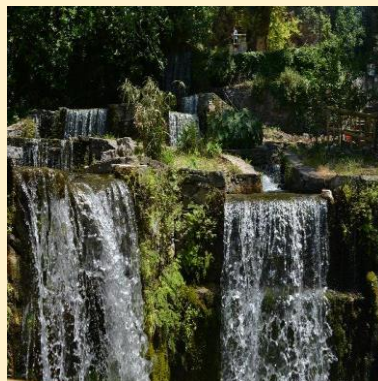




ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ: ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ &
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

**Μοντελοποίηση της υδρολογίας της λεκάνης
απορροής των Καρστικών Πηγών της
Αργυρούπολης**

*Διπλωματική Εργασία
Ιωάννης Λυμπεράκης*



*Επιβλέπων Καθηγητής: Νικολαΐδης Νικόλαος
Εξεταστική Επιτροπή: Καθηγητής Καρατζάς Γεώργιος
Διδάκτωρ Μαρία Λιλλή*

Χανιά, Φεβρουάριος 2022

“Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για μη κερδοσκοπικό σκοπό, εκπαιδευτικού ή ερευνητικού χαρακτήρα, με την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για άλλη χρήση θα πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης”.

Ευχαριστίες

Ένα μεγάλο Ευχαριστώ στην οικογένεια μου, που με στήριξαν όλα αυτά τα χρονιά για να εκπλήρωση των στόχων μου!

Όπως και τις ειλικρινείς ευχαριστίες μου στον κύριο Νικολαΐδη και το διδακτικό προσωπικό, για την καθοδήγηση, την υποστήριξη και την εμπιστοσύνη που μου παρείχαν καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής μου εργασίας.

Περίληψη

Η περιοχή μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας αφορά το φράγμα Ποταμών στην περιοχή του Αμαρίου και τις Καρστικές πηγές Αργυρούπολης, μια μικρή κωμόπολη της επαρχίας Ρεθύμνου. Οι παραπάνω περιοχές ανήκουν στη γεωγραφική περιοχή της Κρήτης και διοικητικά υπάγονται στην Περιφερειακή Ενότητα Ρεθύμνης. Για την μοντελοποίηση των περιοχών έγινε χρήση του ημι-κατανεμημένου μοντέλου Soil & Water Assessment Tool (SWAT) του προγράμματος ArcGIS.

Για την μοντελοποίηση των περιοχών, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της χειροκίνητης βαθμονόμησης, ακολουθώντας τη διαδικασία δοκιμής - σφάλματος. Η έκταση της λεκάνης που μοντελοποιήθηκε είναι 369.5 km² και διαχωρίστηκε σε 43 υπολεκάνες και 256 HRUs. Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας ορισμού των HRUs, εισάχθηκαν καιρικά δεδομένα όπως οι βροχομετρικές και οι θερμοκρασιακές μετρήσεις των σταθμών από το 1961 έως και το 2021. Για την μοντελοποίηση του Φράγματος Ποταμών έγινε διαχωρισμός των δεδομένων σε δυο περιόδους, η πρώτη αφορούσε τα έτη 1970-88 ενώ η δεύτερη τα έτη 1989-97. Με την πρώτη περίοδο έγινε η βαθμονόμηση του μοντέλου και με την δεύτερη έγινε επαλήθευση αυτού, ενώ η αξιολόγηση της προγνωστικής ικανότητας και εγκυρότητάς τους επιτεύχθηκε με τη δημιουργία γραφημάτων και τον υπολογισμό των στατιστικών δεικτών NSE, RMSE, RSR και PBIAS.

Έπειτα έγινε αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης σύμφωνα με τα δεδομένα πεδίου του ταμιευτήρα τα οποία παραχωρήθηκαν από τον Ο.Α.Δ.Υ.Κ. και αφορούσαν μετρήσεις στάθμης και όγκου του ταμιευτήρα για την περίοδο 05/2008 έως 01/2010. Ακόμα υπολογίστηκε πως η παροχή του Φράγματος Ποταμών κυμαίνεται μεταξύ 5 εκ.κυβικών και 45 εκ.κυβικών ετησίως ενώ η μέση παροχή υπολογίστηκε στα 23 εκ.κυβικά. Για τον ταμιευτήρα η παροχή απόληψης είχε ληφθεί κατά τον σχεδιασμό 15 εκ.κυβικά μετρά, βάση της οποίας υπολογίστηκε το ποσοστό αστοχίας 24%. Ποσοστό που δεν παρουσιάζει ικανοποιητική ευστοχία, καθώς 10 από τα 41 χρόνια μοντελοποίησης δεν καλύπτουν την παροχή σχεδιασμού.

Για την μοντελοποίηση των Πηγών της Αργυρούπολης, έγινε χρήση του καρστικού μοντέλου σύμφωνα με το οποίο υπολογίστηκαν οι μέσες παροχές του μοντέλου και αξιολογήθηκε επιτυχώς σύμφωνα με τα αποτελέσματα των στατιστικών δεικτών. Από την μοντελοποίηση των πηγών της Αργυρούπολης υπολογίστηκε για τα έτη 1983 έως και 2005, η μέση ετήσια παροχή 9.8 εκ.κυβικά, με τις τιμές των ξηρών ετών να κυμαίνονται μεταξύ των 6 εκ.κυβικών και 9 εκ.κυβικών ετησίως, ενώ οι τιμές που αφορούν τα υγρά έτη να βρίσκονται μεταξύ των 10 εκ.κυβικών και 15 εκ.κυβικών ετησίως αντίστοιχα. Στην υπάρχουσα συμφωνία διάθεσης των νερών της πηγής είχε ληφθεί ως μέση παροχή η ποσότητα των 7 εκ. κυβικών ετησίως και βάση αυτής υπολογίστηκε το ποσοστό αστοχίας μόλις 15%. Ποσοστό με που δηλώνει ικανοποιητική ευστοχία, καθώς μόλις σε 8 από τα 52 χρόνια θα δημιουργείται η ανάγκη για αναλογική μείωση της παροχής στους χρήστες.

Abstract

The study area of this thesis concerns the Potamon dam in the region of Amari and the Karst springs of Argyroupoli, a small town in the province of Rethymno. The above areas belong to the geographical area of Crete and administratively fall under the Regional Unit of Rethymno. The semi-distributed Soil & Water Assessment Tool (SWAT) model of the ArcGIS program was used to model the areas.

To model the areas, the method of manual calibration was used, following the trial-error process. The basin area modeled is 369.5 km² and divided into 43 sub-basins and 256 HRUs. After the completion of the process of defining the HRUs, weather data such as the rainfall and temperature measurements of the stations from 1961 to 2021 were entered. For the modeling of the River Dam, the data was divided into two periods, the first one related to the years 1970- 88 while the second in the years 1989-97. With the first period, the model was calibrated and with the second, it was verified, while the evaluation of their predictive ability and validity was achieved by creating graphs and calculating the statistical indices NSE, RMSE, RSR and PBIAS.

Then the results of the simulation were evaluated according to the reservoir field data provided by O.A.D.Y.K. and concerned reservoir level and volume measurements for the period 05/2008 to 01/2010. It was also calculated that the supply of the River Dam varies between 5 million cubic meters and 45 million cubic meters per year, while the average flow was calculated at 23 million cubic meters. For the reservoir, the failure rate was calculated at 24%, based on the withdrawal supply had been taken during the dam design of 15 million cubic meters. A rate that does not show satisfactory accuracy, as 10 of the 41 model years do not cover the design supply.

For the modeling of the Springs of Argyroupoli, the karst model was used according to which the average benefits of the model were calculated and it was successfully evaluated according to the results of the statistical indicators. From the modeling of the sources of Argyroupoli, it was calculated for the years 1983 to 2005, the average annual supply of 9.8 million cubic meters, with the values of dry years varying between 6 million cubic meters and 9 million cubic meters per year, while the values for wet years to be between 10 million cubic meters and 15 million cubic meters per year respectively. In the existing agreement for the disposal of the spring water, the amount of 7 million cubic meters per year was taken as an average supply, and based on this the failure rate of only 15% was calculated. A percentage that indicates a satisfactory accuracy, as only in 8 out of 52 years there will be a need for a proportional reduction in the supply to users be created.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	3
Περίληψη	4
1.Εισαγωγή - Ανάλυση του Προβλήματος	11
1.1 Εισαγωγικά στοιχεία	11
1.2 Σκοπός της παρούσας διπλωματικής διατριβής.....	13
2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση	14
2.1 Γενικά.....	14
2.2 Εφαρμογές περιβαλλοντικών μοντέλων.....	14
2.3 Υδρολογικά μοντέλα	15
2.3.1 Γενικά – Ορισμοί	15
2.4 Βαθμονόμηση και Επαλήθευση Υδρολογικού Μοντέλου.....	21
2.4.1 Ορισμός Βαθμονόμησης	21
2.4.2 Είδη βαθμονόμησης.....	22
2.4.3 Ορισμός επαλήθευσης	23
2.5 Το Μοντέλο SWAT	25
2.5.1 Το SWAT γενικά	25
2.5.2 Δεδομένα Εισόδου	25
2.5.3 Δεδομένα Εξόδου	26
2.5.4 Μεθοδολογία Μοντέλου	27
2.5.5 Υδρολογικός κύκλος στο SWAT	27
2.5.6 Υδρολογικό ισοζύγιο	29
2.5.7 Διαχειριστικές πρακτικές	30
2.6 Φράγματα.....	30
2.6.1 Γενικά.....	30
2.6.2 Τύποι φραγμάτων	31
2.6.3 Υδρολογικός σχεδιασμός φραγμάτων	32
2.6.4 Επιπτώσεις των φραγμάτων	33
3. Περιγραφή της περιοχής μελέτης	36
3.1 Γενικά	36
3.1.1 Ιστορική αναδρομή διάθεσης ποσοτήτων νερού της πηγής Αργυρούπολης	37
3.1.2 Ιστορική αναδρομή λειτουργίας του Ταμιευτήρα Αμαρίου.....	37
3.1.3 Σκοπός κατασκευής-Τεχνικά χαρακτηριστικά φράγματος Ποταμών	38
3.2 Περιγραφή Υδρολογικής Λεκάνης Πηγής Αργυρούπολης	39
3.2.1 Γεωγραφική τοποθέτηση.....	39
3.2.2 Γεωμορφολογία.....	41
3.2.4 Υδρογεωλογική συμπεριφορά του ευρύτερου πεδίου.....	44

3.2.5 Υδρογεωλογική συμπεριφορά πηγής Αργυρούπολης	45
3.3 Περιγραφή Υδρολογικής Λεκάνης Φράγματος Ποταμών.....	47
3.3.1 Γεωγραφική τοποθέτηση.....	47
3.3.2 Γεωμορφολογία.....	48
3.3.3 Υδρογεωλογική συμπεριφορά του ευρύτερου πεδίου.....	50
3.4 Μετεωρολογικά – Κλιματολογικά στοιχεία της περιοχής	54
3.5 Χρήσεις Γης.....	61
4. Ανάπτυξη Υδρολογικού Μοντέλου	62
4.1 Πρόγραμμα & Εισαγωγή δεδομένων	62
4.2 Βαθμονόμηση & Επαλήθευση	64
4.3 Αποτελέσματα Μοντελοποίησης Φράγματος Ποταμών.....	67
4.4 Αποτελέσματα Προσομοίωσης Ταμιευτήρα	76
4.5 Αποτελέσματα Προσομοίωσης Καρστικών Πηγών Αργυρούπολης.....	82
5. Συμπεράσματα.....	86
7. Βιβλιογραφία.....	89
7.1 Διεθνής βιβλιογραφία	89
7.2 Ελληνική βιβλιογραφία	90
7.3 Ηλεκτρονική βιβλιογραφία	91

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Ο κύκλος του νερού (USGS)	13
Εικόνα 2: Schematic of the hydrologic cycle and SWAT simulation processes [Neitsch et al., 2011].....	28
Εικόνα 3: Φράγμα Ποταμών (Πηγή: www.cretanbeaches.com).....	35
Εικόνα 4: Περιοχή μελέτης Φράγματος Ποταμών & Πηγών Αργυρούπολης (Πηγή: Google Earth).....	36
Εικόνα 5: Οπτική απεικόνιση της Πηγής Αργυρούπολης. (Πηγή: Google Earth)	40
Εικόνα 6: Απεικόνιση των κλίσεων στη λεκάνη απορροής της Αργυρούπολης (με κίτρινο περίγραμμα) και στην ευρύτερη περιοχή, σύμφωνα με το μοντέλο SWAT.	41
Εικόνα 7: Τοπογραφικό ανάγλυφο της λεκάνης απορροής της Αργυρούπολης (Πηγή: GEODATA.gov).	42
Εικόνα 8: Γεωλογικός Χάρτης Αργυρούπολης (Πηγή: ArcGIS).....	43
Εικόνα 9: Υδρολιθολογικός χάρτης της Κρήτης 1996, της περιοχής της Αργυρούπολης και του Φράγματος Ποταμών.....	46
Εικόνα 10: Οπτική απεικόνιση του ταμιευτήρα του Φράγματος Ποταμών. (Πηγή: Google Earth).....	47
Εικόνα 11: Χαρτογραφικός προσδιορισμός των κλίσεων στο Φράγμα Ποταμών (Λεκάνη απορροής με κίτρινο περίγραμμα) και στην ευρύτερη περιοχή μέσω του προγράμματος SWAT.	48
Εικόνα 12: Τοπογραφικό ανάγλυφο Κρήτης (Πηγή: Περιγραφή υδατικού διαμερίσματος, 1η ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΗ ΣΔΛΑΠ, ΥΔ ΚΡΗΤΗΣ).....	49

Εικόνα 13: Τοπογραφικός χάρτης της περιοχής του Φράγματος Ποταμών. (Πηγή: GEODATA.gov)	49
Εικόνα 14: Εδαφικός χάρτης του Φράγματος Ποταμών που προέκυψε από το πρόγραμμα SWAT.	51
Εικόνα 15: Κρητικός υδροβιολογικός χάρτης, έτους 1996.	52
Εικόνα 16: Γεωλογικός χάρτης της περιοχής του φράγματος (Πηγή: ArcGIS)	53
Εικόνα 17: Χρήσεις γης στη λεκάνη απορροής της ευρύτερης περιοχής.	61
Εικόνα 18: Χάρτης απεικόνισης κλήσεων της μελέτης περιοχής.	63
Εικόνα 19: Χάρτης απεικόνισης εδαφών της μελέτης περιοχής.	63
Εικόνα 20: Χάρτης απεικόνισης των HRUs της μελέτης περιοχής.	64
Εικόνα 21: Απεικόνιση του υδατικού ισοζυγίου του φράγματος ποταμών Αμαρίου αποτυπωμένο από το SWAT.	75

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: Μέση μηνιαία θερμοκρασία για το 2020	54
Διάγραμμα 2: Μέση μηνιαία θερμοκρασία για το έτος 2020.	55
Διάγραμμα 3: Συνολική μηνιαία βροχόπτωση για το 2020.	55
Διάγραμμα 4: Μέση ταχύτητα ανέμου για το 2020.	56
Διάγραμμα 5: Συσχέτιση των δεδομένων βροχόπτωσης για τους σταθμούς Καβούσι-Γερακάρι.	57
Διάγραμμα 6: Αθροιστική συσχέτιση βροχομετρικών δεδομένων Καβούσι-Γερακάρι	58
Διάγραμμα 7: Συσχέτιση των δεδομένων βροχόπτωσης για τους Λευκόγεια-Καβούσι	59
Διάγραμμα 8: Αθροιστική συσχέτιση βροχομετρικών δεδομένων Λευκόγεια-Καβούσι	59
Διάγραμμα 9: Συσχέτιση των δεδομένων βροχόπτωσης για τους Βωλεώνες-Λευκόγεια ..	60
Διάγραμμα 10: Αθροιστική συσχέτιση βροχομετρικών δεδομένων Βωλεώνες-Λευκόγεια ..	60
Διάγραμμα 11: Παρατηρημένες και προσομοιωμένες παροχές που αφορούν την πρώτη χρονοσειρά μελέτης 1970-1988.	69
Διάγραμμα 12: Προσομοιωμένες και παρατηρημένες παροχές που αφορούν την δεύτερη χρονοσειρά μελέτης (1989-1997).	71
Διάγραμμα 13: Διάγραμμα 12: Προσομοιωμένες και παρατηρημένες παροχές που αφορούν τα έτη (1970-1997).	72
Διάγραμμα 14: Συσχέτιση παρατηρούμενων τιμών πεδίου και μοντέλου.	73
Διάγραμμα 15: Σύγκριση παρατηρούμενων παροχών και παροχών μοντέλου 1970-1997.	73
Διάγραμμα 16: Στάθμη ταμιευτήρα σε σχέση με τον χρόνο (πηγή: Ο.Α.Δ.Υ.Κ.)	77
Διάγραμμα 17: Στάθμη & Όγκος ταμιευτήρα σε σχέση με τον χρόνο (πηγή: Ο.Α.Δ.Υ.Κ.).	77
Διάγραμμα 18: Συσχέτιση Στάθμης & Όγκου ταμιευτήρα (πηγή: Ο.Α.Δ.Υ.Κ.).	78
Διάγραμμα 19: Σχέση όγκου ταμιευτήρα του μοντέλου & όγκου ταμιευτήρα από πηγή Ο.Α.Δ.Υ.Κ. σε συνάρτηση με τον χρόνο.	80
Διάγραμμα 20: Σχέση όγκων ταμιευτήρα μοντέλου και πεδίου.	80
Διάγραμμα 21: Σχέση όγκου και στάθμης του ταμιευτήρα του μοντέλου.	81
Διάγραμμα 22: Όγκος ταμιευτήρα συναρτήσει του χρόνου.	81
Διάγραμμα 23: Γραφική απεικόνιση σχέσης παροχών μοντέλου με πεδίου σε σχέση με το χρόνο.	85

Κατάλογος Πινάκων

1: Τεχνικά Χαρακτηριστικά κατασκευής Φράγματος Ποταμών παραχωρημένα από τον κ. Βαγγέλη Μαμαγκάκη, Προϊστάμενο της Διεύθυνσης Ρεθύμνου του Ο.Α.Δ.Υ.Κ. (Πηγή: amariotes.gr)	38
2: Πίνακας χρήσεων γης της λεκάνης απορροής των Πηγών Αργυρούπολης.	61
3: Πίνακας παραμέτρων που μεταβλήθηκαν για την ολοκλήρωση της βαθμονόμησης.	66
4: Πίνακας δεικτών κατά Moriasi, για αξιολόγηση βαθμονόμησης μοντέλων.	69
5: Αξιολόγηση των δεικτών της πρώτης χρονοσειράς με βάση τις πρότυπες τιμές κατά Moriasi.	70
6: Πίνακας αξιολόγησης των δεικτών της δεύτερης χρονοσειράς με βάση τις πρότυπες τιμές κατά Moriasi.	71
7: Πίνακας αξιολόγησης των στατιστικών δεικτών της συνολικής περιόδου 1970-1997.	72
8: Τιμές από το υδατικό ισοζύγιο της υδρολογικής λεκάνης των ποταμών Αμαρίου.	74
9: Δεδομένα όγκου και στάθμης Φράγματος Ποταμών (πηγή: Ο.Α.Δ.Υ.Κ.).	76
10: Πίνακας δεδομένων που προκύπτει από την προσομοίωση του ταμιευτήρα την περίοδο 05/2008-01/2010.	79
11: Πίνακας δεικτών αξιολόγησης της προσομοίωσης του ταμιευτήρα.	82
12: Πίνακας παραμέτρων που μεταβλήθηκαν για την βαθμονόμηση των πηγών Αργυρούπολης.	83
13: Πίνακας Παραμέτρων Καρστικών πηγών Αργυρούπολης.	84
14: Πίνακας αποτελεσμάτων της καρστικής ισορροπίας των πηγών.	85

1.Εισαγωγή - Ανάλυση του Προβλήματος

1.1 Εισαγωγικά στοιχεία

Το νερό αποτελεί μια ανόργανη χημική ένωση που υπάρχει σε μεγάλη ποσότητα στην επιφάνεια της γης, καλύπτοντας το 70% της επιφάνειας του πλανήτη. Είναι ένας από τους σημαντικότερους φυσικούς πόρους και απαραίτητο για τη διατήρηση της ζωής στην Γη. Γενικά το μόριο του νερού είναι το τρίτο σε αφθονία μόριο στο συμπάν ενώ βρίσκεται και σε άλλα ουράνια σώματα συχνά σε μορφή πάγου.

Σε όλα τα μέρη του κόσμου όπου υπάρχει νερό, υπάρχει και ζωή. Ακόμη και στις πιο ξηρές περιοχές της ερήμου υπάρχει μια ποσότητα νερού η οποία βρίσκεται προσκολλημένη στην επιφάνεια των κόκκων της άμμου. Είναι μια σταθερή αλλά συγχρόνως εξαιρετικά δραστική χημική ένωση, η οποία συναντάται στη φύση σε αέρια, υγρή και στερεή κατάσταση. Οι ιδιαίτερες χημικές ιδιότητες του νερού, κυρίως η διαλυτική του ικανότητα είναι απαραίτητες για το οικοσύστημα καθώς μπορεί να διαλύσει ένα ευρύ φάσμα ουσιών. Εξαιτίας της διαλυτικής ιδιότητάς του, πολλές χημικές ενώσεις και χημικά στοιχεία μεταφέρονται σε διάφορα σημεία της επιφάνειας της γης μέσω της επίγειας και υπόγειας κίνησης του. [<https://www.deyamp.gr/oikologia-periballon-nero>]

Το νερό ανακυκλώνεται συνεχώς μέσα στην υδρόσφαιρα, στην λιθόσφαιρα και στην ατμόσφαιρα μέσω της διαδικασίας του κύκλου του νερού. Είναι ένα πολύπλοκο σύστημα που περιλαμβάνει πολλές διαφορετικές διαδικασίες. Οι κυριότερες είναι η εξάτμιση δηλαδή η μετατροπή του νερού σε υδρατμούς, η εφίδρωση κατά την οποία το νερό εξατμίζεται από το φύλλωμα των φυτών, η συμπύκνωση όπου μετατρέπεται το εξατμισμένο νερό σε σταγόνες νερού υγρής μορφής, οι κατακρημνίσεις (βροχή, χιονόνερο, χαλάζι και χιόνι), η διείσδυση όπου επέρχεται η εισχώρηση του νερού μέσα στο έδαφος, το φιλτράρισμα διαδικασία κατά την οποία το νερό μέσω της κατακόρυφης ροής του διέρχεται μέσα από το έδαφος και τους διαπερατούς σχηματισμούς πετρωμάτων σε υπόγειες περιοχές αποθήκευσης που ονομάζονται υδροφόροι ορίζοντες και τέλος η απορροή δηλαδή η επιφανειακή κίνηση του νερού προς τη θάλασσα για να αρχίσει ξανά ο κύκλος.

Ο κύκλος του νερού ενισχύεται με ενέργεια από τον ήλιο και τη βαρύτητα. Η εισερχόμενη ηλιακή ενέργεια εξατμίζει ποσότητες νερού από τους ωκεανούς, τα ποταμιά, τις λίμνες, το έδαφος και τη βλάστηση. Περίπου το 84% του εξατμιζόμενου νερού στην ατμόσφαιρα προέρχεται από τους ωκεανούς και το υπόλοιπο προέρχεται από το έδαφος. Σε παγκόσμια κλίμακα το ποσοστό του εξατμισμένου νερού που εισέρχεται στην ατμόσφαιρα ισούται με το ποσοστό που επιστρέφει στην επιφάνεια της γης ως κατακρήμνιση. [J.TYLER MILLER, JR, 1999]

Από τη συνολική ποσότητα του νερού, ένα πολύ μικρό ποσοστό αυτού είναι αξιοποιήσιμο, καθώς το 97% είναι αυτό των ωκεανών (αλμυρό νερό), ενώ μόνο το 3% είναι πόσιμο νερό (γλυκό νερό). Από το πόσιμο νερό είναι αξιοποιήσιμο από τους ανθρώπους και τα ζώα μόλις το 1% και βρίσκεται σε υγρή μορφή στο υπέδαφος με ένα πολύ μικρό ποσοστό να βρίσκεται και στην επιφάνεια της Γης, όπως στα ποταμιά και στις λίμνες. Το υπόλοιπο βρίσκεται κυρίως είτε σε παγοκαλύμματα είτε “παγιδευμένο” σε παγετώνες και σε άλλα χιονισμένα σημεία του πλανήτη.

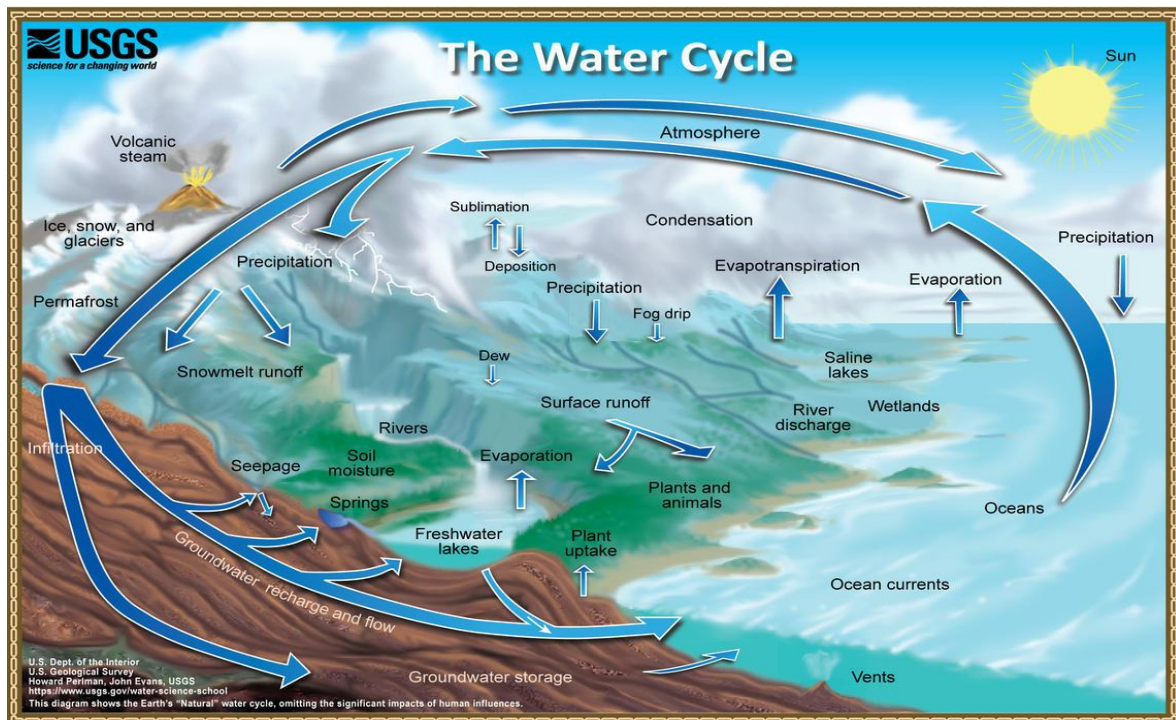
Ο άνθρωπος παρεμβαίνει στον υδρολογικό κύκλο με δυο τρόπους. Πρώτον χρησιμοποιεί μεγάλες ποσότητες γλυκού νερού από τα ποτάμια, τις λίμνες και τους υδάτινους πόρους. Σε περιοχές στις οποίες διεξάγεται εντατική άρδευση ή οι οποίες είναι ιδιαίτερα πυκνοκατοικημένες, η υπερβολική κατανάλωση νερού οδηγεί σε σοβαρή μείωση των υπογείων υδάτων ή σε διείσδυση του θαλασσινού νερού στους υπογείους υδροφόρους ορίζοντες (υφαλμύριση). Δεύτερον καθαρίζει τη γη από τη βλάστηση για τη γεωργία, την εξόρυξη μεταλλευμάτων, τις κατασκευές δρόμων και κτιρίων κ.α. Αυτό συνεπάγεται με αύξηση της απορροής των υδάτων και μείωση της διείσδυσης του νερού στο έδαφος για την ανανέωση των υπόγειων αποθεμάτων. Επίσης έτσι αυξάνεται ο κίνδυνος πλημμυρών και επιτυγχάνεται η διάβρωση και οι καθιζήσεις του εδάφους.

Η παραδοσιακή προσέγγιση της διαχείρισης του, η οποία είναι καθαρά ανθρωποκεντρική, εστιάζει σε ένα και μοναδικό στόχο, την ικανοποίηση των ανθρώπινων αναγκών. [Ganoulis, 2001] Η μη ορθολογική αξιοποίηση του όμως, έχει επιφέρει δραματικές μεταβολές και την ποιοτική υποβάθμιση αυτού. Οι ανάγκες για ύδρευση έχουν πολλαπλασιαστεί από τις αρχές του αιώνα μέχρι σήμερα, με τις καταναλώσεις σε μέσο ευρωπαϊκό επίπεδο να ανέρχονται σε 100 έως 300 λίτρα ανά κάτοικο την ημέρα. Πλέον οι ανάγκες για υδρευτικό νερό εξυπηρετούνται στο μεγαλύτερο μέρος από ταμειυτήρες συλλογής επιφανειακών υδάτων, καθώς και από υπόγεια αποθέματα καλύτερης ποιότητας τα οποία βέβαια δεν επαρκούν πλήρως για να καλύψουν τις απαιτήσεις των μεγάλων αστικών κέντρων. [Δ. Κουτσογιάννης & Θ. Ξανθόπουλος, 2016]

Επομένως η διαχείριση των υδάτων καθιστά αναγκαία την ύπαρξη ενός συντονισμένου και πλήρους νομοθετικού πλαισίου που θα λαμβάνει υπόψη περιβαλλοντικά, κοινωνικά και οικονομικά κριτήρια. Η οδηγία 2000/60/EK της Ευρωπαϊκής Ένωσης είναι αυτή που ανταποκρίνεται στην ανάγκη, καθώς παρέχει ένα συγκεκριμένο νομοθετικό πλαίσιο για την προστασία των επιφανειακών, υπογείων και παράκτιων υδάτων. Κυρίως στόχος της οδηγίας αυτής είναι να διασφαλίζονται επαρκείς ποσότητες νερού έτσι ώστε να καλύπτονται οι σημερινές ανάγκες δίνοντας έμφαση στην αξιοποίηση των πόρων χωρίς να προξενείτε επιπλέον βλάβη στο περιβάλλον. Ταυτόχρονα η οδηγία αντιμετωπίζει αποτελεσματικά φαινόμενα πλημμυρών όπως και ανομβρίας. Τέλος η αρχή ανάκτησης κόστους στην τιμολόγηση του νερού και η αρχή του «ο ρυπαίνων πληρώνει» αποτελούν δυο από τις βασικότερες αρχές της οδηγίας.

Στο πλαίσιο της οδηγίας αυτής γίνεται αναφορά πως τα κράτη μέλη καλούνται να αναγνωρίσουν τις διαφορετικές λεκάνες απορροής ποταμών στην εθνική τους επικράτεια και για σκοπούς της παρούσας οδηγίας να τις κατανείμουν σε επιμέρους περιοχές λεκάνης απορροής ποταμού, προκειμένου να υποβληθούν προτάσεις για την καταστολή της υποβάθμισης και την αποκατάσταση αυτών ή τη διατήρηση της καλής κατάστασης όπου ήδη υπάρχει.

Τέλος κρίνεται απαραίτητη η χρήση τεχνικών μοντελοποίησης, όπου τα κράτη χρησιμοποιώντας δεδομένα που συλλέγουν και κάθε άλλη πληροφορία που είναι άμεσα προσβάσιμη αξιολογούν εάν τα συστήματα επιφανειακών υδάτων μιας περιοχής λεκάνης απορροής ποταμού, είναι ικανά να πληρούν τους ποιοτικούς περιβαλλοντικούς στόχους που ορίζονται για αυτά τα συστήματά. Ένα τέτοιο μοντέλο είναι το SWAT (Soil and Water Assessment Tool) [Arnold et al, 1998, Neitsch et al, 2002, Gassman et al, 2007, Oeurng et al, 2011] το οποίο θεωρείται πως μπορεί να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις που περιλαμβάνονται στην Οδηγία-Πλαίσιο για τα Νερά για τα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης.



Εικόνα 1: Ο κύκλος του νερού (USGS)

1.2 Σκοπός της παρούσας διπλωματικής διατριβής

Είναι γεγονός πως η υπερεκμετάλλευση των υδάτινων αποθεμάτων στον ελλαδικό χώρο οι οποίοι είναι περιορισμένοι σε αριθμό, καθώς και οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, αποτελούν σοβαρό κίνδυνο για την βιωσιμότητα των περιοχών. Ιδιαίτερο πρόβλημα φαίνεται να αντιμετωπίζουν περιοχές με αυξημένα επίπεδα τουριστικού ενδιαφέροντος όπως παραθαλάσσιες περιοχές και νησιά και περιοχές με έντονη ανάπτυξη γεωργικών δράσεων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ανάγκη κατανόησης των κλιματικών διαφοροποιήσεων, ανάλογα την περιοχή και των πρακτικών διαχείρισης των υδάτων.

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά, την περιοχή Αμαρίου στο Ρέθυμνο της οποίας οι υδατικές ανάγκες εξυπηρετούνται κατά κύριο λόγο από το Φράγμα Ποταμών καθώς και τις πηγές Αργυρούπολης οι οποίες θα μπορούσαν να αποτελέσουν σημαντικό παράγοντα στην κάλυψη του ελλειμματικού ισοζυγίου της περιοχής. Έτσι σκοπός της εργασίας αυτής είναι η μοντελοποίηση του Φράγματος Ποταμών και των πηγών της Αργυρούπολης, χρησιμοποιώντας το υδρολογικό μοντέλο SWAT (Soil and Water Assessment Tool) με σκοπό τα αποτελέσματα αυτά να αξιοποιηθούν για την αξιολόγηση των περιοχών και τον εντοπισμό νέων τροπών για καλύτερη διαχείριση των διαθέσιμων πόρων όπως και καλύτερων μεθόδων διατήρησης και διανομής αυτών.

2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

2.1 Γενικά

Η Ελλάδα αποτελείται από 14 υδατικά διαμερίσματα με συνολική επιφανειακή έκταση 131.957 km², εκ των οποίων μόλις 2.200 km² αποτελούν την συνολική επιφάνεια των υδατικών πόρων, δηλαδή ποσοστό κάλυψης 1,6%. Από την επιφάνεια αυτή των υδατικών πόρων, 956 km² περιλαμβάνουν λίμνες φυσικής και τεχνητής κατασκευής, 288 km² αφορούν λιμνοθάλασσές ενώ 723 km² αφορούν τις εκβολές και τα δέλτα των ποταμών. Συνολικά το μήκος των ποταμών εκτιμάται στα 4.268 km και των ελών στα 58km. [Νομαρχιακές Αυτοδιοικήσεις 1970-2001, ΕΚΒΥ 1994].

Σύμφωνα με την κλίμακα ξηρασίας της UNESCO, η χώρα στο μεγαλύτερο μέρος της χαρακτηρίζεται ως ημίυγρη είτε ημίξηρη, εξαίρεση όμως αποτελούν οι περιοχές που βρίσκονται στο δυτικό μέρος της Πίνδου οι οποίες έχουν χαρακτηριστεί υγρές. Το μεγαλύτερο μέρος των διαθέσιμων ποσοτήτων του γλυκού νερού, αποτελείται από επιφανειακά ύδατα και εκτιμάται μεταξύ 80-85%. Σε ετήσια κλίμακα η συνολική ζήτηση νερού ισούται με 7.907 εκ.μ³, με το μεγαλύτερο ποσοστό 70- 85% να διατίθεται για την άρδευση γεωργικών εκτάσεων, 11% να καταναλώνεται για την εξυπηρέτηση των υδρευτικών αναγκών, περίπου 2% να χρησιμοποιείται για βιομηχανικούς σκοπούς και 1% να καταναλώνεται από τον τομέα της ενέργειας. [OECD Environmental Performance Reviews, Greece, 2009]

Σύμφωνα με το Νόμο 1738/87 περί διαχείρισης των υδάτων, η Κρήτη ως το μεγαλύτερο και πολυπληθέστερο νησί της Ελλάδας, εντάσσεται σε ένα ανεξάρτητο υδατικό σύστημα περιλαμβάνοντας την ομώνυμη μεγαλόνησο καθώς και τα μικρότερα νησιά (Γαύδος, Δία, Κουφονήσι κλπ.). Η συνολική έκταση του νησιού ανέρχεται στα 8.303 km², η οποία αντιπροσωπεύει μόλις το 6.3% της ελλαδικής έκτασης. Κατά την τελευταία απογραφή του 2021 ο πληθυσμός ανέρχεται σε 617.360 κατοίκους, ενώ η ετήσια κατανάλωση νερού για τα έτη 2000-2001 είχε εκτιμηθεί στα 371.81 εκ.μ³, ποσότητα η οποία καλύπτεται επαρκώς από τους υδάτινους πόρους της νήσου. Αναλυτικότερα η ζήτηση για άρδευση ήταν περίπου 302.06 εκ.μ³ ενώ για ύδρευση και λοιπές χρήσης 69.75 εκ.μ³. [Β.Περλέρους κ.α.,2004]

Η παρουσία και κυκλοφορία των υπόγειων και επιφανειακών υδάτων αποτελεί αντικείμενο μελέτης και πρόβλεψης με σκοπό την καλύτερη διαχείριση τους. Για το σκοπό αυτό υπάρχουν διάφορα είδη μοντέλων τα οποία προσπαθούν να προσομοιώσουν την κυκλική κίνηση του νερού, μερικά από αυτά αναφέρονται παρακάτω.

2.2 Εφαρμογές περιβαλλοντικών μοντέλων

Στο φυσικό περιβάλλον λαμβάνουν χώρα διαφορά είδη φαινομένων φυσικών ή μη, η συμπεριφορά των οποίων μπορεί και αποδίδεται με μαθηματικές σχέσεις, οι οποίες συνήθως προκύπτουν υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις. Κατανοώντας λοιπόν τις φυσικές διεργασίες του περιβάλλοντος μέσω συγκεκριμένων παρατηρήσεων και πειραμάτων, συνυπολογίζοντας το μέγεθος των επιπτώσεων που προκαλούνται από την ανθρωπογενή

δραστηριότητα, αναπτύσσονται μαθηματικά μοντέλα για την πρόβλεψη, την περιγραφή ή ακόμη και επίλυση προβλημάτων πολύπλοκων συστημάτων της καθημερινότητας.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι μοντέλων όπως τα εννοιολογικά, τα στατιστικά, τα μοντέλα φυσικής βάσης ή αλλού τύπου, ωστόσο σε όλες τις περιπτώσεις, αποτελούν αφαίρεση ή απλοποίηση του πρωτοτύπου συστήματος. Τα μαθηματικά μοντέλα προσπαθούν να αναπαραστήσουν τις διαδικασίες που συμβαίνουν στον πραγματικό κόσμο, στο χώρο και το χρόνο. Οι διαδικασίες που μετασχηματίζουν το περιβάλλον μέσα στο χρόνο περιγράφονται κυρίως από δυναμικά μοντέλα που βασίζονται σε διαφορικές εξισώσεις. Η ακρίβεια προσέγγισης των πραγματικών συνθηκών βελτιώνεται όσο αυξάνεται η πολυπλοκότητα των σχέσεων μεταξύ των παραμέτρων, καθώς με αυτό τον τρόπο παρουσιάζονται με μεγαλύτερη ακρίβεια τα αποτελέσματα του μοντέλου. Σε πολλές περιπτώσεις, αυτά τα μοντέλα αναπτύσσονται επειδή δεν υπάρχουν επαρκή δεδομένα πεδίου ή εργαστηρίου για τη δοκιμή υποθέσεων ή την αξιολόγηση στρατηγικών διαχείρισης [Starfield & Cundall, 1988]

Τα μοντέλα περιβάλλοντος ορίζονται ως εξής:

- Είναι εργαλεία που ποσοτικοποιούν, περιγράφουν ή είναι ανάλογα φαινομένων χημικής, φυσικής ή βιολογικής φύσης.
- Είναι μαθηματικές περιγραφές του τρόπου λειτουργίας των φυσικών συστημάτων. [Νικολαΐδης Νικόλαος, 2013]

Σκοπός της περιβαλλοντικής προσομοίωσης είναι η κατανόηση της μεταφοράς των χημικών ουσιών ποσοτικοποιώντας τις αντιδράσεις, την εξέλιξη και την κίνηση τους. Η κατανόηση του τρόπου με τον οποίο αποκρίνεται το σύστημα. Η αποτίμηση των επιπτώσεων των χημικών ρύπων σε υδρόβιους οργανισμούς ή ανθρώπους σε διάφορες χρονικές περιόδους (παρελθόν-παρόν-μέλλον). Και η πρόβλεψη της συμπεριφοράς καθώς και των συνθηκών, ποικίλων σεναρίων ή εναλλακτικών διαχειριστικών πρακτικών του μέλλοντος. [Schnoor, 2017]

2.3 Υδρολογικά μοντέλα

2.3.1 Γενικά – Ορισμοί

Ο όρος υδρολογικό μοντέλο είναι μια απλοποιημένη αναπαράσταση του συστήματος του πραγματικού κόσμου, που έχει στόχο να προβλέψει τον τρόπο λειτουργίας του συστήματος και να κατανοήσει τις διάφορες υδρολογικές διεργασίες. Κατά βάση το βέλτιστο μοντέλο είναι αυτό που παρέχει αποτελέσματα όσο πιο κοντά στα πραγματικά δεδομένα χρησιμοποιώντας όσο το δυνατόν μικρότερο αριθμό παραμέτρων και μικρότερη πολυπλοκότητα. [Sorooshian et al., 2008] Ένα μοντέλο αποτελείται από διάφορες παραμέτρους, για παράδειγμα ένα μοντέλο απορροής ορίζεται ως ένα σύνολο από εξισώσεις που εκτιμά την απορροή συναρτήσει ορισμένων παραμέτρων οι οποίες χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν την λεκάνη της περιοχής. Δυο από τις σημαντικότερες μεταβλητές που χρειάζονται είναι τα βροχομετρικά δεδομένα και η περιοχή αποστράγγισης. Ο συνδυασμός αυτών με τα δεδομένα του πεδίου (τοπογραφικά, υδρολογικά, γεωμορφολογικά, κ.α.) και με αντιπροσωπευτικές υποθέσεις των φυσικών μηχανισμών του υδρολογικού κύκλου, οδηγεί στην ποσοτική εκτίμηση των υδρολογικών

μεταβλητών-διεργασιών σε κατάλληλη χωρική και χρονική κλίμακα, έχοντας πρακτικές εφαρμογές.

