Η έλλειψη νερού και η αστοχία του φράγματος στο σενάριο Ssmhi-Rca-Echam5 ανά 20 χρόνια, για όγκο 5 και 6 εκ. m³ αντίστοιχα.

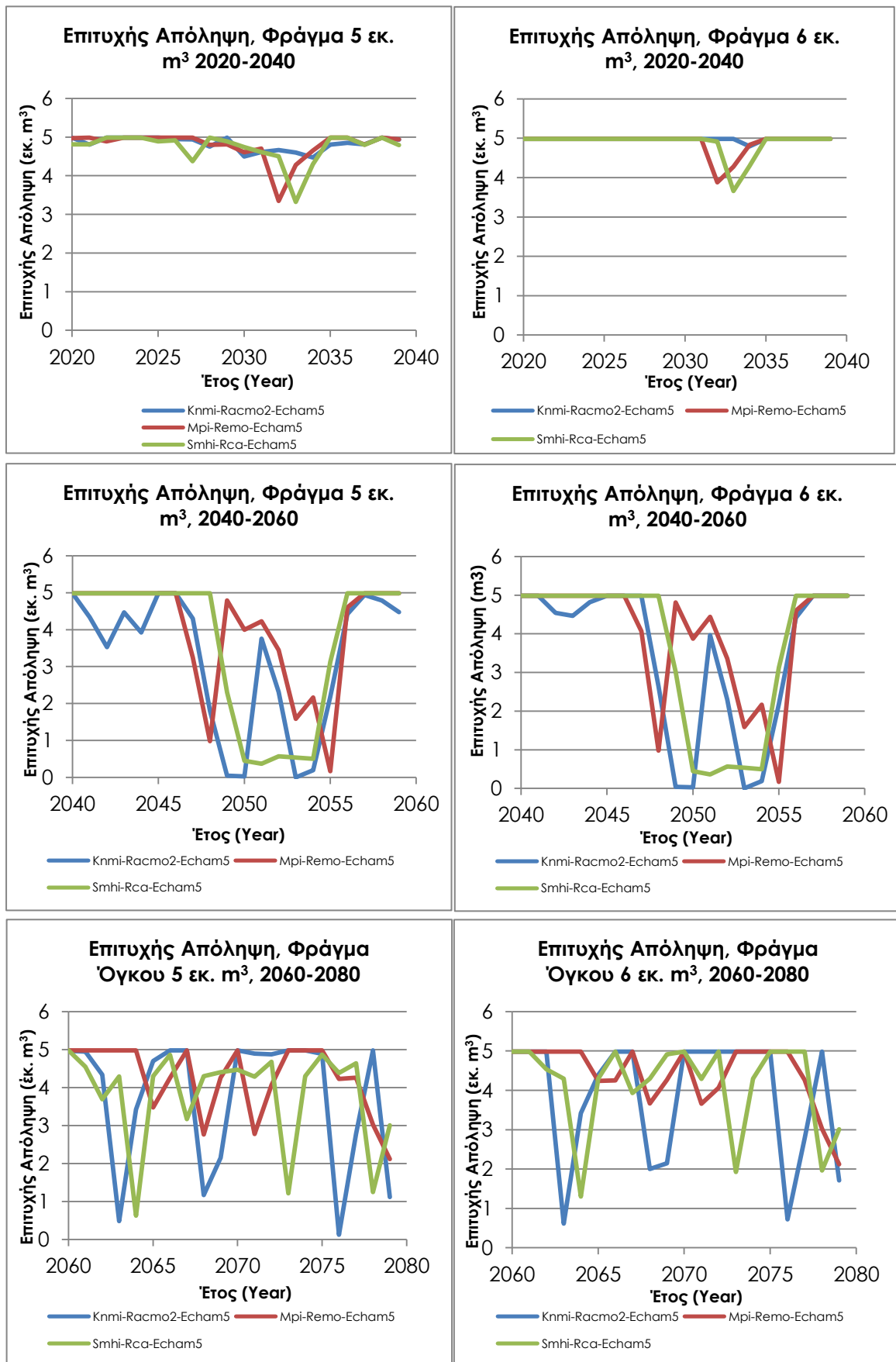
Όγκος Φράγματος	Έλλειψη νερού στο φράγμα ανά έτος (m ³)		Θερινοί μήνες (%) που υπάρχει αστοχία	
	5 εκ. m ³	6 εκ. m ³	5 εκ. m ³	6 εκ. m ³
1995-2006	1,182,396	0	15	0
2020-2040	251,018	103,781	23	7
2040-2060	1,351,873	1,316,073	57	56
2060-2080	1,168,586	837,368	55	26
2080-2100	1,244,711	1,089,023	47	44
Άθροισμα	4,016,188	3,346,245	182	133
Διαφορά	669,943 m³/yr		49%	

Βλέπουμε ότι όσο εντείνεται η ξηρασία, τόσο μειώνεται η διαφορά των δύο όγκων φράγματος. Παρακάτω φαίνεται διαγραμματικά η ετήσια απόληψη που γίνεται από τα φράγματα διαφορετικών όγκων, σύμφωνα με το Reservoir Excel.

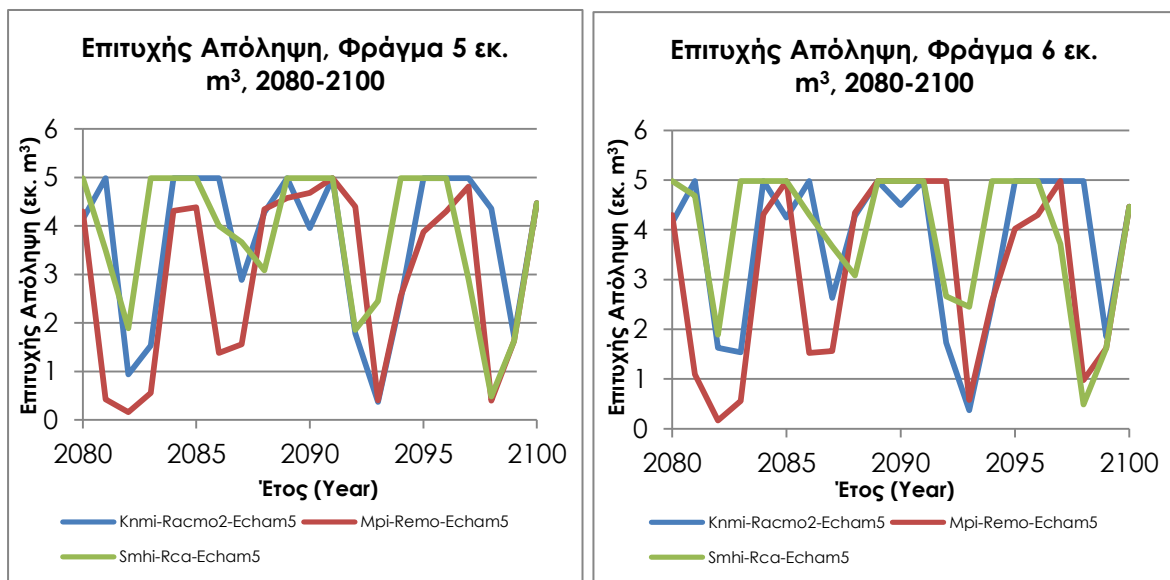
Στο γράφημα 6.10 παρουσιάζεται η ετήσια έλλειψη ανά εικοσαετία, για κάθε όγκο φράγματος. Η τυπική απόκλιση είναι πολύ υψηλή, οπότε η ετήσια έλλειψη νερού θα είναι πολύ ασταθής. Ακόμη, φαίνεται ότι στο φράγμα μεγαλύτερου όγκου η ετήσια έλλειψη νερού είναι κατά 90,000-250,000m³ χαμηλότερη απ' ότι του μικρότερου.



Γράφημα 6.10: Η ετήσια έλλειψη νερού στο κάθε φράγμα ανά 20ετία.



Διαγράμματα 6.11-6.16 : Σύγκριση ετήσιας απόληψης για όγκους 5 εκ. m³ και 6 m³



Διαγράμματα 6.17-6.18: Σύγκριση ετήσιας απόληψης για όγκους 5 εκ. m³ και 6 εκ. m³

Από τα διαγράμματα 6.11-6.18 βλέπουμε ότι:

Το 2020-2040 το φράγμα με όγκο 5 εκ. m³ κάθε έτος έχει μια αστάθεια, σχεδόν κάθε χρόνο δεν δίνει όλη την απαιτούμενη ποσότητα, αλλά δίνει το 96% (Διάγραμμα 6.11). Στο διάγραμμα 6.12 το φράγμα όγκου 6 εκ. m³ αποτυγχάνει μόνο μια χρονιά στο κάθε σενάριο και τότε, δίνει περισσότερη ποσότητα νερού (99.6%) απ' ότι το φράγμα των 5 εκ. m³.

Το 2040-2060 το φράγμα και στις δύο περιπτώσεις παρέχει ικανοποιητική ποσότητα νερού (Διαγράμματα 6.13, 6.14), αλλά σχεδόν αδειάζει για 5 συνεχόμενα έτη (2050-2055). Η διαφορά της απόδοσης νερού είναι ότι το πρώτο φράγμα έχει επιτυχία 72.3%, ενώ το δεύτερο 74.5%.

Το 2060-2080 και οι δύο περιπτώσεις όγκου φράγματος σχεδόν αδειάζουν κάθε δύο χρόνια, αλλά σύντομα ξαναγεμίζουν, η ποσότητα όμως που μπορεί να δοθεί κάθε έτος, είναι πολύ ασταθής. Γενικά εκείνη την εικοσαετία σύμφωνα με το μοντέλο το φράγμα όγκου 5 εκ. m³ δίνει από 1 εκ. m³ το έτος και άνω (Διάγραμμα 6.15), ενώ το μεγαλύτερο φράγμα με εξαίρεση δύο έτη, δίνει πάνω από 2 εκ. m³ το χρόνο (Διάγραμμα 6.16).

Τέλος, το 2080-2100 ο ποταμός από τη μοντελοποίηση φτάνει τα 34 εκ. m³/yr και ο ταμιευτήρας δεν παρέχει νερό για μεγάλα συνεχόμενα διαστήματα (Διαγράμματα 6.17, 6.18).

Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι μέχρι το 2040 ένα φράγμα στον παραπόταμο Σεμπρωνιώτη θα μπορεί να παρέχει 4,982,500 m³ με ~99% επιτυχία. Από το 2040 και μετά, θα μπορεί να καλύπτει υδατικές ανάγκες, αλλά επειδή η παροχή του επηρεάζεται πολύ άμεσα από την έλλειψη

βροχόπτωσης, οι δυνατότητές του θα είναι πολύ ασταθείς και την αρχική απαίτηση ($4,982,500\text{m}^3$) φράγμα κανενός όγκου δεν θα μπορεί να την καλύψει.

Παρ' όλ' αυτά υπάρχει ποσότητα νερού, τέτοια ώστε, σε συνδυασμό με εκσυγχρονισμό καλλιεργειών και μεθόδων άρδευσης, να μπορεί να παρέχει ορισμένη ποσότητα για την ύδρευση και άρδευση των πολύ κοντινών περιοχών, ακόμα και μέχρι το 2100.