Τα μοντέλα μπορούν είτε να περιγράψουν μεμονωμένα γεγονότα, δηλαδή συγκεκριμένα αποτελέσματα μιας χρονικής περιόδου ενδιαφέροντος όπως τη μορφή ενός υδρογραφήματος ή την ένταση ενός πλημμυρικού φαινομένου, είτε την πρόοδο του υδρολογικού κύκλου σε βάθος χρόνου μιας οριοθετημένης περιοχής όπως μιας λεκάνης απορροής, όπου η διαδικασία διέπτετε με βάση κάποιο φυσικό υπόβαθρο και με τη χρήση εργαλείων προσομοίωσης.

Τα υδρολογικά μοντέλα έχουν δυο πεδία εφαρμογής και αφορούν είτε τη λεκάνη απορροής είτε τον υδροφορέα. Ως αποτέλεσμα αυτού προκύπτει η ανάγκη ανάπτυξης ξεχωριστών μοντέλων εξαιτίας των διαφορετικών πρακτικών διαχείρισης καθώς και των διαφορετικών χωροχρονικών εξελίξεων των φυσικών διεργασιών του συστήματος.

Κάποια από τα σημαντικότερα πεδία εφαρμογής των υδρολογικών μοντέλων είναι η αξιολόγηση του δυναμικού στα υπόγεια και επιφανειακά ύδατα σε θέσεις ενδιαφέροντος, όπως σε σχεδιαστικές και διαχειριστικές μελέτες συστημάτων υδατικών πόρων. Η εκτίμηση πλημμυρικών φαινομένων για την κατασκευή υδρογραφημάτων ή τον υπολογισμό των παροχών αιχμής. Πρόγνωση της κλίμακας υδρολογικών φαινομένων σε πραγματικό χρόνο για τη διαχείριση πλημμυρικού ρίσκου ή τη διαχείριση υδατικών πόρων. Εκτίμηση των επιπτώσεων που προκύπτουν λόγω τροποποιήσεων στη διαχείριση των υδατικών πόρων, των χαρακτηριστικών της λεκάνης (αστικοποίηση, αποψίλωση, διευθετήσεις ποταμών) ή των χρήσεων γης. [Α.Ευστρατιάδης & Ν.Μαμάσης, 2010]

Με την πάροδο των ετών αναπτύχθηκαν και εφαρμόστηκαν ποικίλα μοντέλα προσομοίωσης του επιφανειακού και υπόγειου υδρολογικού συστήματος, κάποια από αυτά αναφέρονται ακολούθως.

- **HSPF** (Hydrological Simulation Program-Fortran) (Johanson et al., 1980, Bicknell et al., 2001) Η προσομοίωση της υδρολογίας γίνεται για μεγάλες χρονικές περιόδους ακόμη και σε περιοχές αστικής ζώνης.
- **ETD** (Enhanced Trickle –Down Model) (Schoor et al., 1984, Nikolaidis et al., 1988) Υπάρχει η δυνατότητα να περιγράφουν όλοι οι διαφορετικοί τύποι υδρολογικών συστημάτων με τη χρήση ενός συστήματος περιγραφής που αφορά την απορροή και την αποστράγγιση του νερού στο σύστημα.
- **TOPOFLOW** (Pecham et al., 2007) Αποτελεί ένα χωρικά κατανεμημένο μοντέλο που μελετά τις φυσικές διαδικασίες σε συνδυασμό με τις κλιματικές μεταβολές.
- **ANUGA** (Geoscience Australia and the Australian National University): Είναι ένα δυσδιάστατο υδροδυναμικό μοντέλο που χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη υδρολογικών καταστροφών.
- **MODFLOW** (Modular Three-Dimensional Finite –Difference Ground –Water Flow Model) (Harbaugh and McDonald, 1996) Είναι ένα λογισμικό υπολογιστικής μοντελοποίησης της υπόγειας ροής νερού σε τρεις διαστάσεις. Βασίζεται στη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών και προσομοιώνει την υπόγεια ροή του νερού και την επίδραση των διαφορών παραμέτρων όπως της υδραυλικής αγωγιμότητάς, την

ποσότητα των υδάτων στην επιφάνεια του εδάφους, την επίδραση των αντλήσεων κ.α.

- **ANSWERS-Continuous** (Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation –Continuous) (Beasley et al., 1980) Είναι ένα υδρολογικό μοντέλο που χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη των αστάθμητων πηγών ρύπανσης στο περιβάλλον. Χρησιμοποιείται κυρίως για την αξιολόγηση των επιπτώσεων της ανθρώπινης δραστηριότητας στην ποιότητα των υδάτων στις αγροτικές και αστικές περιοχές.
- **AGNPS** (Agricultural Non-Point Source Pollution Model) (Young et al., 1987)
- **ARNO** Todini (1988,1996) Χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της παροχής και της υδρολογικής ισορροπίας σε λεκάνες απορροής, με βάση την πρόβλεψη της βροχόπτωσης και της απορροής από το έδαφος. (Τυπικό υδρολογικό μοντέλο της Ιταλίας)
- **MIKE-SHE** (European Hydrological System Model) (Refsgaard, 1997, Demetriou and Punthakey, 1998)
- **SURFER** (Golden Software Inc., 1989)
- **TMWAM** (Turkey-Mersey Watershed Acidification Model) (Lam et al., 1988, Bobba and Lam, 1990)
- **ILWAS** (Integrated Lake –Watershed Acidification Study) (Chen et al., 1984)
- **RAINS** (Regional Air Pollution Information and Simulation) (Kamari, 1985)
- **SWAT** (Soil and Water Assessment Tool) (Arnold et al., 1998, Neitsch et al., 2002, Gassman et al., 2007, Oeurng et al., 2011) Το μοντέλο χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση της υδρολογικής και βιολογικής διαδικασίας σε λεκάνες απορροής. Γίνεται χρήση αυτού κυρίως σε περιπτώσεις ανάπτυξης στρατηγικών διαχείρισης των υδατικών πόρων και στη βελτίωση της ποιότητας του νερού.

Η διαδικασία που ακολουθείται για τη δημιουργία ενός μοντέλου είναι η εξής:

- Επιλογή του τρόπου προσομοίωσης (Conceptualization)
- Κωδικοποίηση-Δημιουργία μοντέλου
- Βαθμονόμηση μοντέλου (Calibration)
- Επαλήθευση μοντέλου (Verification)
- Αξιοπιστία μοντέλου (Validation)
- Ανάλυση ευαισθησίας (Sensitivity analysis)

- Ανάλυση αβεβαιότητας (Uncertainty analysis)
- Εφαρμογή μελλοντικών σεναρίων στο μοντέλο

Τα στάδια της βαθμονόμησης, της επαλήθευσης και της αξιολόγησης είναι τα κρισιμότερα καθώς το μοντέλο τότε χαρακτηρίζεται για την εγκυρότητα λειτουργίας του και τη δυνατότάτά πρόβλεψης, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. [Chong-yu Xu, 2002]

2.3.2 Κατηγορίες Μοντέλων

Η κατηγοριοποίηση των υδρολογικών μοντέλων βασίζεται σε διάφορους παράγοντες όπως βάση του πεδίου εφαρμογής τους, την κλίμακά τους στο χώρο, τη μαθηματική τους δομή, την χρονική διακριτότητα και το βαθμό προσέγγισης των φυσικών διεργασιών.

Κατηγοριοποίηση με βάση την κλίμακα περιοχής μελέτης

Τα υδρολογικά μοντέλα υπολογίζουν την επιφανειακή απορροή που καταλήγει στην έξοδο της λεκάνης ανάλογα με την χωρική τους διαφοροποίηση είτε άμεσα (αδιαμέριστα μοντέλα) είτε έμμεσα από τον υπολογισμό της παραγωγής της από επιμέρους χωρικές ενότητες (ημικατανεμημένα ή πλήρως κατανεμημένα μοντέλα). Βασικό χαρακτηριστικό των υδρολογικών μοντέλων αποτελεί η χωρική διακριτότητα, όπου με βάση αυτή καθορίζονται τέσσερις κατηγορίες όπως φαίνονται παρακάτω. [Ajami et al., 2004]

❖ Αδιαμέριστα ή συγκεντρωτικά μοντέλα (lumped):

Οι χρονοσειρές της υδρολογικής φόρτισης αναφέρονται σε όλη την έκταση της λεκάνης απορροής, με τις τιμές των παραμέτρων να θεωρούνται ενιαίες σε όλη την έκταση της. Τα μοντέλα αυτά βάση των κυρίων μεταβλητών του υδατικού ισοζυγίου εκτιμούν την απορροή στην έξοδο των λεκανών.

❖ Ημικατανεμημένα μοντέλα (semi-distributed):

Για την μελέτη της υδρολογικής κατάστασης μιας λεκάνης απαιτείται η διαίρεση της σε διακριτές περιοχές. Σε κάθε περιοχή αντιστοιχεί μια διαφορετική χρονοσειρά φόρτισης αποτελούμενη από ποσότητες υδάτων που εισέρχονται στην περιοχή σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα. Επίσης σε κάθε περιοχή μπορεί να ισχύουν διαφορετικές τιμές παραμέτρων οι οποίες πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στην ανάλυση της λεκάνης και στην πρόβλεψη της ροής των υδάτων στην έξοδο της. Η συνολική απορροή της λεκάνης υπολογίζεται συναρτήσει των επιμέρους χωρικών ενοτήτων.

❖ Ημιδιαμέριστα μοντέλα (semi-lumped):

Είναι μια μορφή ανάμεσα στην αδιαμέριστη και ημικατανεμημένη σχηματοποίηση, όπου οι χωρικές ενότητες λαμβάνουν διαφορετικές τιμές φορτίσεων, όμως οι τιμές των παραμέτρων είναι κοινές για όλες τις ενότητες.

❖ Κατανεμημένα μοντέλα (distributed):

Η διαίρεση του φυσικού συστήματος γίνεται σε μικρότερης κλίμακας χωρικές ενότητες γνωστές και ως κύτταρα, οι οποίες επιτρέπουν την αναπαράσταση του συστήματος με μεγαλύτερη ακρίβεια. Κάθε κύτταρο αντιστοιχεί σε ένα ομοιογενές και ισότροπο εδαφικό τμήμα με διαφορετικές χρονοσειρές φόρτισης και διαφορετικές τιμές παραμέτρων ανάλογα με τις τοπικές συνθήκες. Ο υπολογισμός της απορροής γίνεται με τη χρήση φυσικών εξισώσεων.

Κατηγοριοποίηση με βάση τη χρονική διακριτότητα

Η χρονική διακριτότητα έχει άμεση εξάρτηση με τον σκοπό ενός μοντέλου. Για παράδειγμα μοντέλα που έχουν σκοπό την διαχείριση των υδάτων, συνήθως χρησιμοποιείται η μηνιαία καθώς σπανιότερα και ημερήσια κλίμακα. Αντίθετα για πλημμυρικά μοντέλα ή για συνδυαστικά υδρολογικά-υδροδυναμικά μοντέλα χρησιμοποιούνται δεδομένα μικρότερης της ημερήσιας κλίμακας. Είναι προφανές, πως όσο πιο λεπτότερη είναι η χρονική κλίμακα, τόσο μικρότερη είναι η διακριτότητα των μεταβλητών εισόδου του μοντέλου. Αξίζει να σημειωθεί πως σε τέτοιες κλίμακες χρειάζεται κατάλληλη μετρητική υποδομή στην περιοχή μελέτης σε συνεχή χρόνο.

Ακόμη η επιφανειακή ολοκλήρωση των σημειακών υδρολογικών χρονομέτρων αποτελεί μια αρκετά απαιτητική διαδικασία, καθώς το σύνολο των δεδομένων πρέπει να είναι σωστά χρονισμένο προκειμένου να αποτυπωθούν οι πραγματικοί χρόνοι υστέρησης. Έτσι με βάση την χρονική διακριτότητα τα μοντέλα μπορούν να αναλυθούν σε δυο κατηγορίες:

❖ Συνεχή μοντέλα

Λειτουργούν σε συνεχή χρόνο με τη χρήση ημερήσιων, ετήσιων κ.α. χρονοσειρών. Εξαρτάται από το σκοπό εφαρμογής του μοντέλου.

❖ Μοντέλα μεμονωμένου υδρολογικού γεγονότος

Γίνεται με σκοπό την περιγραφή και ανάλυση ενός μεμονωμένου γεγονότος, όπως ένα επεισόδιο βροχόπτωσης ή την αιχμή μια πλημμύρας.

Κατηγοριοποίηση με βάση τη στοχαστική δομή των μεταβλητών του μοντέλου

Υπάρχουν δυο κατηγορίες υδρολογικών μοντέλων που μπορούν να διακριθούν ανάλογα με το βαθμό στοχαστικότητάς τους.

❖ Στοχαστικά μοντέλα

Τα στοχαστικά υδρολογικά μοντέλα αναπαριστούν το φυσικό σύστημα μέσω ενός ισοδύναμου στατιστικού συστήματος, για το οποίο ορίζονται στατιστικές παράμετροι. Τέτοια μοντέλα που έχουν ως βάση την θεωρία των στοχαστικών ανελίξεων και τουλάχιστον μια από τις μεταβλητές του συστήματος έχει στοχαστική δομή, λαμβάνοντας υπόψη την χρονική αλληλεπίδραση.

Τα μοντέλα στοχαστικής δομής δεν παρέχουν μόνο ακριβείς προβλέψεις για τις μεταβλητές που αναπαριστούν, αλλά καταγράφουν επίσης το βαθμό αβεβαιότητας των προβλέψεων. Από τα παρατηρούμενα δείγματα αναπαράγονται στατιστικά μεγέθη που εξασφαλίζουν τη

στατιστική αξιοπιστία των αποτελεσμάτων ενώ παράλληλα διατηρούν μια στοιχειώδη συνέπεια με τα φυσικά χαρακτηριστικά του συστήματος. [Salas et al. 1980].

❖ Προσδιοριστικά μοντέλα

Τα προσδιοριστικά μοντέλα προσομοιώνουν τη συμπεριφορά των φυσικών μηχανισμών και η λειτουργία τους βασίζεται στον ακριβή προσδιορισμό των φυσικών παραμέτρων του υδρολογικού συστήματος. Αυτού του τύπου η προσομοίωση καλείται παραμετρική. Ακόμη αξίζει να σημειωθεί πως δεν υπάρχει στοχαστική δομή στις μεταβλητές των προσδιοριστικών μοντέλων, για το λόγο αυτό χαρακτηρίζονται ως αξιόπιστα μοντέλα αναπαράστασης της υδρολογικής συμπεριφοράς, παρέχοντας μονοσήμαντες προβλέψεις για την απόκριση του συστήματος σε διάφορες συνθήκες.

Κατηγοριοποίηση με βάση τον βαθμό προσέγγισης των φυσικών διεργασιών

Τα υδρολογικά μοντέλα κατηγοριοποιούνται ανάλογα τον βαθμό προσέγγισης των φυσικών διεργασιών στις παρακάτω κατηγορίες:

❖ Μοντέλα φυσικής βάσης (physically-based)

Πρόκειται για κατανεμημένα μοντέλα μικρής κλίμακας, θεμελιωμένα στους φυσικούς νομούς κίνησης του νερού της κορεσμένης και ακόρεστης ζώνης, καθώς και σε σχέσεις που προέρχονται από εμπειρική παρατήρηση και ανάλυση δεδομένων σε περιοχές ενδιαφέροντος μέσα από έρευνες πειραματικών λεκανών.

Τα μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εκτιμήσουν τα μεγέθη που σχετίζονται με τις ροές νερού σε λεκάνες στις οποίες δεν γίνεται να ληφθούν μετρήσεις, διότι δεν βασίζονται σε μετρήσεις πιεζομετρίας και παροχής. Το μειονέκτημα τους είναι ότι χρειάζονται δεδομένα από μικρή χωρική κλίμακα εξαιτίας της πυκνής διαμέρισης κι έτσι τα εκτιμώμενα μεγέθη είναι πολλά. Τα μοντέλα φυσικής βάσης αναπτύσσονται κυρίως για εξειδικευμένες εκτιμήσεις και δεν χρησιμοποιούνται για την πρόγνωση απορροών. [Sivapalan et al. 2003]

❖ Εννοιολογικά μοντέλα (conceptual)

Η κυκλοφορία του νερού στο φυσικό περιβάλλον αναπαρίσταται με τη χρήση ιδεατών στοιχείων, κάθε ένα από τα οποία αναπαριστά μια βασική διαδικασία του υδρολογικού κύκλου. Το πλεονέκτημα είναι ότι μπορούν να περιγράψουν πολύπλοκους φυσικούς μηχανισμούς σε χωρικές ενότητες με ανομοιογένεια, χρησιμοποιώντας απλά και αντιπροσωπευτικά στοιχεία χωρίς την ύπαρξη πλήρους φυσικής ερμηνείας.

Έτσι τα συγκεκριμένα μοντέλα προκειμένου να αποφύγουν προβλήματα που προκύπτουν λόγω κλίμακας από τα μοντέλα φυσικής βάσης, χρησιμοποιούν υποθετικούς όγκους ελέγχου στους οποίους ολοκληρώνονται οι ροές του συστήματος καθώς και οι μεταβλητές καταστάσεις σε σχέση με το χώρο και το χρόνο. [Nash & Sutcliffe, 1970]

❖ Μοντέλα Μαύρου Κουτιού (Black Box)

Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται δεν έχουν άμεση σχέση με τις φυσικές διεργασίες του συστήματος. Οι διεργασίες που ελέγχουν τη σχέση μεταξύ της εισροής (κατακρήμνισης) και της εκροής (απορροής, εξάτμισης) σε μια συγκεκριμένη διαδικασία δεν είναι γνωστές. Ένα από τα πλεονεκτήματα του μοντέλου βασίζεται στη δυνατότητα αυτού να μην αναπαριστά τις ενδιάμεσες διεργασίες του υδρολογικού κύκλου και κατ' αυτόν τον τρόπο να δίνεται η

δυνατότητα υπολογισμού σύνθετων και πολύπλοκων συστημάτων αποφεύγοντας την υπολογιστική φόρτιση.



2.4 Βαθμονόμηση και Επαλήθευση Υδρολογικού Μοντέλου

2.4.1 Ορισμός Βαθμονόμησης

Ως βαθμονόμηση της υδρολογίας ενός μοντέλου ορίζεται η συστηματική διαδικασία κατά την οποία οι τιμές των παραμέτρων προσαρμόζονται έτσι, ώστε οι προσομοιωμένες αποκρίσεις να προσεγγίζουν τις πραγματικές (παρατηρούμενες) τιμές κατά το βέλτιστο δυνατό.

Μια επιτυχημένη βαθμονόμηση, προϋποθέτει συνεχή λήψη δεδομένων για μια επαρκή χρονική περίοδο στην οποία θα πρέπει να είναι διαθέσιμες συστηματικές μετρήσεις των αποκρίσεων του συστήματος προκειμένου στη συνέχεια να μπορούν να συγκριθούν τα ιστορικά με τα προσομοιωμένα δεδομένα. Στη βαθμονόμηση οι χρησιμοποιούμενες παράμετροι δεν είναι πάντοτε γνωστές, κάτι το οποίο οδηγεί ουσιαστικά στην αναζήτηση της βελτιστοποίησης της μαθηματικής δομής του μοντέλου ώστε η φυσική συμπεριφορά του υδρολογικού συστήματος να προσεγγίζεται καλύτερα.

Εφόσον ολοκληρωθεί η προσομοίωση του μοντέλου, γίνεται μια στατιστική σύγκριση των αποκρίσεων του μοντέλου με τις αντίστοιχες παρατηρούμενες του φυσικού συστήματος. Στην περίπτωση που οι αποκλίσεις βρίσκονται εντός του αποδεκτού ορίου ανοχής, τότε το μοντέλο θεωρείται βαθμονομημένο ενώ σε αντίθετη περίπτωση θα πρέπει με συστηματικές αλλαγές των παραμέτρων και των συντελεστών να επιτευχθεί μια αποδεκτή προσομοίωση. Βέβαια είναι σημαντικό οι τιμές των παραμέτρων που αλλάζουν να βρίσκονται μέσα στα πλαίσια των πειραματικά προσδιοριζόμενων τιμών που υπάρχουν στη βιβλιογραφία. [Schnoor, 2017]

Ωστόσο η διαδικασία της βαθμονόμησης αποτελεί αντικείμενο προβληματισμού κι αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα μοντέλα με την πάροδο των ετών έχοντας ως στόχο την επίτευξη ακριβέστερων αποτελεσμάτων, εξελίσσονται σε πολύπλοκότερα συστήματα, απαιτώντας ως είσοδο μεγαλύτερο όγκο παραμέτρων που χρειάζεται να οριστούν.

2.4.2 Είδη βαθμονόμησης

Ένα μοντέλο μπορεί να βαθμονομηθεί με τρεις διαφορετικές μεθόδους. Από αυτούς οι δύο αφορούν την εμπειρική και αυτόματη βαθμονόμηση ενώ από τον συνδυασμό τους προκύπτει και η ημιαυτόματη βαθμονόμηση.

Εμπειρική βαθμονόμηση

Η εμπειρική βαθμονόμηση γίνεται με χειροκίνητο τρόπο, που σημαίνει πως δεν εκτελούνται κάποιοι είδους αυστηρές ή συστηματικές διαδικασίες και ο χρήστης είναι αυτός που επιλεγεί τον κατάλληλο συνδυασμό παραμέτρων, σε συμφωνία με τη διεθνή βιβλιογραφία, την κρίση και την εμπειρία του ή τυχόν πειραματικές μελέτες που αφορούν την συγκεκριμένη περιοχή μελέτης. Τελικά η επιλογή των παραμέτρων γίνεται έπειτα από την αξιολόγηση της προσαρμογής του μοντέλου με τα ιστορικά δεδομένα, σύμφωνα με τα γραφήματα και τους στατιστικούς δείκτες που θα προκύψουν. Παρόλο που η διαδικασία της εμπειρικής βαθμονόμησης χαρακτηρίζεται ως υποκειμενική (καθώς η επιλογή των παραμέτρων δεν προκύπτει από την χρήση κάποιου αριθμητικού κριτηρίου σφάλματος) και ιδιαίτερα χρονοβόρα (κυρίως σε περιπτώσεις με υψηλό αριθμό παραμέτρων) συνηθίζεται να χρησιμοποιείται ακόμα στις μέρες μας από ορισμένο πλήθος υδρολόγων. Το κυριότερο πλεονέκτημα της μεθόδου βασίζεται στη δυνατότητα που παρέχεται στο χρήστη να επιλεγεί τις τιμές των παραμέτρων, σύμφωνα με την υδρολογική εμπειρία του, οδηγώντας έτσι σε πιο ρεαλιστικά και αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα παραμετροποίησης των φυσικών χαρακτηριστικών της υδρολογικής λεκάνης.

Αυτόματη βαθμονόμηση

Κατά τη διαδικασία της αυτόματης βαθμονόμησης ενός υδρολογικού μοντέλου, περιγράφεται ένα κριτήριο καλής προσαρμογής των προσομοιωμένων αποκρίσεων του μοντέλου σε σχέση με τις παρατηρούμενες αποκρίσεις της περιοχής. Αυτό το κριτήριο αποτελεί την αντικειμενική συνάρτηση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης μη γραμμικής μορφής, η οποία έχει ως μεταβλητές ελέγχου τις παραμέτρους του μοντέλου. Κατά τη βελτιστοποίηση, επιλέγονται οι τιμές των παραμέτρων που ελαχιστοποιούν το κριτήριο προσαρμογής, με στόχο τη βελτίωση της ακρίβειας και της αξιοπιστίας του μοντέλου. Η ακρίβεια, η αξιοπιστία, η ελαχιστοποίηση του ανθρωπίνου λάθους καθώς και η δυνατότητα εφαρμογής του σε μεγάλη κλίμακα είναι κάποια από τα βασικότερα πλεονεκτήματά της μεθόδου. Ως μειονέκτημα της μπορεί να θεωρηθεί η έλλειψη ανεξαρτησίας των αποτελεσμάτων από το μετρώ προσαρμογής, το οποίο μπορεί να οδηγήσει στη μεταφορά των σφαλμάτων από τα δεδομένα και άλλες πηγές αβεβαιότητας στα αποτελέσματα. Λόγω των παραπάνω ένα υδρολογικό μοντέλο μπορεί να φαίνεται πως έχει ικανοποιητική προσαρμογή στις τιμές των μετρήσεων ωστόσο ενδέχεται να λειτουργεί σαν μαύρο κουτί, δηλαδή οι παράμετροι να μην έχουν κάποιο φυσικό νόημα και πιθανότατα να μην έχουν τη δυνατότητα να αναπαράγουν όλο το επιθυμητό εύρος των αποκρίσεων του συστήματος που εξετάζεται.

Ημιαυτόματη βαθμονόμηση

Η ημιαυτόματη βαθμονόμηση προκύπτει από τον συνδυασμό των δυο παραπάνω ειδών βαθμονόμησης δίνοντας έτσι τη δυνατότητα στο χρήστη να ελέγχει τη διαδικασία και να παρεμβαίνει όταν αυτό είναι απαραίτητο προκειμένου να μεταβάλει τα κριτήρια και τις παραδοχές του προβλήματος κατευθύνοντας την στο επιθυμητό αποτέλεσμα. Στόχος της μεθόδου είναι ο συνδυασμός των πλεονεκτημάτων της εμπειρικής και αυτόματης βαθμονόμησης, εξασφαλίζοντας την εγκυρότητα της προσομοίωσης και την επίτευξη του βέλτιστου αποτελέσματος σε σύντομη χρονική περίοδο. Κατ' αυτόν τον τρόπο η ημιαυτόματη βαθμονόμηση κρίνεται αρκετά αντιπροσωπευτική, ειδικότερα σε περιπτώσεις πολυπλοκότερων σχημάτων όπου η αβεβαιότητα εκτίμησης των παραμέτρων είναι μεγαλύτερη, εξαιτίας της παρουσίας πολλαπλών ισοδυνάμων καλών λύσεων. [Boyle et al., 2000· Mazi et al., 2004· Efstratiadis et al., 2008]

Ανεξαρτήτως από την επιλογή της μεθόδου που θα χρησιμοποιηθεί από τον εκάστοτε χρήστη, η αξιοπιστία της βαθμονόμησης ενός υδρολογικού μοντέλου προκύπτει όταν:

- ❖ Το μοντέλο έχει αρκετά ικανοποιητική προγνωστική ικανότητα και μπορεί να αναπαράξει τις αποκρίσεις μιας υδρολογικής λεκάνης σε ολόκληρο το μήκος του ποταμού, είτε κατά τη διάρκεια ξηρών είτε υγρών χρονικών περιόδων με ικανοποιητική ακρίβεια.
- ❖ Οι βέλτιστοι παράμετροι του μοντέλου που επιλέχθηκαν έχουν φυσική σημασία, που σημαίνει πως συμπίπτουν ή τουλάχιστον προσεγγίζουν σε ικανοποιητικό βαθμό τα χαρακτηριστικά του φυσικού συστήματος.

Εφόσον το μοντέλο ικανοποιεί τις παραπάνω προϋποθέσεις, επιβεβαιώνεται πως μπορεί να αναπαραστήσει τους υδρολογικούς μηχανισμούς της λεκάνης με τρόπο αντιπροσωπευτικό, χωρίς να υπάρχουν περιορισμοί στο διάστημα που υπάρχουν παρατηρούμενες - ιστορικές παρατηρήσεις και δεδομένα και έτσι το πεδίο εφαρμογής του μπορεί να επεκταθεί για οποιοδήποτε χρονικό ορίζοντα στο παρελθόν ή μέλλον. Κατά τον τρόπο αυτόν τα παρατηρούμενα δεδομένα των φυσικών αποκρίσεων που απαιτούνται για τον προσδιορισμό των παραμετρικών τιμών του μοντέλου, χρειάζεται να είναι πλήρως αντιπροσωπευτικά της συμπεριφοράς της λεκάνης.

Για τη διαδικασία επαλήθευσης (validation) του μοντέλου χρησιμοποιείται ένα δείγμα παρατηρήσεων, το οποίο δεν είχε ληφθεί υπόψιν κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης και αντιστοιχεί σε διαφορετικό χρονικό διάστημα ή διαφορετικό σημείο του ποταμού εντός της λεκάνης, το οποίο τελικά θα συγκριθεί με το βαθμονομημένο δείγμα. [Refsgaard, 1997] Η παραπάνω διαδικασία ελέγχου κρίνει την τελική επιτυχία της προσομοίωσης καθώς και την αξιοπιστία του μοντέλου, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα εφαρμογής εναλλακτικών διαχειριστικών πρακτικών σε διάφορα τμήματα της λεκάνης.

2.4.3 Ορισμός επαλήθευσης

Ως επαλήθευση (validation) ενός μοντέλου ορίζουμε τη διαδικασία αξιολόγησης - ελέγχου του μοντέλου, με σκοπό να εξεταστεί η ορθότητα και η αντιπροσωπευτικότητα της αναπαράστασης του συστήματος που προσομοιώνει.

Σε κάποιες περιπτώσεις τα μοντέλα ενδέχεται να αποτύχουν κι αυτό οφείλεται κυρίως στους παρακάτω λόγους.

- Ύπαρξη τυχόν σφαλμάτων στα δεδομένα που λήφθηκαν για την βαθμονόμηση του μοντέλου
- Δεδομένα συγκεκριμένων χρονικών περιόδων, όπου οι φυσικές υδρολογικές διεργασίες δεν επαρκούν για τον προσδιορισμό όλων των παραμέτρων.
- Μη ικανοποιητική ή λανθασμένη απεικόνιση των υδρολογικών της λεκάνης του μοντέλου. [Chong-yu Xu, 2002]

Η επαλήθευση υδρολογικών μοντέλων γίνεται συνήθως για ένα σύνολο βέλτιστων παραμέτρων, που έχουν προκύψει από το στάδιο της βαθμονόμησης, με στόχο τον έλεγχο της προσαρμογής τους για μια διαφορετική χρονική περίοδο (συνήθως έπεται της βαθμονομημένης) κατά τη διάρκεια της οποίας είναι επίσης διαθέσιμα δεδομένα μετρήσεων των φορτίσεων και αποκρίσεων της λεκάνης. Αυτός ο τρόπος προσέγγισης γίνεται γνωστός και ως διαχωρισμός δεδομένων, με τις συνθήκες του συστήματος να διατηρούνται σταθερές καθ' όλη τη χρονική διάρκεια ελέγχου του μοντέλου (των περιόδων βαθμονόμησης και επαλήθευσης). Σε περίπτωση μεταβολής των παραμέτρων αυτών του συστήματος κατά τη διάρκεια του χρόνου, το μοντέλο χάνει την επιχειρησιακή χρησιμότητά του.

Ωστόσο πρέπει να αναφερθεί πως μια πετυχημένη βαθμονόμηση δεν σημαίνει απαραίτητα επιτυχή επαλήθευση του μοντέλου. Για παράδειγμα σε ορισμένες περιπτώσεις ενώ κατά την περίοδο βαθμονόμησης τα δεδομένα του μοντέλου προσαρμόζονται πολύ καλά με τα παρατηρούμενα δεδομένα του πεδίου, κατά το στάδιο της επαλήθευσης παρατηρείται μικρότερος βαθμός προσαρμογής. Έτσι παρόλο που έχει βρεθεί ένα ικανό σύνολο παραμέτρων, που αναπαράγει με αποδεκτό τρόπο τις αποκρίσεις της περιοχής για την περίοδο βαθμονόμησης, το μοντέλο αδυνατεί να αποδώσει εξίσου ικανοποιητικά αποτελέσματα για διαφορετικές χρονικές περιόδους. Αυτού του είδους η συμπεριφορά αναφέρεται και ως υπερπροσαρμογή του μοντέλου.

Ως υπερπροσαρμογή ορίζεται η υπερβολική προσαρμογή του μοντέλου στα ιστορικά δεδομένα, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να προβλέψει με ορθό τρόπο την τιμή της εξαρτημένης μεταβλητής για οποιοδήποτε άλλο άγνωστο δεδομένο. Αυτό συμβαίνει στην περίπτωση που το μοντέλο διεξάγει απλώς μαθηματικούς υπολογισμούς, χωρίς εμφανή φυσική σημασία, δηλαδή συμπεριφέρεται ως “μαύρο κουτί”. Με αυτόν τον τρόπο λειτουργεί αψογά κατά τη διάρκεια της περιόδου βαθμονόμησης, αλλά αποτυγχάνει να αναπαράγει ακριβή αποτελέσματα σε άλλες χρονικές περιόδους ή για εναλλακτικές χωρικές ενότητες. Ένας τρόπος αντιμετώπισης είναι η κανονικοποίηση του μοντέλου.

Ωστόσο ορισμένο πλήθος ερευνητών υποστηρίζει πως η πρακτική διαχωρισμού των δεδομένων δεν θεωρείται ιδιαίτερα αξιόπιστη για την αξιολόγηση της προγνωστικότητας ενός μοντέλου. [Klemes, 1986] Ακόμα χαρακτηρίζουν την πρακτική ως μη ικανοποιητικό “τεστ” αξιολόγησης μοντέλων κατανεμημένης μορφής. [Refsgaard & Knudsen, 1996]

2.5 Το Μοντέλο SWAT

2.5.1 Το SWAT γενικά

Το μοντέλο SWAT (Soil & Water Assessment Tool) είναι ένα εργαλείο που δημιουργήθηκε για την Υπηρεσία Αγροτικών Ερευνών των ΗΠΑ από τον καθηγητή Jeff Arnold, στο Texas (USDA-ARS, Agricultural Research Service). Στόχος του είναι κάνοντας χρήση των υδρομετεωρολογικών πληροφοριών να προβλέψει τον τρόπο με τον οποίο οι μέθοδοι διαχείρισης της γης θα επηρεάσουν το νερό, το έδαφος και τα μεταφερόμενα θρεπτικά συστατικά σε λεκάνες απορροής μεγάλου μήκους. Λόγω της ικανότητας του προσομοίωσης πολύπλοκων λεκανών με διάφορους τύπους εδαφών και πρακτικών διαχείρισης, έγινε γνωστό σε διεθνές επίπεδο. [Arnold & Fohrer, 2005· Gassman et al., 2007]

Ανήκει στην κατηγορία των κατανεμημένων υδρολογικών μοντέλων λεκάνης απορροής, φυσικής βάσης (physically-based) και συνεχούς χρόνου, λειτουργώντας με ημερήσιο βήμα. [Arnold et al., 1998· Neitsch et al., 2001] Το μοντέλο με βάση τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά του εδάφους έχει τη δυνατότητα να οριοθετεί υδροκρίτες όπως και λεκάνες απορροής και να περιγράφει τη χωρική ποικιλομορφία της υδρολογικής λεκάνης διαιρώντας τη σε μικρότερες ενότητες, πολύ πιο ευέλικτες στη διαχείριση. Μέσα σε μια λεκάνη απορροής μπορούν να προσομοιωθούν διάφορες φυσικές διεργασίες όπως η πορεία των φυτοφάρμακων, των νιτρικών, των ιζημάτων ή του μικροβιακού φορτίου, η διάβρωση που προξενείτε από τη ροή του νερού, γεωργικές πρακτικές και πολλών ακόμη.

Με το μοντέλο SWAT επιτυγχάνεται η προσομοίωση των βροχοπτώσεων καθώς και της χιονόπτωσης έως και 10 κλίμακες υψομέτρου. Ακόμη λόγω του επαναπροσδιορισμού των εισαχθέντων δεδομένων δίνεται η δυνατότητα προσομοίωσης των κλιματικών αλλαγών και πρόβλεψης των μελλοντικών κλιματικών συνθηκών.

Ο στόχος του μοντέλου είναι να προβλέψει τις μακροπρόθεσμες επιπτώσεις σε μεγάλες λεκάνες διαχείρισης καθώς επίσης και το χρονοδιάγραμμα των γεωργικών πρακτικών εντός ενός έτους (π.χ. ημερομηνίες φύτευσης και συγκομιδής, άρδευση, λιπάσματα και ρυθμοί εφαρμογής φυτοφαρμάκων κ.α.). Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κλίμακα λεκάνης απορροής για την προσομοίωση του κύκλου του νερού και των θρεπτικών ουσιών σε τοπία των οποίων η κυρίαρχη χρήση γης είναι η γεωργία. Ακόμα μπορεί να βοηθήσει στην αξιολόγηση της περιβαλλοντικής αποτελεσματικότητας των βέλτιστων πρακτικών διαχείρισης και εναλλακτικών πολιτικών διαχείρισης.

2.5.2 Δεδομένα Εισόδου

Για τη λειτουργία του μοντέλου SWAT απαιτούνται πληροφορίες-δεδομένα τα οποία χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισαγωγής για την δημιουργία του. Στα δεδομένα εισόδου περιλαμβάνονται η εδαφική μορφολογία δηλαδή το ανάγλυφο της περιοχής, οι τύποι εδαφών ιδιαίτερα της ακόρεστης ζώνης καθώς και οι χρονοσειρές των ημερήσιων δεδομένων βροχόπτωσης και θερμοκρασίας για ολόκληρο το διάστημα της προσομοίωσης. Ακόμη δεδομένα σχετικής υγρασίας, ταχύτητας ανέμου και ηλιακής ακτινοβολίας μπορεί να

απαιτηθούν ανάλογα από τη μέθοδο προσομοίωσης της χρονοσειράς δυνητικής εξατμισοδιαπνοής. [Gassman et al., 2007]

Από τα ημερήσια δεδομένα θερμοκρασίας, υπολογίζεται ο μέσος ορός τους για τον καθορισμό των κατακρημνισμάτων ως βροχόπτωση ή ως χιονόπτωση, ενώ οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές ημερήσιων θερμοκρασιών χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας του εδάφους και του νερού σε ημερήσια βάση. Έτσι το μοντέλο καταγράφει τα δεδομένα εισόδου που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση του κλίματος της περιοχής μελέτης, χρησιμοποιώντας 13 μηνιαίες κλιματικές μεταβλητές οι οποίες δημιουργήθηκαν μετά από χρόνια παρακολούθηση κλιματικών δεδομένων και βρίσκονται καταγεγραμμένες σε πίνακες εντός του μοντέλου.

2.5.3 Δεδομένα Εξόδου

Το μοντέλο SWAT μετά το πέρας της εισαγωγής δεδομένων και το simulation run, παρέχει στο χρήστη πρόσβαση σε αρχεία παραμέτρων του υδρολογικού κύκλου του νερού της λεκάνης απορροής που διερευνάται.

Υπάρχουν τέσσερα βασικά αρχεία εξόδου.

1. Αρχείο output.std (Standard output file): Είναι ένα τυπικό αρχείο σύνοψης εξόδου μέσα από το οποίο ο χρήστης αποκτά μια βασική ιδέα του υδατικού ισοζυγίου, των θρεπτικών (N,P) και των φερτών στην έξοδο της υπολεκάνης. Μέσω αυτού επιτυγχάνεται ο πρώτος έλεγχος της ορθότητας των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.
2. Αρχείο output.rch (Main channel output file): Είναι ένα αρχείο εξόδου κυρίου καναλιού το οποίο περιέχει συνοπτικές πληροφορίες για κάθε υδατόρεμα στην λεκάνη απορροής, τόσο στην έξοδο όσο και στην είσοδο της (Qin-Qout). Τα στοιχεία αυτά μπορεί να είναι ποιοτικά ή ποσοτικά. Αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα αρχεία, καθώς από αυτό λήφθηκαν οι παροχές εξόδου των υπολεκάνων, βάση των οποίων έγινε μετέπειτα η βαθμονόμηση του μοντέλου.
3. Αρχείο output.sub (subbasin output file): Το αρχείο αυτό περιέχει συγκεντρωτικές πληροφορίες για τις παραμέτρους κάθε υπολεκάνης που συνεισφέρουν στον υδρολογικό κύκλο. Κάποια σημαντικά δεδομένα που περιέχονται στο αρχείο είναι η επιφανειακή απορροή, τα υπόγεια νερά και η εξατμισοδιαπνοή.
4. Αρχείο output.hru (Hydrological response units): Είναι ένα αρχείο σύνοψης των αποτελεσμάτων εξόδου κάθε υδρολογικής μονάδας απόκρισης, παρόμοιο με το output.sub. Από τα δεδομένα που παρέχει φαίνεται κατά πόσο οι διάφορες χρήσεις γης και οι διάφοροι τύποι εδαφών επηρεάζουν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

2.5.4 Μεθοδολογία Μοντέλου

Ως πρωταρχικός στόχος του μοντέλου SWAT είναι να προβλέψει την υδρολογική συμπεριφορά της περιοχής μελέτης και την κίνηση των ρευμάτων με ακρίβεια σε κάθε υδρολογική μονάδα της λεκάνης. Οι διαδικασίες προσομοίωσης υπολεκάνης του SWAT περιλαμβάνουν κύρια στοιχεία όπως η υδρολογία, το κλίμα, η διάβρωση, η θερμοκρασία του εδάφους, η ανάπτυξη καλλιεργειών και η γεωργική διαχείριση.

Για υπολογιστικούς σκοπούς, η λεκάνη απορροής του μοντέλου διαχωρίζεται σε υπολεκάνες συνδυάζοντας την μορφολογία της περιοχής με τα υδατορεύματα, έτσι ώστε κάθε τμήμα του υδρογραφικού δικτύου να ανήκει σε κάθε υπολεκάνη. Όταν οι κατηγορίες χρήσεων γης, εδάφους και κλίσεων ορίζονται, κάθε υπολεκάνη χωρίζεται περαιτέρω σε υδρολογικές μονάδες απόκρισης (HRUs).

Κάθε HRU αποτελείται από μοναδική κατηγορία κάλυψης γης, εδάφους και κλίσης. Για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής σε διάφορους τύπους εδαφών και χρήσεων γης η λεκάνη χωρίζεται σε υδρολογικές μονάδες απόκρισης HRUs. Ο υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής μπορεί να πραγματοποιηθεί με τρεις διαφορετικές μεθόδους ανάλογα τα δεδομένα που διατίθενται. Την μέθοδο Thornthwaite η οποία υπολογίζει την εξατμισοδιαπνοή με βάση τη μέση μηνιαία θερμοκρασία, την μέθοδο Hargreaves η οποία συνήθως χρησιμοποιείται σε περιοχές που δεν διατίθενται μετρήσεις ακτινοβολίας και απαιτούνται δεδομένα θερμοκρασιών και ακτινοβολίας στο εξωτερικό της ατμοσφαιράς και τέλος την μέθοδο Penman-Monteith που χρησιμοποιεί μόνο δεδομένα ακτινοβολίας.

Ο υπολογισμός της τελικής απορροής προκύπτει από το άθροισμα των επιμέρους παροχών των υδρολογικών μονάδων απόκρισης που έχουν βρεθεί. Αυτές περιλαμβάνουν την επιφανειακή, την ενδιάμεση και την υπόγεια απορροή. Έτσι με αυτού του είδους τη μοντελοποίηση, επιτυγχάνεται ο έλεγχος της πραγματικής κίνησης του νερού στο έδαφος και αξιολογούνται οι ποσότητες του νερού, των ιζημάτων, των θρεπτικών συστατικών καθώς επίσης και των φυτοφάρμακων τα οποία εν τέλει εισέρχονται στο κύριο υδατόρευμα.

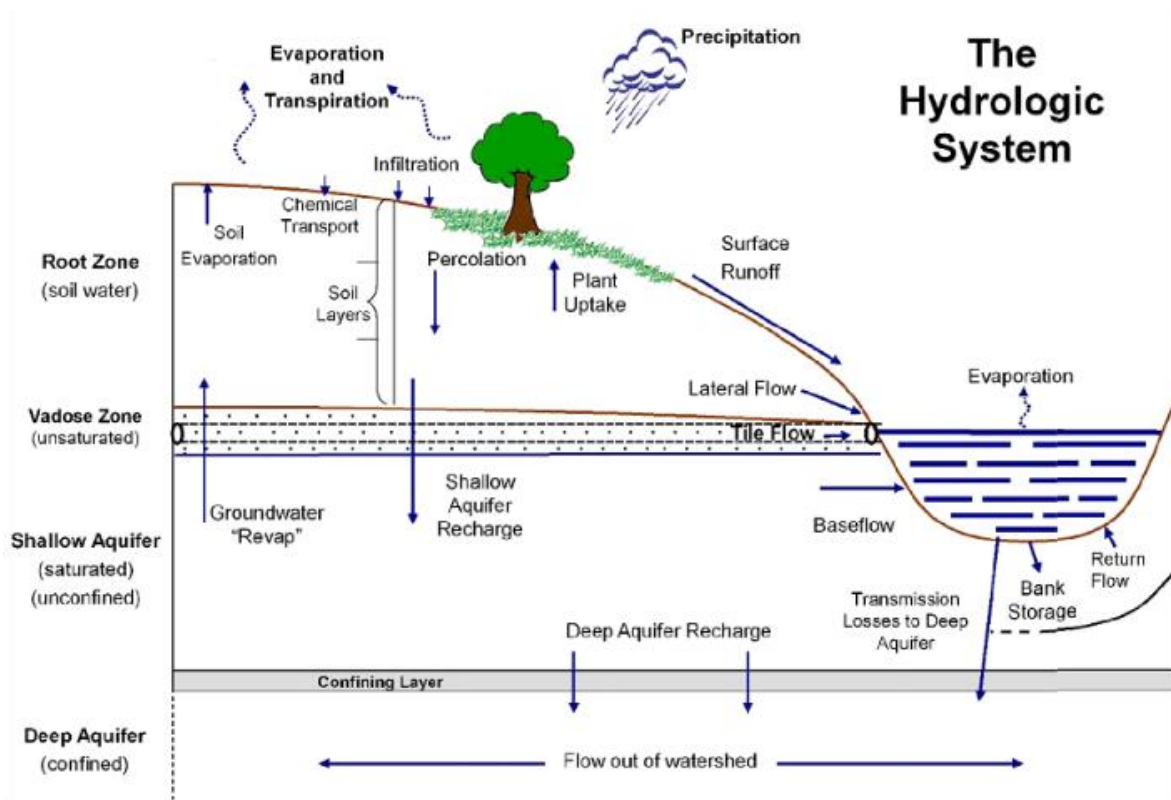
2.5.5 Υδρολογικός κύκλος στο SWAT

Ο υδρολογικός κύκλος είναι σημαντικός καθώς μέσω αυτού γίνεται εφικτή η κατανόηση της υδρολογίας μιας περιοχής και ο προσδιορισμός της ποσότητας του νερού, των φερτών υλών και των θρεπτικών στοιχείων που παρασύρονται και καταλήγουν στο υδρογραφικό δίκτυο. Απαραίτητη προϋπόθεση λοιπόν αποτελούν οι ημερήσιες χρονοσειρές βροχόπτωσης και χιονόπτωσης που δέχεται το SWAT σε μορφή κειμένου. Κατά τη διάρκεια μιας βροχόπτωσης, νερό πέφτει πάνω στο φύλλωμα των φυτών ή στο έδαφος συνεχίζοντας την κίνηση του μέσα σε αυτό, ενώ κατά τη χιονόπτωση στρώσεις χιονιού σχηματίζονται στο έδαφος και λιώνουν σταδιακά όταν η θερμοκρασία εδάφους το επιτρέψει, μέσω της διαδικασίας της τήξης. Το χιόνι που λιώνει συμπεριφέρεται με αντίστοιχο τρόπο όπως και η βροχόπτωση. [Neitsch et al., 2005]

Σε κάθε υπολεκάνη αντιστοιχίζεται η ποσότητα του νερού που καταγράφηκε από τον πλησιέστερο μετεωρολογικό σταθμό (μεταξύ των σταθμών που έχουν οριστεί από τον χρήστη) στο κέντρο βάρους της. Η ποσότητα αυτή του νερού είτε διηθείται στο έδαφος, είτε απορρέει επιφανειακά. Για τον προσδιορισμό της ποσότητας νερού που απορρέει υπάρχει ο συντελεστής απορροής, ο οποίος εξαρτάται από τον τύπο των εδαφών και τις χρήσεις

γης. Ο προσδιορισμός του γίνεται βάση της μεθόδου αριθμών καμπύλης SCS-CN, η οποία αποτελεί τυπικό εργαλείο για την εκτίμησή μιας απόκρισης βροχοπτώσεων-απορροών και αναπτύχθηκε από την Soil Conservation Service το 1972.

Η ποσότητα του νερού που απορρέει στην επιφάνεια του εδάφους οδηγείται στους υδάτινους αποδέκτες (π.χ. ποταμιά, λίμνες) συμβάλλοντας στην αύξηση της παροχής τους, ενώ η ποσότητα του νερού που διηθείται μετακινείται κατακόρυφα ή οριζόντια μέσα στο έδαφος σε τρεις κυρίες στρώσεις. Η πρώτη αφορά την ακόρεστη ζώνη όπου το νερό απορροφάται από τη βλάστηση και υστερά διαπνέεται, υπόκειται σε εδαφική εξάτμιση ή μέσω της υποδερμικής ροής καταλήγει στους υδάτινους αποδέκτες. Η δεύτερη αφορά την ποσότητα νερού που καταλήγει στον αβαθή-επιφανειακό υδροφόρα, η φόρτιση του οποίου τροφοδοτείται από διηθούμενα κατακρημνίσματα, λίμνες, ταμειυτήρες κ.α. Η εκφόρτιση του γίνεται είτε με τη διαδικασία της υπόγειας ροής τροφοδοτώντας τους υδάτινους αποδέκτες, είτε με το φαινόμενο της επανεξάτμισης “*renaporation*” όπου το νερό μετακινείται από τον βαθύ υδροφόρο στην υπερκείμενη ακόρεστη ζώνη, ιδίως σε περιόδους ξηρασίας. Την τρίτη στρώση αποτελεί ο βαθύς υδροφόρας, όπου το νερό θεωρείται πως χάνεται από το σύστημα.



Εικόνα 2: Schematic of the hydrologic cycle and SWAT simulation processes [Neitsch et al., 2011].

Παρακάτω παρουσιάζεται η γενική εξίσωση που περιγράφει τον υδρολογικό κύκλο για κάθε μονάδα υδρολογικής απόκρισης.

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

Όπου:

SW_t : Η υγρασία του εδάφους που παρατηρείται στην τελική φάση της ημέρας t (σε mm H_2O)

SW_0 : Η υγρασία του εδάφους στην αρχική φάση την χρονική στιγμή 0 (σε mm H_2O)

R_{day} : Η ποσότητα των κατακρημνισμάτων κατά τη διάρκεια της ημέρας (σε mm H_2O)

Q_{surf} : Η ποσότητα του νερού που απορρέει επιφανειακά κατά τη διάρκεια μιας ημέρας i (σε mm H_2O)

E_a : Η ημερήσια εξατμισοδιαπνοή την ημέρα i (σε mm H_2O)

W_{seep} : Το νερό που εξέρχεται από την ζώνη ριζοστρώματος και εισέρχεται στη ζώνη vadose κατά τη διάρκεια της ημέρας i (σε mm H_2O)

Q_{gw} : Η ποσότητα του νερού που ρέει υπόγεια κατά τη διάρκεια της ημέρας i (σε mm H_2O)

2.5.6 Υδρολογικό ισοζύγιο

Στο μοντέλο συνυπολογίζονται όλες οι υδρολογικές διεργασίες στις οποίες συμπεριλαμβάνονται η επιφανειακή απορροή του κύκλου και η μεταφορά των θρεπτικών, η ανάπτυξη των φυτών, οι δραστηριότητες που συνδέονται με τη χρήση της γης όπως και η διαχείριση των υδατικών πόρων σε επίπεδο υπολεκάνης. Οι λεκάνες απορροής όπως αναφέρθηκε και στο υποκεφάλαιο 2.5.4 «Μεθοδολογία μοντέλου» διαιρούνται σε επιμέρους υπολεκάνες κι έπειτα σε υδρολογικές μονάδες απόκρισης HRUs κάθε μια χαρακτηριζόμενες από ένα μοναδικό συνδυασμό εδάφους, κλίσης και χρήσεων γης, έτσι ώστε μέσω του σταδιακού υπολογισμού να προσδιορίσουν τη συνολική απορροή.

Κατά την διαδικασία προσδιορισμού της απορροής λαμβάνονται υπόψη τα ποσοστά συγκράτησης των κατακρημνισμάτων από την βλάστηση, της άρδευσης μεταξύ των επιφανειακών απορροών και των διηθήσεων, τα χιονιά που λιώνουν, η ανακατανομή του νερού μέσα στα διάφορα εδαφικά προφίλ, η εξατμισοδιαπνοή, η απορροή στο υπέδαφος και η ροή από τους ρηχούς υδροφόρους. Τελικά τα δεδομένα αυτά συναθροίζονται για κάθε υδρολογική μονάδα και ενσωματώνονται στο υδρογραφικό δίκτυο με στόχο την ακριβέστερη προσομοίωση της πραγματικής κίνησης του νερού στο έδαφος. Για την ενσωμάτωση των ροών στο δίκτυο χρησιμοποιούνται οι παρακάτω μέθοδοι.

- Μέθοδος αποθήκευσης μεταβλητού ρυθμού [Williams, 1969]
- Μέθοδος Muskingum [Neitsch et al., 2005]

Ακόμα από κάθε υδρολογική μονάδα, γίνεται άθροιση της συγκέντρωσης ή του φορτίου του ιζήματος, των θρεπτικών, των φυτοφάρμακων όπως και των βακτηρίων με σκοπό την τελική απόθεση τους στην έξοδο της λεκάνης. Η διόδευση αυτών γίνεται μέσω

καναλιών, υγροτόπων, ρεζερβουάρ ή λιμνάζοντων νερών καταλήγοντας στον τελικό αποδεκτή.

Για τον υπολογισμό των τελικών αποτελεσμάτων σε επίπεδο λεκάνης απορροής, εκτιμούνται σημειακές πηγές ή τυχόν πιέσεις που μπορεί να διαταράσσουν τον κύκλο εξαιτίας της ύπαρξης αστικών περιοχών στην ευρύτερη ζώνη. [Gassman et al., 2007b]

2.5.7 Διαχειριστικές πρακτικές

Το μοντέλο SWAT δημιουργήθηκε από την υπηρεσία αγροτικής έρευνας του Υπουργείου Γεωργίας των Ηνωμένων Πολιτειών. Μέσω του μοντέλου μπορούν να προσομοιωθούν με ακρίβεια πολλές διαχειριστικές πρακτικές της αγροτικής γης όπως η άρδευση, η σπορά, η λίπανση, η βόσκηση, η συγκομιδή, η λίπανση και πολλές άλλες.

2.6 Φράγματα

2.6.1 Γενικά

Ως φράγμα μπορεί να οριστεί το τεχνητό εμπόδιο που κατασκευάζεται εγκάρσια κατά μήκος ενός φυσικού ρεύματος (ποταμού), έχοντας ως στόχο τον σχηματισμό μιας κλειστής κοιλότητας, δίνοντας την δυνατότητα αποθήκευσης του νερού, παροχέτευσής του για διάφορους σκοπούς, ή ανάσχεση της παροχής του για αποτροπή πλημμυρικών φαινομένων. Ολοκληρώνοντας την κατασκευή τους, ανάντη αυτών δημιουργούνται τεράστιες δεξαμενές που ονομάζονται ταμιευτήρες ή λεκάνες κατάκλισης.

Η ανάγκη για κατασκευή τους προέκυψε όταν ήταν αναγκαία η αξιοποίηση των επιφανειακών υδάτων για την καταστολή πλημμυρών, παροχή νερού για δραστηριότητες όπως άρδευση, ανθρώπινη κατανάλωση, βιομηχανική χρήση, υδατοκαλλιέργειες, ναυσιπλοΐα ακόμα και παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας. Τα φράγματα αποτελούν σημαντική υποδομή κάθε έθνους και εξυπηρετούν πολλούς οικονομικούς, γεωργικούς, περιβαλλοντικούς και ψυχαγωγικούς σκοπούς. Για την εκπλήρωση των αναφερόμενων σκοπών, υψηλός αριθμός φραγμάτων άνω των 100 μέτρων κατασκευάζονται σε όλο τον κόσμο, όπου μερικά είναι υπό κατασκευή και άλλα βρίσκονται ήδη στη φάση σχεδιασμού. [S. Bhattarai, Y. Zhou, et al., 2016]

Για την μελέτη και κατασκευή ενός φράγματος, απαιτούνται εξειδικευμένες πρακτικές που ορίζονται από συγκεκριμένα νομοθετικά πλαίσια στην Ελλάδα και σε διεθνές επίπεδο και αφορούν τις διαδικασίες και τις τεχνικές προδιαγραφές που χρειάζεται να εφαρμόζονται. Η κατασκευή ενός έργου φράγματος είναι πολύπλοκη και εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως τις απαιτήσεις της χώρας και το διαθέσιμο κεφάλαιο, τη γεωλογική και υδρογεωλογική κατάσταση και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Τα φράγματα αν και έχουν πολλά πλεονεκτήματα, η ασφάλεια αυτών γίνεται όλο και πιο σημαντικό ζήτημα καθώς η αστοχία ενός φράγματος μπορεί να είναι ένα καταστροφικό γεγονός, με επικίνδυνες συνέπειες για την κατάντη περιοχή και το γύρω περιβάλλον.

2.6.2 Τύποι φραγμάτων

Υπάρχουν ποικίλοι τύποι φραγμάτων οι οποίοι κατασκευάζονται για διαφορετικούς σκοπούς. Έτσι ανάλογα με τον σκοπό κατασκευής τους, διακρίνονται σε φράγματα για την άρδευση καλλιεργήσιμων εκτάσεων (37%), παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (16%), κάλυψης υδρευτικών αναγκών (12%), πρόληψης κι ελέγχου πλημμυρικών φαινομένων (6%), δημιουργίας πάρκων αναψυχής (3%) και για άλλους σκοπούς (4%). Τα φράγματα αυτά ταξινομούνται σχετικά με τη χρήση τους, τον υδραυλικό σχεδιασμό, τα υλικά κατασκευής, την δομή και το σχέδιο. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιοι τύποι φραγμάτων.

Ταξινόμηση ως προς τον σκοπό χρήσης:

- Αποθήκευση νερού: δημιουργία ταμιευτήρων συγκέντρωσης νερού για μεταγενέστερη χρήση.
- Αντιπλημμυρικά: πρόληψη πλημμυρών, ελεγχόμενη παροχέτευση νερού.
- Συγκράτησης φερτών: τα νερά των ποταμών συνήθως περιέχουν μεγάλου και μικρού όγκου φερτά όπως ξυλά, πλαστικά, χώματα κ.α. Κύριος στόχος αυτού του τύπου φράγματος είναι τα συγκρατεί τα φερτά και να επιτρέπει τη διέλευση του νερού χωρίς να υπάρχει μεταφορά αυτών κατά μήκος του ποταμού.
- Φράγματα εκτροπής: αλλαγή της διεύθυνσης ροής του νερού για εξυπηρέτηση αναγκών συγκεκριμένου χώρου ή για εκτέλεση εργασιών. Διάκριση σε δυο κατηγορίες, μονιμά και προσωρινά.
- Φράγματα ανάσχεσης: μείωση της ταχύτητας ροής του νερού για τον εμπλουτισμό του υπογείου υδροφόρου ορίζοντα στοχεύοντας στην αντιμετώπιση προβλημάτων υφαλμύρωσης, λειψυδρίας κ.α. ή για την αποφυγή διαβρωτικών τάσεων λόγω χειμαρρικών φαινομένων.

Σύμφωνα με τα γεωμετρικά χαρακτηρίστηκα και τα υλικά κατασκευής, τα φράγματα χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

- Άκαμπτα: είναι κατασκευασμένα από σκυρόδεμα και διακρίνονται σε υποκατηγορίες, μερικά από αυτά είναι τα τοξωτά, βαρύτητας και αντηριδωτά.
- Εύκαμπτα: είναι κατασκευασμένα από γαιώδης ύλες (άργιλος, άμμος, κροκάλες) και βράχους. Κατηγοριοποιούνται σε χωμάτινα και λιθόρριπτα φράγματα.
- Μεικτά ή Σύνθετα: αποτελούν συνδυασμό των δυο παραπάνω και διακρίνονται σε βαρύτητας, αντηριδωτά και χωμάτινα.

Άκαμπτα φράγματα (rigid dams) από Σκυρόδεμα, ταξινομούνται ως προς τον τρόπο ανάληψης των φορτίων:

- Βαρύτητας: συμπαγή φράγματα κατασκευασμένα από άοπλο και από κυλινδρικό σκυρόδεμα. Σχεδιασμένα έτσι ώστε να αντισταθούν με το βάρος τους

στις υδροστατικές πιέσεις, στις ανώσεις, στις δυνάμεις ανατροπής και στις σεισμικές φορτίσεις.

- Αντηριδωτά: είναι κατασκευασμένα από μια πλακά από οπλισμένο σκυρόδεμα και στηρίζεται πάνω σε αντηρίδες μεταβλητού πλάτους. Υπάρχει η δυνατότητα μεταφοράς των υδροστατικών πιέσεων στις επιφάνειες θεμελίωσης και στη συνέχεια στα αντερείσματα έχοντας έτσι υψηλή αντοχή.
- Τοξωτά: είναι κατασκευασμένα από οπλισμένο ή ίσως κάποιες φορές από άοπλο σκυρόδεμα. Η κατασκευή γίνεται σε στενές κοιλάδες μεγάλων υψών, σχεδιασμένα με την κυρτή επιφάνεια προς τα ανάντη έτσι ώστε να υπάρχει μεταφορά των υδροστατικών πιέσεων στα αντερείσματα. Σε σχέση με τα φράγματα βαρύτητας εξοικονομείται έως και 70% σκυρόδεμα.
- Σύνθετα αντηριδωτά-τοξωτά: αποτελούν συνδυασμό των δυο παραπάνω.

Εύκαμπτα φράγματα-γεωφράγματα (embankment dams), ταξινομούνται ως προς τα υλικά κατασκευής:

- Χωμάτινα με αδιαπέρατο πυρήνα
- Λιθόρριπτα με αδιαπέρατο πυρήνα
- Λιθόρριπτα με ανάντη ασφαλικό τάπητα
- Λιθόρριπτα με ανάντη Πλάκα Σκυροδέματος ΛΑΠΣ
- Λιθόρριπτα με κεντρικό ασφαλικό διάφραγμα

Τα γεωφράγματα είναι τραπεζοειδούς διατομής και είναι κατασκευασμένα από υδροπερατό κυρίως σώμα συνήθως από χώμα ή λιθορριπή, κι έναν κεντρικό αδιαπέρατο πυρήνα (κεντρικά) ή ένα αδιαπέρατο στρώμα (σκυρόδεμα ή ασφαλική μεμβράνη) στην ανάντη πλευρά. Το πλεονέκτημα τους έγκειται στο γεγονός πως μπορούν να ακολουθήσουν σημαντικές παραμορφώσεις στον πυθμένα θεμελίωσης χωρίς να ρηγματώνεται το κυρίως σώμα του φράγματος καθώς συμπεριφέρονται ως ιξωδο-πλαστικά. Μειονεκτούν στο γεγονός ότι είναι υπερπηδητά και απαιτούν προστασία έναντι ολισθήσεων πρηνών, καθιζήσεων εδάφους, κυματισμού νερών, διέλευσης οχημάτων.

2.6.3 Υδρολογικός σχεδιασμός φραγμάτων

Παρακάτω ακολουθεί η ανάλυση του γενικευμένου ισοζυγίου σχεδιασμού ενός φράγματος με μηνιαίο χρονικό βήμα.

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

Όπου,

V_i : η ποσότητα του νερού που αποθηκεύεται κάθε μηνά i (m^3)

V_{i-1} : η ποσότητα του νερού που έχει αποθηκευτεί τον προηγούμενο μηνά (m^3)

Q_{in_i} : η ποσότητα του νερού που εισέρχεται στον ταμιευτήρα τον μήνα i (m^3)

P : η βροχόπτωση τον μήνα i (m)

A : το εμβαδόν της επιφάνειας του φράγματος (m²)

PET : η δυνητική εξατμισοδιαπνοή τον μήνα i (m)

Q_{eco} : οικολογική παροχή ή παροχή υπερχείλισης τον μήνα i (m³)

Q_{irr} : ο όγκος νερού που καταναλώνεται για την κάλυψη αρδευτικών ή υδρευτικών αναγκών τον μήνα i (m³)

Η σχεδίαση και κατασκευή φραγμάτων, έχει ως βασικό στόχο τη δυνατότητα αποθήκευσης όγκου νερού κατά τους υγρούς μήνες του χειμώνα όπου τα ποσοστά βροχόπτωσης αυξάνονται και υπάρχει περίσσεια ποσότητας νερού, με σκοπό την κάλυψη του ελλείματος κυρίως τους θερινούς ξηρούς μήνες όπου οι ανάγκες μεγιστοποιούνται. Η τελική χωρητικότητα του ταμιευτήρα σε νερό είναι μεγαλύτερη από αυτή του ωφέλιμου όγκου και αυτό γιατί με την πάροδο του χρόνου ένα τμήμα του ταμιευτήρα αναμένεται να καλυφθεί από φερτά υλικά (νεκρός όγκος ταμιευτήρα). Ακόμη για την πρόληψη πλημμυρών υπολογίζεται ένας όγκος ασφαλείας στο ανώτερο τμήμα του ταμιευτήρα (όγκος πλημμυράς ταμιευτήρα). Για την αξιολόγηση της αποδοτικότητας χρήσης του ταμιευτήρα υπολογίζεται ο βαθμός εκμετάλλευσης, ο οποίος αποτελεί ένα κλάσμα όγκων όπου στον αριθμητή βρίσκεται ο συνολικός όγκος που είναι δυνατόν να αποθηκεύσει το φράγμα και στον παρονομαστή ο συνολικός όγκος εισροής:

$$a = \frac{V_z}{V_e} = \frac{\text{Συνολικός όγκος ζήτησης}}{\text{Συνολικός όγκος εισροής}}$$

2.6.4 Επιπτώσεις των φραγμάτων

Με την κατασκευή ενός φράγματος γίνεται επέμβαση στην υδρολογική δίατα της λεκάνης απορροής, έχοντας θετικές και αρνητικές επιπτώσεις τόσο στο οικοσύστημα όσο και στη λειτουργία των φυσικών διεργασιών όπως και στο τοπίο. Οι επιπτώσεις των φραγμάτων στις φυσικές διεργασίες είναι αμεσότερες και σχετίζονται με τη ροή του νερού και τη μεταφορά των φερτών υλών στους ποταμούς

Υπάρχουν πολλοί παράγοντες για τον καθορισμό των επιπτώσεων ενός φράγματος. Ένας από αυτούς είναι ο τρόπος λειτουργίας και δομής του φράγματος καθώς ανάλογα με τις απαιτήσεις και τον σκοπό του έργου επηρεάζονται η ροή και η αλληλεπίδραση του νερού με το έδαφος και τα υπόγεια ύδατα. Παράλληλα κάποιοι άλλοι παράγοντες είναι οι ποσότητες των φερτών υλών που μπορούν να επηρεάσουν σε μεγάλο βαθμό την ποιότητα, την υγεία και την ασφάλεια των υδάτινων υδατοδρομίων, οι γεωμορφολογικοί περιορισμοί, το κλίμα, η τοπική υδρολογία, οι ιδιότητες του τοπικού διάκοσμου και γενικότερα οι διαδικασίες που ακολουθούνται.

Στόχος του σχεδιασμού ενός φράγματος είναι η αποθήκευση και εκτροπή του νερού, η μεταβολή της φυσικής κατανομής και ο συντονισμός της ροής των ποταμών προκειμένου να καλυφθούν οι απαιτήσεις της ευρύτερης περιοχής και να αποφευχθούν τυχόν καταστροφικά φαινόμενα. Αλλάζοντας έτσι τον τρόπο ροής κατάντη (ένταση, συγχρονισμός, συχνότητα κ.α.), επέρχεται και αλλαγή του υδατικού ιζήματος και των υπάρχουσων θρεπτικών, καθώς επίσης μεταβάλλεται η θερμοκρασία του ύδατος και η χημεία του.

Ωστόσο κατά τη φάση κατασκευής των ταμιευτήρων, γίνεται καταστροφή της χλωρίδας και στη συνέχεια πλημμυρίζουν τα χερσαία οικοσυστήματα, αναγκάζοντας την μετακίνηση των ζώων μεταβάλλοντας κατ' αυτόν τον τρόπο τη γενετική δεξαμενή της περιοχής. Ακόμα λόγω του ότι πολλά είδη επιλέγουν τις χαμηλότερες περιοχές των κοιλάδων όπου υπάρχουν ευνοϊκότερες συνθήκες επιβίωσης, η συγκέντρωση μεγάλων ποσοτήτων νερού σε ταμιευτήρες μεγάλης κλίμακας θα μπορούσε να προκαλέσει μεταβολές σε μοναδικούς βιότοπους άγριας φύσης και να οδηγήσει στην έκλειψη πληθυσμών απειλούμενων υπό εξαφάνιση ειδών.

Κατάντη του ποταμού μεταβάλλονται οι προ υπάρχουσες συνθήκες δημιουργώντας αλλαγές στην τοπική υδρολογία και στα κατάντη ρέοντα ύδατα, καθώς και στη μεταφορά φερτών υλών. Η μεταβολή αυτή ελλοχεύει τον κίνδυνο διάβρωσης του εδάφους και την μεταβολή του οικοσυστήματος που προϋπήρχε στην περιοχή. Έτσι με την τεχνίτη έμφραξη των ποταμών παρατηρούνται ορισμένες επιδράσεις στο υδρολογικό περιβάλλον. Αυτές περιλαμβάνουν την αύξηση του χρόνου παραμονής του νερού και της θερμοκρασίας του, τη μείωση της θολερότητας και την τροποποίηση της θερμικής στρωματοποίησης και κατ' επέκταση την πρωταρχική σε φυσική θέση παραγωγή, που επηρεάζει την ισορροπία των θρεπτικών ουσιών και του άνθρακα. [Friedl, G. and Wüest, A., 2002] [McGinnis et al., 2006]

Παράλληλα, η πανίδα της περιοχής κατάντη του φράγματος επηρεάζεται αρνητικά από τις διακύμανσης της ροής του ποταμού που φράσσεται και από τον όγκο φερτών υλών, καθώς με αυτόν τον τρόπο γίνεται δυσκολότερη η αναπαραγωγή των ψαριών. Αλλαγές στη θερμοκρασία του νερού, τη συγκέντρωση αλατιού και την περιεκτικότητα σε οξυγόνο μπορούν επίσης να επηρεάσουν την τοπική πανίδα. Προβλήματα μπορούν να δημιουργηθούν σε περιπτώσεις ρύπανσης του οικοσυστήματος από την εκφόρτιση τοξικών ουσιών, επηρεάζοντας την τροφική αλυσίδα κι έχοντας άμεσες επιπτώσεις σε ευαίσθητους οργανισμούς ή ακόμη και σε μεγαλύτερους οργανισμούς που διαβιούν στο οικοσύστημα, ιδιαίτερα σε περίπτωση που το υδατόρευμα αποτύχει να ανακάμψει.

Όσον αφορά την πολιτιστική κληρονομιά, με την κατασκευή ενός φράγματος μπορεί να καλυφθούν ολόκληροι χώροι αρχαιολογικού ενδιαφέροντος, χώροι ιστορικής μνήμης ή τοποθεσίες με σημαντική αξία από άποψη τοπογραφίας, γεωλογίας και αισθητικής. [Kondolf G.M., 1997] Ένα ακόμη πρόβλημα είναι η αισθητική όχληση σε περιπτώσεις εντόνων διακυμάνσεων της στάθμης του ταμιευτήρα αποκαλύπτοντας έτσι τη “νεκρή” ζώνη.

Ακόμη πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι υπάρχει η πιθανότητα να παρουσιαστούν μικροκλιματικές αλλαγές, οι οποίες συνδέονται με την υγρασία του αέρα, την ατμοσφαιρική θερμοκρασία (IEA 2000), την ατμοσφαιρική κυκλοφορία σε μεγάλη κλίμακα και τις αλλαγές στην τοπογραφία των περιοχών που προκαλούνται από την ύπαρξη μεγάλης και στάσιμης υδάτινης μάζας στην περιοχή. Τέλος υπάρχει η πιθανότητα αύξησης των ασθενειών λόγω της ύπαρξης στάσιμων νερών, όπως η ελονοσία, ο τύφος και η χολέρα. Ο κύριος τρόπος ελαχιστοποίησης των παραπάνω αρνητικών επιπτώσεων είναι η κατάλληλη σχεδίαση του φράγματος και η ορθή επιλογή της θέσης κατασκευής του.

Οι θετικές επιπτώσεις από την κατασκευή φραγμάτων ως έργα αξιοποίησης των υδατικών πόρων είναι πλείστες. Τα φράγματα συμβάλουν σε μεγάλο βαθμό στην εθνική οικονομία, καθώς καλύπτουν τις καταναλωτικές χρήσεις (ύδρευση – άρδευση) των ευρύτερων περιοχών, εξασφαλίζοντας πόσιμες ποσότητες νερού. Αυτό επιφέρει την αύξηση της αγροτικής παραγωγής και την εξοικονόμηση σημαντικής ποσότητας νερού άρδευσης, με αποτέλεσμα την βελτίωση των συνθηκών βιωσιμότητας του γεωργικού τομέα.

Βοηθούν στον έλεγχο των πλημμυρών ως προληπτικά μετρά αντιμετώπισης φαινομένων ανεξέλεγκτων απορροών. Άλλα πιθανά οφέλη που μπορούν να επέλθουν είναι η δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και παροχέτευσης αυτής στο ευρύτερο δίκτυο για την κάλυψη των αναγκών αστικών κέντρων, μειώνοντας έτσι την παραγωγή ρύπων από την κατανάλωση πόρων όπως του πετρελαίου, του λιθάνθρακα κ.α. για την παραγωγή αυτής. Τέλος από την ανάπτυξη της πανίδας του υδάτινου οικοσυστήματος που δημιουργείται, ενισχύεται ο τομέας της αλιείας λόγω της δυνατότητας ανάπτυξης ιχθυοκαλλιεργειών εντός του ταμιευτήρα του φράγματος και αυξάνεται η τουριστική ελκυστικότητα.

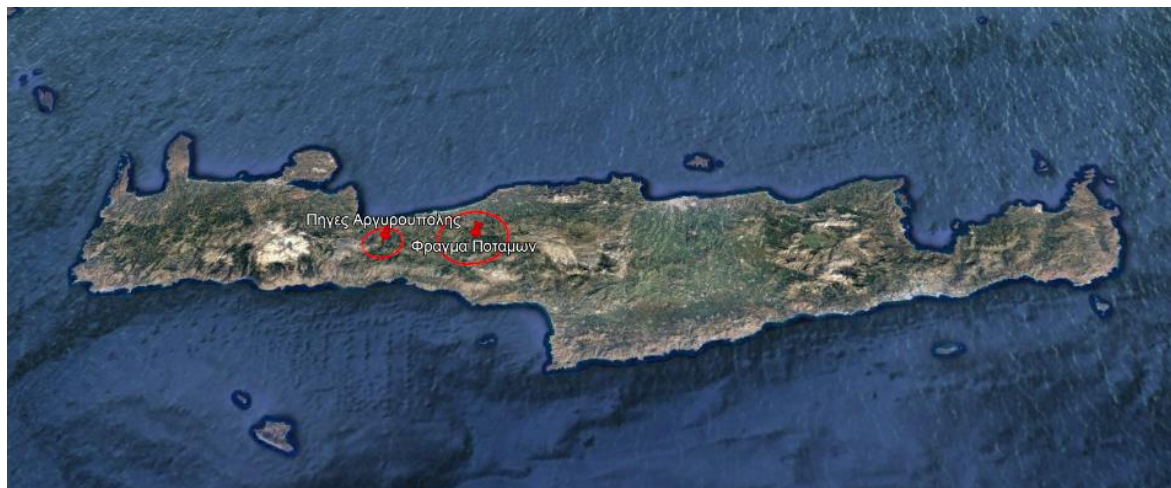


Εικόνα 3: Φράγμα Ποταμών (Πηγή: www.cretanbeaches.com)

3. Περιγραφή της περιοχής μελέτης

3.1 Γενικά

Η περιοχή που εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική εργασία αφορά το Φράγμα Ποταμών στην περιοχή του δήμου Αμαρίου και τις Καρστικές πηγές Αργυρούπολης, μια μικρή κωμόπολη της επαρχίας Ρεθύμνου. Οι παραπάνω περιοχές εντάσσονται γεωγραφικά στην Κρήτη και αποτελούν διοικητικά μέρη της περιφερειακής ενότητας του Ρέθυμνου. Στην εικόνα 4 προσδιορίζονται οι περιοχές μελέτης ως προς την ευρύτερη περιοχή.



Εικόνα 4: Περιοχή μελέτης Φράγματος Ποταμών & Πηγών Αργυρούπολης (Πηγή: Google Earth)

Η Αργυρούπολη είναι ένα χωριό της περιφερειακής ενότητας του Ρέθυμνου στην Κρήτη και βρίσκεται σε υψόμετρο περίπου 260 μέτρων, με τον πληθυσμό να ανέρχεται στους 400 κάτοικους σύμφωνα με την τελευταία απογραφή. Από το 1999 έως και το 2010 αποτελούσε έδρα του δημοτικού διαμερίσματος του δήμου Λαππαίων, σύμφωνα με την τότε διοικητική διαίρεση της Ελλάδας.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον στο χωριό της Αργυρούπολης παρουσιάζουν οι πηγές από όπου πηγάζει ο ποταμός Μουσελάς, το νερό των οποίων αναβλύζει από τη σπηλιά που βρίσκεται μέσα στο εκκλησάκι της Αγίας Δύναμης. Η ποσότητα του νερού είναι αρκετά μεγάλη και καλύπτει κάποιες από τις ανάγκες της πόλης του Ρεθύμνου. Η πηγή της Αργυρούπολης αναβλύζει περάνω της κοίτης του ποταμού σε υψόμετρο περίπου 200 μετρά και τροφοδοτείται από ανθρακικά πετρώματα του καλύμματος Τρίπολης που εμφανίζονται ανατολικά του ποταμού και του χωριού της Αργυρούπολης.

Ο Δήμος Αμαρίου ανήκει στην περιφέρεια Κρήτης και δημιουργήθηκε από την ένωση των προϋπαρχντων δήμων Κουρητών και Συβριτού. Βρίσκεται στα νοτιοανατολικά της Περιφερειακής Ενότητας Ρεθύμνου και περιβάλλεται από τα ορεινά συγκροτήματα του Κέντρου, Σάμιτου και Ψηλορείτη. Στα βόρεια συνορεύει με τον δήμο Ρεθύμνου και Μυλοποτάμου ενώ στα νότια με τους δήμους Φαιστού και Αγίου Βασιλείου. Η έκταση του δήμου ανέρχεται στα 278.85 km² και βάση της πιο πρόσφατης απογραφής ο πληθυσμός καταμετράται στους 5.915 κάτοικους. Οι δημότες της περιοχής απασχολούνται κυρίως με την κτηνοτροφία και την καλλιέργεια ελαιόδεντρων, αμπελιών, δημητριακών και ζωοτροφών.

3.1.1 Ιστορική αναδρομή διάθεσης ποσοτήτων νερού της πηγής Αργυρούπολης

Στις 5 Ιουλίου του 1984 στην ευρύτερη περιοχή υπογράφηκε ένα συμφωνητικό μεταξύ των χρηστών, (του ΤΟΕΒ Καστέλλου, της ΔΕΥΑΡ και των τότε Κοινοτήτων της περιοχής) και των Νομαρχιών Χανίων και Ρεθύμνης, προσαρμοσμένο στις εκάστοτε συνθήκες, στο οποίο λαμβανόταν υπόψη ότι το πρώτο έργο χρήσης νερού της Αργυρούπολης, ήταν αυτό του αρδευτικού του ΤΟΕΒ Καστέλλου. Ως πρώτη και κύρια πηγή απόληψης των ποσοτήτων νερού ελήφθη υπόψη η πηγή της Αργυρούπολης λόγω του προ υπάρχοντος από το 1952 αρδευτικού έργου ΤΕΒ Καστέλλου και των πλεονεκτημάτων που έχει αυτή όπως, οι μεγάλες παροχές, η καλή ποιότητα του νερού και το μεγάλο υψόμετρο ανάβλυσης.

Στην συμφωνία της διάθεσης των νερών της πηγής (μεικτή χρήση) ελήφθη ως μέση παροχή η ποσότητα των 220 L/s (λίτρων ανά δευτερόλεπτο) της οποίας έγινε η ακόλουθη κατανομή στους χρήστες.

- | | |
|---|--------|
| 1. Κοινότητα Αργυρούπολης για άρδευση | 25 L/s |
| 2. Κοινότητες Φυλακή, Κάστελλος, Κουρνάς κ.α.
(Ανάλογα με τον πληθυσμό τους) | 15 L/s |
| 3. Δήμος Ρεθύμνου ύδρευση (ΔΕΥΑΡ) | 80 L/s |
| 4. ΤΟΕΒ Καστέλλου άρδευση (3.200 στρέμματα) | 100L/s |
- (Για την αρδευτική περίοδο απαιτούνται 160 L/s, η ποσότητα αυτή (δηλαδή των 60L/s) καλύπτεται από πηγές της ευρύτερης περιοχής (Λίμνη Κουρνά)

➤ Στο σύνολο τους 220L/s

Στην περίπτωση μείωσης των παροχών προβλεπόταν αναλογική μείωση για τους χρήστες, ενώ σε περίπτωση αύξησης των παροχών η περίσσεια θα κάλυπτε τις ανάγκες στο ΤΟΕΒ Καστέλλου και παράλληλα θα υπήρχε αντίστοιχη μείωση των αντλήσεων από την λίμνη Κουρνά, που τροφοδοτούσε για την κάλυψη των αναγκών της περιοχής.

3.1.2 Ιστορική αναδρομή λειτουργίας του Ταμιευτήρα Αμαρίου

Το Υπουργείο Γεωργίας ανέλαβε τις πρώτες ενέργειες για την κατασκευή του ταμιευτήρα στους ποταμούς Αμαρίου. Αρχικά, στο έργο αποδόθηκε η ονομασία Φράγμα Πρασσών, παίρνοντας το όνομα του από τον οικισμό Πρασσές, ωστόσο στη συνέχεια έλαβε την σημερινή ονομασία Φράγμα Ποταμών. Οι πρώτες έρευνες στην περιοχή πραγματοποιήθηκαν το 1965-1967 όπου τοποθετήθηκαν αρχικά γεωτρήσεις στο στένωμα της έναρξης του πρασσανού φαραγγιού και στη θέση όπου έγινε και η κατασκευή του ταμιευτήρα. Επιπλέον με τη δράση του Υπουργείου Γεωργίας τοποθετήθηκε βροχομετρικός σταθμός επί του χωριού Βολεώνες και ξεκίνησε να λαμβάνει μηνιαίες μετρήσεις παροχής του ποταμού, μέσα στη λεκάνη απορροής του φράγματος.

Το 1984 ιδρύθηκε στο Ρέθυμνο ένα παράρτημα του Ο.Α.Δ.Υ.Κ. και οι έρευνες στην περιοχή μελέτης εντατικοποιήθηκαν. Το 1987 κατασκευάστηκαν πρόσθετες ερευνητικές γεωτρήσεις και ως ότου το 1991 ολοκληρώθηκαν 31 γεωτρήσεις τόσο στη θέση του φράγματος όσο και στην περιοχή του ταμιευτήρα. Ακόμη δημιουργήθηκαν 21 ερευνητικά

φρέατα για τη δειγματοληψία των υλικών που θα χρησιμοποιούνταν στην κατασκευή του φράγματος, πραγματοποιώντας παράλληλα και τις αναγκαίες εργαστηριακές δοκιμές.