7. Συμπεράσματα-Προτάσεις

Η μοντελοποίηση της λεκάνης απορροής του ποταμού Ταυρωνίτη σε συνδυασμό με το Reservoir Excel μοντέλο μας οδήγησε στα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Το μοντέλο SWAT περιγράφει ικανοποιητικά το ισοζύγιο της υδρολογίας της περιοχής, σύμφωνα με τους στατιστικούς δείκτες, λαμβάνοντας υπόψη την αβεβαιότητα των δεδομένων.
- Ο ποταμός Ταυρωνίτης έχει πολύ νερό το χειμώνα το οποίο ελαχιστοποιείται το καλοκαίρι, που με τη δημιουργία φραγμάτων μπορεί να αξιοποιηθεί.
- Από τη μοντελοποίηση των ετών 1995-2009 η συνολική παροχή του ποταμού προκύπτει 62.2 εκ. m³/yr, έχοντας αφαιρέσει απολήψεις. Η βροχόπτωση, η εξατμισοδιαπνοή και η επιστροφή νερού στην ακόρεστη ζώνη είναι ~1176 mm/yr, ~361 mm/yr και ~259 mm/yr αντίστοιχα.
- Οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στη λεκάνη απορροής του Ταυρωνίτη θα είναι εξαιρετικά σημαντικές. Μέχρι το 2100 η αύξηση της μέσης θερμοκρασίας και για τα τρία σενάρια είναι ~3.5 °C, η μείωση της βροχόπτωσης και της μέσης παροχής περίπου 29.7% και 48% αντίστοιχα και τέλος, η εξατμισοδιαπνοή μειώνεται κατά 13.6% και η επιστροφή νερού στην ακόρεστη ζώνη αυξάνεται κατά 1.3%, ανά επιφάνεια m². Αν αυτά τα σενάρια πραγματοποιηθούν, τα υδατικό δυναμικό της περιοχής από τα 65 εκ. m³/yr θα μειωθεί στα 34 εκ. m³/yr.
- Η μέση ετήσια παροχή του παραποτάμου Σεμπρωνιώτη είναι 13.6 εκ. m³, του Ρουματιανού 16.5 και του Ντεριανού 32.2 εκ. m³.
- Το βαθμονομημένο μοντέλο και το μοντέλο Reservoir Excel, χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση φράγματος στον Σεμπρωνιώτη, παραπόταμο του Ταυρωνίτη. Ως αρχικός στόχος τέθηκε να παρέχει ~5 εκατ. m³ (4,982,500 m³) το χρόνο. Εξετάστηκε η δυνατότητα παροχής νερού για δύο διαφορετικούς όγκους για το φράγμα, 5 και 6 εκ. m³.
- Για το φράγμα με όγκο 5 εκ. m³, από την 10ετή προσομοίωση (1996-2006) προκύπτει ότι στα 6 χρόνια υπήρχε 100% επιτυχία, ενώ στα 4 υπήρχε περίπου 8% αποτυχία, ή 92% επιτυχία (δηλ. σύνολο 99.99% επιτυχία).
- Για το φράγμα όγκου 6 εκ. m³ υπάρχει 100% επιτυχία, για τις ίδιες απαιτήσεις νερού.
- Με ελάχιστες εξαιρέσεις, το φράγμα ανταποκρίνεται στην παροχή νερού τους καλοκαιρινούς μήνες(μέχρι τον Αύγουστο δηλαδή). Αλλά

επειδή οι απαιτήσεις σε ύδρευση και άρδευση εκείνους τους μήνες διπλασιάζονται, την ίδια περίοδο που μειώνονται οι εισροές νερού, η αστοχία του φράγματος εμφανίζεται τους μήνες Σεπτέμβριο και Οκτώβριο.

- Η προσομοίωση με τα μοντέλα κλιματικών αλλαγών δείχνει ότι μέχρι το 2040 η συνολική επιτυχία του φράγματος των 5 εκατ. m³ μειώνεται στο 96%, ενώ το 2060 στο 72.3%. Ενώ για το μεγαλύτερο φράγμα το 2040 γίνεται 99.3% και το 2060 γίνεται 74.5%. Η αστοχία του φράγματος αυξάνεται σημαντικά με βάση τα αποτελέσματα των κλιματικών αλλαγών. Η επικαιροποίηση της μελέτης του φράγματος πρέπει να λάβει υπόψη τις επιπτώσεις των κλιματικών αλλαγών στην συνολική λειτουργία του φράγματος.

Μέχρι σήμερα η περιοχή του Ταυρωνίτη υδρεύεται κυρίως από τις πηγές της Αγυιάς, όμως οι υδάτινοι πόροι της Κρήτης σύμφωνα με τις προβλέψεις θα μειωθούν δραματικά. Για τη βελτίωση της διαχείρισης του ποταμού Ταυρωνίτη υπάρχουν οι παρακάτω προτάσεις:

- Σχεδιασμός και τρέξιμο διαχειριστικών σεναρίων για τη λεκάνη απορροής Ταυρωνίτη.
- Καταγραφή της ακριβούς θέσης των γεωτρήσεων και των χαρακτηριστικών τους (παροχή, περίοδος λειτουργίας).
- Βελτίωση γεωργικών μεθόδων ώστε να μην καταναλώνεται τόσο νερό τους θερινούς μήνες. Εξέταση εναλλακτικών σεναρίων αλλαγής χρήσεων γης και εφαρμογή καλλιεργειών με μικρότερες αρδευτικές ανάγκες. Τότε το φράγμα θα μπορεί να προσφέρει περισσότερη ποσότητα νερού, για όλο το έτος.
- Για την κατασκευή φραγμάτων στον Ταυρωνίτη, απαιτείται εκπόνηση μελέτης σύμφωνα με τα σημερινά δεδομένα, ώστε να επαναπροσδιοριστούν οι στόχοι και οι δυνατότητες των φραγμάτων. Σίγουρα πιο εφικτά αποτελέσματα θα υπάρχουν στην κατασκευή φραγμάτων που να αξιοποιούν μεγαλύτερο τμήμα του ποταμού Ταυρωνίτη και όχι μόνο τον Σεμπρωνιώτη.
- Σε περίπτωση κατασκευής του φράγματος Σεμπρωνιώτη, η επιλογή του όγκου του εξαρτάται από το πόσο υψηλότερο είναι το κόστος για την κατασκευή του μεγαλύτερου φράγματος σε σχέση με το πόσο περισσότερη ποσότητα νερού θα δύναται να παρέχει.
- Επίσης η οικολογική παροχή έχει υπολογιστεί με δεδομένα μέχρι το 2005. Μετά το 2045 το σύστημα έχει αισθητή διαφορά, επομένως η οικολογική παροχή μπορεί να επαναπροσδιοριστεί.
- Σε περίπτωση κατασκευής του φράγματος Σεμπρωνιώτη μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέθοδοι μείωσης της εξάτμισης το καλοκαίρι, με αποτέλεσμα τη μείωση της έλλειψης νερού κατά

~15,000m³ ανά μήνα, που μέχρι το 2100 θα είναι ~19,000m³ ανά μήνα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

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., J.R. Kiniry, J.R. Williams, R. Srinivasan, E.B. Haney, S.L. Neitsch, 2011. Soil and Water Assessment Tool – Input / Output File Documentation – Version 2009, Texas A&M University, Texas, USA.
3. Beasley, D.B., Huggins, L.F., Monke, E.J., 1980. ANSWERS-a model for watershed planning. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* 23, 938–944.
4. Chong – yu, X., 2002. Hydrologic Models, Uppsala University, Sweden.
5. Christian, R. J., 1996. Validation and Intercomparison of Different Updating Procedures for Real-Time Forecasting, *Nordic Hydrology Vol 28 No 2* pp 65–84
6. Demetriou, C., Punthakey, J.F., 1998. Evaluating sustainable groundwater management options using the MIKE-SHE integrated hydrogeological modeling package. *Environmental Modelling & Software* 14, (2-3), 129-140.
7. Di Luzio, M., Srinivasan, R., Arnold, J.G., 2004. A GIS-coupled hydrological model system for the watershed assessment of agricultural nonpoint and point sources of pollution. *Transactions in GIS* 8 (1), 113-136
8. Dilks, C.F., Dunn, S.M., Ferrier, R.C., Srinivasan, R., Jacobs, J., Day, D., Abbaspour, K. (Eds.), 2005. Evaluation of SWAT for use in Development of a River Basin Management Plan for the Ythan Catchment, UK. 3rd International SWAT Conference, Zurich, 11-15 July
9. E. Roeckner, G. Bäuml, L. Bonaventura , R. Brokopf , M. Esch, M. Giorgetta, S. Hagemann, I. Kirchner, L. Kornblueh, E. Manzini, A. Rhodin, U. Schlese, U. Schulzweida, A. Tompkins.,2003. ECHAM5-Model description, https://www.mpimet.mpg.de/fileadmin/publikationen/Reports/max_scirep_349.pdf
10. Fantechi, R., Peter, D., Balabanis, P., Rubio, J.L., 1995. Desertification in a European context: Physical and socio-economic aspects, Final Report EUR 15415 EN 635 pp., European Commission, Brussels.