Τον Οκτώβριο του 1988 υπογράφηκε η σύμβαση ΠΡΟΜΕΛΕΤΗΣ & ΟΡΙΣΤΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΠΟΤΑΜΩΝ ΡΕΘΥΜΝΗΣ με την εταιρία ΥΔΡΟΣΥΣΤΗΜΑ-ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ ΕΠΕ και το 1992 παραδόθηκε η μελέτη του έργου. Αφότου έλαβαν χώρα οι απαραίτητες διαδικασίες από τους αρμόδιους φορείς, τον Δεκέμβριο του 1995 υπεγράφη η εργολαβική σύμβαση και ξεκίνησε η υλοποίηση του έργου, το οποίο παραδόθηκε και τέθηκε σε λειτουργία το 2009.

3.1.3 Σκοπός κατασκευής-Τεχνικά χαρακτηριστικά φράγματος Ποταμών

Το Φράγμα Ποταμών στο νομό Ρεθύμνης, είναι ένα έργο κατασκευασμένο από τον Οργανισμό Ανάπτυξης Δυτικής Κρήτης και περιλαμβάνει μια σειρά από επιμέρους έργα τα οποία είχαν στόχο την εξασφάλιση μέσης ποσότητας όγκου νερού τα $22,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ και ο προϋπολογισμός ανερχόταν στα 51 εκ. ευρώ. Με την κατασκευή του έργου προβλεπόταν η κάλυψη των αρδευτικών αναγκών του κάμπου Ρεθύμνης και των περιχώρων του δήμου Αμαρίου καθώς και η κάλυψη των αναγκών ύδρευσης της ευρύτερης περιοχής. Σήμερα το ανάγλυφο της περιοχής σε συνδυασμό με την ύπαρξη των γειτονικών φαραγγιών στους Πατσούς, στις Πρασσές και στο Άγιο Πνεύμα της Παντανάσσας, αποτελούν προορισμό έλξης για πολλούς τουρίστες αλλά και ντόπιους περιηγητές σε ολόκληρη την Κρητική ενδοχώρα.

Ο πίνακας 1 περιλαμβάνει τα τεχνικά χαρακτηριστικά που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του Φράγματος Ποταμών.

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

Τύπος	Χωμάτινο
Όγκος ταμιευτήρα	$22,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$
Ύψος	55 m
Οφέλιμος όγκος	$17,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$
Πλάτος βάσης	310 m
Επιφάνεια ταμιευτήρα	1.600 στρεμ.
Μήκος στέψης	265 m
Λεκάνη απορροής	60 km^2
Πλάτος στέψης	10 m
Όγκος αναχώματος	$1.800.000 \text{ m}^3$
Μήκος υπερχειλιστή	340 m
Σκυροδέματα πάσης φύσεως	40.000 m^3
Παροχή υπερχειλιστή	$1.325 \text{ m}^3/\text{sec}$

Γεωτρήσεις - τσιμεντενέσεις	27.500 m
Ύψος πύργου υδροληψίας	25 m
Ανώτατη στάθμη αποθηκεύσεως	+ 203,00 m
Διατομή πύργου υδροληψίας	4,5 m × 4,5 m
Κατώτατη στάθμη υδροληψίας	+ 177,00 m
Μήκος σήραγγας εκτροπής	385 m
Διάρκεια κατασκευής	1996-2000 & 2003-2005
Διατομή σήραγγας εκτροπής	Εσωτ. διάμ. 4,5 m

Η κοίτη στη θέση του φράγματος βρίσκεται σε υψόμετρο +160 m, με το μεγαλύτερο πλάτος της βάσης του φράγματος να είναι τα 310 m και το μέγιστο ύψος μόλις 55 m. Όσον αφορά τη στέψη το φράγματος το υψόμετρο αυτής αναγράφεται στα +210 m, το πλάτος είναι 275 m και το μήκος αυτής 10 m. Ο υπερχειλιστής βρίσκεται σε υψόμετρο +203 m και ως ανώτατη στάθμη νερού ορίζεται αυτή των +206.5 m σε περιπτώσεις εντόνων καιρικών συνθηκών. Για τις διαδικασίες υδροληψίας ορίζεται ως κατώτατη στάθμη αυτή των +177m. Τέλος ο όγκος του φράγματος για την στάθμη των +177m υπολογίζεται στα $5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ νερό ενώ για την στάθμη των +203 m υπολογίζεται στα $22.5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ νερό (μέγιστη χωρητικότητα).

3.2 Περιγραφή Υδρολογικής Λεκάνης Πηγής Αργυρούπολης

3.2.1 Γεωγραφική τοποθέτηση

Γεωγραφικά η Αργυρούπολη τοποθετείται 20 χιλιόμετρα νοτιοδυτικά της πόλης Ρέθυμνου, σε υψόμετρο μόλις 260 μέτρων και αξίζει να σημειωθεί πως έχει αναπτυχθεί πάνω στα ερείπια της αρχαίας πόλης Λάππας. Στο δυτικό τμήμα περιβάλλεται από τις απολήξεις των Λευκών Όρων, ενώ στο νότιο και ανατολικό τμήμα υψώνονται βουνά και λόφοι. Στο βόρειο κομμάτι εκτείνεται η κοιλάδα του ποταμού Μουσελά και κάτω από το χωριό της Αργυρούπολης βρίσκονται οι δέκα πηγές.

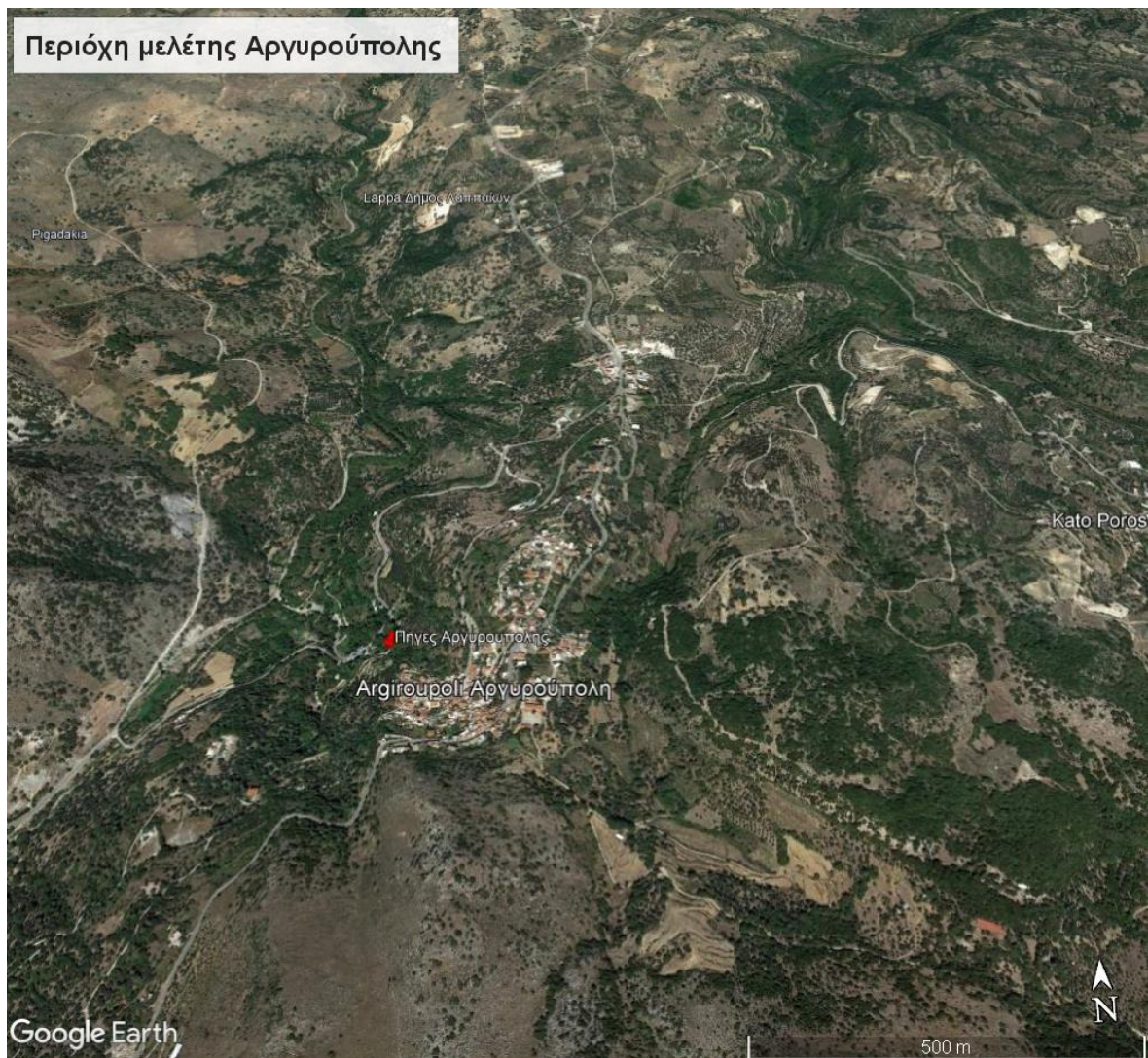
Η οικιστική ανάπτυξη του χωριού καλύπτει μια έκταση η οποία στο βόριο ήμισυ τμήμα της εμφανίζονται οι αποθέσεις του Νεογενούς και στο νότιο τα ανθρακικά πετρώματα του καλύμματος της Τρίπολης, στην βάση των οποίων αναβλύζουν οι πηγές.

Οι πηγές Αργυρούπολης συγκαταλέγονται σαν μια από τις τρεις περιοχές που τροφοδοτούν τον Μουσελά ποταμό μαζί με την πηγή Φοντάνα και τις πηγές Αναβρέτη. Το τμήμα του ποταμού ανάντι της πηγής Αργυρούπολης (Βαθύ ρέμα) έχει μηδενική απορροή κι έτσι κατά την καλοκαιρινή περίοδο οι ποσότητες του νερού που φθάνουν στη θάλασσα προέρχονται βασικά από τις τροφοδοσίες των πηγών και των υδροφοριών. Το χειμώνα η απορροή αυξάνεται λόγω των επιπλέον τροφοδοσιών από βροχοπτώσεις στο σύνολο της έκτασης της λεκάνης περίπου 130 km^2 .

- Στοιχεία για την παροχή του ποταμού Μουσελά.
Μέση ετήσια παροχή $Q = 0,263 \text{ m}^3/\text{s}$
Μέση παροχή χειμερινής περιόδου $Q = 0,443 \text{ m}^3/\text{s}$
Μέση παροχή καλοκαιρινής περιόδου $Q = 0.084 \text{ m}^3/\text{s}$

- Στοιχεία για την παροχή της Πηγής Αργυρούπολης.
Μέση ετήσια παροχή $Q = 0,204 \text{ m}^3/\text{s}$
Μέση παροχή χειμερινής περιόδου $Q = 0,225 \text{ m}^3/\text{s}$
Μέση παροχή καλοκαιρινής περιόδου $Q = 0.183 \text{ m}^3/\text{s}$

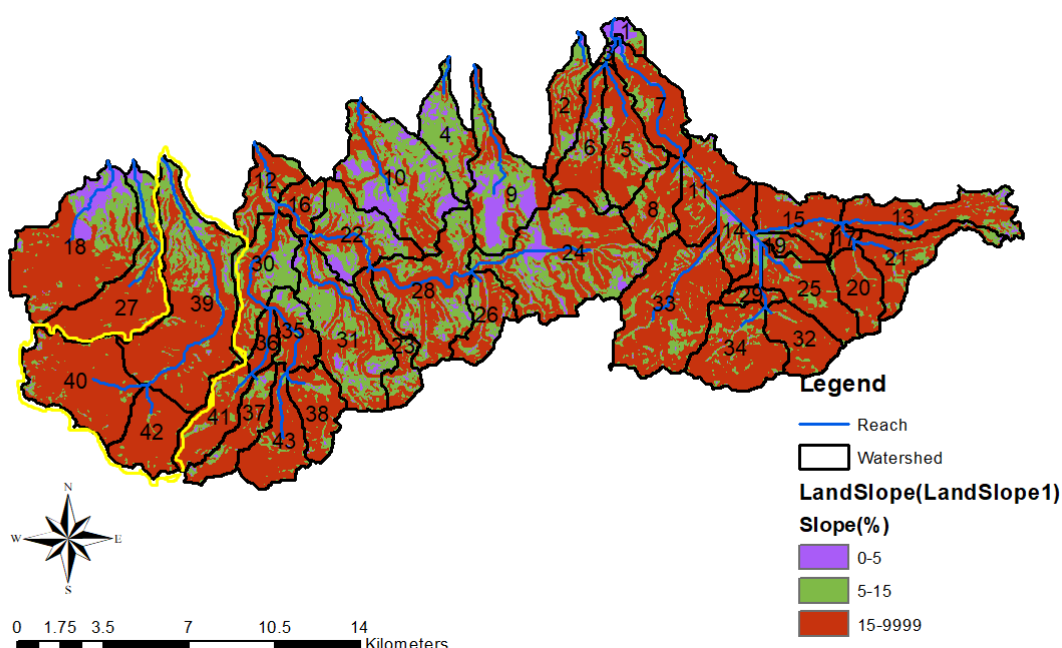
Στην εικόνα 5 παρουσιάζεται η περιοχή της Αργυρούπολης και των πηγών.



Εικόνα 5: Οπτική απεικόνιση της Πηγής Αργυρούπολης. (Πηγή: Google Earth)

3.2.2 Γεωμορφολογία

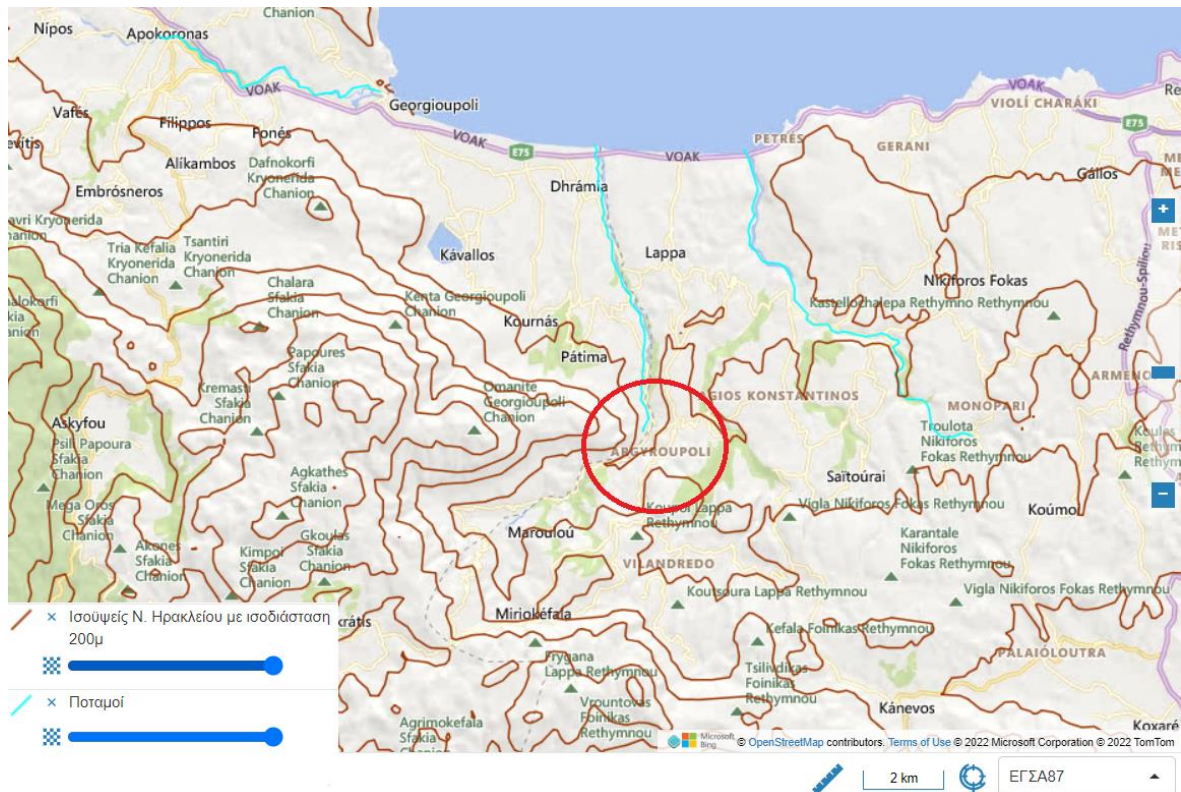
Σε γεωμορφολογικό επίπεδο η Αργυρούπολη βρίσκεται νοτιοδυτικά του Ρεθύμνου, σε υψόμετρο μόλις 260 μέτρων, στους πρόποδες του Αζώνα. Γενικά η περιοχή αποτελείται από ορεινά μέρη, με στενές κοιλάδες και μικρές εκτάσεις βοσκότοπων. Στα δυτικά αυτής βρίσκεται το ορός Ομανιτέ (απόληξη των ανατολικών Λευκών Ορέων), νότια το βουνό Αζώνας και ανατολικά ο λόφος Καλαμαρά, ενώ στα βόρεια βλέπει το Κρητικό Πέλαγος. Οι ορεινές μάζες χαρακτηρίζονται ως μεσαία βουνά, όπου τα χιόνια δεν διατηρούνται την καλοκαιρινή περίοδο καθώς το χαμηλό υψόμετρο αποτρέπει τον βαρύ χειμώνα. Στην ευρύτερη περιοχή της λεκάνης απορροής της Αργυρούπολης υπάρχουν στοιχεία πλούσιας βλάστησης και καλλιεργειών, τα οποία οφείλονται κατά κύριο λόγο στην ύπαρξη πολλαπλών πηγών νερού στην ευρύτερη περιοχή.



Εικόνα 6: Απεικόνιση των κλίσεων στη λεκάνη απορροής της Αργυρούπολης (με κίτρινο περίγραμμα) και στην ευρύτερη περιοχή, σύμφωνα με το μοντέλο SWAT.

Στην εικόνα 6 παρουσιάζονται οι κλίσεις του εδάφους που προέκυψαν από το μοντέλο SWAT. Με κίτρινο περίγραμμα είναι η λεκάνη απορροής της Αργυρούπολης (υπολεκάνες 39,40,42), όπου διαπιστώνεται η υψηλή διακύμανση των τοπογραφικών υψομέτρων (κλίσεις από 15-999%) κάτι που είναι φυσιολογικό λόγω της ύπαρξης οροσειρών που διατέτασσονται κατά μήκος της περιοχής.

Στην εικόνα 7 φαίνεται η τοπογραφία της λεκάνης απορροής της Αργυρούπολης.



Εικόνα 7: Τοπογραφικό ανάγλυφο της λεκάνης απορροής της Αργυρούπολης (Πηγή: GEODATA.gov).

3.3.3 Γεωλογική δομή της περιοχής

Στον κοντινό και ευρύτερο χώρο της πηγής και του οικισμού της Αργυρούπολης, αναπτύσσονται οι παρακάτω γεωλογικοί σχηματισμοί οι οποίοι είναι με σειρά κατάταξης από τον νεότερο στον παλαιότερο.

- Πρόσφατες και τεταρτογενείς αποθέσεις
- Νεογενή (Μειόκαινο)
- Ανθρακικά πετρώματα του καλύμματος της Τρίπολης
- Φυλλίτες – χαλαζίτες

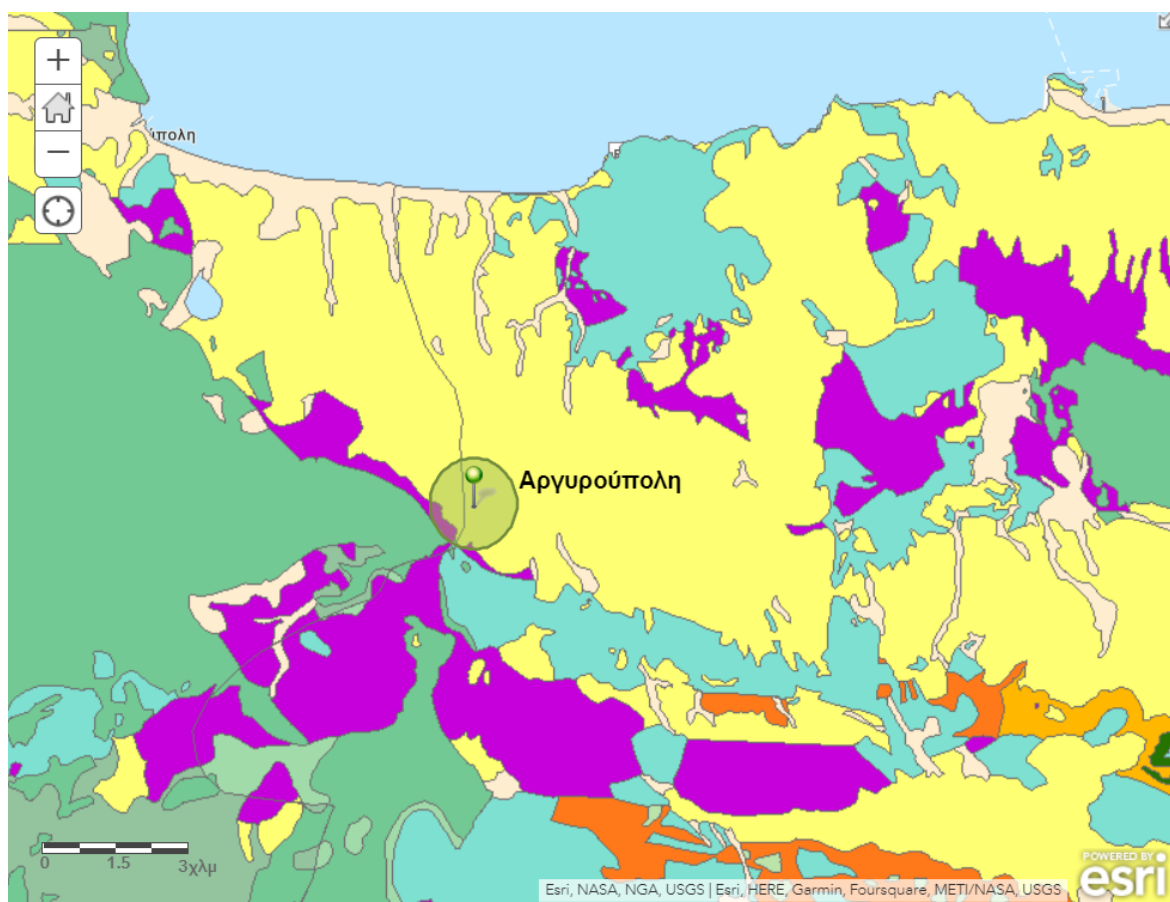
Οι πρόσφατες και τεταρτογενείς αποθέσεις έχουν μικρό σχετικό πάχος και καλύπτουν κατά τόπους τους σχηματισμούς του νεογενούς και τα ανθρακικά πετρώματα της Τρίπολης. Αποτελούνται γενικά από αργίλους, άμμο, χάλικες και κροκάλες μικράς συνοχής. Η έκτασή τους στο χώρο ενδιαφέροντος είναι αρκετά μικρή και εμφανίζονται βασικά σε μορφολογικές κοιλότητες του Νεογενούς. Στα κατωτέρα μέλη τους (Πλειστόκαινο) απαντούν αργιλικές ενστρώσεις με υλικά της αποσάθρωσης φυλλιτών-χαλαζιτών.

Οι αποθέσεις του Νεογενούς περιλαμβάνουν διάφορους τύπους γεωλογικών σχηματισμών όπως μάργες, ψαμμίτες, κροκαλοπαγή, μαργαϊκούς ασβεστόλιθους και αργιλομαργαϊκές ενστρώσεις. Γενικά υπέρκεινται ασυμφώνως των προνεογενών σχηματισμών και του καλύμματος της Τρίπολης ή στους υποκείμενους φυλλίτες-χαλαζίτες. Η εμφάνιση των Νεογενών στο χώρο της έρευνας αποκτά ενδιαφέρον γιατί ένα μεγάλο

τμήμα του οικισμού έχει κτισθεί πάνω σ' αυτά και συνίστανται από μάργες, ψαμμίτες και αργιλικές εν στρώσεις. Στην ευρύτερη περιοχή βόρεια των πηγών μεγάλη ανάπτυξη έχουν οι μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι.













Τα ανθρακικά πετρώματα της Τρίπολης επεκτείνονται στο νότιο τμήμα του χωριού όπου στον ευρύτερο χώρο (ανατολικά και δυτικά) καταλαμβάνουν μεγάλη επιφανειακή έκταση. Στο σύνολο τους συναντούμε όλη σχεδόν την στρωματογραφική σειρά του καλύμματος με ασβεστόλιθους και δολομίτες Ηωκαίνου ηλικίας έως Αν. Τριαδικό. Επίσης Νοτιοανατολικά και Νότια του χωριού εμφανίζεται η βάση της Τρίπολης αποτελούμενη κυρίως από αργιλικούς σχιστόλιθους. Ειδικά στο χώρο της πηγής και του οικισμού αναπτύσσονται δολομιτωμένοι ασβεστόλιθοι και δολομίτες, (Αν. Τριαδικό - Μ. Ιουρασικό) οι οποίοι είναι έντονα τεκτονισμένοι και κατακερματισμένοι. Το σύνολο των σχηματισμών του καλύμματος της Τρίπολης είναι επωθημένο πάνω στην φυλιτική - χαλαζιτική σειρά η οποία εμφανίζεται στον κοντινό και ευρύτερο χώρο.

Οι φυλλίτες-χαλαζίτες αποτελούν το πρώτο τεκτονικό κάλυμμα της γεωλογικής δομής της Κρήτης πάνω στο οποίο βρίσκονται επωθημένα τα κατ' εξοχήν ανθρακικά πετρώματα των καλυμμάτων της Τρίπολης και της Πίνδου. Στην περιοχή της έρευνας εμφανίζονται κατάντι (δυτικά) της πηγής της Αργυρούπολης και νοτιά του χωριού. Δυτικά της πηγής η φυλλιτική - χαλαζιτική σειρά είναι επωθημένη πάνω στους γεωλογικούς σχηματισμούς του γεωλογικού υποβάθρου της Κρήτης.



Εικόνα 8: Γεωλογικός Χάρτης Αργυρούπολης (Πηγή: ArcGIS)

Κατηγορία

	ΑΝΘΡΑΚΙΚΑ ΑΛΛΟΧΘΟΝΩΝ ΣΕΙΡΩΝ
	ΑΝΘΡΑΚΙΚΑ ΤΕΚΤΟΝΙΚΟΥ ΚΑΛΥΜΜΑΤΟΣ ΖΩΝΗΣ ΠΙΝΔΟΥ
	ΑΝΘΡΑΚΙΚΑ ΤΕΚΤΟΝΙΚΟΥ ΚΑΛΥΜΜΑΤΟΣ ΖΩΝΗΣ ΤΡΙΠΟΛΗΣ
	ΑΝΘΡΑΚΙΚΑ ΤΕΚΤΟΝΙΚΟΥ ΚΑΛΥΜΜΑΤΟΣ ΖΩΝΗΣ ΤΡΥΠΑΛΙΟΥ
	ΕΝΟΤΗΤΑ ΠΛΑΚΩΔΩΝ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΩΝ
	ΝΕΟΓΕΝΗ
	ΟΦΙΟΛΙΘΙΚΟ ΣΥΜΠΛΕΓΜΑ ΑΛΛΟΧΘΟΝΩΝ ΣΕΙΡΩΝ
	ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΗ
	ΦΛΥΣΧΗΣ ΤΕΚΤΟΝΙΚΟΥ ΚΑΛΥΜΜΑΤΟΣ ΖΩΝΗΣ ΠΙΝΔΟΥ
	ΦΛΥΣΧΗΣ ΤΕΚΤΟΝΙΚΟΥ ΚΑΛΥΜΜΑΤΟΣ ΖΩΝΗΣ ΤΡΙΠΟΛΗΣ
	ΦΛΥΣΧΟΕΙΔΗ - ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΙΚΑ ΑΛΛΟΧΘΟΝΩΝ ΣΕΙΡΩΝ
	ΦΥΛΛΙΤΙΚΗ - ΧΑΛΑΖΙΤΙΚΗ ΣΕΙΡΑ

3.2.4 Υδρογεωλογική συμπεριφορά του ευρύτερου πεδίου

Στους παραπάνω γεωλογικούς σχηματισμούς που αναφέρθηκαν αναπτύσσονται γενικά οι ακόλουθες υδρογεωλογικές συνθήκες.

Οι αλλουβιακές αποθέσεις έχουν μικρή έκταση και μικρό πάχος και έτσι δεν επηρεάζουν ουσιαδώς τις συνθήκες της περιοχής και την υδροφορία της πηγής. Όσο αφορά όμως τη στενή περιοχή του χωριού, ο ρόλος τους διαφοροποιείται λόγω της λιθολογικής τους σύστασης (αποτελούνται από χαλαρά αδρομερή υλικά). Έτσι τα νερά που φθάνουν στην επιφάνεια τους κατεισδύουν και οδηγούνται κατά την κατακόρυφο προς τα βαθύτερα στρώματα.

Τα Νεογενή χαρακτηρίζονται από μεγάλη ποικιλία λιθολογικής σύστασης με αποτέλεσμα να έχουν και την ανάλογη υδρογεωλογική συμπεριφορά όσο αφορά την ανάπτυξη υπογείων υδροφοριών και γενικά στην διαμόρφωση του υδατικού δυναμικού κάθε περιοχής. Οι οργανογενείς για παράδειγμα μαραγκοί ασβεστόλιθοι έχουν μια αξιόλογη εμφάνιση βόρεια και ανατολικά του χωριού και είναι ένας σχηματισμός αρκετά υδροπερατός, γι' αυτό το λόγο από την επιφάνεια τους αναβλύζουν αρκετές πηγές στις περιοχές όπου αυτοί επικάθονται σε αδιαπέρατες μάργες (πηγή Αναβρέτης, Φοντάνα κ.α.). Στην Αργυρούπολη ωστόσο επικρατούν κυρίως οι μάργες με ενστρώσεις ψαμμιτών, μαργαϊκών ασβεστόλιθων κ.α. που έχουν μια γενική κλίση Β-ΒΑκή. Έτσι πρακτικά η συγκριμένη εμφάνιση που χρήζει ενδιαφέροντος συμπεριφέρεται στο σύνολο ως σχηματισμός αδιαπέρατος έως μετρίως υδροπερατός.

Τα ανθρακικά πετρώματα στο σύνολο τους είναι ένας σχηματισμός κερματισμένος, ρηγματωμένος και κατά συνέπεια πολύ υδροπερατός. Για την περιοχή αποτελεί την σημαντικότερη υδρογεωλογική ενότητα από την οποία αναβλύζει η ζωτικής σημασίας καρστική πηγή της Αργυρούπολης. Από γεωλογική και τεκτονική άποψη διαμορφώνονται γενικά αρκετά ευνοϊκές προϋποθέσεις για την δημιουργία της υπόγειας υδροφορίας στα

ανθρακικά πετρώματα τα οποία αναπτύσσονται υπό μορφή επιμήκους ζώνης διεύθυνσης Α-Δ. Από την υδροφορία αυτή τροφοδοτείται η πηγή της Αργυρούπολης (θα επιγραφεί εκτενέστερα εν συνεχεία) και κατά περίπτωση οι υδροφορίες των Νεογενών όταν οι συνθήκες είναι ευνοϊκές.

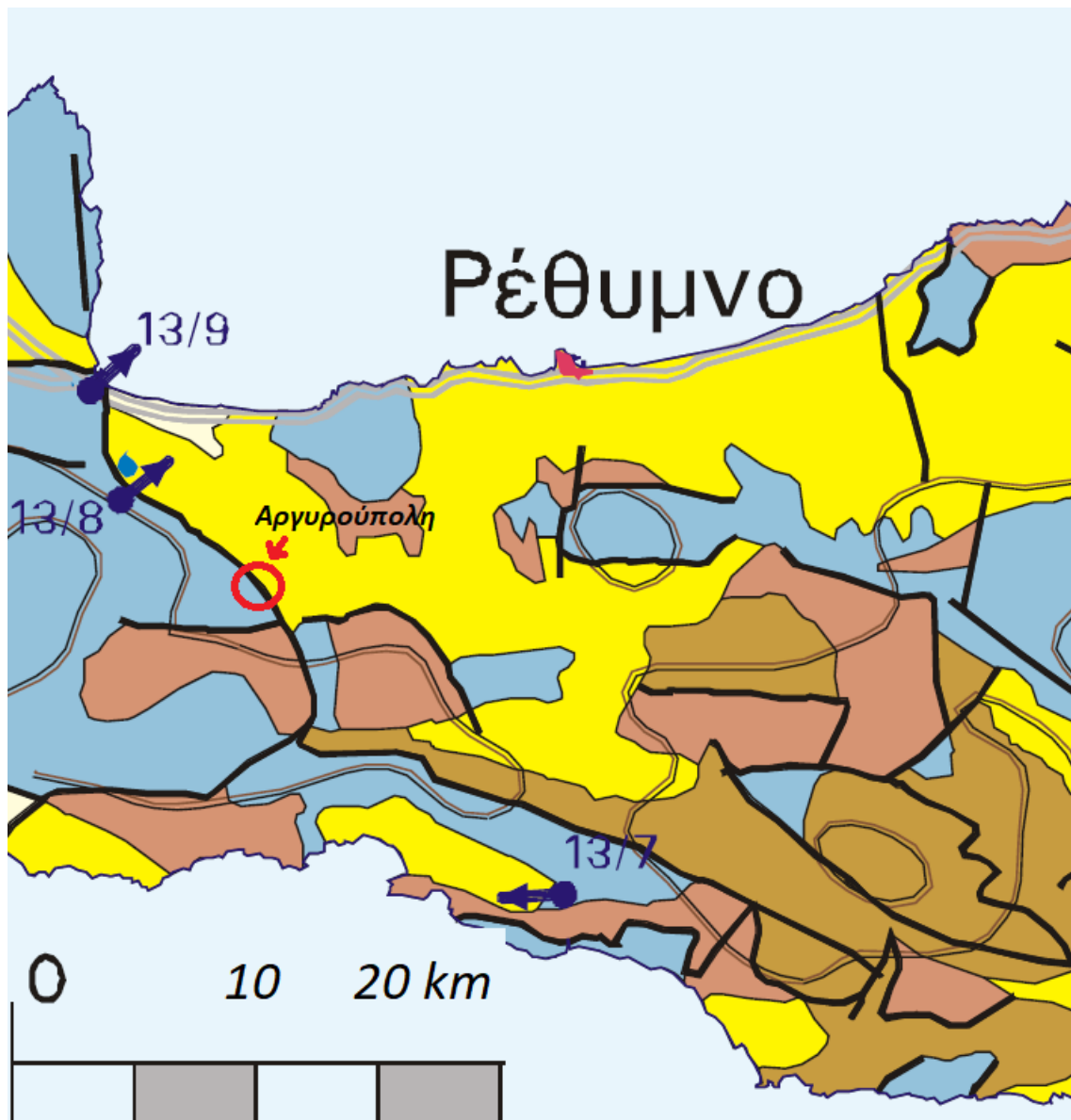
Η φυλλιτική χαλαζιτική σειρά στο σύνολο της είναι ένας μη υδροπερατός σχηματισμός, έμμεσα όμως συμβάλει στην δημιουργία υπογείων υδροφοριών σε υπερκείμενα υδροπερατά πετρώματα. Στην κοντινή και στην ευρύτερη περιοχή της Αργυρούπολης στους φυλλίτες χαλαζίτες υπέρκεινται τα ανθρακικά πετρώματα της Τρίπολης και κατά περίπτωση τα νεογενή. Και στις δυο περιπτώσεις προκύπτει η ανάπτυξη υδροφοριών με σημαντικότερη αυτή των ανθρακικών. [Μ. ΚΝΙΘΑΚΗ & Δ. ΡΟΖΟ, 1992]

3.2.5 Υδρογεωλογική συμπεριφορά πηγής Αργυρούπολης

Οι σχηματισμοί του τεκτονικού καλύμματος (ασβεστόλιθοι – δολομίτες) επίκεινται της φυλλιτικής – χαλαζιτικής σειράς (με επώθηση) στα βόρεια και νότια της εμφάνισης. Όπου από την συνθήκη αυτή δημιουργούνται οι κατ' αρχήν ευνοϊκές προϋποθέσεις ανάπτυξης αυτής της υδροφορίας. Ωστόσο για την ανάβλυση της πηγής σημαντικό ρόλο παίζουν τα διαφορά ρήγματα από τον χώρο αυτής (της πηγής) με διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ. Το ρήγμα αυτό βυθίζει τα ανθρακικά πετρώματα σε σχέση με τους υποκείμενους φυλλίτες χαλαζίτες δημιουργώντας έτσι και συνθήκες μηχανισμού ως πηγής επαφής – υπερπλήρωσης.

Στον ευρύτερο χώρο οι εν λόγω ανθρακικές ενότητες επεκτείνονται προς την ανατολή υπό μορφή επιμήκους ζώνης. Στην νότια πλευρά υπέρκεινται των φυλλιτών και καλύπτονται από φλύσχη και σε μεγάλο μήκος από ποταμοχερσαίες αποθέσεις αποτελούμενες από ασύνδετα έως ελαφρά συνεκτικά κροκαλοπαγή και ερυθρούς αργίλους που προέρχονται από την αποσάθρωση της φυλλιτικής – χαλαζιτικής σειράς.

Στην βόρεια πλευρά υπέρκεινται σε φυλλίτες – χαλαζίτες και κατά το μεγαλύτερο τμήμα τους καλύπτονται ασύμφωνα (τεκτονική επαφή) από τον σχηματισμό των νεογενών. Οι συνθήκες αυτές τόσο στον κοντινό όσο και στον ευρύτερο χώρο συμβάλουν στον μηχανισμό ανάβλυσης (υψομέτρου 200 μέτρων) και στην τροφοδοσία της πηγής από τα ανθρακικά πετρώματα.



Εικόνα 9: Υδρολιθολογικός χάρτης της Κρήτης 1996, της περιοχής της Αργυρούπολης και του Φράγματος Ποταμών.

- Κοκκώδεις προσχωματικές αποθέσεις κυμαινόμενης υδροπερατότητας
- Κοκκώδεις μη προσχωματικές αποθέσεις μέτριας έως πολύ μικρής υδροπερατότητας
- Κοκκώδεις μαλασσικές αποθέσεις σχετικά μικρής υδροπερατότητας
- Ασβεστόλιθοι και μάρμαρα εκτεταμένης ανάπτυξης, μέτριας έως υψηλής υδροπερατότητας
- Ασβεστόλιθοι και μάρμαρα περιορισμένης ανάπτυξης, κυμαινόμενης υδροπερατότητας
- Τριαδικά ασβεστολιθικά λατυποπαγή της Ιονίου ζώνης, μικρής έως μέτριας υδροπερατότητας
- Φλύσχης
- Μεταμορφωμένα πετρώματα
- Πλουτώνια και ηφαιστειακά πετρώματα

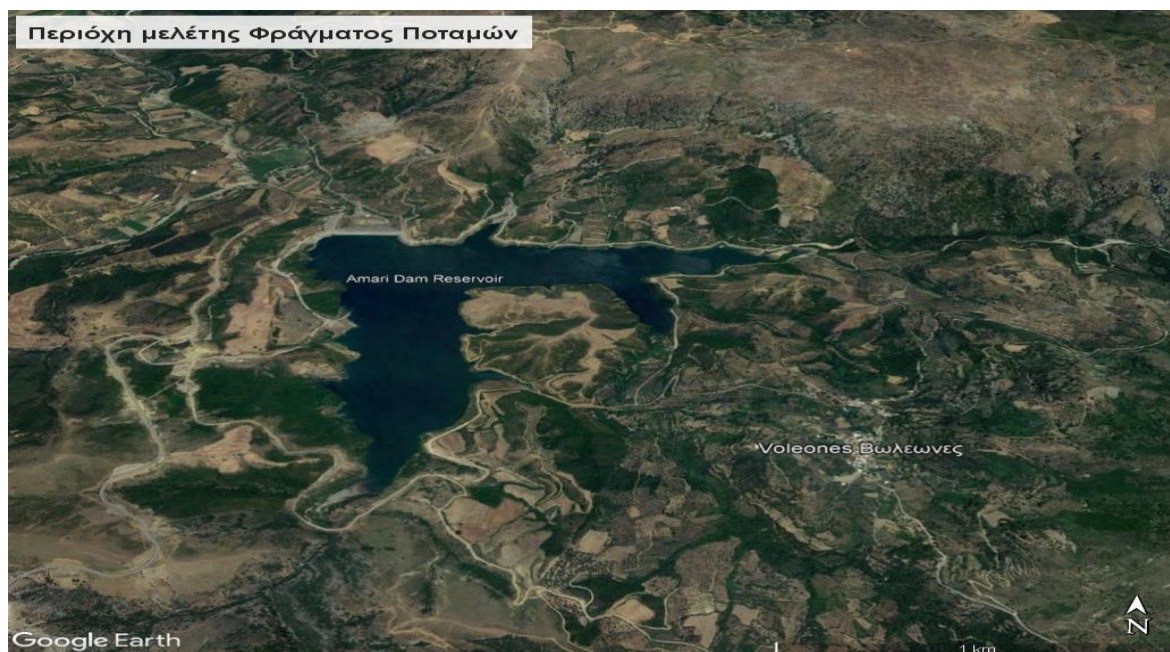
3.3 Περιγραφή Υδρολογικής Λεκάνης Φράγματος Ποταμών

3.3.1 Γεωγραφική τοποθέτηση

Σε υψόμετρο 400–500 μέτρων είναι σχηματισμένη η κοιλάδα του Αμαρίου μεταξύ του ορούς Κέδρους και του Ψηλορείτη με μήκος 25 χιλιομέτρων. Βρίσκεται σε απόσταση 35 χιλιομέτρων από την πόλη του Ρέθυμνου, στους πρόποδες του όρους Σάμιτος. Αποτελεί το φυσικό σημείο διέλευσης από το βόρειο Ρέθυμνο προς το Νότο και τη Μεσσαρά. Ως αποτέλεσμα των σημαντικών βροχοπτώσεων της περιοχής, είναι ο Πλατύς Ποταμός όπου πηγάζει από εκεί και εκβάλλει στην Αγία Γαλήνη. Εκεί βρίσκεται ένα από τα μεγαλύτερα φράγματα της Κρήτης, το Φράγμα Ποταμών το οποίο αποτελεί και την παρούσα περιοχή μελέτης.

Όσον αφορά τη μορφολογία της Περιοχής Μελέτης, τα κύρια χαρακτηριστικά της είναι το μεγάλο εύρος υψομετρικών διαφορών και το μεγάλο ποσοστό ορεινών και ημιορεινών εκτάσεων. Τα όρια της περιοχής μελέτης ορίζονται από τις κορυφογραμμές μεγάλων και μικρών ορεινών όγκων. Οι διαφοροποιήσεις που παρατηρούνται στη μορφολογία της περιοχής οφείλονται σε τεκτονικά φαινόμενα, καθώς και σε επιδράσεις χειμάρρων και ρεμάτων στο ανάγλυφο.

Η εύφορη κοιλάδα του φιλοξενεί μια πληθώρα πολλών και σπάνιων ειδών της Κρητικής χλωρίδας, για παράδειγμα στα δυτικά κοντά στο χωριό Πατσός υπάρχει ένας φυσικός βοτανικός κήπος και στα βορειοδυτικά του βουνού Κέντρος το οροπέδιο Γιους Κάμπος. Η κοιλάδα του ταμιευτήρα χωρίζεται σε δυο κομμάτια, το νότιο στο ρέμα Κεφαλόβρυσων και το ανατολικό στο Αποστολόρεμα οι οποίοι περίπου στα 500 μετρά ενώνονται δημιουργώντας μια ενιαία κοιλάδα. Η περιοχή είναι ορεινή με απότομες κλίσεις φυσικών πρανών κάτι το οποίο οδηγεί στην γρήγορη αποστράγγιση της λεκάνης. Το φράγμα τροφοδοτείται κυρίως από τρία ρέματα, Βολεώνες, Κεφαλόβρυσα και Απόστολοι. Παρακάτω στην εικόνα 10 παρουσιάζεται η θέση του Φράγματος Ποταμών.

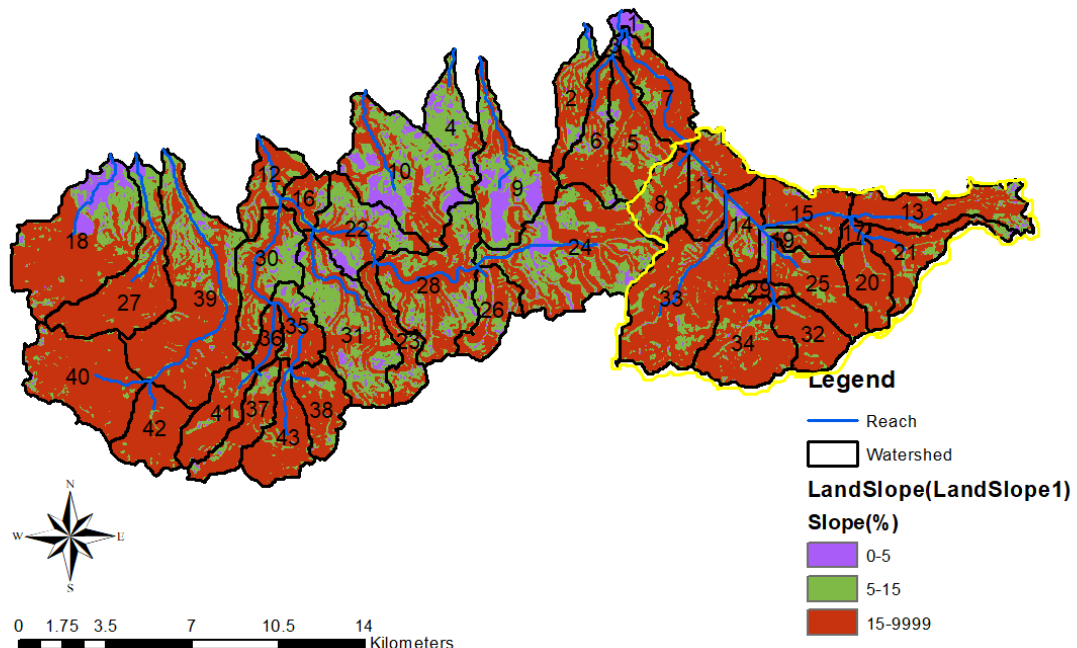


Εικόνα 10: Οπτική απεικόνιση του ταμιευτήρα του Φράγματος Ποταμών. (Πηγή: Google Earth)

3.3.2 Γεωμορφολογία

Το ορεινό ανάγλυφο του φράγματος Αμαρίου βρίσκεται ΝΝΑ/κα της πόλης του Ρέθυμνου σε απόσταση 12,5 km. Η γεωμορφολογία της περιοχής ορίζεται από τον χείμαρρο Σφακορυακό ρέμα και τους παραπόταμους με τις αντίστοιχες κοιλάδες, το Πρασσανό φαράγγι και το φαράγγι του Αγίου Αντωνίου (Πατσός). Το όρος Κέδρος (1.777 μέτρα) υψώνεται νοτιοδυτικά του Ψηλορείτη και εκτείνεται προς τη βόρεια κατεύθυνση, φέροντας τις κορυφές Σωρός και Φορτέσα.

Η καταπράσινη κοιλάδα του Αμαρίου αναπτύσσεται στους πρόποδες του ορούς Κέντρος και του Ψηλορείτη, χαρακτηριζόμενη από τους τυπικούς μεσογειακούς χερσότοπους και θαμώνες, την ύπαρξη της χαρακτηριστικής μακίας βλάστησης και το φρυγανικό τοπίο. Ακόμη στην περιοχή είναι έντονη η ύπαρξη καλλιεργούμενων γεωργικών εκτάσεων, αιθαλή δασών του τύπου *oleo-Ceratonion* με το πουρνάρι να επικρατεί σαν είδος και φυσικών υγροτόπων με γλυκό νερό. Το φαράγγι Πατσός είναι γνωστό για το σπηλαιώδη ναό του Αγίου Αντωνίου όπου εκεί υπάρχουν αναβλύζουσες πηγές οι οποίες δημιουργούν συνθήκες πλούσιας βλάστησης. Οι ποσότητες νερού που προέρχονται από το φαράγγι παροχετεύονται στο Φράγμα Ποταμών, ωστόσο η παρουσία Δρυμών στην περιοχή είχε ως αποτέλεσμα στο να χαρακτηριστεί μεγάλο μέρος της ως προστατευόμενη περιοχή NATURA.



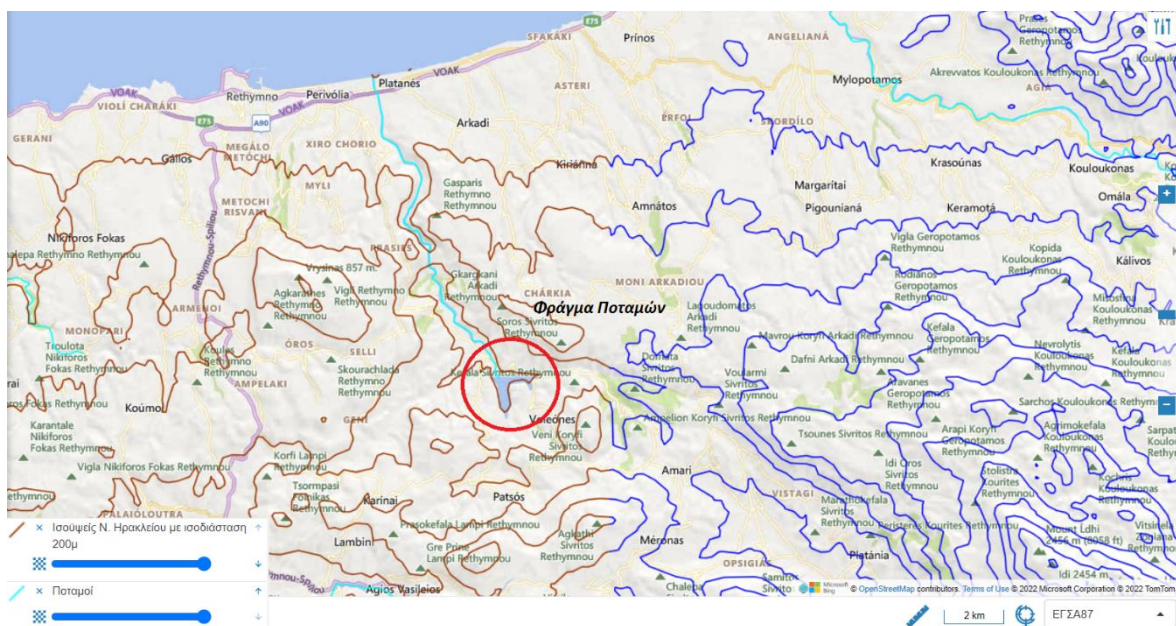
Εικόνα 11: Χαρτογραφικός προσδιορισμός των κλίσεων στο Φράγμα Ποταμών (Λεκάνη απορροής με κίτρινο περίγραμμα) και στην ευρύτερη περιοχή μέσω του προγράμματος SWAT.

Η διακύμανση των τοπογραφικών υψομέτρων και η κλίση του εδάφους σε ολόκληρη τη λεκάνη είναι εξαιρετικά μεγάλη, κάτι φυσιολογικό δεδομένου της ύπαρξης ορέων κατά

μήκος της, όπως φαίνεται στην εικόνα 11. Παρακάτω στην εικόνα 12 παρουσιάζεται το τοπογραφικό ανάγλυφο της Κρήτης και παράλληλα διακρίνονται τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά του Φράγματος Ποταμών.



Εικόνα 12: Τοπογραφικό ανάγλυφο Κρήτης (Πηγή: Περιγραφή υδατικού διαμερίσματος, 1η ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΗ ΣΔΔΑΠ, ΥΔ ΚΡΗΤΗΣ)



Εικόνα 13:Τοπογραφικός χάρτης της περιοχής του Φράγματος Ποταμών. (Πηγή: GEODATA.gov)

3.3.3 Υδρογεωλογική συμπεριφορά του ευρύτερου πεδίου

Η περιοχή του Αμαρίου εκτείνεται πάνω σε μια γεωλογική δομή που ανήκει στη φυλετική-χαλαρωτική σειρά. Αυτή η δομή βρίσκεται επάνω στους ανθρακικούς σχηματισμούς της Ιονίου ζώνης και είναι έντονα πτυχωμένη. Αποτελείται ιδίως από μεταμορφωμένα παραπετρώματα, με ορισμένες περιοχές να εμφανίζουν ορθοπετρώματα και ο βαθμός μεταμόρφωσης τους κυμαίνεται από πολύ χαμηλός έως χαμηλός.

Τα παραπετρώματα ουσιαστικά αποτελούνται κυρίως από διάφορους τύπους σχιστόλιθων (μαρμαρυγικοί, μαρμαρυγικοί-χλωριτικοί, μοσχοβιτικοί με χλωριτοειδή, χαλαζιτικοί, ανθρακομιγείς-μαρμαρυγικοί, γραφιτικοί-μαρμαρυγικοί), φυλλιτών κατά βάση ανθρακομιγείς με χλωριτοειδή και χαλαζιτών. Στο εσωτερικό αυτών υπάρχουν ενστρώσεις ασβεστόλιθων και το χρώμα τους ποικίλει από μαύρο έως υπόλευκο, μεσοστρωματώδεις, κρυσταλλικοί και κατακερματισμένοι. Παράλληλα υπάρχουν σε διασπαρτη μορφή τεμαχία από μεταψαμμίτες και μεταπηλίτες. Τα ορθοπετρώματα κυρίως μεταβασάλτες (πρασινίτες) εμφανίζονται στα παραπετρώματα με τη μορφή φλεβών και κοιτών. Ο ιστός τους είναι μικρο-μεσο-λεπιδοβλαστικός ενώ η υφή τους συμπαγής, παράλληλη μικροπτυχωμένη.

Η περιοχή εδράσης τους Φράγματος βρίσκεται στο βόρειο τμήμα της λεκάνης όπου εκεί κυριαρχούν οι φυλλίτες - χαλαζίτες (μη υδροπερατά πετρώματα) της φυλλιτικής χαλαζιτικής σειράς του Περμοτριάδικου. Αξίζει να σημειωθεί πως οι περιβάλλοντες ανθρακικοί σχηματισμοί πιθανώς να έχουν σημαντική υδροφορία καθώς χαρακτηρίζονται από μεγάλο πάχος και έντονη καρστική συμπεριφορά. [Ινστιτούτου Έρευνας Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών]

Ακολουθεί ανάλυση των κυρίαρχων γεωλογικών σχηματισμών στην περιοχή της λεκάνης απορροής του Φράγματος Ποταμών.

- Ασβεστόλιθοι

Η πλειονότητα της υδρολογικής λεκάνης του Φράγματος Ποταμών βρίσκεται μέσα σε καρστικούς σχηματισμούς. Κατά μήκος του Όρους Ίδη (Ψηλορείτης), Βρύσινα και κατά μήκος της λεκάνης απορροής του Φράγματος Ποταμών, σχηματίζονται ιζηματογενή πετρώματα όπως ασβεστόλιθος. Ως αποτέλεσμα, το βόρειο τμήμα της λεκάνης να αποτελείται σε μεγάλο βαθμό από ασβεστόλιθους, οι οποίοι είναι μονόμεικτα πετρώματα που αποτελούνται κατά κύριο λόγο από ασβεσίτη. Το πέτρωμα διαβρώνεται σχετικά εύκολα από το νερό και το χρώμα του είναι άσπρο, γαλαζωπό. Το υπόστρωμα του, αποτελείται από αδιαπέρατα στρώματα φυλλίτη δημιουργώντας έτσι υδροφόρους ορίζοντες. Λόγω της διαβρωτικής φύσης του, είναι σύνηθες να προκαλείται απογύμνωση αυτού δημιουργώντας περιέργες συνθέσεις όπως ρηγματώσεις, καταβόθρες και άλλες δομές, πράγμα που είναι εμφανές εξετάζοντας το τοπίο της υπομελέτης περιοχής, με τις μεγάλες οροσειρές και τα απότομα φαράγγια.

- Νεογενείς σχηματισμοί

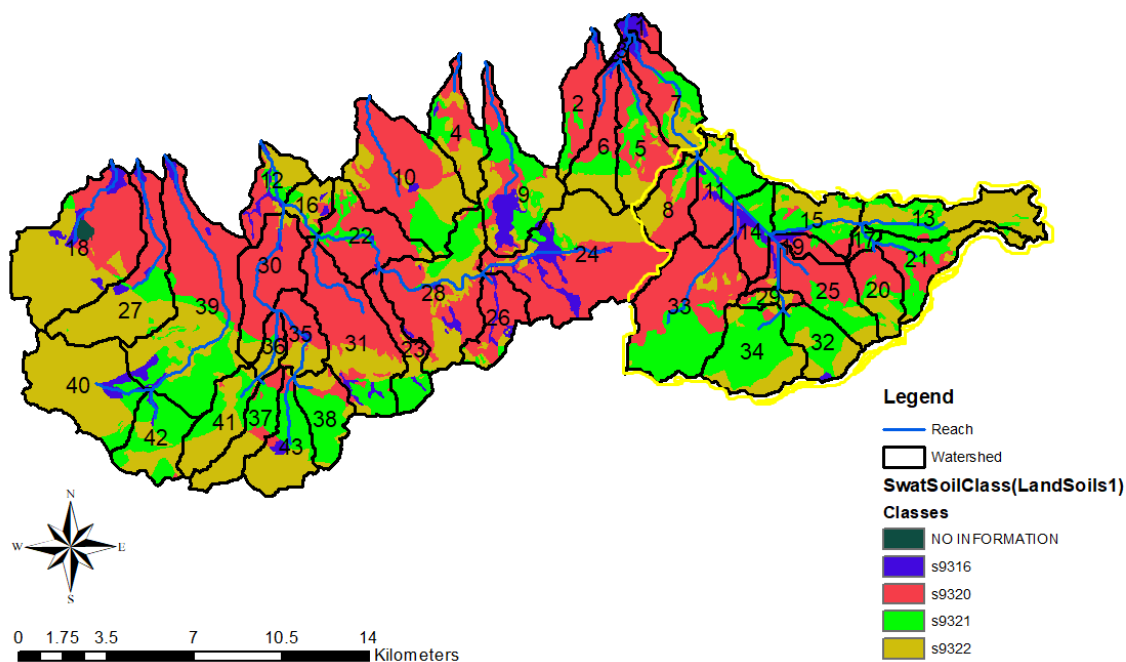
Οι νεογενείς σχηματισμοί βρίσκονται στο νοτιοδυτικό κομμάτι του Φράγματος Ποταμών. Αυτό το είδος σχηματισμών είναι αποτέλεσμα μαργαϊκού τύπου ασβεστόλιθων και πλεικαινικών αποθέσεων με επικράτηση μαργών και κροκαλοπαγών σε ορισμένες θέσεις. Η μάργα είναι ένας ιζηματογενής σχηματισμός και ορυκτολογικά κυμαίνεται μεταξύ του ασβεστολίθου και της αργίλου. Αυτά τα πετρώματα είναι σχετικά νεότερης ηλικίας και

ιδιαίτερα οι μάργες νεογενούς όπου τα απολιθώματα τους διατηρούνται σε καλή κατάσταση. Αποτελούν πετρώματα μη υδροπερατού τύπου.

- Σχιστόλιθοι

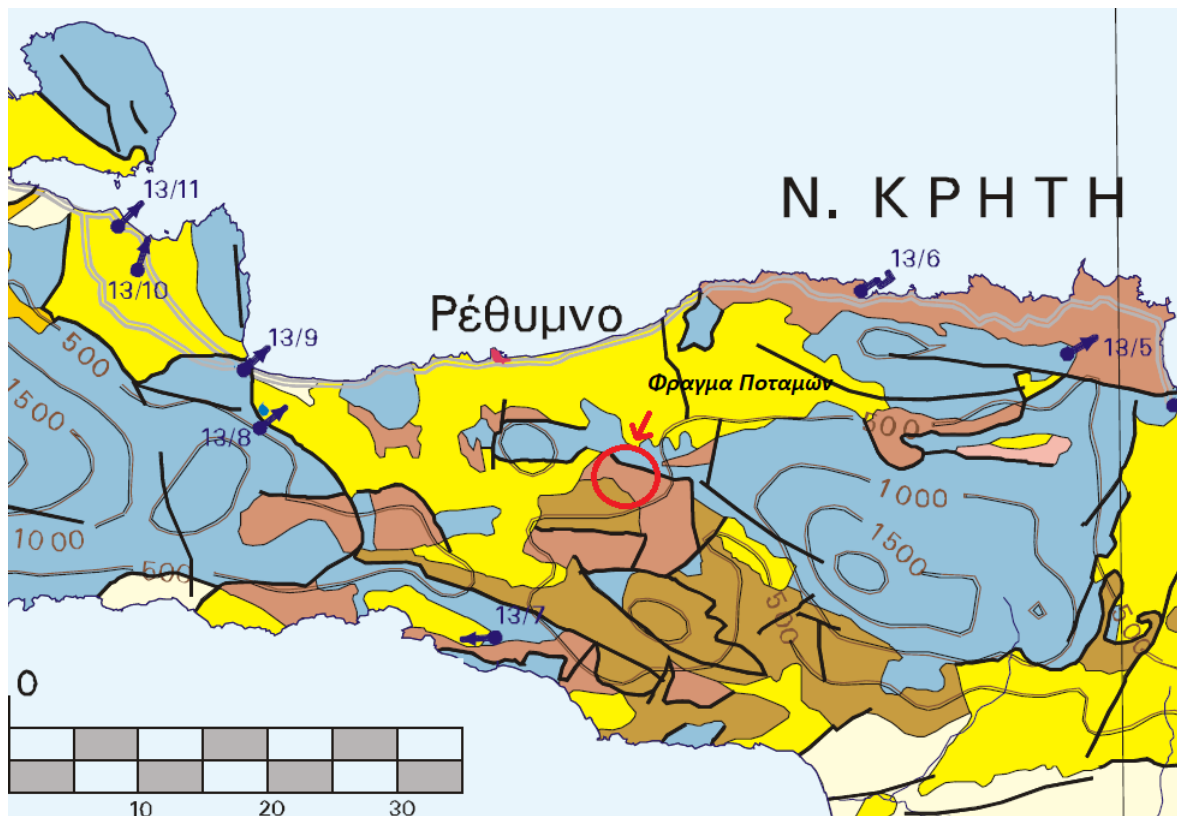
Η παρουσία σχιστόλιθου εντείνεται στην νότια περιοχή της λεκάνης. Είναι ένα μεταμορφωμένο (κρυσταλλοσχιστώδες) πέτρωμα, αποτελούμενο από χαλαζία, μοσχοβίτη, χλωρίτη και άλλες μικρότερες ποσότητες ορυκτών, τα οποία βρίσκονται διατεταγμένα σε σχεδόν παράλληλη διάταξη, ως συνέπεια δημιουργίας του πετρώματος σε συνθήκες έντονης μεταμόρφωσης. Αποτέλεσμα αυτού είναι η σχιστοφυΐα του όψη και η σχιστότητα του σε πλάκες έπειτα από κρούση. Οι σχιστόλιθοι ανήκουν στην κατηγορία των κρυσταλλοσχιστώδων πετρωμάτων παίρνοντας μέρος στη δομή μια μεταμορφωμένης περιοχής. Έτσι, οι σχιστόλιθοι ορίζονται ως πετρώματα με καλή σχιστότητα, συμπεριλαμβανομένων των σχίστων (slates), ορισμένων γνεύσιων και φυλλιτών, ορισμένων ασβεστόλιθων και ασβεστολιθικών σχιστόλιθων (calc – schists), χαλαζιτών και λεπτόκοκκων πυροκλαστικών πετρωμάτων, τα οποία εμποδίζουν την διέλευση του νερού.

Η εικόνα 14 παρουσιάζει τον εδαφικό χάρτη της περιοχής του φράγματος που προέκυψε από το πρόγραμμα SWAT.



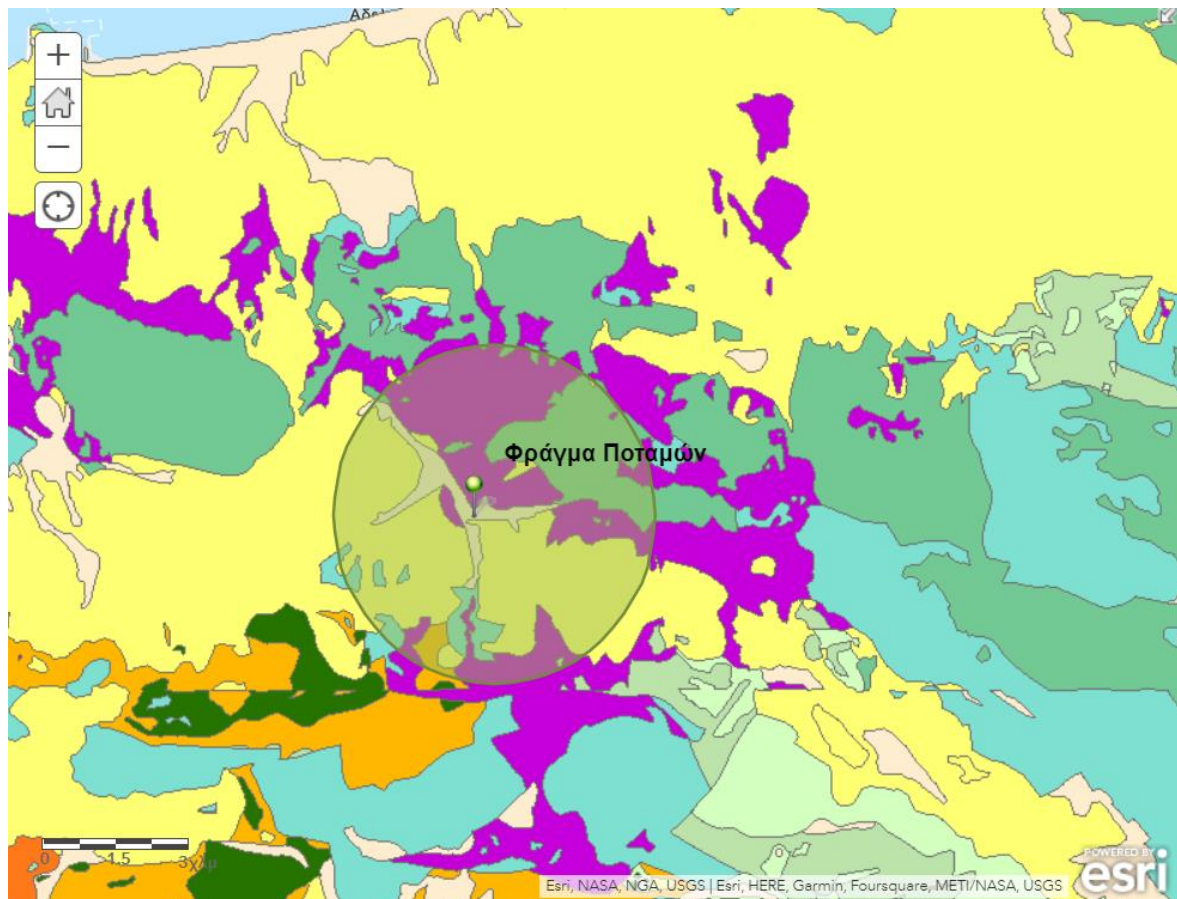
Εικόνα 14: Εδαφικός χάρτης του Φράγματος Ποταμών που προέκυψε από το πρόγραμμα SWAT.

Από την υδρολιθολογική κατανομή της Κρήτης που παρουσιάζεται στην εικόνα 15, προσδιορίζονται οι υδρολιθολογικές ιδιότητες της περιοχής του φράγματος. Σε κόκκινο κύκλο η περιοχή του φράγματος.



Εικόνα 15: Κρητικός υδροβιολογικός χάρτης, έτους 1996.

- Κοκκώδεις προσχωματικές αποθέσεις κυμαινόμενης υδροπερατότητας
- Κοκκώδεις μη προσχωματικές αποθέσεις μέτριας έως πολύ μικρής υδροπερατότητας
- Κοκκώδεις μαλασσικές αποθέσεις σχετικά μικρής υδροπερατότητας
- Ασβεστόλιθοι και μάρμαρα εκτεταμένης ανάπτυξης, μέτριας έως υψηλής υδροπερατότητας
- Ασβεστόλιθοι και μάρμαρα περιορισμένης ανάπτυξης, κυμαινόμενης υδροπερατότητας
- Τριαδικά ασβεστολιθικά λατυποπαγή της Ιονίου ζώνης, μικρής έως μέτριας υδροπερατότητας
- Φλύσχης
- Μεταμορφωμένα πετρώματα
- Πλουτώνια και ηφαιστειακά πετρώματα



Εικόνα 16: Γεωλογικός χάρτης της περιοχής του φράγματος (Πηγή: ArcGIS)

Γεωλογία Ρεθύμνου

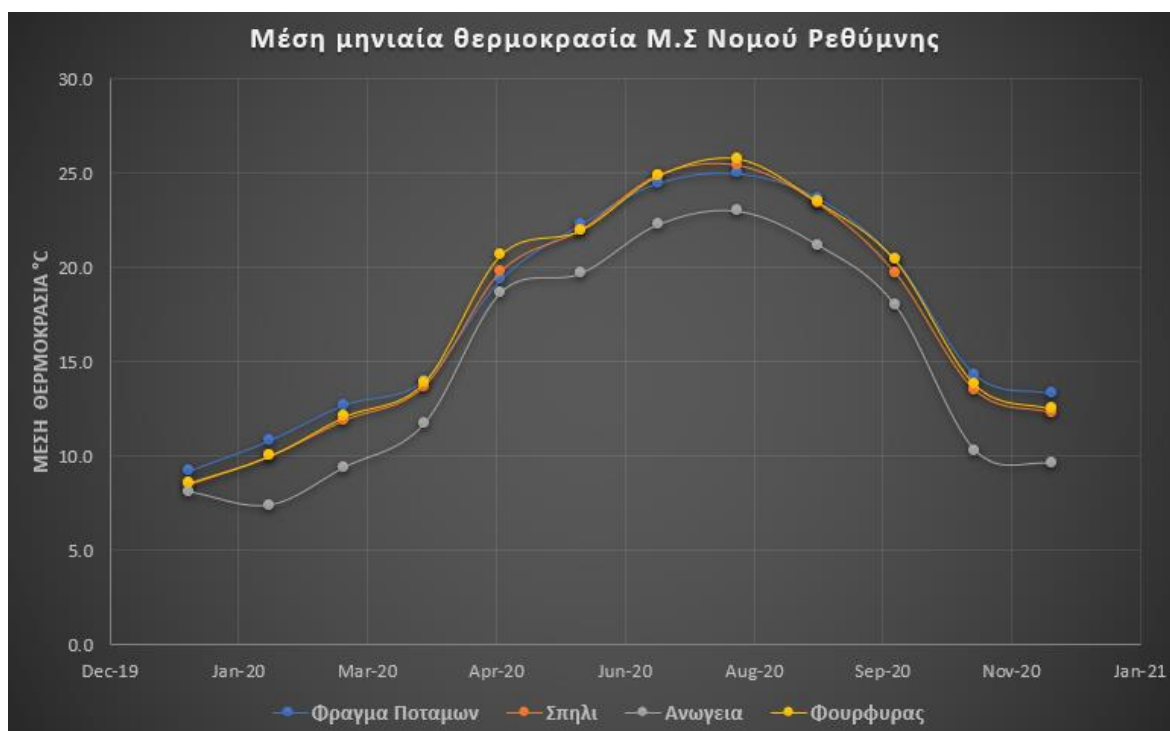
Κατηγορία

- ΑΝΘΡΑΚΙΚΑ ΑΛΛΟΧΘΟΝΩΝ ΣΕΙΡΩΝ
- ΑΝΘΡΑΚΙΚΑ ΤΕΚΤΟΝΙΚΟΥ ΚΑΛΥΜΜΑΤΟΣ ΖΩΝΗΣ ΠΙΝΔΟΥ
- ΑΝΘΡΑΚΙΚΑ ΤΕΚΤΟΝΙΚΟΥ ΚΑΛΥΜΜΑΤΟΣ ΖΩΝΗΣ ΤΡΙΠΟΛΗΣ
- ΑΝΘΡΑΚΙΚΑ ΤΕΚΤΟΝΙΚΟΥ ΚΑΛΥΜΜΑΤΟΣ ΖΩΝΗΣ ΤΡΥΠΑΛΙΟΥ
- ΕΝΟΤΗΤΑ ΠΛΑΚΩΔΩΝ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΩΝ
- ΝΕΟΓΕΝΗ
- ΟΦΙΟΛΙΘΙΚΟ ΣΥΜΠΛΕΓΜΑ ΑΛΛΟΧΘΟΝΩΝ ΣΕΙΡΩΝ
- ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΗ
- ΦΛΥΣΧΗΣ ΤΕΚΤΟΝΙΚΟΥ ΚΑΛΥΜΜΑΤΟΣ ΖΩΝΗΣ ΠΙΝΔΟΥ
- ΦΛΥΣΧΗΣ ΤΕΚΤΟΝΙΚΟΥ ΚΑΛΥΜΜΑΤΟΣ ΖΩΝΗΣ ΤΡΙΠΟΛΗΣ
- ΦΛΥΣΧΟΕΙΔΗ - ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΙΚΑ ΑΛΛΟΧΘΟΝΩΝ ΣΕΙΡΩΝ
- ΦΥΛΛΙΤΙΚΗ - ΧΑΛΑΖΙΤΙΚΗ ΣΕΙΡΑ

3.4 Μετεωρολογικά – Κλιματολογικά στοιχεία της περιοχής

Μια υγρή βιοκλιματική κατάσταση με ήπιους ή κρύους χειμώνες χαρακτηρίζει την περιοχή έρευνας, με βάση τα στοιχεία της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (NMS). Σύμφωνα με στατιστικά στοιχεία, ο Δεκέμβριος και ο Ιανουάριος είναι οι πιο βροχεροί μήνες, ενώ ο Ιούλιος και ο Αύγουστος είναι οι λιγότερο βροχεροί. Τους βροχερούς μήνες, οι χιονοπτώσεις είναι ασυνήθιστες ενώ οι χαλαζοπτώσεις δεν είναι τόσο συχνές. Όσον αφορά τον καιρό, η περιοχή παρουσιάζει υψηλές θερμοκρασίες το καλοκαίρι και ομαλές θερμοκρασιακές διακυμάνσεις το χειμώνα. Σε όλη τη διάρκεια του χρόνου οι άνεμοι που κυριαρχούν, πνέουν κατά μέσο όρο από βόρειες διευθύνσεις.

Παρακάτω στο διάγραμμα 1 φαίνονται τα στοιχεία κλιματολογικού ενδιαφέροντος για το έτος 2020 τα οποία λήφθηκαν από το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών για τους μετεωρολογικούς σταθμούς που αφορούν το νομό Ρεθύμνης. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον δίνεται στα μέσα μηνιαία σύνολα βροχοπτώσεων, στις μέσες ταχύτητες ανέμου και στις μέσες θερμοκρασίες στο φράγμα Ποταμών και στην Αργυρούπολη.



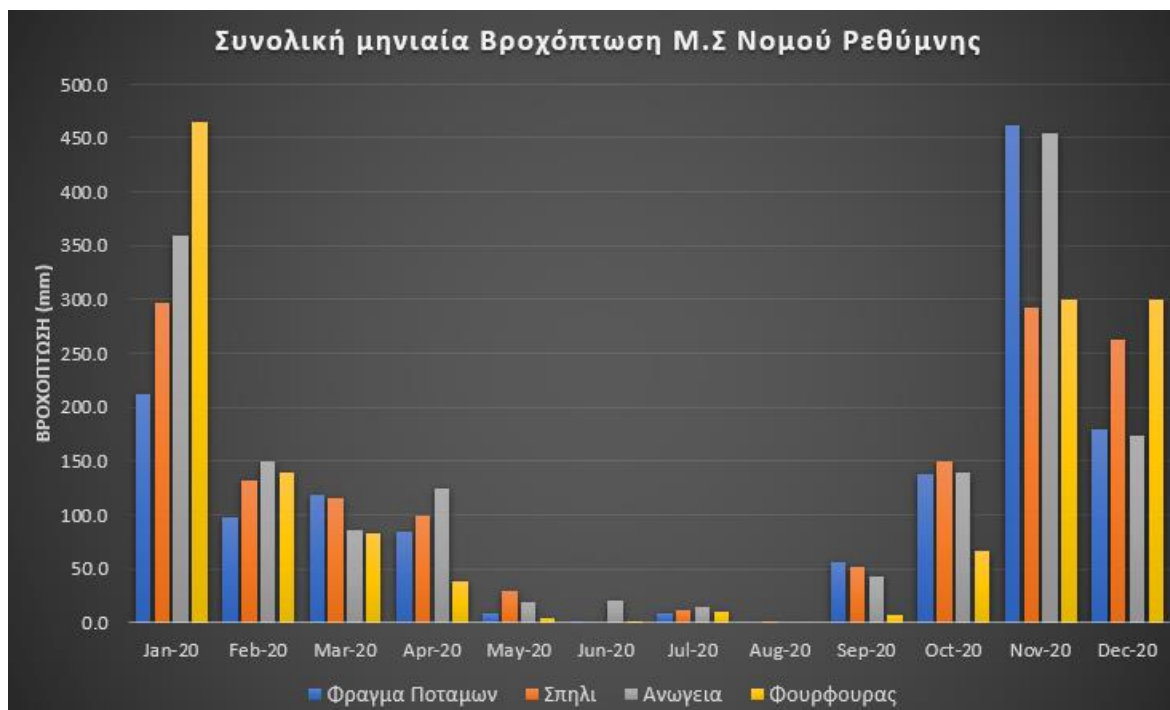
Διάγραμμα 1: Μέση μηνιαία θερμοκρασία για το 2020

Σύμφωνα με το διάγραμμα 1 η θερμοκρασία στις περιοχές μελέτης (Φράγμα Ποταμών & Αργυρούπολη) είναι υψηλή τους μήνες του Ιουνίου, Ιουλίου και Αυγούστου και χαμηλή τους μήνες του Δεκεμβρίου, Ιανουαρίου και Φεβρουαρίου.



Διάγραμμα 2: Μέση μηνιαία θερμοκρασία για το έτος 2020.

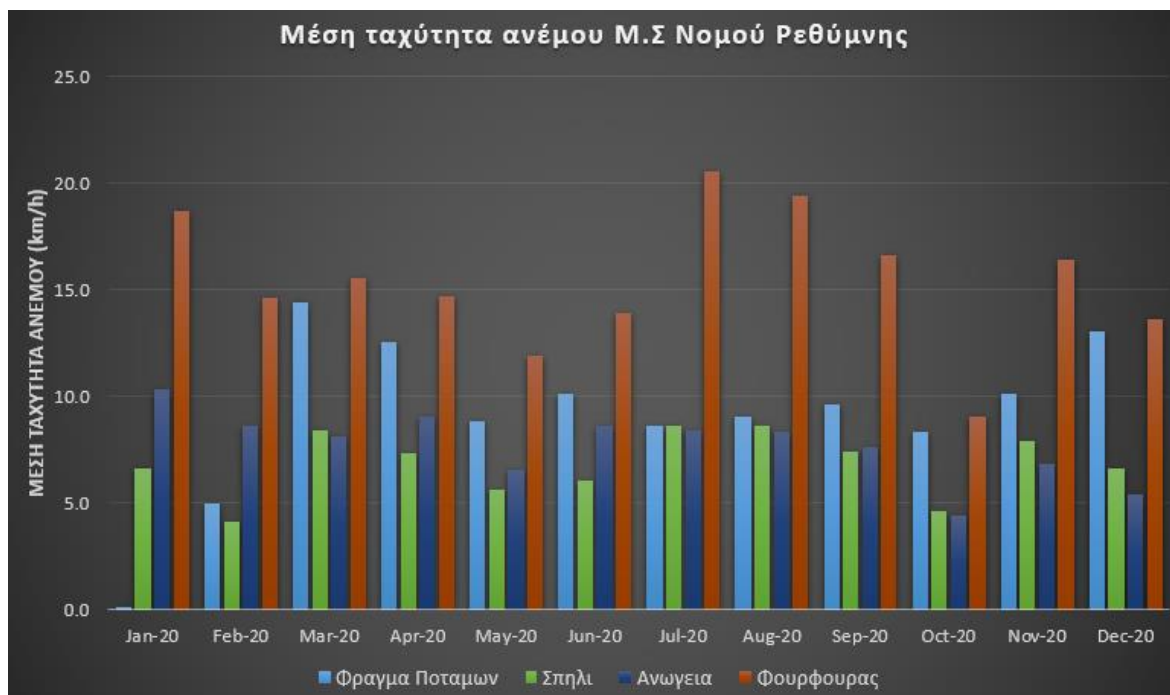
Στο διάγραμμα 2 φαίνονται οι θερμοκρασίες για το έτος 2020. Σχετικά χαμηλές είναι οι θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια του χειμώνα, με την μικρότερη μέση θερμοκρασία να ανήκει στον μηνά Ιανουάριο με τιμή 8.6 °C και σχετικά υψηλές το καλοκαίρι με την μεγαλύτερη μέση θερμοκρασία να ανήκει στον μηνά Αύγουστο με τιμή 24.8 °C.



Διάγραμμα 3: Συνολική μηνιαία βροχόπτωση για το 2020

Από το διάγραμμα 3 διαπιστώνεται ότι η βροχοπτώση είναι έντονη κατά κύριο λόγο τους μήνες του Ιανουαρίου, Νοεμβρίου και Δεκεμβρίου. Λιγότερες κατακρημνίσεις εμφανίζονται κατά τους μήνες Φεβρουαρίου, Μαρτίου, Απριλίου και Οκτωβρίου, ενώ τους υπόλοιπους μήνες παρατηρούνται ελάχιστες ως μηδενικές βροχοπτώσεις.

Σχετικά με την μέση ταχύτητα του ανέμου κατά το έτος 2020, ισχυρότεροι άνεμοι παρατηρείται πως υπάρχουν κατά βάση τους μήνες του Μαρτίου, Απριλίου και Νοεμβρίου, με μεγαλύτερη τιμή εκείνη των 16.5 km/h.



Διάγραμμα 4: Μέση ταχύτητα ανέμου για το 2020

Στην Αργυρούπολη καθαυτή δεν υπάρχει κάποιος μετεωρολογικός σταθμός, ωστόσο δεδομένα μπορούν να ληφθούν από τον πλησιέστερο σταθμό (σε απόσταση μικρότερη των 5 χιλιομέτρων) που είναι τοποθετημένος στην Ασή Γωνιά με υψόμετρο 380m, ο οποίος αποτελεί ιδιοκτησία του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών.