11. Koutroulis, A. G., Tsanis, I. K., Daliakopoulos, I. N., Jacob, D, 2013. Impact of climate change on water resources status: A case study for Crete Island, Greece, *Journal of Hydrology*, 479, 146–158
12. Moraetis, D., Stamati, F., Kotronakis, M., Fragia, T., Paranychnianakis, N., Nikolaidis, N.P., 2011. Identification of hydrologic and geochemical pathways using high frequency sampling, REE aqueous sampling and soil characterization at Koiliaris Critical Zone Observatory, Crete. *Applied Geochemistry*, 26 (SUPPL.), pp. S101-S104.
13. Moriasi D. N., J. R. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R.D. Harmel, R. D., T. L. Veith, 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations, *ASABE*, Vol (50) 3.
14. Neitsch S. L., J.G. Arnold, J.R. Kiniry, J.R. Williams, 2011. *Soil and Water Assessment Tool – Theoretical Documentation – Version 2009*, Texas A&M University, Texas, USA.
15. Nikolaidis, N.P, F. Bouraoui, G. Bidoglio, 2013. Hydrologic and geochemical modeling of a karstic Mediterranean watershed, *Journal of Hydrology*, vol. 477, p. 129-138
16. Nikolaidis, N.P., Rajaram, H., Schnoor, J.L., Georgankakos, K.P., 1988. A generalized soft water acidification model. *Water Resources Res.* 24, 1983-96.
17. Van Pelt, S. C., Kabat, P., ter Maat, H. W., van den Hurk, B. J. J. M., and Weerts, A. H., 2009. Discharge simulations performed with a hydrological model using bias corrected regional climate model input, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 13, 2387-2397
18. Van der Linden P., and J.F.B. Mitchell (eds.) 2009: *ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project*. Met Office Hadley Centre, FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB, UK. 160pp.
19. Sharad M. Lele, 1987. Improved Algorithms for Reservoir Capacity Calculation Incorporating Storage-Dependent Losses and Reliability Norm, *Water Resources Research*, Vol. 23, No. 10, 1819-1823
20. Yanlai Z., Shenglian G., 2013. Incorporating ecological requirement into multipurpose reservoir operating rule curves for adaptation to climate change. *Journal of Hydrology*, Volume 498, 153–164

21. Refsgaard, J.C., 1997. Parametrisation, calibration and validation of distributed hydrological models. *Journal of Hydrology* 198 (1-4), 69-97.
22. Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282–290.
23. V. Klemeš (1986) Operational testing of hydrological simulation models, *Hydrological Sciences Journal*, 31:1, 13-24, DOI: 10.1080/02626668609491024
24. M. Sait Tahmiscioğlu, Nermin ANUL, Fatih Ekmekçi, Nurcan Durmuş, Positive and negative impacts of dams on the environment, <http://www.creditvalleyca.ca/wp-content/uploads/2011/02/60.pdf>
25. Schnoor, J. L., 2003. Περιβαλλοντικά Μοντέλα – Τύχη και μεταφορά ρύπων στον αέρα, νερό και έδαφος (Μεταφρασμένο), Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη.
26. 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
27. E. van Meijgaard, L.H. van Ulft, W.J. van de Berg, F. C. Bosveld, B.J.J.M. van den Hurk, G. Lenderink, Siebesma. The KNMI regional atmospheric climate model RACMO version 2.1, 2008. Technical report ; TR - 302 <http://bibliotheek.knmi.nl/knmipubTR/TR302.pdf>

Ελληνική Βιβλιογραφία

1. Βαφειάδης Μ., 2005, Σημειώσεις «Ταμιευτήρες», Τομέας Υδραυλικής και Τεχνικής Περιβάλλοντος, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
2. Γεωργιόπουλος Δ., 2008, Αξιοποίηση Μέσου και Άνω Αλιάκμονα: Κατασκευή του Φράγματος του Υδροηλεκτρικού Έργου (ΥΗΕ) Ελαφίου, <http://portal.tee.gr/portal/page/portal/teelar/EKDILWSEIS/damConference/eisigiseis/5.3.pdf>
3. Δίγκα Α., 2012, Αξιολόγηση της Μελέτης Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων για την κατασκευή του φράγματος των ποταμών Πείρου-Παραπεύρου στο Νομό Αχαΐας και εκτίμηση της εφαρμογής των περιβαλλοντικών όρων από τη μελέτη των επιπτώσεων του έργου στο περιβάλλον, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών-Τμήμα Βιολογίας-Τομέας Βιολογίας Φυτών, Πάτρα
4. Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και Συμβούλιο της Ε.Ε., 2000. Οδηγία 2000/60/ΕΚ για τα Νερά.
5. Θεοδωράκη Μ., 2009, Μελέτη Φράγματος Βαλσαμιώτη Ν. Χανίων, Τμήμα Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος, ΤΕΙ Κρήτης, Χανιά
6. Καλημέρη Μ., 2004, Ποιοτικός έλεγχος υδάτων των ποταμών Κοιλιάρη και Ταυρωνίτη, ΤΕΙ Κρήτης, Χανιά, <http://nefeli.lib.teicrete.gr/browse/sefe/sdfp/2004/KalimeriMaria/attached-document/2004Kalimeri.pdf>
7. Καλογερόπουλος Κ., 2011, Αξιοποίηση του υδρολογικού μοντέλου SWAT στη διερεύνηση δημιουργίας λιμνοδεξαμενών, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Τμήμα Γεωγραφίας
8. Κουτούπα – Ρεγκάκου, Ε., 2008. Δίκαιο του Περιβάλλοντος, Εκδόσεις Σάκκουλα, Αθήνα.
9. Κουτσογιάννης, Δ., και Θ. Ξανθόπουλος, 1999. Τεχνική Υδρολογία, Έκδοση 3, 418 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Τεχνική Υδρολογία
10. Κωτούλας Δ., 2001. Ορεινή Υδρονομική Τόμος ΙΙα,β Μέθοδοι και συστήματα υδρονομικής διευθέτησης, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