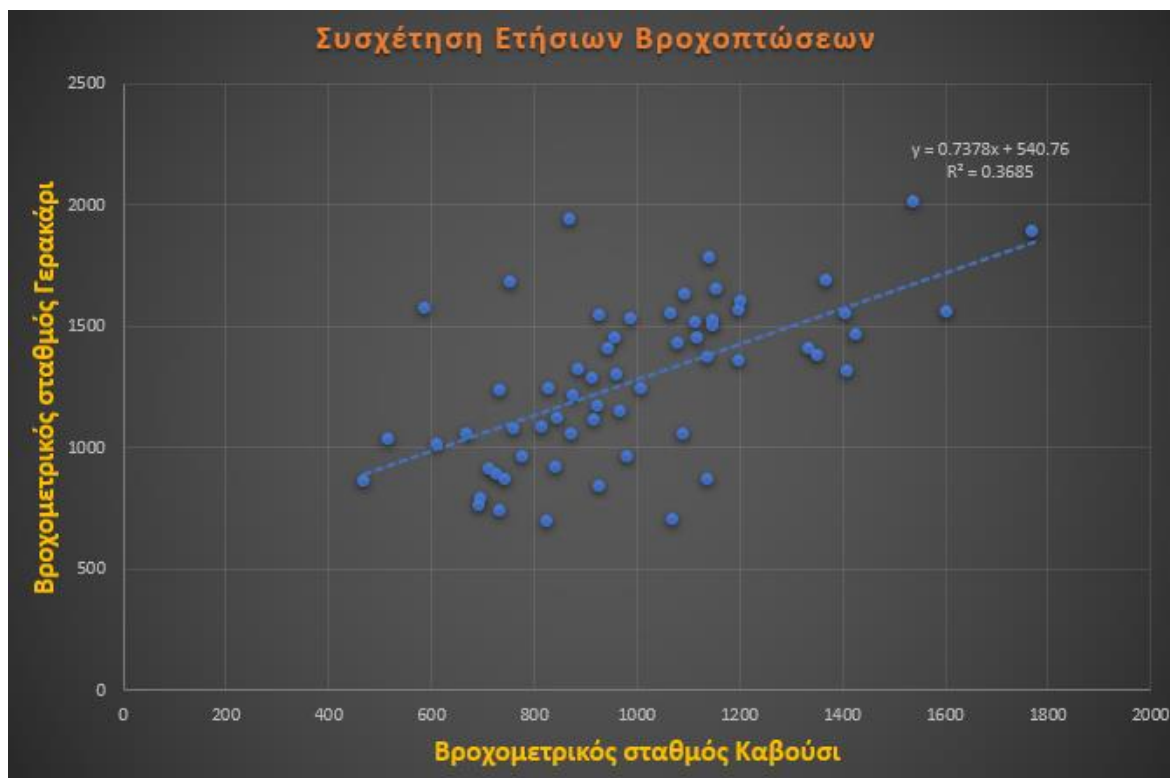
Προκειμένου να υπάρξει μια ακριβέστερη και πιο ολοκληρωμένη εικόνα για το κλίμα της περιοχής της λεκάνης, υπολογίστηκαν από δεδομένα που παραχωρήθηκαν οι ετήσιες βροχοπτώσεις και οι αθροιστικές ετήσιες βροχοπτώσεις για τα έτη 1961 έως 2021 τεσσάρων υποσταθμών. Πιο συγκεκριμένα οι σταθμοί αυτοί αφορούσαν τις περιοχές Λευκόγεια, Βολεώνες, Καβούσι και Γερακάρι οι οποίες βρίσκονταν εντός της προσομοιωμένης περιοχής. Ωστόσο πρέπει να σημειωθεί πως τα βροχομετρικά δεδομένα των σταθμών αυτών εκπροσωπούν τα έτη 1961-2010. Για το χρονικό διάστημα από το 2011 έως το 2021 χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από σταθμούς παραπλήσιους στους αρχικούς. Συγκεκριμένα ο σταθμός Λευκόγεια αντικαταστάθηκε με τον σταθμό στον Πλακιά, ο σταθμός στο Γερακάρι με αυτόν στο Φουρφουρά και οι σταθμοί στους Βωλεώνες και στο Καβούσι (παραπλήσιοι σταθμοί) με αυτόν στο Φράγμα των Ποταμών.

Συγκεκριμένα το διάγραμμα 5 απεικονίζει τη μέση ετήσια βροχοπτώση από το σταθμό Καβούσι για τα έτη 1961 έως 2020 σε συνάρτηση με τη μέση ετήσια βροχοπτώση του σταθμού Γερακάρι για την αντίστοιχη χρονική περίοδο. Μέσω της σύγκρισης των τιμών από τους δυο σταθμούς, γίνεται ευκολά αντιληπτή η απόκλιση των αποτελεσμάτων για τις

αντίστοιχες ετήσιες τιμές βροχοπτώσεων, κάτι το οποίο είναι λογικό να συμβαίνει εξαιτίας των διαφορετικών τοποθεσιών που βρίσκεται ο κάθε σταθμός.

Ωστόσο στο διάγραμμα 5 φαίνεται η υπολογισμένη τιμή του συντελεστή $R^2=0,37$ επιβεβαιώνοντας την ασθενή γραμμική σύνδεση των δεδομένων και υποδεικνύοντας την μεγάλη διαφορά μεταξύ των ετήσιων τιμών βροχόπτωσης που καταγράφονται από τον σταθμό «Καβούσι» και των τιμών του σταθμού «Γερακάρι». Αυτό ουσιαστικά σημαίνει πως οι ετήσιες βροχομετρικές μετρήσεις δεν βρίσκονται κοντά στη γραμμή τάσης από κανέναν από τους δύο σταθμούς που εξετάζουμε στο γράφημα. Έτσι, διαπιστώνεται ότι τα ετήσια στοιχεία βροχοπτώσεων και των δύο σταθμών δεν είναι αντιπροσωπευτικά.

Παρόμοια εικόνα παρατηρείται και στα διαγράμματα 7 και 9, συγκρίνοντας τις τιμές των βροχοπτώσεων που είχαν καταγραφεί από το σταθμό στο Καβούσι με αυτούς που παρείχε ο σταθμός στη Λευκόγεια, καθώς και οι τιμές για το σταθμό της Λευκόγειας συγκρίνονται με τιμές του σταθμού στο περιοχή Βολεώνες. Ως αποτέλεσμα της συσχέτισης μεταξύ των διαφόρων σταθμών, μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι η απόκλιση των τιμών είναι επαρκής για να διαπιστωθεί πως τα δεδομένα δεν είναι ικανοποιητικά και υπάρχουν αρκετά μετρητικά σφάλματα.



Διάγραμμα 5: Συσχέτιση των δεδομένων βροχόπτωσης για τους σταθμούς Καβούσι-Γερακάρι.

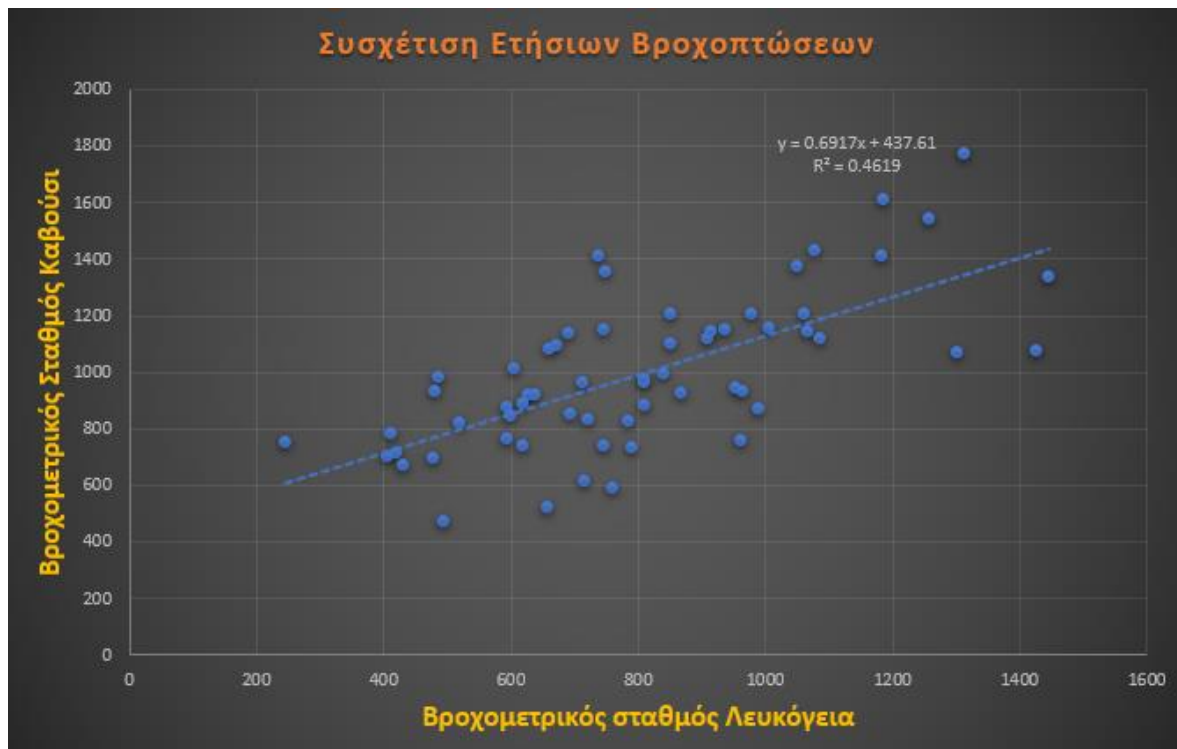
Στο διάγραμμα 6 συγκρίνονται οι αθροιστικές ετήσιες τιμές βροχοπτώσεων του σταθμού στο Καβούσι με τις ετήσιες αθροιστικές τιμές βροχόπτωσης στον σταθμό της περιοχής Γερακάρι. Ο συντελεστής R^2 μπορεί να υπολογιστεί κατά τη χρήση του αθροιστικού-συσσωρευτικού διαγράμματος για την εύρεση μικροσκοπικών συστηματικών σφαλμάτων μεταξύ των τιμών. Σε γενικές γραμμές, όταν η τιμή του προαναφερθέντος συντελεστή είναι κοντά στη μοναδιαία τιμή ($R^2=1$), όπως προκύπτει και στο παρόν διάγραμμα, συμπεραίνεται ότι δεν υπάρχουν συστηματικά σφάλματα μεταξύ των τιμών και

ότι υπάρχει ισχυρή συσχέτιση αναμεσα στους δυο σταθμούς, έτσι ώστε να μην υποδηλώνονται σφάλματα στις τεχνικές μετρήσεις

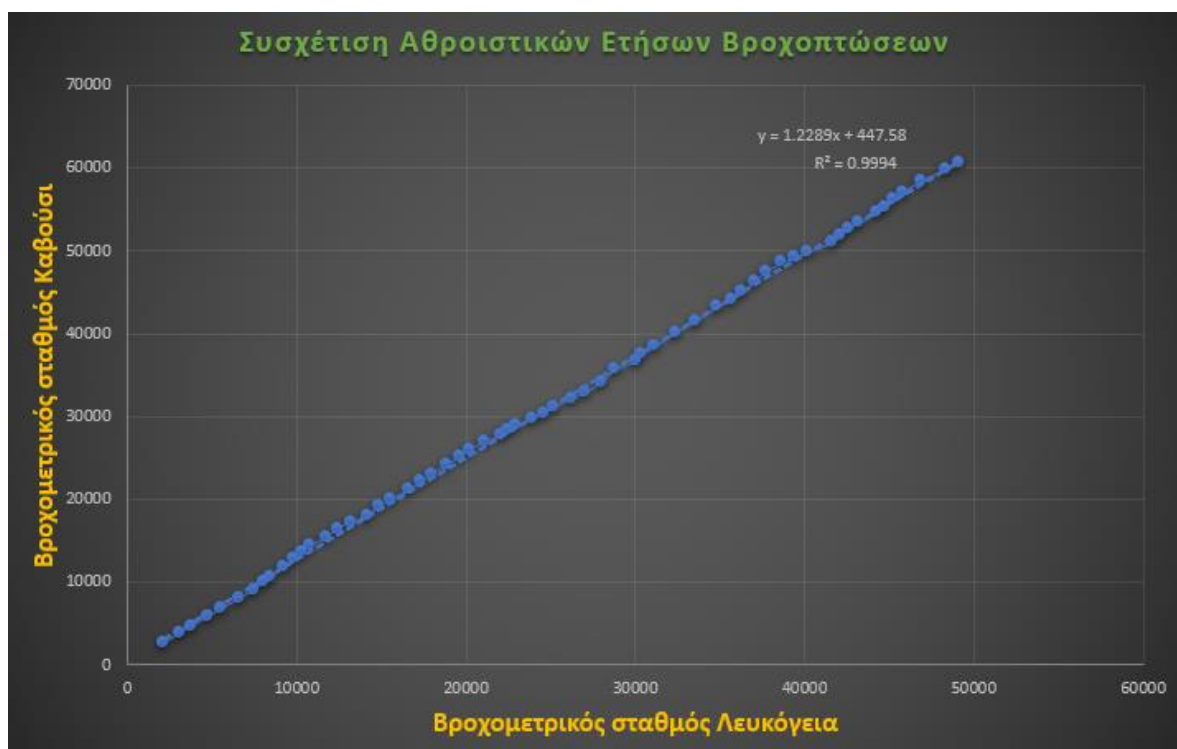
Ιδια εικόνα παρουσιάζεται και στο διάγραμμα 8 όπου οι ετήσιες τιμές βροχόπτωσης συσχετίζονται αθροιστικά αναμεσα στους σταθμούς Καβουσίου και Λευκόγειας, όπως και στο διάγραμμα 10 όπου η συσχέτιση γίνεται μεταξύ των σταθμών Λευκόγειας και Βολεώνες. Κατά αυτόν τον τρόπο επιβεβαιώνεται ότι δεν υπάρχουν συστηματικά λάθη αναμεσα στις τιμές, επιβεβαιώνοντας έτσι την υψηλή συσχέτιση μεταξύ των σταθμών που εξετάζονται.



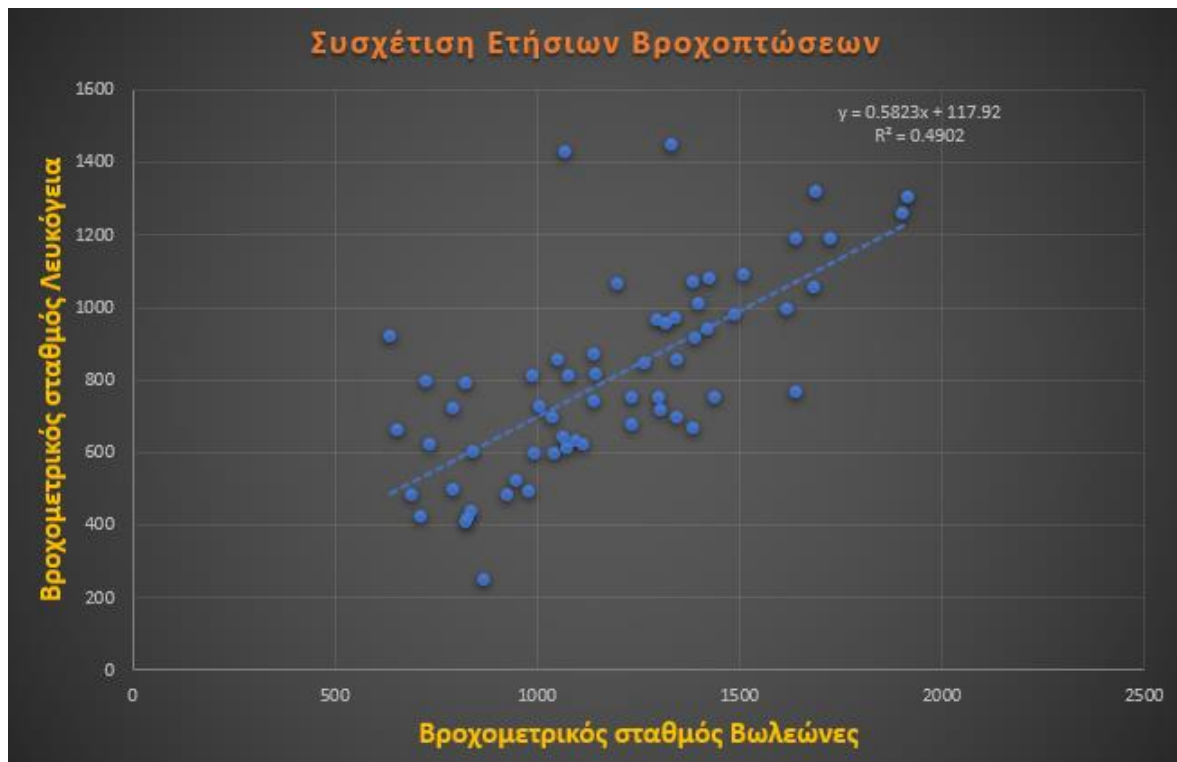
Διάγραμμα 6: Αθροιστική συσχέτιση βροχομετρικών δεδομένων Καβούσι-Γερακάρι



Διάγραμμα 7: Συσχέτιση των δεδομένων βροχόπτωσης για τους Λευκόγεια-Καβούσι



Διάγραμμα 8: Αθροιστική συσχέτιση βροχομετρικών δεδομένων Λευκόγεια-Καβούσι



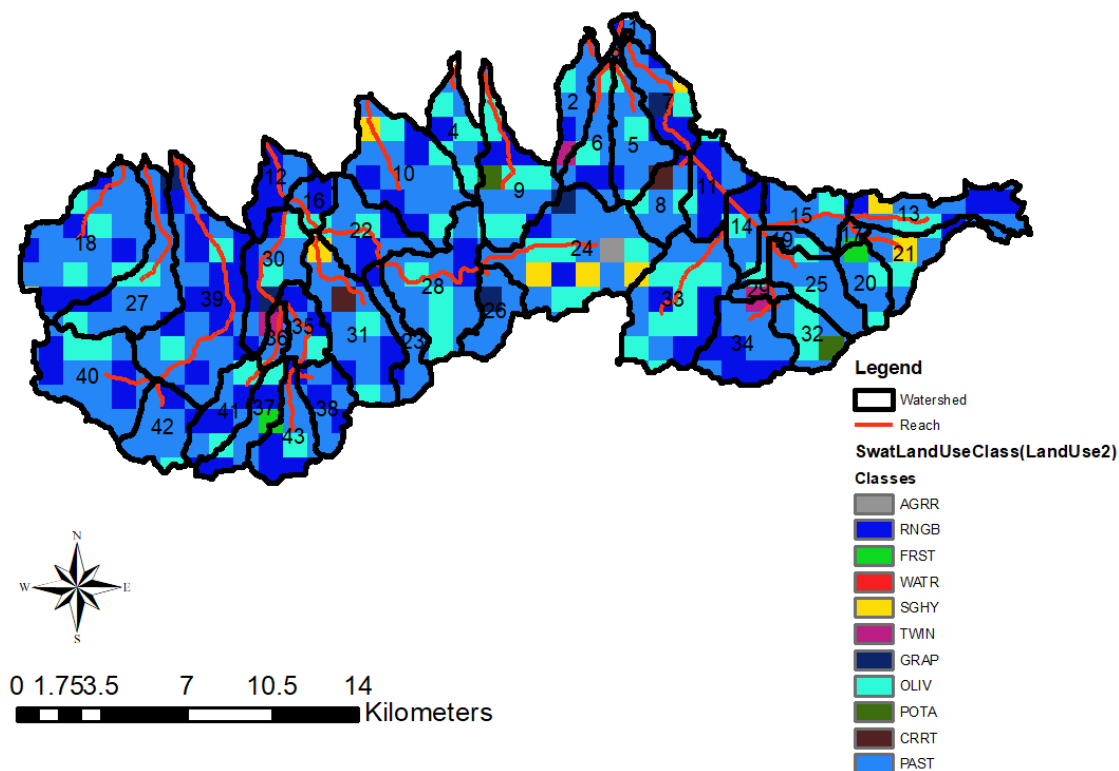
Διάγραμμα 9: Συσχέτιση των δεδομένων βροχόπτωσης για τους Βωλεώνες-Λευκόγεια



Διάγραμμα 10: Αθροιστική συσχέτιση βροχομετρικών δεδομένων Βωλεώνες-Λευκόγεια

3.5 Χρήσεις Γης

Στην εικόνα 17 παρουσιάζονται οι χρήσεις γης με τον τρόπο που αποτυπώθηκαν από το πρόγραμμα SWAT.



Εικόνα 17: Χρήσεις γης στη λεκάνη απορροής της ευρύτερης περιοχής.

Παρακάτω παρουσιάζεται ο πίνακας δεδομένων χρήσεων γης (Landuse) της λεκάνης απορροής των Πηγών Αργυρούπολης σύμφωνα με τα δεδομένα του προγράμματος SWAT.

LANDUSE	Area (ha)	Area (acres)	%Wat.Area
Range-Brush → RNGB	1597.216	3,946.80669	33.31
Water → WATR	29.7276	73.4584994	0.61
Vineyard → GRAP	64.2116	158.670319	1.31
Olives → OLIV	465.8155	1,151.05517	9.79
Pasture → PAST	2.644,0643	6,533.62517	55.13

2: Πίνακας χρήσεων γης της λεκάνης απορροής των Πηγών Αργυρούπολης.

Τα ποσοστά κατανομής των χρήσεων της λεκάνης που διερευνάται υπολογίζονται και εμφανίζονται στην τελευταία στήλη. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, τα βοσκοτόπια (PAST) δηλαδή οι φοιτητικές φυλές που συντελούνται από ποώδη ή ξυλώδη φυτά και αποτελούν την κύρια πηγή τροφής των ζώων του αγρού, αντιπροσωπεύουν το υψηλότερο

ποσοστό περίπου 55%. Η συνολική έκταση της λεκάνης έχει καλλιεργήσιμες και λιβάδιες εκτάσεις που καλύπτουν περίπου το 33% αυτής (RNGB). Περίπου το 10% της συνολικής έκτασης του λεκανοπεδίου καταλαμβάνεται από καλλιεργήσιμες εκτάσεις, με κύρια καλλιέργεια τα ελαιόδεντρα (OLIV). Το υπόλοιπο 2% αποτελείται από αμπέλους και περιοχές με ύπαρξη νερού.

4. Ανάπτυξη Υδρολογικού Μοντέλου

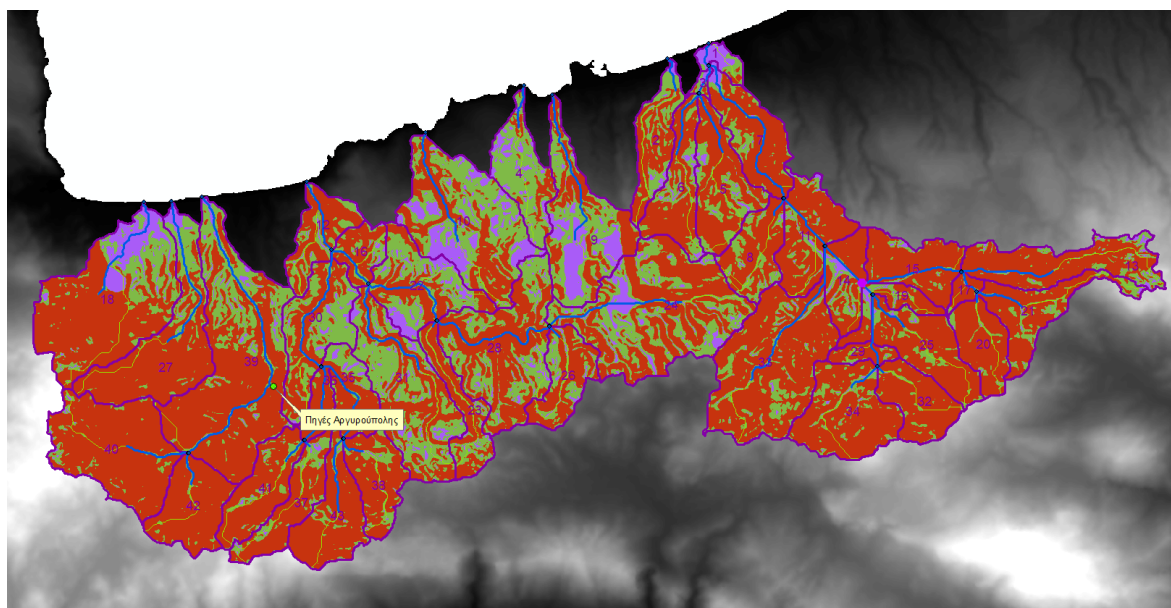
4.1 Πρόγραμμα & Εισαγωγή δεδομένων

Για την μοντελοποίηση της μελέτης περιοχής του συστήματος χρησιμοποιήθηκαν το πρόγραμμα Arc Map 10, Service Pack 5 (Build 4400) και η έκδοση του SWAT 2012.10_0.15. Αρχικά εισάγεται στο σύστημα ένα ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο (DEM grid) το οποίο αναπαριστά σε τρισδιάστατη μορφή γραφικά υπολογιστικά δεδομένα υψομέτρου για την αναπαράσταση του εδάφους. Στη συνέχεια εισάγεται ένας χάρτης χρήσεων γης κι ένας εδαφολογικός χάρτης και γίνεται ο ορισμός των κλήσεων σε τρεις κλάσεις (Από 0-5, 5-15 & 15-9999). Εισάγοντας αυτά τα δεδομένα σε πρώτο στάδιο γίνεται δυνατός ο διαχωρισμός των λεκανών σε υπολεκάνες και σε μονάδες υδρολογικής απόκρισης (HRUs).

Τα HRUs είναι η μικρότερη χωρική μονάδα του μοντέλου και η τυπική προσέγγιση ορισμού HRU συγκεντρώνει όλες τις παρόμοιες χρήσεις γης, τα εδάφη και τις πλαγιές μέσα σε μια υπολεκάνη με βάση τα κατώφλια που καθορίζονται από τον χρήστη. Αυτή η τυπική μέθοδος παρέχει έναν αποτελεσματικό τρόπο για τη διακριτοποίηση μεγάλων λεκανών απορροής όπου η προσομοίωση σε κλίμακα πεδίου μπορεί να μην είναι υπολογιστικά εφικτή. [IJABE, Margaret M. Kalcic et al., 2015] Η έκταση της λεκάνης που μοντελοποιήθηκε είναι 369.5 km² και διαχωρίστηκε σε 43 υπολεκάνες και 256 HRUs.

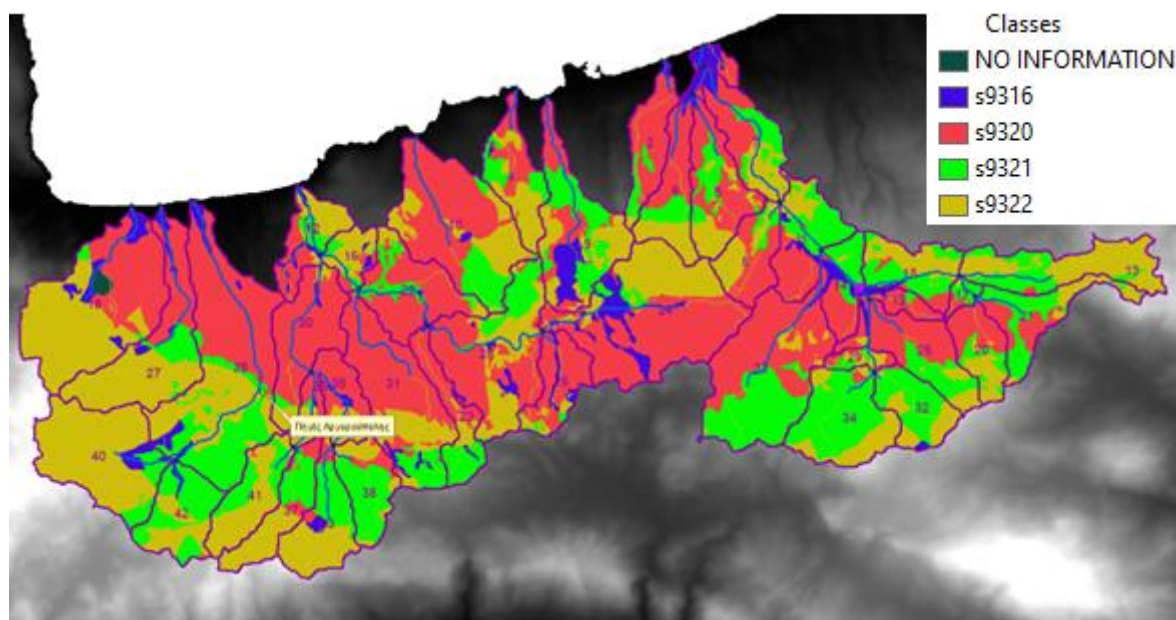
Υστέρα από την ολοκλήρωση της διαδικασίας ορισμού των HRUs, εισάγονται τα καιρικά δεδομένα όπως οι βροχομετρικές και οι θερμοκρασιακές μετρήσεις των σταθμών από το 1961 έως και το 2021. Έτσι το μοντέλο έπεται από μια σειρά διαδικασιών είναι ολοκληρωμένο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί και να περάσει στην επόμενη φάση της βαθμονόμησης-επαλήθευσης. Περισσότερες λεπτομέρειες για τους σταθμούς δίνονται παραπάνω στο κεφάλαιο 3.4 “Μετεωρολογικά – Κλιματολογικά στοιχεία της περιοχής”

Παρακάτω στην εικόνα 15 παρουσιάζεται ο χάρτης κλήσεων της υπομελέτης περιοχής. Με μοβ χρώμα είναι οι κλίσεις από 0- 5%, με πράσινο χρώμα οι κλίσεις από 5-15% ενώ με κόκκινο από 15-9999%.

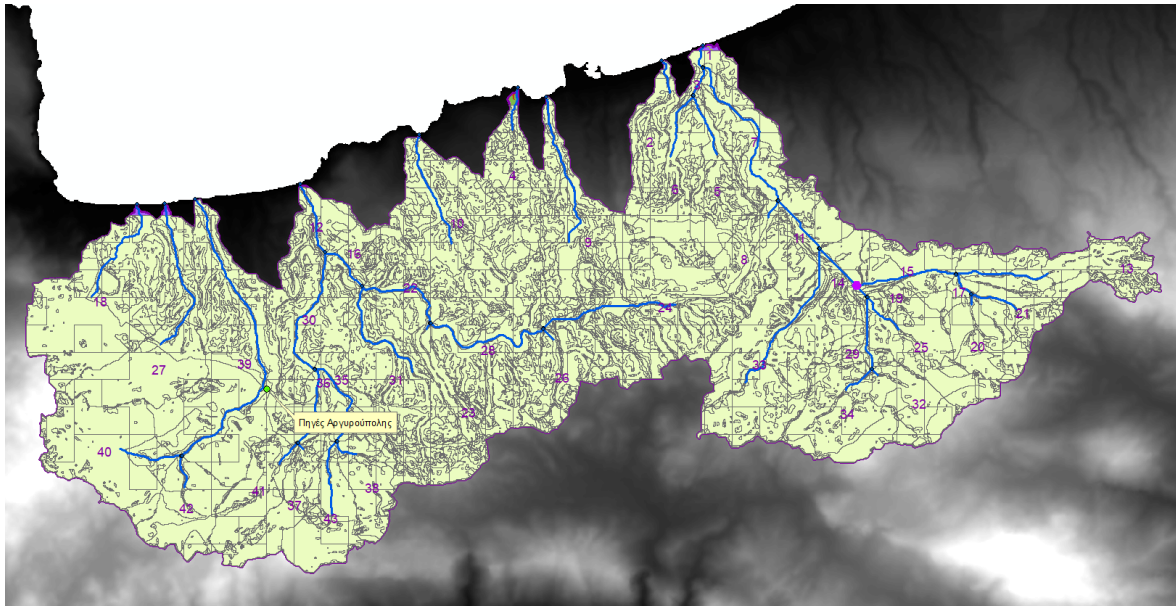


Εικόνα 18: Χάρτης απεικόνισης κλήσεων της μελέτης περιοχής.

Η εικόνα 19 που ακολουθεί απεικονίζει τον εδαφολογικό χάρτη της περιοχής. Παρατηρείται πως στο μεγαλύτερο μέρος αποτελείται από τεταρτογενή εδάφη (s9320) και διάφορα είδη ασβεστόλιθων (s9321-s9322), ενώ σε μικρότερη κλίμακα παρατηρούνται και αλουβιακά νεογενή στρωματά(s9316).



Εικόνα 19: Χάρτης απεικόνισης εδαφών της μελέτης περιοχής.



Εικόνα 20: Χάρτης απεικόνισης των HRUs της μελέτης περιοχής

4.2 Βαθμονόμηση & Επαλήθευση

Ως βαθμονόμηση, ορίζεται ο συστηματικός τρόπος με τον οποίο εκτιμούνται οι τιμές των παραμέτρων ενός μοντέλου, προκειμένου να διασφαλιστεί ότι τα αποτελέσματα του μοντέλου σε ένα δεδομένο σύνολο εισόδων παρατήρησης συγκλίνουν όσο το δυνατόν πιο κοντά στο αντίστοιχο σύνολο αποκρίσεων του φυσικού συστήματος που αντιπροσωπεύει. Έτσι με τη χρήση ενός κατάλληλου μαθηματικού μοντέλου διαμορφώνεται μια ρεαλιστική παραμετροποίηση του συστήματος.

Η διαδικασία της βαθμονόμησης μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε τρεις βασικές κατηγορίες: χειροκίνητη βαθμονόμηση, αυτόματη και ημιαυτόματη βαθμονόμηση. Για την μοντελοποίηση της Αργυρούπολης και του Φράγματος Ποταμών χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της χειροκίνητης βαθμονόμησης, την οποία ο χρήστης ελέγχει πλήρως μεταβάλλοντας κάθε φορά μια παράμετρο ακολουθώντας τη διαδικασία δοκιμής - σφάλματος.

Οι παράμετροι οι οποίες μεταβάλλονται πρώτα είναι εκείνες που προκαλούν έντονες μεταβολές στα αποτελέσματα του μοντέλου δεδομένου ότι αυτές έχουν τον υψηλότερο βαθμό αβεβαιότητας και αλλάζουν σημαντικά τα αποτελέσματά του. Οι τιμές των παραμέτρων μεταβάλλονται στα πλαίσια της διεθνούς βιβλιογραφίας και στόχος είναι να μειωθεί το σφάλμα των προβλέψεων του μοντέλου σε σχέση με τα παρατηρούμενα. Έπειτα ακολουθεί η μεταβολή των παραμέτρων που δεν έχουν ικανοποιητική φυσική ερμηνεία ή δεν υπάρχουν επαρκείς μετρήσεις στο πεδίο και μεταβάλλονται συνήθως αν υπάρχουν συγκεκριμένες μετρήσεις.

Στη χειροκίνητη βαθμονόμηση, μεταβάλλεται μια παράμετρος κάθε φορά και έπειτα τα αποτελέσματα των παρατηρούμενων και προσομοιωμένων δεδομένων συγκρίνονται γραφικά και στατιστικά. Αν και η διαδικασία αυτή είναι υποκειμενική και χρονοβόρα είναι ένας από τους καλύτερους τρόπους αξιολόγησης της μεταβολής των ευαίσθητων και

αβέβαιων παραμέτρων. [Engel, Storm, White, Arnold, & Arabi, 2007] Λόγω της υποκειμενικότητάς της, δεν είναι εύκολο να καθοριστεί η ιδανική βαθμονόμηση όπως και το τελικό σημείο ολοκλήρωσης της διαδικασίας, με αποτέλεσμα να προκύπτουν διαφορετικά αποτελέσματα ανάλογα με τον χρήστη.

Όσον αφορά την αυτόματη βαθμονόμηση, μέσω αυτής εκτελούνται πολλαπλές δοκιμές με αυθαίρετες αλλαγές παραμέτρων, προκειμένου το μοντέλο να παρομοιώνει τα παρατηρούμενα δεδομένα όσο το δυνατόν περισσότερο. Ωστόσο, αυτή η προσέγγιση απαιτεί προσοχή για να αποφευχθεί η ανεξέλεγκτη μεταβολή των παραμέτρων χωρίς την ύπαρξη περιορισμών με απώτερο στόχο την επίλυση ως ένα απλό μαθηματικό πρόβλημα, αλλά να λαμβάνονται υπόψιν οι πραγματικές συνθήκες του συστήματος και να υπάρχει φυσικό νόημα.

Η ημιαυτόματη βαθμονόμηση ίσως αποτελεί μια από τις καλύτερες μεθοδολογίες καθώς συνδυάζει στοιχεία των δυο προηγούμενων μεθόδων. Αρχικά ο χρήστης πραγματοποιεί μεταβολές βάσει της εμπειρίας του, των γνώσεων του και με γνώμονα τη διεθνή βιβλιογραφία. Υστέρα αποκλείει ορισμένες παραμέτρους από τη διαδικασία της βαθμονόμησης και ξεκινά αυτόματη διαδικασία εύρεσης της βέλτιστης λύσης, προσαρμόζοντας τις κατάλληλες παραμέτρους σε ένα πιο περιορισμένο εύρος τιμών. Με αυτόν τον τρόπο, μπορεί να διασφαλιστεί η εγκυρότητα της προσομοίωσης και συγχρόνως δίνεται η δυνατότητα μέσω του αλγόριθμου βελτιστοποίησης του μοντέλου να επιτευχθεί η βέλτιστη δυνατή λύση σε σύντομο χρονικό διάστημα.

Η βαθμονόμηση του μοντέλου ολοκληρώνεται με τη διαδικασία της επαλήθευσης, δηλαδή τη διαδικασία ελέγχου του βαθμού στον οποίο το μοντέλο μπορεί να αναπαράγει την πραγματικότητα. Για να θεωρηθεί μια προσομοίωση επιτυχημένη, δεν επαρκεί η ικανοποιητική, ρεαλιστική και με φυσικό νόημα παραμετροποίηση του μοντέλου. Κρίνεται απαραίτητο να ελεγχθεί η προγνωστική ικανότητα του μοντέλου, δηλαδή η ικανότητα του να αναπαράγει ένα ευρύ φάσμα αποκρίσεων της λεκάνης (πχ σε υγρά και ξηρά έτη) και σε διάφορες θέσεις κατά μήκος του ποταμού. [Refsgaard, 1997] Συνεπώς, τα δεδομένα πεδίου που χωρίζονται σε δύο ή περισσότερες χρονικές περιόδους με σκοπό τη χρήση μιας από αυτές για τη φάση της βαθμονόμησης του μοντέλου και την άλλη για την επαλήθευσή του. Αυτό καταδεικνύει την αποτελεσματικότητα του μοντέλου όσον αφορά την ακρίβεια που παρομοιώνει τα δεδομένα πεδίου που χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση.

Παρακάτω στον πίνακα 3 αναγράφονται οι τιμές των παραμέτρων που έχουν μεταβληθεί για την βαθμονόμηση του μοντέλου.

3: Πίνακας παραμέτρων που μεταβλήθηκαν για την ολοκλήρωση της βαθμονόμησης.

Πίνακας εισαγωγής δεδομένων	Παράμετρος	Περιγραφή Παραμέτρου	Τυπικό εύρος στο SWAT MIN	MAX	Τιμές στη λεκάνη απορροής
Soils(.sol)	SOL_Z	Depth from soil surface to bottom of layer (mm)	0	3500	950
	SOL_AWC	Available water capacity in soil layer (mm H ₂ O/mm soil)	0	1	0.8
	SOL_K	Saturated hydraulic conductivity	0	2000	12
Subbassin(.sub)	CH_K1	Effective hydraulic conductivity in tributary channel alluvium (mm/hr)	0	300	300
	TLAPS	Temperature lapse rate (°C/km)	0	50	20
HRU(.hru)	ESCO	Soil evaporation compensation factor	0	1	0.3
	EPCO	Plant uptake compensation factor	0	1	1
	SURLAG	Surface runoff lag coefficient	0	24	2
Groundwater(.gw)	GW_DELAY	Groundwater delay (days)	0	500	10
	ALPHA_BF	Baseflow alpha factor (days)	0	1	0.01
	GWQMIN	Threshold depth of water in the shallow aquifer required for return flow to occur (mm H ₂ O)	0	5000	3000
	GW_REVAP	Groundwater revap coefficient	0.02	2	0.02
	RCHRG_DP	Deep aquifer percolation fraction	0	1	0
Management(.Mgt)	CN2	Initial SCS runoff curve number for moisture condition II	35	98	35
General Data (.bsn)	SFTMP	Snowfall temperature (°C)	-5	5	-5
	SMTMP	Snow melt base temperature (°C)	-5	5	-5
	SMFMX	Maximum melt rate for snow during the year (summer solstice) (mm H ₂ O / (°C · day))	0	10	10
	SMFMN	Minimum melt rate for snow during the year (winter solstice) (mm H ₂ O / (°C · day))	0	10	2

4.3 Αποτελέσματα Μοντελοποίησης Φράγματος Ποταμών

Στην υδρολογία χρησιμοποιούνται κάποιοι στατιστικοί δείκτες για την εκτίμηση των βελτιώσεων της εκάστοτε βαθμονόμησης κατά τη διαδικασία trial & error με τις προγενέστερες και για την ποιοτική εκτίμηση της ικανότητας του μοντέλου να αναπαριστά την υδρολογική συμπεριφορά του φυσικού συστήματος στο παρελθόν και στο μέλλον. Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν διάφοροι δείκτες έτσι ώστε να αξιολογηθεί η μοντελοποίηση. Ο πρώτος δείκτης αφορά τον συντελεστή απόδοσης Nash-Sutcliffe (Nash-Sutcliffe Efficiency), έπειτα χρησιμοποιήθηκαν ο μέσος δείκτης υπολειμματικού σφάλματος RMSE (Root Mean Square), ο λόγος του μέσου τετραγωνικού σφάλματος προς την τυπική απόκλιση των μετρήσεων RSR (Root mean square error-Standard deviation of measured data-Ratio) και τέλος η ποσοστιαία απόκλιση PBIAS (Percent BIAS).

➤ **NSE**

Ο συντελεστής απόδοσης Nash-Sutcliffe αξιολογεί κατά πόσο συγκλίνουν οι προσομοιωμένες και οι παρατηρούμενες χρονικές σειρές και κυμαίνεται μεταξύ $-\infty$ και 1. Όταν ο δείκτης παίρνει την τιμή 1 υποδεικνύει πως υπάρχει μια τέλεια αντιστοιχία μεταξύ των παρατηρούμενων και των προβλεπόμενων τιμών. Για τιμές μικρότερες του μηδενός υποδηλώνεται ότι η μέση παρατηρούμενη τιμή είναι καλύτερη από την προσομοιωμένη τιμή, οι οποίες υποδηλώνουν μη αποδεκτές αποδόσεις, ενώ για τιμές μεταξύ 0 και 1 θεωρούνται γενικά ως αποδεκτές αποδόσεις.

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

όπου,

O_i : η παρατηρούμενη χρονοσειρά

P_i : η χρονοσειρά που προσομοιώνεται

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

n : το μήκος της χρονοσειράς

➤ **RMSE**

Ο μέσος δείκτης υπολειμματικού σφάλματος RMSE, όσο μικρότερες τιμές λαμβάνει τόσο καλύτερη κρίνεται η αποδοτικότητα του μοντέλου. Μια τέλεια αντιστοίχιση μεταξύ των παρατηρούμενων και των προβλεπόμενων τιμών υπάρχει όταν ο δείκτης ισούται με 0. Με την αύξηση των τιμών RMSE υποδηλώνεται μια ολοένα και πιο κακή αντιστοίχιση. Το μοντέλο αξιολογείται σε συνδυασμό με τον υπολογισμό του δείκτη RSR επειδή οι τιμές που προκύπτουν από αυτόν τον στατιστικό δείκτη εξαρτώνται από το μέγεθος των ποσοτήτων με τις οποίες σχετίζεται. [Singh et al. 2004]

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}}$$

όπου,

O_i : η παρατηρούμενη χρονοσειρά

P_i : η προσομοιωμένη χρονοσειρά

n : ο αριθμός των παρατηρήσεων

➤ **RSR**

Ο λόγος του RMSE προς την τυπική απόκλιση των παρατηρούμενων δεδομένων χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του δείκτη RSR. Οι αριθμοί που δέχεται κυμαίνονται του μηδενός, το οποίο υποδηλώνει είτε μηδενική τιμή του RMSE είτε μηδενική απόκλιση των σφαλμάτων, υποδεικνύοντας την επιτυχία της προσομοίωσης στον μεγαλύτερο δυνατό βαθμό. Η απόδοση της προσομοίωσης μοντέλου αυξάνεται όσο μειώνεται η τιμή του δείκτη RSR, και κατά συνέπεια η τιμή του δείκτη RMSE.

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

όπου,

O_i : η παρατηρούμενη χρονοσειρά

P_i : η προσομοιωμένη χρονοσειρά

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

n : το μήκος της χρονοσειράς

➤ **PBIAS**

Η μέση πιθανότητα οι προσομοιωμένες τιμές να είναι μεγαλύτερες ή μικρότερες από τις αντίστοιχες παρατηρούμενες τιμές μετράται από τον δείκτη PBIAS. Ο δείκτης αυτός αποτελεί για το μοντέλο μια μέτρηση της αποδοτικότητάς του και της προγνωστικής του ισχύος. [Gurta et al., 2003] Οι τιμές χαμηλού μεγέθους για το PBIAS υποδεικνύουν ακριβή προσομοίωση μοντέλου και η ιδανική τιμή του είναι 0. Η μεροληψία υποεκτίμησης υποδεικνύεται με θετικές τιμές, ενώ η μεροληψία υπερεκτίμησης υποδεικνύεται με αρνητικές. Οι τιμές εντός του εύρους $\pm 25\%$ θεωρούνται αποδεκτές. [Moriassi et al, 2007]

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

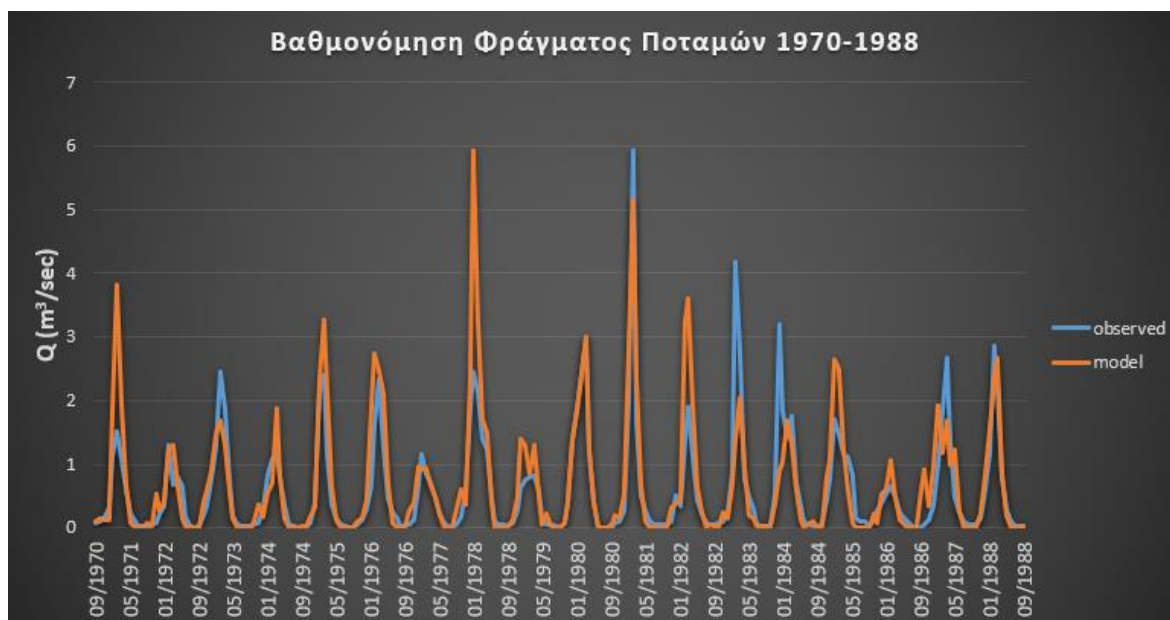
όπου,

O_i : η παρατηρούμενη χρονοσειρά

P_i : η προσομοιωμένη χρονοσειρά

n : το μήκος της χρονοσειράς

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη βαθμονόμηση απεικονίζονται στο διάγραμμα 11. Στο διάγραμμα παρουσιάζονται οι προσομοιωμένες και οι παρατηρούμενες παροχές για την πρώτη χρονοσειρά, που αφορά την χρονική περίοδο των ετών 1970-1988. Παρατηρώντας γίνεται αντιληπτό πως ο βαθμός προσομοίωσης των παροχών του μοντέλου είναι αρκετά ικανοποιητικός.



Διάγραμμα 11: Παρατηρημένες και προσομοιωμένες παροχές που αφορούν την πρώτη χρονοσειρά μελέτης 1970-1988.

Σύμφωνα με τους στατιστικούς δείκτες που αναφέρθηκαν παραπάνω είναι δυνατή η αξιολόγηση της προσομοίωσης ως ικανοποιητική. Οι υπολογισμένες τιμές των δεικτών για την πρώτη χρονοσειρά φαίνονται παρακάτω στον πίνακα 5 και αξιολογούνται με βάση τις τυπικές τιμές για τους αντίστοιχους δείκτες που παρατίθενται από τον Moriasi στον πίνακα 4. [Moriasi et al. 2007]

4: Πίνακας δεικτών κατά Moriasi, για αξιολόγηση βαθμονόμησης μοντέλων.

Βαθμολογία Απόδοσης	RSR	NSE	PBIAS%
Πολύ καλή	$0.00 \leq RSR \leq 0.50$	$0.75 \leq NSE \leq 1.00$	$PBIAS < \pm 10$
Καλή	$0.50 \leq RSR \leq 0.60$	$0.65 \leq NSE \leq 1.00$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$
Ικανοποιητική	$0.60 \leq RSR \leq 0.70$	$0.50 \leq NSE \leq 0.65$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$
Μη ικανοποιητική	$RSR > 0.70$	$NSE \leq 0.50$	$PBIAS \geq \pm 25$

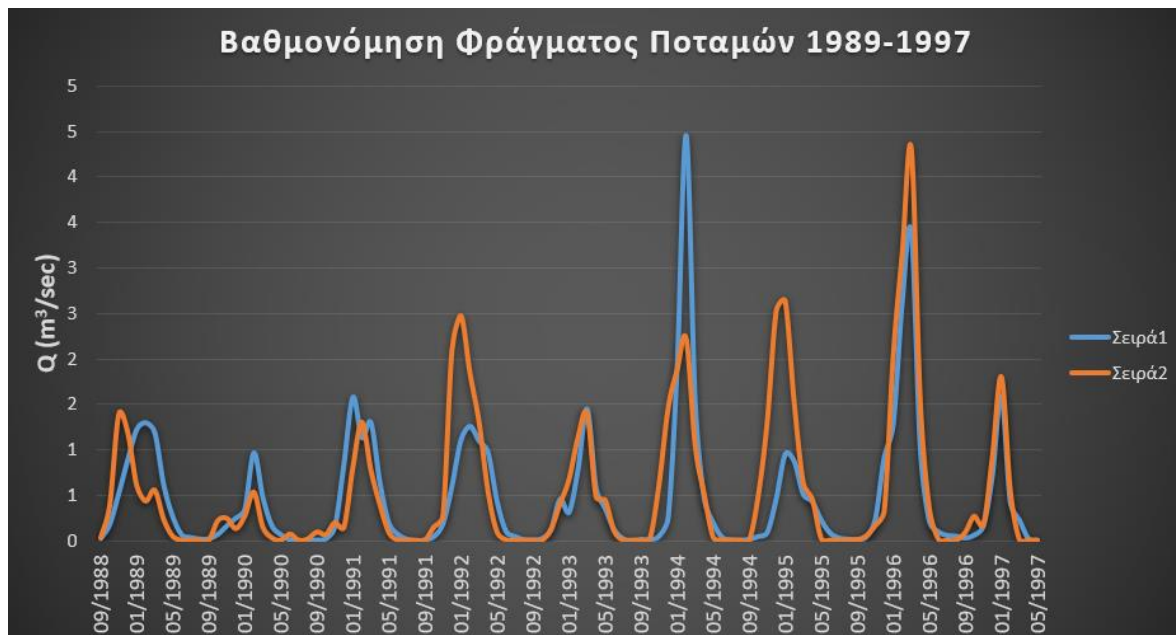
5: Αξιολόγηση των δεικτών της πρώτης χρονοσειράς με βάση τις πρότυπες τιμές κατά Moriasi.

Δείκτες	Τιμές δεικτών	Βαθμολογία απόδοσης
<i>NSE</i>	0.58	Ικανοποιητικός
<i>RMSE</i>	0.54	Καλός
<i>RSR</i>	0.65	Ικανοποιητικός
<i>PBIAS</i>	-13.73	Καλός

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα η πρώτη χρονοσειρά που αφορά τα έτη 1970 έως και 1988 έχει μοντελοποιηθεί καλά. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τις τιμές των παραπάνω δεικτών που λαμβάνουν ικανοποιητικές και καλές βαθμολογίες απόδοσης. Αναλυτικότερα ο δείκτης *NSE* παίρνοντας την τιμή αυτή θεωρείται πως υπάρχει ικανοποιητική αντιστοιχία μεταξύ των παρατηρούμενων και των προβλεπόμενων τιμών. Η αποτελεσματικότητα και η προγνωστική ισχύς του μοντέλου επιβεβαιώνονται από τον δείκτη *PBIAS* που παίρνει την τιμή (-13,73), μέσω του οποίου εκτιμάται πως οι προσομοιωμένες τιμές δεν έχουν μεγάλη τάση υπέρβασης των αντίστοιχων παρατηρούμενων. Λόγω των ικανοποιητικών τιμών, οι δείκτες *RMSE* & *RSR* επιβεβαιώνουν τελικά την αποτελεσματικότητα της προσομοίωσης του μοντέλου.

Παρατηρώντας το διάγραμμα 12 με τις παρατηρημένες και προσομοιωμένες παροχές που αφορούν την πρώτη χρονοσειρά μελέτης γίνεται αντιληπτό πως επιτυγχάνεται αρκετά καλή προσαρμογή του μοντέλου, όσον αφορά τη βασική παροχή εκτός από κάποια έτη ακραίας παροχής 1983 & 1984 όπου έχουν μετρηθεί υψηλότερες παροχές από τις προσομοιωμένες και κάποια έτη με μικρότερες παροχές από τις προσομοιωμένες 1970 & 1978. Αυτό δείχνει ότι είτε το μοντέλο δεν αποτυπώνει επαρκώς τις παροχές αυτών των ετών, είτε υπάρχουν ανακρίβειες στα δεδομένα πεδίου, κάτι που μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι οι μηνιαίες μετρήσεις για τα δεδομένα πεδίου δεν πραγματοποιήθηκαν με απόλυτη συνέπεια ή ακόμη και ορισμένες από αυτές ενδεχομένως να παραλείφθηκαν.

Η βαθμονόμηση του Φράγματος Ποταμών επαληθεύεται στη συνέχεια χρησιμοποιώντας τη δεύτερη χρονοσειρά μελέτης που αφορά τα χρονιά 1989-1997, με τις ίδιες τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν και για την πρώτη.



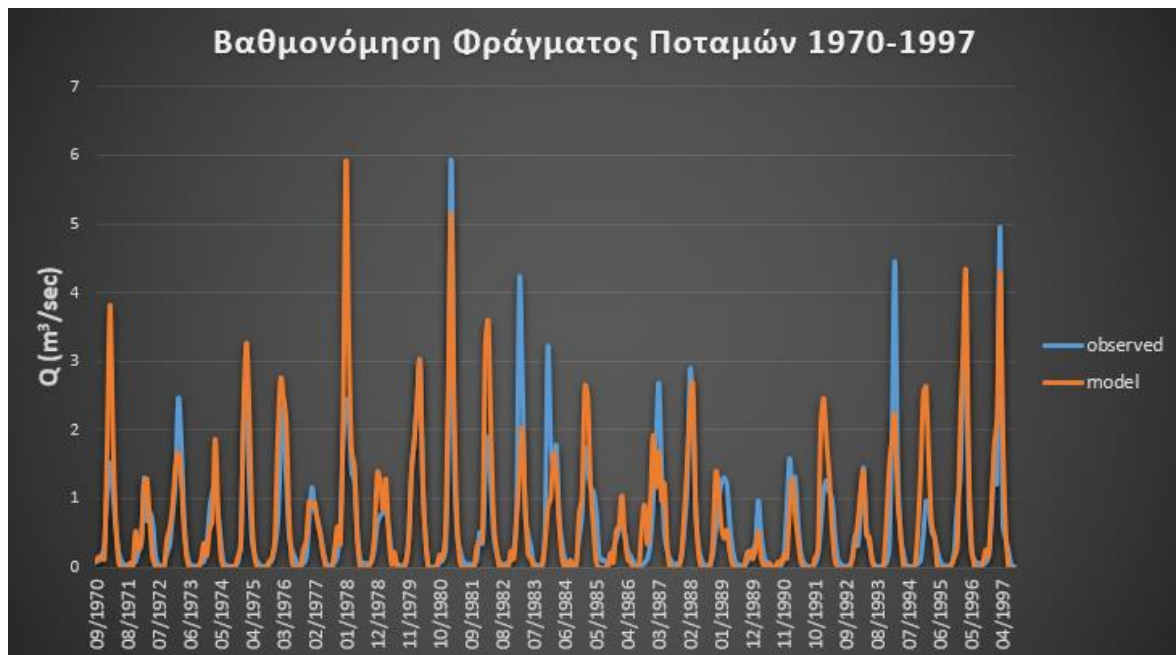
Διάγραμμα 12: Προσομοιωμένες και παρατηρημένες παροχές που αφορούν την δεύτερη χρονοσειρά μελέτης (1989-1997).

Παρατηρώντας το διάγραμμα 12, είναι σαφές ότι η υδρολογία της υπό μελέτη περιοχής προσομοιώνεται ικανοποιητικά, καθώς κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης συγκλίνουν με τις παρατηρούμενες τιμές με εξαίρεση τα έτη 1992 & 1994-1995. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι στην εικόνα της προσομοίωσης δεν περιέχονται οι μετρήσεις των μηνών Μάρτιου και Απριλίου του έτους 1997 καθώς έπειτα από σύγκριση τους με μετρήσεις γειτονικών σταθμών φάνηκε να μην αντιπροσωπεύουν την πραγματικότητα, δημιουργώντας μεγάλες αποκλίσεις κατά τον υπολογισμό των στατιστικών δεικτών. Παρακάτω ακολουθεί ο πίνακας 6 με τις υπολογισμένες τιμές των στατιστικών δεικτών και η αξιολόγηση τους κατά Moriasi.

6: Πίνακας αξιολόγησης των δεικτών της δεύτερης χρονοσειράς με βάση τις πρότυπες τιμές κατά Moriasi.

Δείκτες	Τιμές δεικτών	Βαθμολογία απόδοσης
<i>NSE</i>	0.54	Ικανοποιητικός
<i>RMSE</i>	0.52	Καλός
<i>RSR</i>	0.68	Ικανοποιητικός
<i>PBIAS</i>	-11.26	Καλός

Κατά την αξιολόγηση των παραπάνω δεικτών βλέπουμε ότι η δεύτερη χρονοσειρά έχει μοντελοποιηθεί κι αυτή σε καλό επίπεδο, με τις τιμές των δεικτών να είναι αποδέκτες και πολύ κοντά σε εκείνες της πρώτης χρονοσειράς. Έτσι σύμφωνα με τη βαθμολογία απόδοσης, η υδρολογία της υπό μελέτης περιοχής φαίνεται να προσομοιώνεται καλά με τις πραγματικές τιμές. Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα των προσομοιωμένων και παρατηρούμενων παροχών περιέχοντας και τις δυο χρονοσειρές από το 1970-1989.



Διάγραμμα 13: Διάγραμμα 12: Προσομοιωμένες και παρατηρημένες παροχές που αφορούν τα έτη (1970-1997).

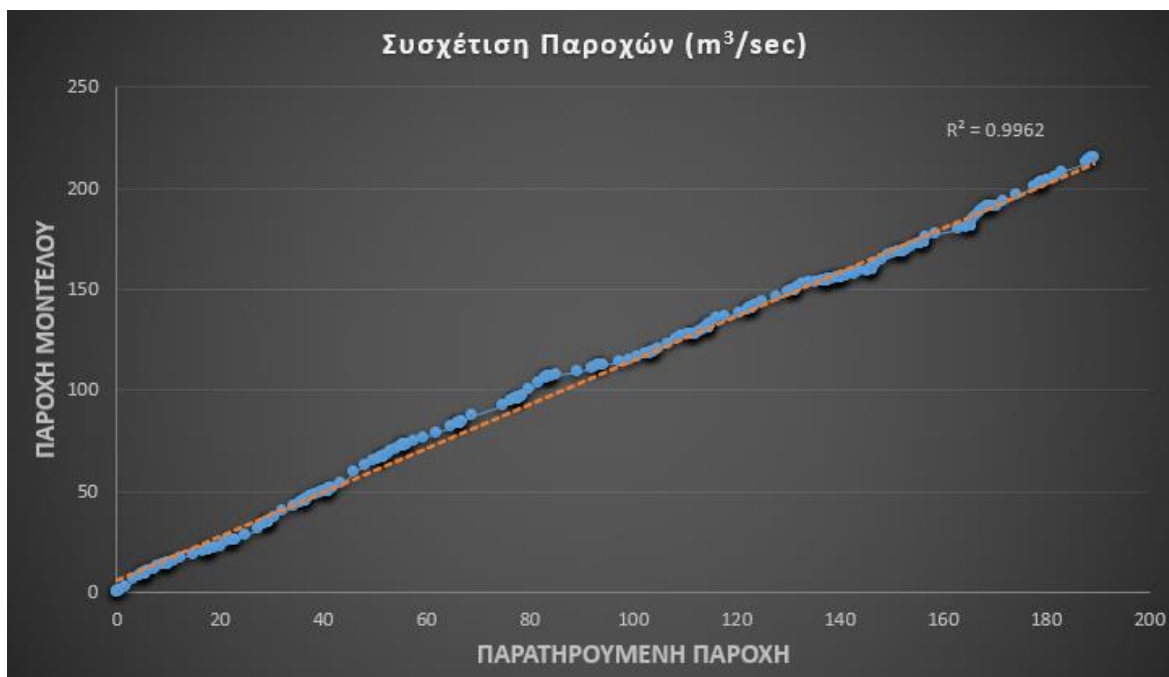
Παρατηρώντας το διάγραμμα 13, φαίνεται στην περίοδο αυτή να υπάρχει σχετικά καλή προσομοίωση των τιμών του μοντέλου με τις τιμές του πεδίου. Η βασική παροχή καλύπτει επαρκώς τα περισσότερα χρόνια αν και σε ορισμένες περιπτώσεις ακραίων παροχών δείχνει να υστερεί να προβλέψει τις τιμές. Ωστόσο όπως αναφέρθηκε προηγουμένως αυτό μπορεί να αποδίδεται σε εσφαλμένες μετρήσεις, σε ελλείψεις ή μη απέχουσες μετρήσεις και άλλους εξωτερικούς παράγοντες όπως έντονες βροχοπτώσεις.

7: Πίνακας αξιολόγησης των στατιστικών δεικτών της συνολικής περιόδου 1970-1997.

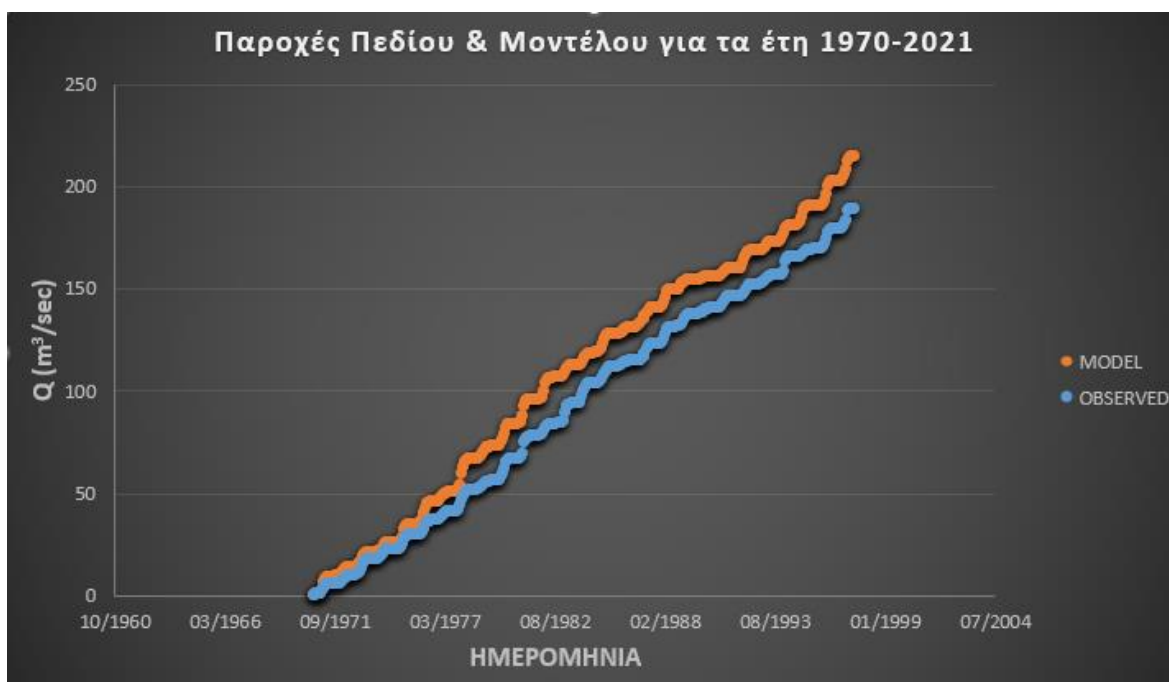
Δείκτες	Τιμές δεικτών	Βαθμολογία απόδοσης
<i>NSE</i>	0.57	Ικανοποιητικός
<i>RMSE</i>	0.54	Καλός
<i>RSR</i>	0.65	Ικανοποιητικός
<i>PBIAS</i>	-13.47	Καλός

Από τον πίνακα 7, συμπεραίνεται ότι στο σύνολο της περιόδου όπως και στις δυο προηγούμενες χρονοσειρές μελέτης, οι στατιστικοί δείκτες παίρνουν εξίσου ικανοποιητικές τιμές. Συγκεκριμένα οι δείκτες *NSE* & *RSR* είναι ικανοποιητικοί επιβεβαιώνοντας τη σχετική σύγκλιση των χρονοσειρών καθώς και ο κάλος δείκτης *PBIAS* που επιβεβαιώνει την αποδοτικότητα και την προγνωστικότητα του μοντέλου.

Στα διαγράμματα 14,15 που φαίνονται παρακάτω γίνεται γραμμική σύγκριση και συσχέτιση των παρατηρούμενων παροχών της περιοχής μελέτης με τις παροχές του μοντέλου για τα έτη 1970-1997.



Διάγραμμα 14: Συσχέτιση παρατηρούμενων τιμών πεδίου και μοντέλου.



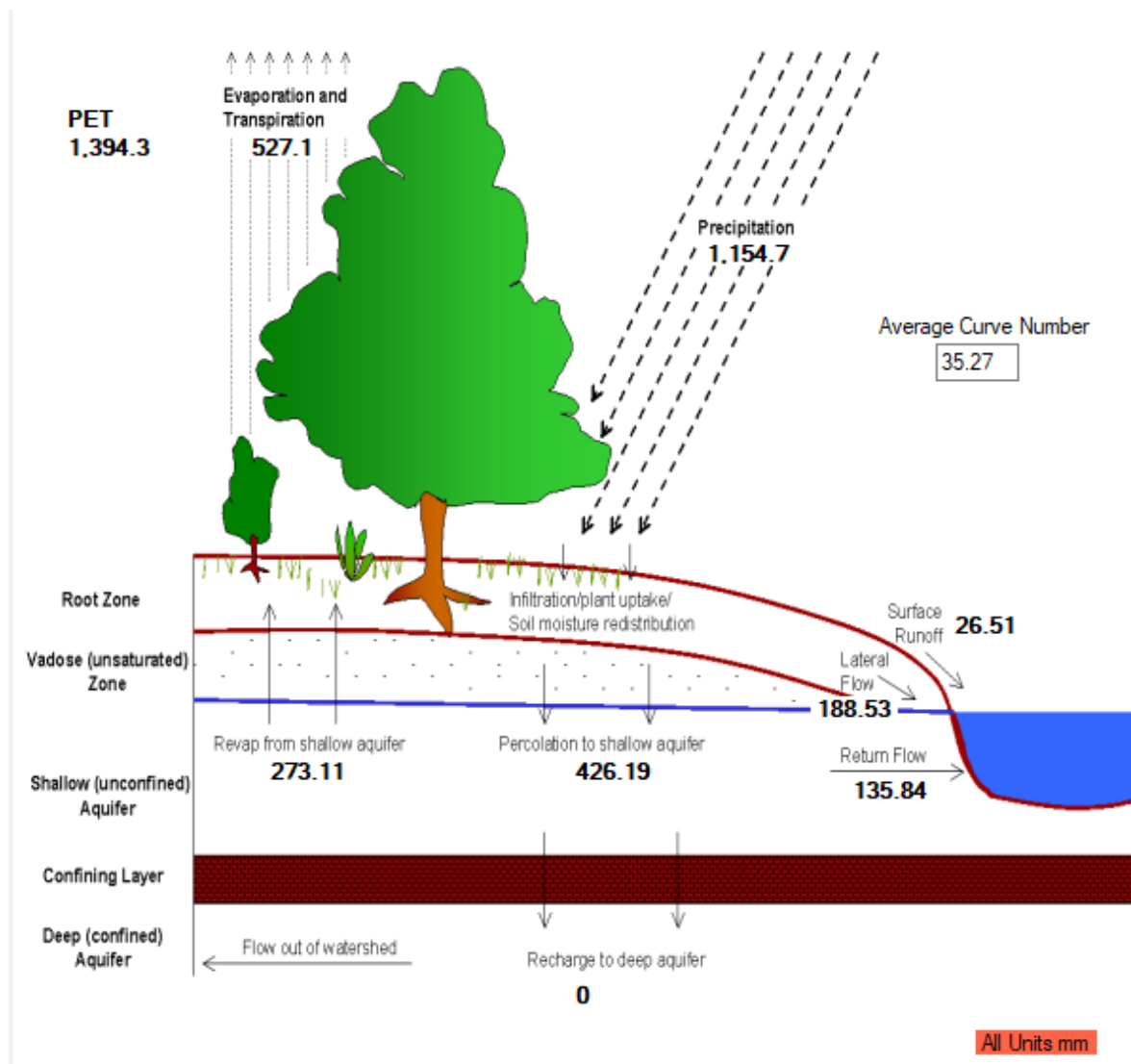
Διάγραμμα 15: Σύγκριση παρατηρούμενων παροχών και παροχών μοντέλου 1970-1997.

Στο διάγραμμα 14 από τη σύγκριση των παροχών παρατηρείται μια αρκετά ικανοποιητική σύγκλιση, στο μεγαλύτερο μέρος των τιμών με εξαίρεση ορισμένες περιπτώσεις που δείχνουν να μην ταυτοποιούνται πλήρως. Εν συνεχεία στο διάγραμμα 15 μέσω της συγκρίσεις των παροχών στην ίδια χρονοσειρά διαπιστώνουμε ότι ενώ οι παρατηρούμενες τιμές του πεδίου προσεγγίζουν τις τιμές του μοντέλου από το έτος 1978 κι έπειτα παρατηρείται μια σχετικά μικρή απόκλιση των παροχών. Το αποτέλεσμα αυτό έχει

να κάνει με το γεγονός ότι το μοντέλο παρουσιάζει αποκλίσεις σε γενικές γραμμές σε έντονα καιρικά φαινόμενα, οι οποίες όπως έχει ήδη αναφερθεί πιθανώς να οφείλονται σε εσφαλμένες, ελλείψεις ή μη απέχουσες μετρήσεις και άλλους εξωτερικούς παράγοντες. Ωστόσο, δεδομένου των μικρών αποκλίσεων μεταξύ των δύο γραφημάτων, το μοντέλο μπορεί να θεωρηθεί πως προσομοιώνει τις τιμές των πεδίου σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό. Τα στοιχεία του υδατικού ισοζυγίου της υδρολογικής λεκάνης των ποταμών Αμαρίου εμφανίζονται στον παρακάτω πίνακα.

8: Τιμές από το υδατικό ισοζύγιο της υδρολογικής λεκάνης των ποταμών Αμαρίου.

Υδατικό ισοζύγιο φράγματος ποταμών Αμαρίου	
Παράμετρος	Τιμή (mm)/year
<i>Βροχόπτωση</i>	<i>1.155</i>
<i>Εξατμισοδιαπνοή</i>	<i>527</i>
<i>Κατείσδυση στο ρηχό υδροφορέα</i>	<i>426</i>
<i>Επανατροφοδότηση από το ρηχό υδροφορέα</i>	<i>273</i>
<i>Πλάγια Ροή</i>	<i>189</i>
<i>Βασική Ροή</i>	<i>136</i>
<i>Επιφανειακή απορροή</i>	<i>27</i>



Εικόνα 21: Απεικόνιση του υδατικού ισοζυγίου του φράγματος ποταμών Αμαρίου αποτυπωμένο από το SWAT.

Στην εικόνα 21 παρουσιάζεται το υδατικό ισοζύγιο του φράγματος Αμαρίου το οποίο προκύπτει από το μοντέλο SWAT σύμφωνα με τις παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν. Σύμφωνα με το παραπάνω ισοζύγιο παρατηρείται πως η τιμή των κατακρημνίσεων υπολογίζεται στα 1.155 mm/year, ενώ από αυτό μόλις τα 189 mm/year οδηγούνται στη λεκάνη απορροής μέσω πλάγιας ροής (Lateral Flow). Στον ρηχό υδροφόρα (Shallow Aquifer) κατεισδύουν περίπου 426 mm/year, δηλαδή αυτά απορροφώνται στους πόρους του εδάφους και από τη βλάστηση. Η ποσότητα νερού που απορρέει στην έξοδο της λεκάνης αντιστοιχεί σε 136 mm/year ενώ η εναπομένουσα ποσότητα 273 mm/year επιστρέφει στο επιφανειακό μέρος του εδάφους και εξατμίζεται. Αξίζει να σημειωθεί πως στην παρούσα υδρολογική μελέτη, λόγω της σύστασης των εδαφών θεωρείται ότι δεν κατεισδύει σημαντική ποσότητα ύδατος στον βάθη υδροφόρα και για αυτό τον λόγω παρατηρείται μηδενική κατείσδυση. Ωστόσο σε θεωρητικό επίπεδο μια μικρή ποσότητα περνά από τον ρηχό στον βάθη υδροφόρα και χάνεται από το σύστημα. Η ποσότητα του νερού που δεν απορροφάτε από την επιφάνεια του εδάφους, ένα μέρος αυτής καταλήγει στην λεκάνη απορροής μέσω της επιφανειακής απορροής με τιμή περίπου 27 mm/year ενώ

η υπόλοιπη ποσότητα παραμένει πάνω στην επιφάνεια του εδάφους και στην επιφάνεια των φυτών και τελικά εξατμίζεται 527mm/year. Συνολικά η ποσότητα του νερού που καταλήγει στη λεκάνη απορροής υπολογίζεται στα 351 mm/year, ποσότητα σχετικά καλή δεδομένου της πυκνής βλάστησης στην περιοχή με μεγάλο μέρος των κατακρημνισμάτων να συγκρατείται από τα φυτά και στη συνέχεια να εξατμίζεται και πάλι στην ατμόσφαιρα.

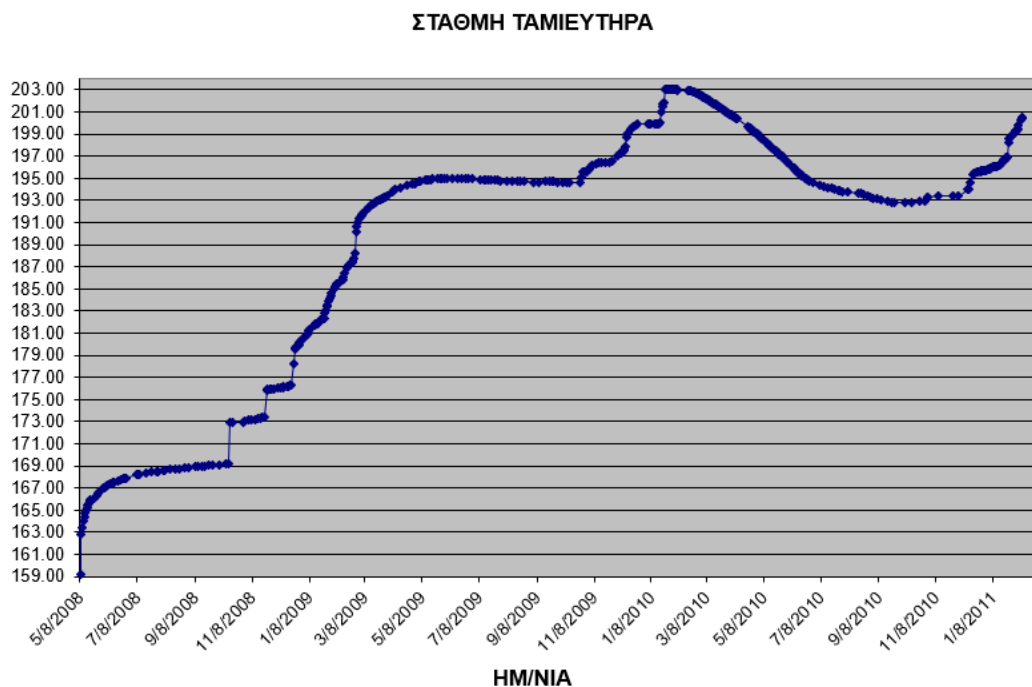
4.4 Αποτελέσματα Προσομοίωσης Ταμιευτήρα

Για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων της μοντελοποίησης του ταμιευτήρα από το πρόγραμμα SWAT, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα μιας υπάρχουσας μελέτης από την υπηρεσία Ο.Α.Δ.Υ.Κ. του νομού Ρεθύμνης, που αφορούν ημερήσιες μετρήσεις του όγκου και της στάθμης του ταμιευτήρα από τον Μάιο του 2008 έως και τον Φεβρουάριο του 2012. Η παρούσα προσομοίωση θα εστιαστεί στην περίοδο 05/2008 όπου ξεκινά η πλήρωση του ταμιευτήρα έως 01/2010 όπου παρατηρείται η πρώτη μεγιστοποίηση της στάθμης και του όγκου του ταμιευτήρα. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα προαναφερθέντα δεδομένα αντιπροσωπεύοντας τις μέσες τιμές του κάθε μήνα.

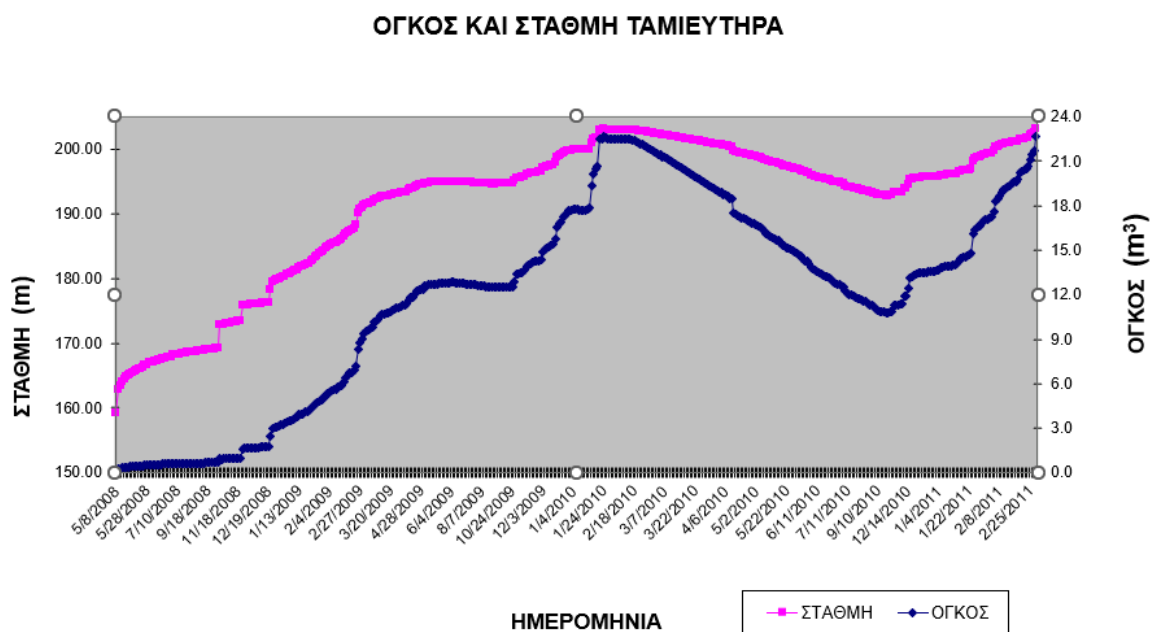
9: Δεδομένα όγκου και στάθμης Φράγματος Ποταμών (πηγή: Ο.Α.Δ.Υ.Κ.).

Ημερομηνία	Όγκος ταμιευτήρα ανά μηνά (mm ³)	Μηνιαία στάθμη (m)
05/2008	0	0
06/2008	177306	167.48
07/2008	233726	168.33
08/2008	257694	168.69
09/2008	276250	168.97
10/2008	434964	171.35
11/2008	855028	174.38
12/2008	1974774	177.84
01/2009	3822029	182.39
02/2009	6165129	187.08
03/2009	10159168	192.54
04/2009	11621990	194.11
05/2009	12343505	194.88
06/2009	12435738	194.98
07/2009	12311983	194.85
08/2009	12191730	194.72
09/2009	12142361	194.67
10/2009	12588779	195.13
11/2009	13743250	196.29

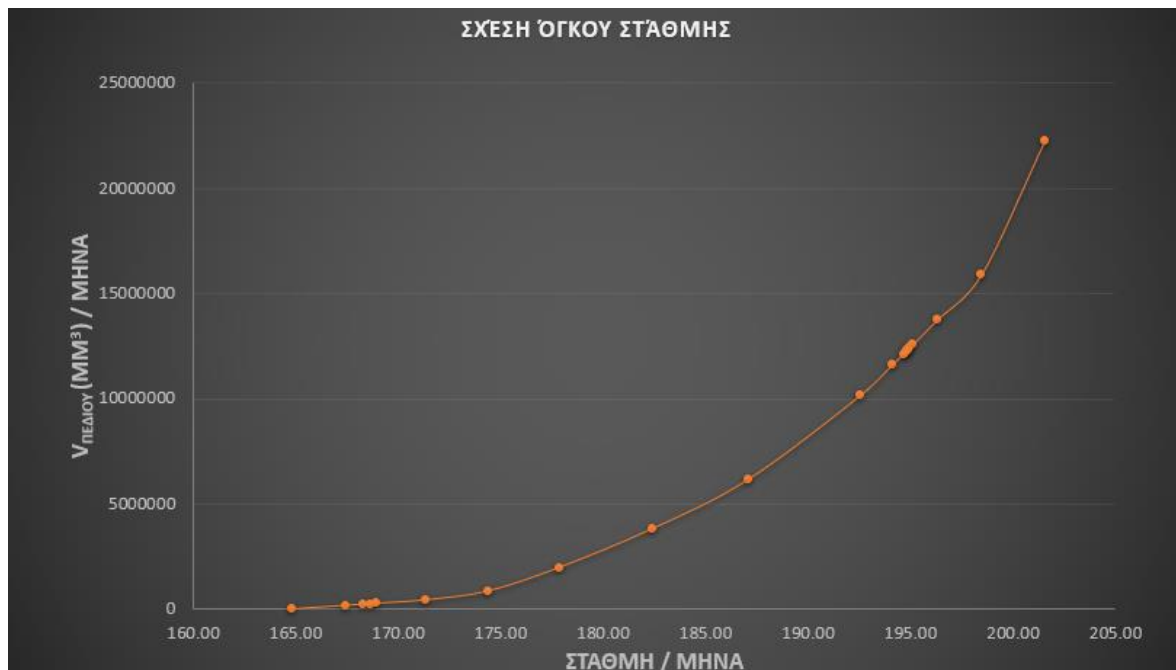
12/2009	15928583	198.48
01/2010	20253925	201.55



Διάγραμμα 16: Στάθμη ταμειυτήρα σε σχέση με τον χρόνο (πηγή: Ο.Α.Δ.Υ.Κ.).



Διάγραμμα 17: Στάθμη & Όγκος ταμειυτήρα σε σχέση με τον χρόνο (πηγή: Ο.Α.Δ.Υ.Κ.).