11. Λουκάς Α., Μυλόπουλος Ν., Μυλόπουλος Γ., Μουστάκα Ε., Προσομοίωση και Αποτίμηση της Λειτουργίας του Ταμιευτήρα της Κάρλας, <http://www.srcosmos.gr/srcosmos/showpub.aspx?aa=7964>
12. Λουκάς Α., Βασιλειάδης Λ., Υδρολογική Μελέτη: Κατασκευή Φράγματος Βασιλειάδας-Μελισσοτόπου, Ν. Καστοριάς. Φορέας Ανάθεσης: Δήμος Αγίων Αναργύρων Νομού Καστοριάς. Ανάδοχος Μελέτης: Ηλίας Χατζηστεφάνου (συμμετοχή).
13. Μανούτσογλου, Ε., 2007. Σημειώσεις του μαθήματος Εισαγωγή στις Γεωεπιστήμες – Περιβαλλοντική Γεωλογία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
14. Μαμάσης, Ν., Ι. Ναλμπάντης, και Δ. Κουτσογιάννης, 1992, Διερεύνηση των υδρολογικών χαρακτηριστικών των λεκανών Μόρνου και Βοιωτικού Κηφισού-Υλίκης, Ύδρευση της Αθήνας, Αθήνα, Σύλλογος Πολιτικών Μηχανικών Ελλάδας, Πανελλήνιος Σύλλογος Χημικών Μηχανικών, Σύνδεσμος Ελληνικών Γραφείων Μελετών
15. Μαρίνος Β., Διάλεξη 8-9, Γεωλογικές μελέτες τεχνικών έργων, ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη, <http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg881e/assets/geologikes-meletes-8o-9o-mathima-site.pdf>
16. Μιμίκου, Μ.Α., 2006. Τεχνολογία Υδατικών Πόρων. Γ' έκδοση, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα
17. Μπελλάς Μ., Αγγελίδης Χ., Γρίβας Η., Στάμος Α., Βακόνδιος Ι., 1998, Γεωλογική-Γεωτεχνική μελέτη για την κατασκευή φράγματος στην περιοχή Μεσοβούνου Ν. Κοζάνης, Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας, τομ. XXXII/4, 99-104
18. Νικολαΐδης, Ν., 2010. Διερεύνηση του Ευτροφισμού και Οικολογικής Παροχής του Ταμιευτήρα στον Οινούντα (Κελεφίνα) Ποταμό της Λακωνίας
19. Νικολαΐδης, Ν., 2013. Εφαρμογές σε Περιβαλλοντικά Μοντέλα, Σημειώσεις μαθήματος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Χανιά
20. Νικολαΐδης, Ν., Καρατζάς, Γ., 2013. Ειδικό σχέδιο διαχείρισης των υδατικών πόρων για τη λεκάνη απορροής του ποταμού Ταυρωνίτη, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

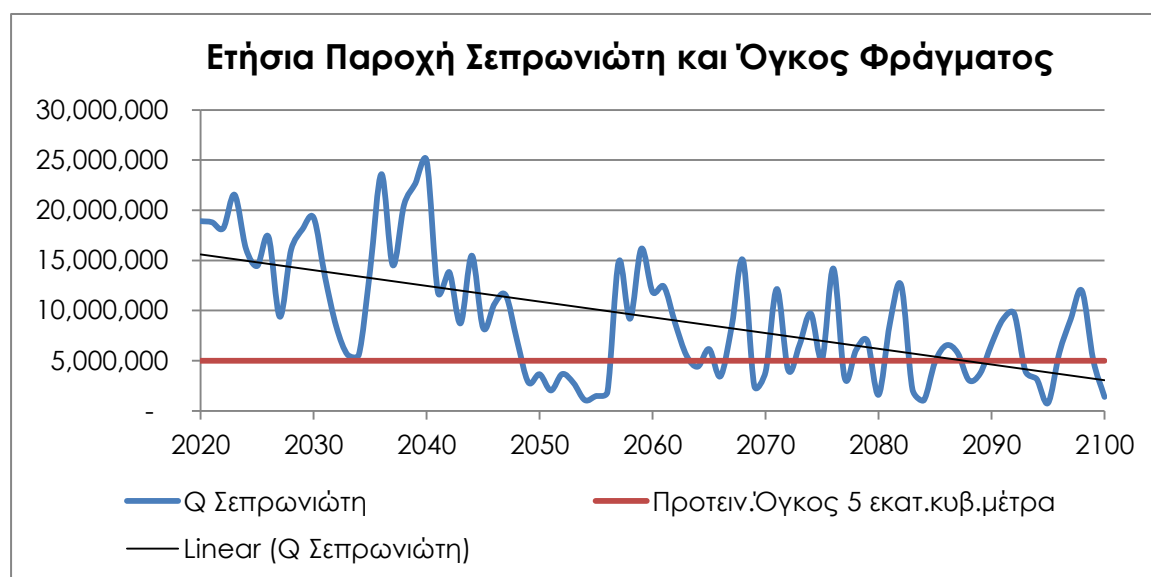
21. Οικονομόπουλος, Α., Οικονομοπούλου, Μ., 2005. Ρύπανση και έλεγχος ρύπανσης νερών, Πανεπιστημιακές σημειώσεις, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Χανιά.
22. Παρασχούδης Β., 1991. Μελέτη Φραγμάτων στο χείμαρρο Ταυρωνίτη Ν. Χανίων, Υπουργείο Γεωργίας, Διεύθυνση Τεχνικών Μελετών και Κατασκευών
23. Προχωρημένη Υδρολογία, 2009, Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, Παρουσίαση: Υδρολογικά μοντέλα και εφαρμογές, Αθήνα
24. Ρόπης Κ., 2005. Διερεύνηση της ποιότητας των υδάτων της λίμνης Σμοκοβού, Δ.Π.Μ.Σ. Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων, Αθήνα http://new.ims.forth.gr/water/sites/new.ims.forth.gr.water/files/documents/thesis/ropis_konstandinos_full.pdf
25. Τσακίρης, Γ., 1995. Υδατικοί Πόροι: Ι. Τεχνική Υδρολογία, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα.
26. Τερζίδης Γ.Α., Παπαζαφειρίου Ζ.Γ., (1997). Γεωργική Υδραυλική, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
27. Υδρο-σύστημα Σύμβουλοι Μηχανικοί ΕΠΕ, 1993- Οριστική μελέτη φραγμάτων λεκάνης απορροής ποταμού Ταυρωνίτη Ν. Χανίων- Υδρολογικοί και υδραυλικοί υπολογισμοί, Αθήνα
28. Υπουργείο Αγροτικής ανάπτυξης και τροφίμων, 2006- Τα φράγματα και οι λιμνοδεξαμενές του υπουργείου ανάπτυξης και τροφίμων- Β' Έκδοση- Νέα Έργα
29. ΦΕΚ Α' 280/9.12.2003 - Νόμος 3199/2003 «Προστασία και διαχείριση των υδάτων - Εναρμόνιση με την Οδηγία 2000/60/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23ης Οκτωβρίου 2000».
30. Φιλίντας Αγ.Θ., Πολύζος Σερ.Θ., Φράγματα, λειτουργίες οικοσυστήματος και περιβαλλοντικές επιπτώσεις, <http://portal.tee.gr/portal/page/portal/teelar/EKDILWSEIS/damConference/eisigiseis/2.7.pdf>

Ηλεκτρονικές Πηγές

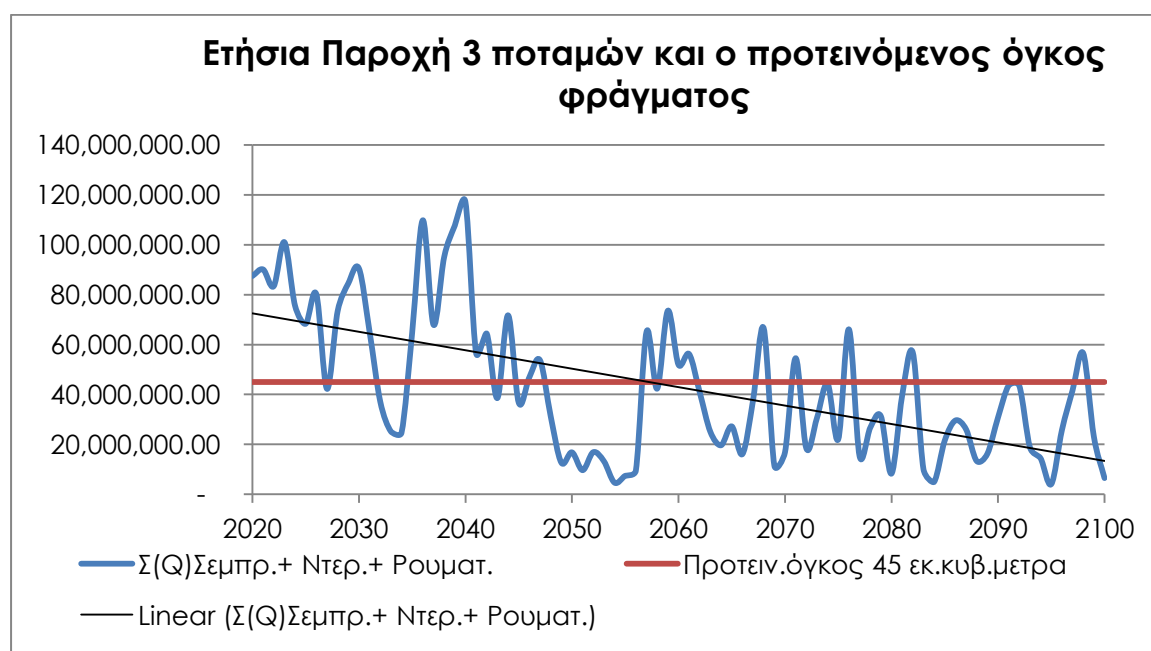
1. <http://www.hydroscope.gr/>
2. <https://maps.google.gr/>
3. <http://water.usgs.gov>
4. http://peseta.jrc.ec.europa.eu/climate_scenarios.html
5. <http://www.ypeka.gr/>
6. <http://time.com/3998554/shade-balls-graphic/>
7. <http://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/hydrology/sediment-transport-deposition/>
8. <http://www.cru.uea.ac.uk/>
9. <http://www.statistics.gr/portal/page/portal/ESYE/PAGE-census2011>
10. <http://www.smhi.se/en>
11. http://www.mpimet.mpg.de/fileadmin/Climate_Scenarios/IPCC-Models-Giorgetta.pdf
12. <http://users.auth.gr/vmarios/courses/HYMODEL.pdf>
13. <http://www.cru.uea.ac.uk/projects/ecochange/climatedata/tables/ek.html>
14. <http://www.ipcc.ch/>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Ι. Διαγράμματα Παροχής-Όγκου φράγματος



Διάγραμμα Ι: Η παροχή του Σεπρωνιώτη σε σχέση με τον όγκο φράγματος (εκτροπής) που προτάθηκε στη μελέτη του 1991, μέχρι το 2100.



Διάγραμμα ΙΙ: Το άθροισμα των παροχών των τριών παραποτάμων, σε σχέση με τον όγκο του φράγματος που προτάθηκε στη μελέτη του 1991, 45 εκατ. m³, μέχρι το 2100.

II. Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιήθηκαν στο Microsoft Office Excel για την προσομοίωση του φράγματος:

Όγκος[m³]:

if Season=Wet then

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

if $V_{i-1} + 60\%Q_{in} + Pin - PET - Q_{απαιτ} \leq V_{max}$ then

$V_i = V_{i-1} + 60\%Q_{in} + Pin - PET - Q_{απαιτ}$

else $V_i = V_{max}$

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

then $V_i = V_{max}$

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

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

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

else $V_i = V_{min}$

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

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

then $V_i = V_{max}$

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

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

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

else $V_i = V_{min}$

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

Όπου

- Wet Season=Ιανουάριος, Φεβρουάριος, Νοέμβριος, Δεκέμβριος
- Συνθήκη για να εφαρμόσει το $Q_{in} = 40\%Q_{out} + 60\%Q_{storage}$:
 $Q_{in} \geq \frac{2}{3} \cdot V_{max}$ ή $V_{i-1} \geq 0.7 \cdot V_{max}$

Qout-Υπερχείλιση[m³/month]

if Season=Wet then

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

then if $V_{i-1} + 60\%Q_{in} + Pin - PET \geq V_{max}$

then $Q_{out} = V_{i-1} + Q_{in} + Pin - PET - Q_{απαιτ} - V_{max}$

else $Q_{out} = 40\%Q_{in}$

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

$Q_{out} = V_{i-1} + Q_{in} + Pin - PET - Q_{απαιτ} - V_{max}$

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

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

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

else $Q_{out} = 0$

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

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

$Q_{out} = V_{i-1} + Q_{in} + Pin - PET - Q_{απαιτ} - V_{max}$

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

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

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

else $Q_{out} = 0$

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

Qirr-final[m³/month]:

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

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

then $Q_{irr-final} = 0$

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

else Qirr-final=Qαπταιτ

III. Πίνακες

Πίνακας 1: Ποσοστά ανά μήνα ζήτησης για την ύδρευση και την άρδευση βάσει της εμπειρίας του Οργανισμού Ανάπτυξης Κρήτης, που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση του φράγματος.

Μήνας	Ύδρευση Μ.Ο Ζήτησης	Άρδευση Μ.Ο Ζήτησης	Τελική Ζήτηση/Μήνα
Σεπτέμβριος	0.121628564	0.102677358	0.102883253
Οκτώβριος	0.061135371	0.033127208	0.033431502
Νοέμβριος	0.048291806	0	0.000524665
Δεκέμβριος	0.049833034	0	0.000541409
Ιανουάριος	0.049833034	0	0.000541409
Φεβρουάριος	0.045080914	0	0.00048978
Μάρτιος	0.049833034	0	0.000541409
Απρίλιος	0.059208836	0.037129655	0.037369533
Μάιος	0.125610069	0.131013862	0.130955153
Ιούνιος	0.127151297	0.218605599	0.217611997
Ιούλιος	0.131261238	0.252225469	0.250911257
Αύγουστος	0.131261238	0.225197064	0.224176502

Πίνακας 2: Μορφομετρικές παράμετροι του ποταμού Ταυρωνίτη και των παραποτάμων του Σεμπρενιώτη, Ρουματιανού και Ντεριανού, αλλά για σύγκριση και οι παράμετροι του ποταμού Κερίτη της γειτονικής υδρολογικής λεκάνης (από Κουλι et al., 2007).

	Ταυρωνίτης	Σεμπρενιώτης	Ρουματιανός	Ντεριανός	Κερίτης
Έκταση (km ²)	130.87	22.44	27.78	56.64	180.62
Ολικός αριθμός ρευμάτων	2312	483	511	1042	1783
Ολικό μήκος (km) ρευμάτων	511.38	92.58	109.26	229.53	479.27
Μήκος λεκανών (km)	23.7	11.55	9.95	20.99	24.87
Λόγος αριθμού ρευμάτων /μήκος τους	1.4	1.45	1.42	1.43	1.54
Συχνότητα ρευμάτων	17.67	21.52	18.39	18.39	9.87

Πίνακας 3: Λίστα των κλιματικών παραμέτρων του Ensembles/KnmiRacmo2

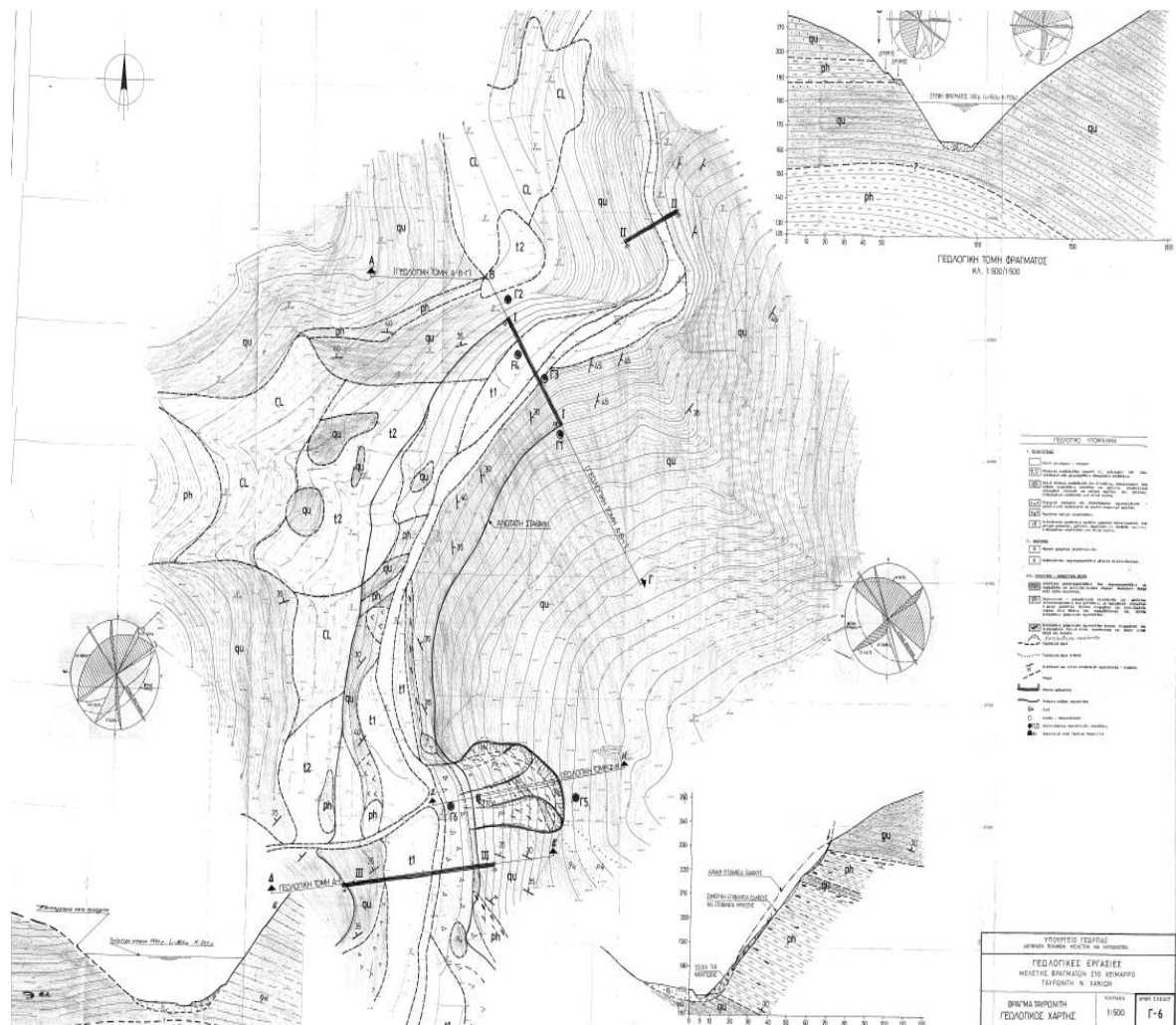
(<http://www.cru.uea.ac.uk/projects/ecochange/climatedata/tables/ek.htm>)

Meijgaard et al., 2008

Surface Climate Parameter	Units	File Name			min	max
		AlB scenario				
Daily mean temperature	tas	°C	ensembles knmi racmo2 alb 1950 2100 tas.txt ensembles knmi racmo2 alb 1961 1990 tas.txt ensembles knmi racmo2 alb 2071 2100 tas.txt	-25.99 -14.54 -7.95	44.65 34.86 40.48	
Daily minimum temperature	tasmin	°C	ensembles knmi racmo2 alb 1950 2100 tasmin.txt ensembles knmi racmo2 alb 1961 1990 tasmin.txt ensembles knmi racmo2 alb 2071 2100 tasmin.txt	-29.55 -17.23 -10.25	39.06 28.76 34.62	
Daily maximum temperature	tasmax	°C	ensembles knmi racmo2 alb 1950 2100 tasmax.txt ensembles knmi racmo2 alb 1961 1990 tasmax.txt ensembles knmi racmo2 alb 2071 2100 tasmax.txt	-22.33 -12.07 -6.20	51.98 42.10 47.66	
Days with ground-frost						
Precipitation	pr	mm/day	ensembles knmi racmo2 alb 1950 2100 pr.txt ensembles knmi racmo2 alb 1961 1990 pr.txt ensembles knmi racmo2 alb 2071 2100 pr.txt	0.00 0.00 0.00	61.77 23.16 22.41	
Rain days						
Snowfall	prsn	mm/day	ensembles knmi racmo2 alb 1950 2100 prsn.txt ensembles knmi racmo2 alb 1961 1990 prsn.txt ensembles knmi racmo2 alb 2071 2100 prsn.txt	0.00 0.00 0.00	61.62 23.10 19.03	
Evaporation	evpsbl	mm/day	ensembles knmi racmo2 alb 1950 2100 evpsbl.txt ensembles knmi racmo2 alb 1961 1990 evpsbl.txt ensembles knmi racmo2 alb 2071 2100 evpsbl.txt	-2.60 -0.70 -0.43	13.48 8.14 9.07	
Potential Evapotranspiration	pet	mm/day	ensembles knmi racmo2 alb 1950 2100 pet.txt ensembles knmi racmo2 alb 1961 1990 pet.txt ensembles knmi racmo2 alb 2071 2100 pet.txt	0.08 0.34 0.35	20.32 16.73 18.38	
Snow water-equivalent / Surface snow amount	snw	kg/m2	ensembles knmi racmo2 alb 1950 2100 snw.txt ensembles knmi racmo2 alb 1961 1990 snw.txt ensembles knmi racmo2 alb 2071 2100 snw.txt	0.00 0.00 0.00	4559.41 2443.36 1397.73	
Fractional snow cover	snc	unitless	ensembles knmi racmo2 alb 1950 2100 snc.txt ensembles knmi racmo2 alb 1961 1990 snc.txt ensembles knmi racmo2 alb 2071 2100 snc.txt	0.00 0.00 0.00	1.00 1.00 1.00	
Vapour pressure	e2m	hPa	ensembles knmi racmo2 alb 1950 2100 e2m.txt ensembles knmi racmo2 alb 1961 1990 e2m.txt ensembles knmi racmo2 alb 2071 2100 e2m.txt	0.42 1.53 2.59	38.03 28.02 34.30	
Relative humidity	hurs	unitless	ensembles knmi racmo2 alb 1950 2100 hurs.txt ensembles knmi racmo2 alb 1961 1990 hurs.txt ensembles knmi racmo2 alb 2071 2100 hurs.txt	0.09 0.15 0.14	0.99 0.95 0.94	
Sunshine duration	sund	hours/day	ensembles knmi racmo2 alb 1950 2100 sund.txt ensembles knmi racmo2 alb 1961 1990 sund.txt ensembles knmi racmo2 alb 2071 2100 sund.txt	0.09 0.15 0.14	0.99 0.95 0.94	
10-meter wind speed	wss	m/s	ensembles knmi racmo2 alb 1950 2100 wss.txt ensembles knmi racmo2 alb 1961 1990 wss.txt ensembles knmi racmo2 alb 2071 2100 wss.txt	0.55 0.99 0.94	16.69 11.80 11.96	

Institution: Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI) - The Netherlands
Driving data: ECHAM5-r3 (GCM) data

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΕΙΚΟΝΩΝ



Εικόνα1: Γεωλογικός χάρτης φράγματος Σεμπρωνιώτη (“Μελέτη Φραγμάτων στον χείμαρρο Ταυρωνίτη Νομού Χανίων”)



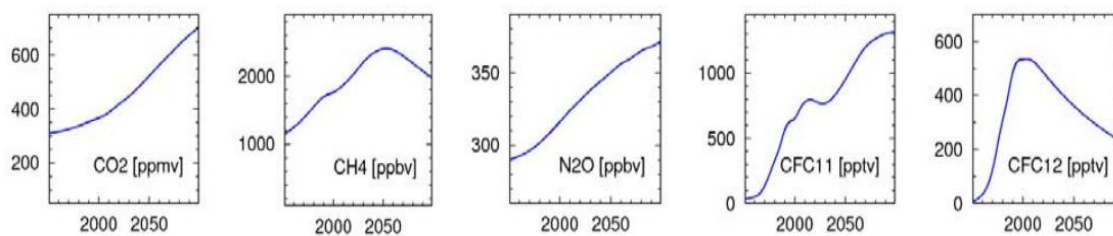
Εικόνα 2: Ο ποταμός Σεμπρωνιώτης τον Ιούλιο 2015



Εικόνα 3: Κοντά στην τοποθεσία Κάτω Κεφάλια, η προτεινόμενη τοποθεσία του φράγματος



Εικόνα 4 : Ο Ταυρωνίτης μετά την ένωση Ρουματιανού και Σεμπρωνιώτη, πριν τη συνένωση με Ντεριανό



Εικόνα: Οι συγκεντρώσεις των αερίων του Θερμοκηπίου για την περίοδο 1950-2100 σύμφωνα με το σενάριο A1B (http://ensemblesrt3.dmi.dk/metadata/KNMI-RACMO2-EUR-domain_spec_25km_Dec2008.pdf)