Διάγραμμα 18: Συσχέτιση Στάθμης & Όγκου ταμιευτήρα (πηγή: Ο.Α.Δ.Υ.Κ.).

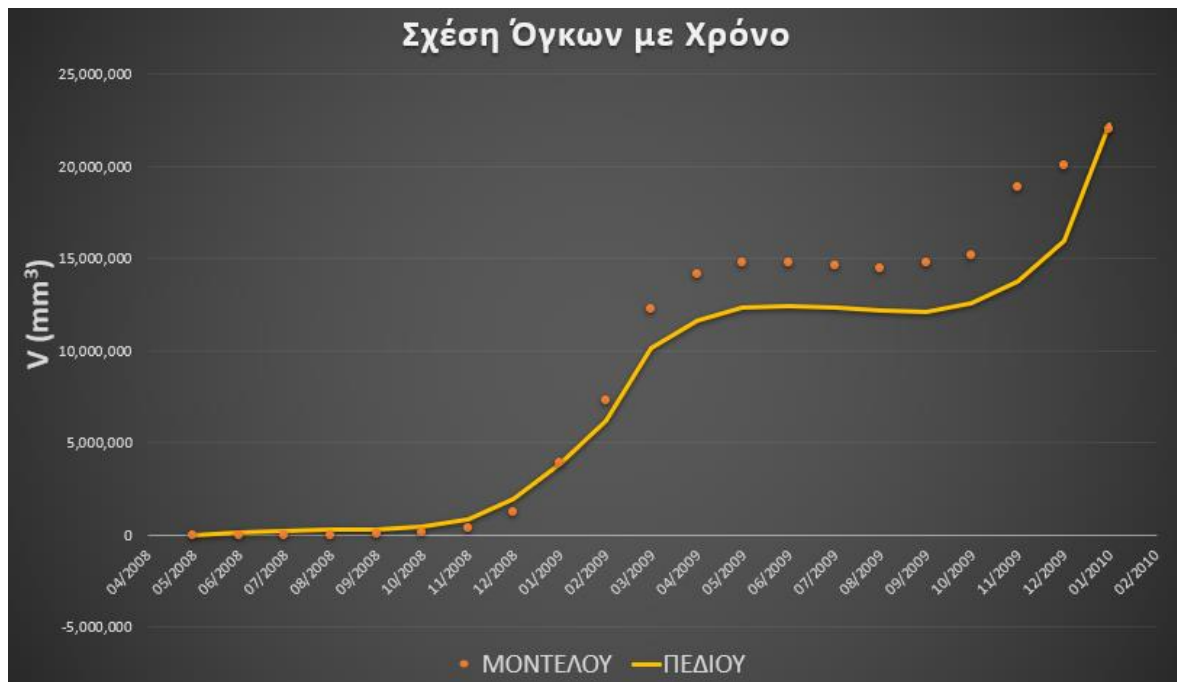
Στα παραπάνω διαγράμματα (16,17,18) παρουσιάζονται γραφικά τα δεδομένα που λήφθηκαν από τον ΟΑΔΥΚ Ρεθύμνου για την πληρέστερη κατανόηση της εξέλιξης του Φράγματος Ποταμών κατά την περίοδο 05/2008 έως 01/2010 και την περαιτέρω σύγκριση και συσχέτιση αυτών στη συνέχεια με αυτά του προγράμματος μοντελοποίησης. Η χρονική περίοδος μπορεί να μην αντιπροσωπεύει το συνολικό χρονικό διάστημα λειτουργίας του ταμιευτήρα, ωστόσο κρίνεται ικανή για την αξιολόγηση της προσομοίωσης και εκτίμησης των δεδομένων.

Στη συνέχεια στον πίνακα 10 παρουσιάζονται οι παράμετροι που προέκυψαν από το πρόγραμμα SWAT έπειτα από κάποιες ανάγωγες, έτσι ώστε να είναι συγκρίσιμες οι τιμές του μοντέλου με τις τιμές του πεδίου και να κατασκευαστούν τα απαραίτητα διαγράμματα. Είναι σημαντικό να αναφερθεί, πως για να λάβει μέρος μια τέτοια σύγκριση - συσχέτιση ήτανε αναγκαία η προσφορά νερού του ταμιευτήρα να ληφθεί μηδενική, τόσο για την παροχέτευση του δικτύου άρδευσης όσο και του δικτύου ύδρευσης καθώς και για τις οποιεσδήποτε τυχόν διαρροές ύδατος.

10: Πίνακας δεδομένων που προκύπτει από την προσομοίωση του ταμιευτήρα την περίοδο 05/2008-01/2010.

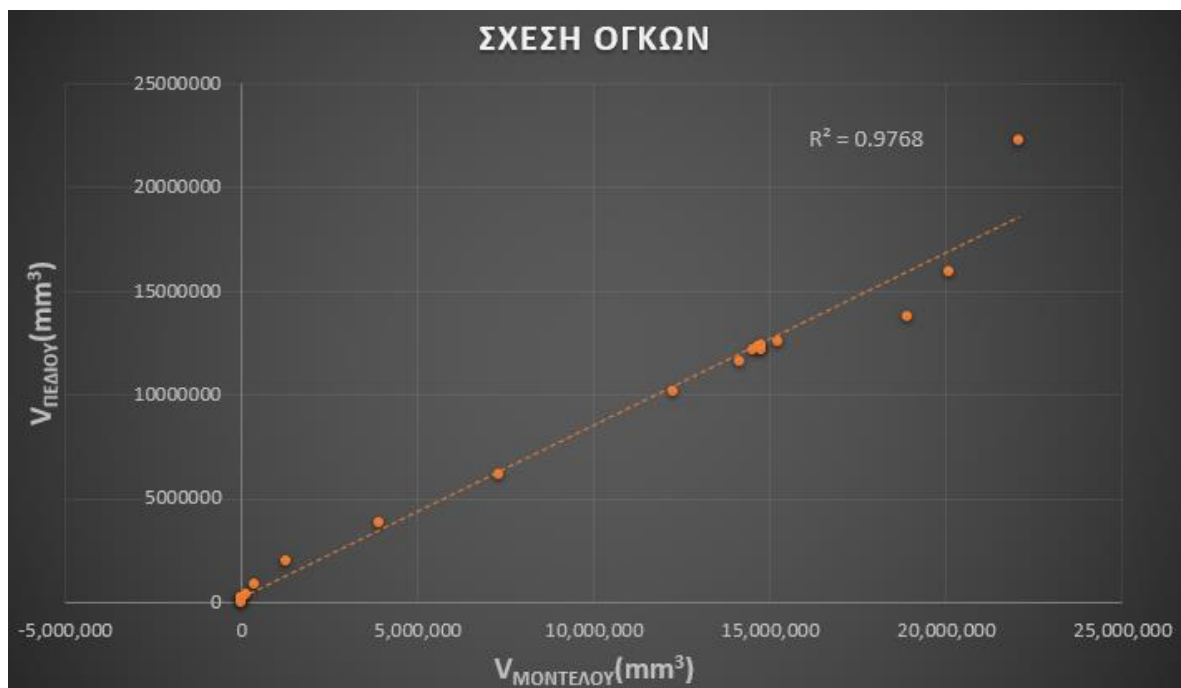
Ημερομηνία	Όγκος	<i>Q_{in} per month</i>	<i>PA</i>	<i>PETA</i>	<i>Q_{out}</i>	<i>Q_{irr}</i>
05/2008	0	89,539	33	214	0	0
06/2008	99	379	0	280	0	0
07/2008	-227	0	0	326	0	0
08/2008	-543	0	0	315	0	0
09/2008	54,204	54,976	48	182	0	0
10/2008	125,796	71,754	23	139	0	0
11/2008	362,058	236,494	122	110	0	0
12/2008	1,266,891	905,299	393	74	0	0
01/2009	3,891,938	2,625,368	239	82	0	0
02/2009	7,275,960	3,384,461	371	67	0	0
03/2009	12,249,541	4,973,789	95	113	0	0
04/2009	14,151,569	1,902,269	72	169	0	0
05/2009	14,750,972	599,694	85	207	0	0
06/2009	14,754,440	3,727	0	259	0	0
07/2009	14,630,369	0	0	315	0	0
08/2009	14,509,832	0	0	285	0	0
09/2009	14,751,755	291,600	116	192	0	0
10/2009	15,196,053	444,882	443	141	0	0
11/2009	18,904,909	3,709,152	197	99	0	0
12/2009	20,051,401	3,037,306	232	91	0	0
01/2010	22,045,168	3,999,456	457	92	0	0

Στο διάγραμμα 19 προκύπτει η σχέση του όγκου νερού του ταμιευτήρα του μοντέλου, με τον όγκο νερού που προκύπτει από τις μετρήσεις πεδίου. Όπως γίνεται αντιληπτό από τον 05/2008 έως και 03/2009 παρατηρείται μεγάλη σύγκλιση των τιμών, ωστόσο στο αμέσως επόμενο διάστημα παρατηρείται μια σχετική απόλυση. Ο λόγος της απόκλισης αυτής πιθανώς να οφείλεται στην υπερεκτιμημένη αποτύπωση μιας περιόδου με έντονες καιρικές συνθήκες από την πλευρά του μοντέλου. Παρ' όλα αυτά είναι δύσκολο να εκφραστεί με σιγουριά ο παράγοντας της διαφοροποίησης των τιμών, εφόσον ο ταμιευτήρας στην πραγματικότητα είχε απώλειες, καθώς αποτελεί ένα ανοικτό σύστημα κάτι το οποίο στην παρούσα συσχέτιση δεν έχει συμπεριληφθεί.



Διάγραμμα 19: Σχέση όγκου ταμιευτήρα του μοντέλου & όγκου ταμιευτήρα από πηγή Ο.Α.ΔΥ.Κ. σε συνάρτηση με τον χρόνο.

Στο διάγραμμα 20 παρατηρείται πως για τιμές όγκων μικρότερες των 15 εκ.κυβικών υπάρχει μικρή απόκλιση, ενώ για μεγαλύτερες τιμές γίνεται ορατή η διαφορά αναμεσα στις τιμές του μοντέλου με αυτές του πεδίου, γεγονός που αποδίδεται στην υπερεκτιμημένη αποτύπωση του έτους 2010.

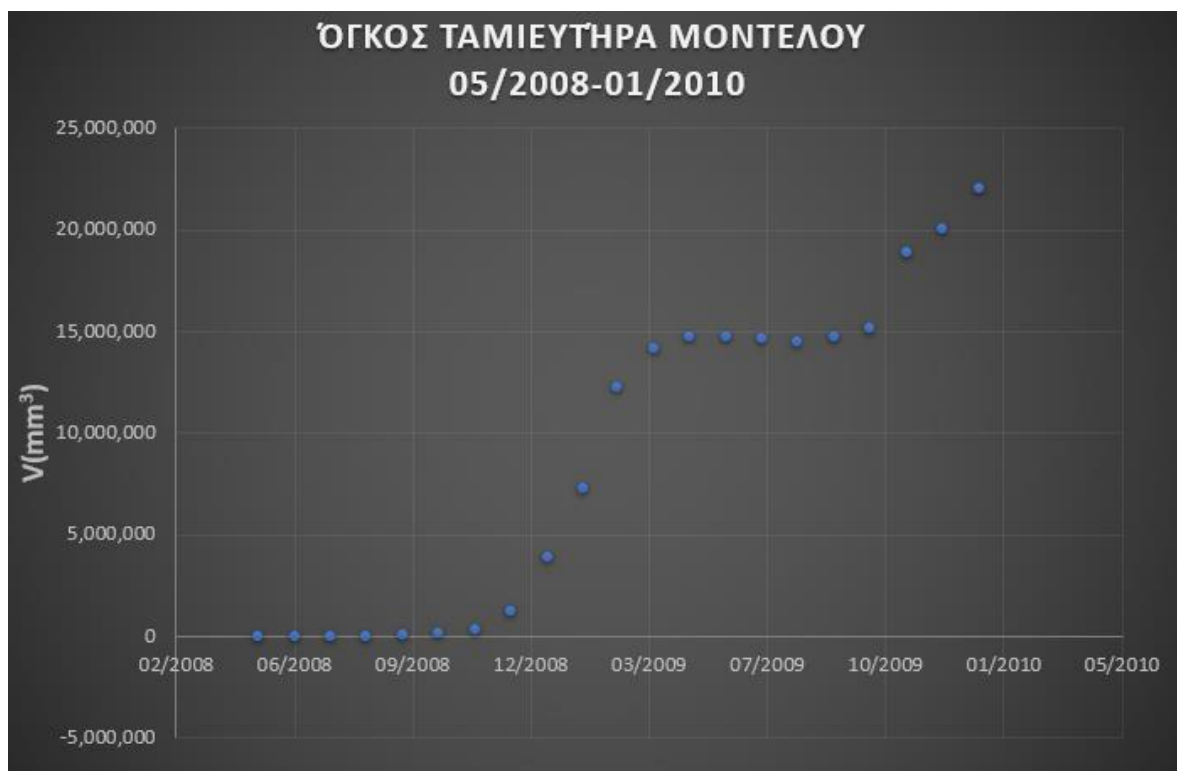


Διάγραμμα 20: Σχέση όγκων ταμιευτήρα μοντέλου και πεδίου.

Το διάγραμμα σχέσης όγκου και στάθμης για το μοντέλο, προφανώς κι αυτό υπερεκτιμά τις τιμές του όγκου στις χαρακτηριστικές στάθμες που λήφθηκαν από την μελέτη του Ο.Α.Κ.Υ.Δ και το οποίο μπορεί να συγκριθεί με το διάγραμμα 18 το οποίο αφορά τη σχέση όγκου και στάθμης για τις τιμές που μετρήθηκαν στο πεδίο.



Διάγραμμα 21: Σχέση όγκου και στάθμης του ταμιευτήρα του μοντέλου.



Διάγραμμα 22: Όγκος ταμιευτήρα συναρτήσει του χρόνου.

Για την πληρέστερη κατανόηση και διαπίστωση της επιτυχίας και της ευστοχίας της προσομοίωσης του μοντέλου, γίνεται ο υπολογισμός των στατιστικών δεικτών NSE και RSR στον ακόλουθο πίνακα 11.

11: Πίνακας δεικτών αξιολόγησης της προσομοίωσης του ταμιευτήρα.

Δείκτες	Τιμές δεικτών	Βαθμολογία απόδοσης
NSE	0.90	Πολύ Καλός
RSR	0.21	Πολύ Καλός

Από τον υπολογισμό των στατιστικών δεικτών διαπιστώνεται πως η προσομοίωση του ταμιευτήρα κρίνεται πολύ καλή, παρά τα παρατηρούμενα αποτελέσματα των γραφημάτων. Αυτό συμβαίνει καθώς οι στατιστικοί δείκτες αξιολογούν την υφιστάμενη κατάσταση με βάση τις τιμές, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η κλίμακα των διαφορών των μεγεθών, οι ποιες στην παρούσα κατάσταση είναι σημαντικές.

4.5 Αποτελέσματα Προσομοίωσης Καρστικών Πηγών Αργυρούπολης.

Για την μοντελοποίηση των Καρστικών πηγών της Αργυρούπολης ακολουθήσαν οι παρακάτω μεταβολές των παραμέτρων, με σημαντικότερη εκείνη του κλάσματος διήθησης του βάθι υδροφορέα παίρνοντας την τιμή 1. Κάτι το οποίο λήφθηκε υπόψη εξαιτίας της καρστικότητας των εδαφών με το 100% των υδάτων κατεβαίνουν στον βαθύ υδροφόρο.

12: Πίνακας παραμέτρων που μεταβλήθηκαν για την βαθμονόμηση των πηγών Αργυρούπολης.

Πίνακας εισαγωγής δεδομένων	Παράμετρος	Περιγραφή Παραμέτρου	Τυπικό εύρος στο SWAT MIN	MAX	Τιμές στη λεκάνη απορροής
HRU(.hru)	ESCO	Soil evaporation compensation factor	0	1	0.95
	EPCO	Plant uptake compensation factor	0	1	1
	SURLAG	Surface runoff lag coefficient	0	24	2
Groundwater(.gw)	GW_DELAY	Groundwater delay (days)	0	500	31
	ALPHA_BF	Baseflow alpha factor (days)	0	1	0.01
	GWQMIN	Threshold depth of water in the shallow aquifer required for return flow to occur (mm H ₂ O)	0	5000	1000
	GW_REVAP	Groundwater revap coefficient	0.02	2	0.02
	RCHRG_DP	Deep aquifer percolation fraction	0	1	1
General Data (.bsn)	SFTMP	Snowfall temperature (°C)	-5	5	-5
	SMTMP	Snow melt base temperature (°C)	-5	5	-5
	SMFMX	Maximum melt rate for snow during the year (summer solstice) (mm H ₂ O/(°C·day))	0	10	10
	SMFMN	Minimum melt rate for snow during the year (winter solstice) (mm H ₂ O/(°C·day))	0	10	2

Τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από το μοντέλο στη συνέχεια καλιμπραρίστηκαν μέσω της χρήσης ενός καρστικού μοντέλου, του οποίου οι παράμετροι παρουσιάζονται στον πίνακα 13. Στη συνέχεια έγινε σύγκριση αναμεσα στα αποτελέσματα του μοντέλου και στις μετρήσεις του πεδίου οι οποίες αφορούν την περίοδο των ετών 01/1983 έως 08/2005.

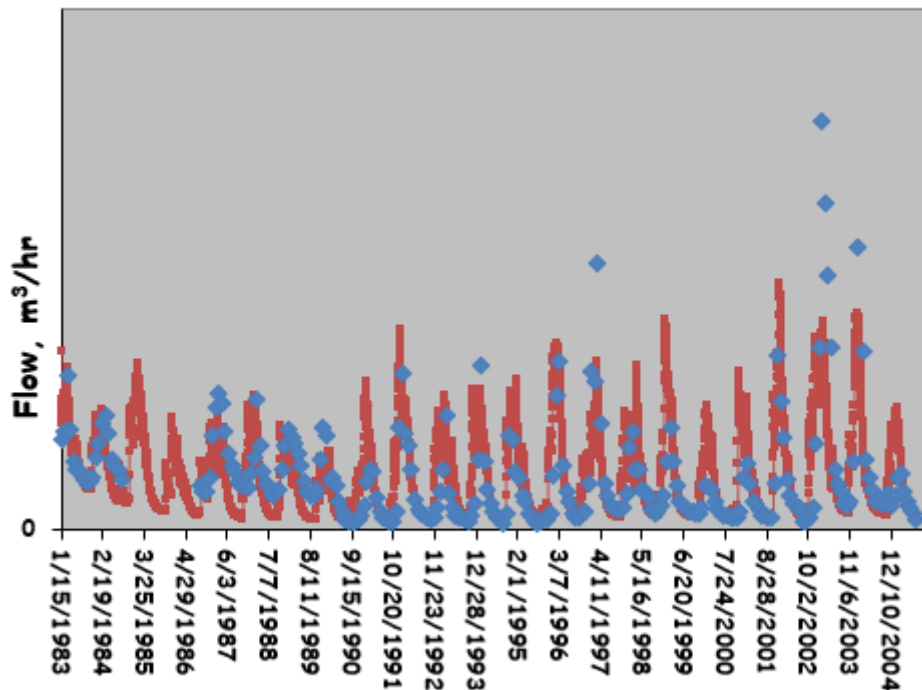
13: Πίνακας Παραμέτρων Καρστικών πηγών Αργυρούπολης.

Surface Area of the Karst, A_k	m ²	21,471,444
Time Step, Δt	days	1
Karst Model Parameters		
Initial Karstic Flow, Q_{ko}	m ³ /day	210000
Fraction of Inflow to Lower Reservoir, α_1		0.13
Upper Reservoir Recession Constant, k_u	1/day	1.6
Lower Reservoir Recession Constant, k_l	1/day	0.002
Fraction of Upper Reservoir Flow to Lower, α_2		0.13
Days of model simulation	days	8249
RMSE (Karstic Flow)	m ³ /s	0.27
Detention Time - Upper Reservoir	hrs	0.0
Detention Time - Lower Reservoir	hrs	1.4

Η περιοχή η οποία μοντελοποτιήθηκε για τις Καρστικές πηγές της Αργυρούπολης είχε εμβαδόν 21.471 km² και το βήμα των δεδομένων ήταν ημερήσιο για τα δεδομένα του μοντέλου ενώ μηνιαίο για τις παρατηρούμενες τιμές του πεδίου. Για το κλάσμα εισροής του χαμηλότερου ρεζερβουάρ δόθηκε η τιμή 0.13 ενώ η σταθερά ύφεσης του άνω και κάτω ταμιευτήρα εκτιμήθηκαν στα 1.6/day και 0.002/day αντίστοιχα. Τέλος το κλάσμα της ροής του άνω ρεζερβουάρ προς το χαμηλότερο έλαβε την τιμή 0.13 και ο χρόνος παραμονής στον χαμηλότερο ρεζερβουάρ υπολογίστηκε στα 1.4 χρόνια.

Στο διάγραμμα 23 απεικονίζονται τα αποτελέσματα της σύγκρισης των τιμών του μοντέλου με αυτών του πεδίου ωστόσο είναι σημαντικό να αναφερθεί πως για τα δεδομένα πεδίου υπήρχαν ελλείψεις και μη ισαπέχουσες μετρήσεις οι οποίες δημιούργησαν αμφιβολίες ως προς την εγκυρότητα και την συνέπεια με την οποία προσκομίστηκαν. Είναι γεγονός πως από ένα καλύτερο σύστημα παρακολούθησης, θα ήταν δυνατή η δημιουργία μιας ορθότερης βάσης δεδομένων που θα μπορούσε να επιφέρει καλύτερα αποτελέσματα τόσο στις τιμές των βασικών παροχών όσο και σε ακραία καιρικά φαινόμενα.

Karstic Model Results - Αργυρούπολης



Διάγραμμα 23: Γραφική απεικόνιση σχέσης παροχών μοντέλου με πεδίου σε σχέση με το χρόνο.

14: Πίνακας αποτελεσμάτων της καρστικής ισορροπίας των πηγών.

Karst Balance		
Karst Input	m	10.39
Upper Reservoir Flow	m	9.05
Lower Reservoir Flow	m	3.01
Karst Flow	m	10.88
RMSE	m ³ /s	0.27
Measured Karstic Flow	m	9.81
Flow Cumulative Error	%	-10.94
Average Flow (observed)	m ³ /s	0.324
Average Flow (modeled)	m ³ /s	0.328

Όπως γίνεται αντιληπτό το μοντέλο φαίνεται να προσομοιώνει σε ικανοποιητικό βαθμό τα δεδομένα του πεδίου. Ακόμα αυτό επιβεβαιώνεται από τον υπολογισμό του στατιστικού δείκτη RMSE, λαμβάνοντας την τιμή 0.27 αξιολογώντας την μοντελοποίηση ως καλή και από τον υπολογισμό του αθροιστικού σφάλματος με ποσοστό μόλις χαμηλότερο του -11%, δηλαδή οι τιμές του μοντέλου να έχουν ελαφρώς μεγαλύτερες παροχές. (Πίνακας 14) Έτσι η μοντελοποίηση της καρστικής περιοχής θεωρείται αποδεκτή και αξιόπιστη.

5. Συμπεράσματα

Το μοντέλο SWAT που χρησιμοποιήθηκε για την βαθμονόμηση της περιοχής του Φράγματος Ποταμών και των πηγών της Αργυρούπολης, προσομοιώνουν σε καλό επίπεδο την υδρολογία της υφιστάμενης περιοχής, βάση των γραφημάτων και των στατιστικών δεικτών που προέκυψαν. Το μοντέλο έδειξε να αναπαριστά με ακρίβεια και συνέπεια τις τιμές των βασικών παροχών, ωστόσο αποκλίσεις παρατηρήθηκαν σε ακραία καιρικά φαινόμενα μέγιστης και ελάχιστης παροχής.

Για την μοντελοποίηση του Φράγματος Ποταμών έγινε διαχωρισμός των δεδομένων σε δυο περιόδους, η πρώτη αφορούσε τα έτη 1970-88 ενώ η δεύτερη τα έτη 1989-97. Με την πρώτη περίοδο έγινε η βαθμονόμηση του μοντέλου, ενώ με την δεύτερη έγινε επαλήθευση αυτού. Και οι δυο περίοδοι έδωσαν παρόμοια αποτελέσματα καλής βαθμονόμησης όπως αξιολογήθηκε από τα διαγράμματα προσομοίωσης και τον υπολογισμό των στατιστικών δεικτών.

Από το υδρολογικό ισοζύγιο του Φράγματος Ποταμών προκύπτει η τιμή των κατακρημνίσεων στα 1155 mm/year, η κατείσδυση αυτών στον ρηχό υδροφορέα 426 mm/year, η ποσότητα της επιφανειακής απορροής 27 mm/year, η απορροή στην έξοδο της λεκάνης 136 mm/year, η πλάγια ροή 189 mm/year και η εξατμισοδιαπνοή της λεκάνης στα 527 mm/year.

Όσον αφορά την προσομοίωση του ταμιευτήρα η περίοδος αφορούσε τα έτη 05/2008 έως 01/2010 πετυχαίνοντας αρχικά μεγάλη σύγκλιση, καθώς μετά τον Απρίλιο του 2009 παρατηρήθηκε μια απόκλιση της τάξης των 2 εκ.κυβικών μεταξύ των τιμών του πεδίου και των τιμών του μοντέλου. Ακόμα υπολογίστηκε πως η ετήσια παροχή του Φράγματος Ποταμών κυμαίνεται μεταξύ 5 εκ.κυβικών και 38 εκ.κυβικών ετησίως ενώ η μέση παροχή υπολογίστηκε στα 20 εκ.κυβικά.

Για τον ταμιευτήρα η παροχή απόληψης είχε ληφθεί κατά τον σχεδιασμό 15 εκ.κυβικά μετρά, βάση της οποίας υπολογίστηκε το ποσοστό αστοχίας 24% (Ιστόγραμμα 1). Ποσοστό που δεν παρουσιάζει ικανοποιητική ευστοχία, καθώς 10 από τα 41 χρονιά μοντελοποίησης δεν καλύπτουν την παροχή σχεδιασμού.

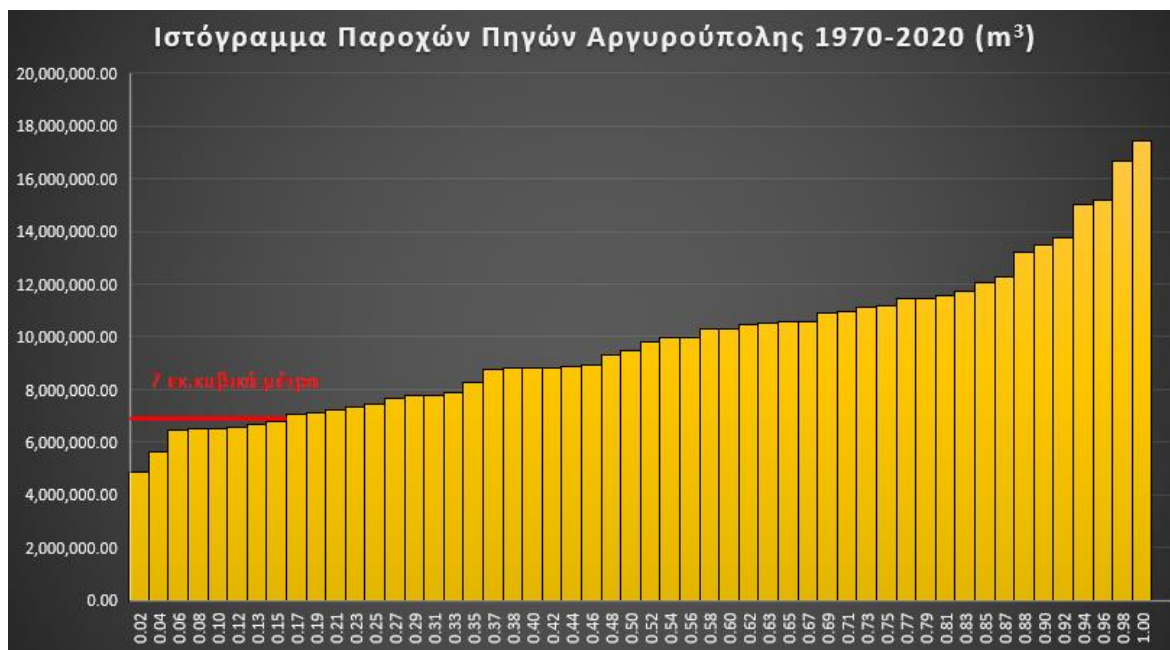


*Ιστόγραμμα 1: Ποσοστό αστοχίας κάλυψης των 15 εκ. κυβικών μέτρων νερού
για το Φράγμα Ποταμών..*

Για την μοντελοποίηση των Πηγών της Αργυρούπολης έγινε χρήση του καρστικού μοντέλου σύμφωνα με το οποίο υπολογίστηκαν οι μέσες παροχές του μοντέλου στα 0.328 m³/sec και οι μέσες παροχές του πεδίου στα 0.324 m³/sec, ενώ το αθροιστικό σφάλμα ροής υπολογίστηκε μόλις 10.94%. Ακόμα για τις Πηγές υπολογίστηκε για τα έτη 1983 έως και 2005 η μέση ετήσια παροχή 9.8 εκ. κυβικά. Οι τιμές των ξηρών ετών κυμαίνονται μεταξύ των 6 εκ. κυβικών και 9 εκ. κυβικών ετησίως, ενώ οι τιμές που αφορούν τα υγρά έτη κυμαίνονται μεταξύ των 10 εκ. κυβικών και 15 εκ. κυβικών ετησίως αντίστοιχα.

Για την ήδη υπάρχουσα συμφωνία διάθεσης των νερών των Πηγών για μεικτή χρήση έχει ληφθεί ως μέση παροχή η ποσότητα των 220 L/s, δηλαδή περίπου 7 εκ. κυβικών μέτρων ετησίως, η οποία έχει κατανεμηθεί ως εξής: στην κοινότητα Αργυρούπολης για άρδευση 25 L/s στις κοινότητες Φυλακή, Κάστέλλος, Κουρνάς κ.α. 15 L/s, στον δήμο Ρεθύμνου ύδρευση (ΔΕΥΑΡ) 80 L/s και στο ΤΟΕΒ Καστέλλου άρδευση (3.200 στρέμματα) 100L/s. Ωστόσο στην περίπτωση μείωσης των παροχών προβλέπεται αναλογική μείωση για τους χρήστες, ενώ σε περίπτωση αύξησης των παροχών η περίσσεια καλύπτει τις ανάγκες στο ΤΟΕΒ Καστέλλου και παράλληλα υπάρχει αντίστοιχη μείωση των αντλήσεων από την λίμνη Κουρνά, που τροφοδοτεί για την κάλυψη των αναγκών της περιοχής.

Σύμφωνα με το ιστόγραμμα 2 υπολογίστηκε το ποσοστό αστοχίας κάλυψης ετήσιας παροχής 7 εκ.κυβικών μέτρων για τα 52 έτη μοντελοποίησης, ποσότητα ύδατος που είχε χρησιμοποιηθεί στην συμφωνία διάθεσης των νερών των Πηγών της Αργυρούπολης. Το ποσοστό αστοχίας το οποίο προέκυψε ήταν της τάξης του 15% δηλαδή μόλις 8 χρονιά που η ετήσια παροχή δεν θα ξεπερνούσε τα 7 εκ.κυβικά μέτρα και κατ' αυτόν τον τρόπο θα προβλεπόταν αναλογική μείωση της κατανάλωσης από τους χρήστες.



Ιστόγραμμα 2: Ποσοστό αστοχίας κάλυψης των 7 εκ. κυβικών μέτρων.

7. Βιβλιογραφία

7.1 Διεθνής βιβλιογραφία

1. Alpert, P., Krichak, S. O., Shafir, H., Haim, D., & Osetinsky, I. (2008). Climatic trends to extremes employing regional modeling and statistical interpretation over the E. Mediterranean. *Global and Planetary Change*, 63(2–3), 163–170.
2. Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. (1998). Large Area Hydrologic Modeling and Assessment Part I,: Model Development. *Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 73–89.
3. Arnold, J. G., Williams, J. R., & Maidment, D. R. (1995). Continuous-Time Water and Sediment-Routing Model for Large Basins. *Journal of Hydraulic Engineering*, 121(2), 171–183. Beasley, D. B., Huggins, L. F., & E.J., M. (1980). ANSWERS,: A model for watershed planning. *Transactions of the ASAE*. 23 (4), (7038), 938–944.
4. Boyle, D. P., Gupta, H. V., & Sorooshian, S. (2000). Toward improved calibration of hydrologic models,: Combining the strengths of manual and automatic methods. *Water Resources Research*, 36(12), 3663–3674.
5. Brohan, P., Kennedy, J. J., Harris, I., Tett, S. F. B., & Jones, P. D. (2006). Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes,: A new data set from 1850. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 111(12), 1–21
6. E. M. WILSON, (1975). ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ. Εκδότης Μ. Γκιούρδας, ΑΘΗΝΑΙ, 5η έκδοση.
7. Fell R., P. MacGregor, D. Stapledon and G. Bell. “Geotechnical engineering of dams” Balkema, Rotterdam, 2005
8. Friedman, R., Ansell, C.S., Diamond, S., Haimes, Y.Y., (1984). The use of models for water resources management, planning and policy. *Water Resour. Res.* 20, 793-802
9. Ganoulis, J. (2001). Water resources management at the turn of the millennium: Towards a new scientific paradigm. *Revue des sciences de l'eau*, 14 (2): 225- 233.
10. Giannakopoulos, C., Le Sager, P., Bindi, M., Moriondo, M., Kostopoulou, E., & Goodess, C. M. (2009). Climatic changes and associated impacts in the Mediterranean resulting from global warming. *Global and Planetary Change*, 68(3), 209–224.
11. Gupta, H.V., Khodatalab, N., Wagener, T., Sorooshian, S., 2003. Advances in semi distributed watershed modeling. EGS-AGU-EUG Joint Assembly, Geophysical Research Abstracts, Vol. 5, European Geophysical Society, American Geophysical Union, Nice.
12. Jerald L. Schnoor, (2016). ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ: Τύχη και μεταφορά Ρύπων στον Αέρα, Νερό και Έδαφος, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ, 2η έκδοση.
13. Jeffrey G. Arnold, Daniel N. Moriasi, Philip W. Gassman, Karim C. Abbaspour and Michael J. White (2012). SWAT: Model use, calibration, and validation.
14. Kalcic M M, Chaubey I, Frankenberger J. Defining Soil and Water Assessment Tool (SWAT) hydrologic response units (HRUs) by field boundaries. *Int J Agric & Biol Eng*, 2015. 8(3): 69–80.
15. Lambert, F. H., Stott, P. A., Allen, M. R., & Palmer, M. A. (2004). Detection and attribution of changes in 20th century land precipitation. *Geophysical Research Letters*, 31(10).
16. Leggett, J., Pepper, W. J., Swart, R. J., Edmonds, J., Meira Filho, L. G., Mintzer, I., ... Wasson, J. (1992). Emissions scenarios for the IPCC,: an update. *Climate Change 1992,: The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment*, 69–95.

17. Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Binger, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900.
18. Nikolaidis, N.P., Rajaram, H., Schnoor, J.L., Georgankakos, K.P., 1988. A generalized soft water acidification model. *Water Resources Res.* 24, 1983-96.
19. Refsgaard, J.C., (1997). Parametrisation, calibration and validation of distributed hydrological models. *Journal of Hydrology* 198 (1-4), 69-97.
20. Santhi, C., Arnold, J. G., Williams, J. R., Dugas, W. a., Srinivasan, R., & Hauck, L. M. (2001). Validation of the SWAT Model on A Large River Basin With Point and Nonpoint Sources. *Journal of American Water Resources Association*.
21. Santosh Bhattarai, Yihong Zhou, Chunju Zhao, and Raghavendra Yadav: "An Overview on Types, Construction Method, Failure and Key Technical Issues during Construction of High Dams" *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 2016 (21.26), pp 10415-10432.
22. Schnoor, J.L., Palmer, W.D., Jr & Glass, G.E., 1984. *Modeling impacts of acid precipitation for northeastern Minnesota. In Modeling of Total Acid Precipitation Impact*, ed. J. L. Schnoor. Butterworth, Boston, MA, 155-73
23. Schnoor, J. L. (1996). *Flow e x • change Lateral Flow Transpirati • Percolation*, 24(12), 1983–1996.
24. Schnoor, J. L., 2003. *Περιβαλλοντικά Μοντέλα – Τύχη και μεταφορά ρύπων στον αέρα, νερό και έδαφος (Μεταφρασμένο)*, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη
25. Sharma, K. D., Sorooshian, S. and Wheeler, H., 2008. *Hydrological Modelling in Arid and Semi-Arid Areas*. New York : Cambridge University Press. 223 p. ISBN-13 978-0-511-37710-5.
26. Zhang, Z., Wang, S., Sun, G., McNulty, S. G., Zhang, H., Li, J., ... Strauss, P. (2008). Evaluation of the MIKE SHE model for application in the Loess Plateau, China. *Journal of the American Water Resources Association*, 44(5), 1108–1120.

7.2 Ελληνική βιβλιογραφία

1. Α. Ευστρατιάδης & Ν. Μαμάσης, (2010). Εισαγωγή στα υδρολογικά μοντέλα, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Τομέας Υδατικών Πόρων.
2. Α. Ευστρατιάδης, Ε. Ρόζος, Α. Κουκουβίνος, (2009). ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ–Μοντέλο υδρολογικής και υδρογεωλογικής προσομοίωσης, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος ΕΜΠ, Αθήνα
3. Αγ.Θ. Φιλίντας και Σερ.Θ. Πολύζος. *Φράγματα, λειτουργίες οικοσυστήματος και περιβαλλοντικές επιπτώσεις*.
4. Β.Περλέρος, Δ.Παπαμαστοράκης, Μ.Κριτσωτάκης, Ε.Δρακοπούλου, Α.Παναγόπουλος Vol 36, No 4 (2004). GROUNDWATER POTENTIAL OF THE ISLAND OF CRETE. PROBLEMS AND PERSPECTIVES.
5. Δ. Κουτσογιάννης & Θ. Ξανθόπουλος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο -Τομέας Υδατικών Πόρων Τεχνική Υδρολογία Ελληνικά συγγράμματα & Βοηθήματα HEALLINK 2016
6. Λ.Αθανάσιος, (2012). ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΓΝΩΣΗ, σημειώσεις του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Εργαστήριο Υδρολογίας και Ανάλυσης Υδατικών Συστημάτων 25-40

7. Μαμάσης, Ν., 2007. Παρουσιάσεις στο μάθημα «Προχωρημένη Υδρολογία» του ΔΠΜΣ «Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων», ΕΜΠ
8. Μιμίκου, Μ.Α., 2006. Τεχνολογία Υδατικών Πόρων. Γ' έκδοση, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, 2006
9. Νικολαΐδης, Ν., (2013). *Εφαρμογές σε Περιβαλλοντικά Μοντέλα*, Σημειώσεις μαθήματος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Χανιά.
10. Ν.Ι.Μουτάφης, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, *Υδραυλικές κατασκευές – φράγματα*
11. Σ. Π. Τζιτζή. *Περιβαλλοντικές επιπτώσεις και οφέλη από την κατασκευή των μεγάλων φραγμάτων της ΔΕΗ ΑΕ.*
12. *OECD Environmental Performance Reviews, Greece, 2009 76-85*

7.3 Ηλεκτρονική βιβλιογραφία

1. Ρεθυμιώτικα Νέα:
[https://rethnea.gr/%CE%B1%CF%81%CE%B3%CF%85%CF%81%CE%BF%CF%8D%CF%80%CE%BF%CE%BB%CE%B7-%CF%81%CE%B5%CE%B8%CF%8D%CE%BC%CE%BD%CE%BF%CF%85/\[4/2022\]](https://rethnea.gr/%CE%B1%CF%81%CE%B3%CF%85%CF%81%CE%BF%CF%8D%CF%80%CE%BF%CE%BB%CE%B7-%CF%81%CE%B5%CE%B8%CF%8D%CE%BC%CE%BD%CE%BF%CF%85/[4/2022])
2. ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΚΡΗΡΗΣ Α.Ε.
[https://oakae.gr/erga-ypodomon/ydravlika-erga/fragma-potamon-amariou-rethymnou/\[5/2022\]](https://oakae.gr/erga-ypodomon/ydravlika-erga/fragma-potamon-amariou-rethymnou/[5/2022])
3. Βαγγέλη Μαμαγκάκη, ΑΜΑΡΙΩΤΕΣ:
https://web.archive.org/web/20161229105459/http://amariotes.gr/index.php?id=13,270_0,0,1,0
4. Δήμος Αμαρίου: <https://www.amari.gr/%cf%84%ce%bf-%ce%b1%ce%bc%ce%ac%cf%81%ce%b9/#>
5. Μανούσος Κλάδος:
https://www.rethemnosnews.gr/rethymno/644497_pos-apektise-rethymno-fragma-potamon-amariou
6. Μανούσος Κλάδος, EurActiv.gr:
<https://www.economix.gr/2020/12/25/pos-apektise-to-rethymno-to-fragma-potamon-amariou/>
7. Δημήτρης Ζ. Αρχοντάκης:
<https://www.politistikorethymno.org/%CF%80%CF%89%CF%82%CE%BE%CE%B5%CE%B4%CE%AF%CF%88%CE%B1%CF%83%CE%B5%CF%84%CE%BF%CF%81%CE%AD%CE%B8%CF%85%CE%BC%CE%BD%CE%BF%CE%B7%CE%B5%CF%80%CE%B9%CE%BB%CE%BF%CE%B3%CE%AE%CF%84%CF%89%CE%BD%CF%80/>
8. Λευτέρης Κρυοβρυσανάκης:
<https://rethnea.gr/%CE%B1%CF%81%CE%B3%CF%85%CF%81%CE%BF%CF%8D>

%CF%80%CE%BF%CE%BB%CE%B7-

%CF%81%CE%B5%CE%B8%CF%8D%CE%BC%CE%BD%CE%BF%CF%85/

9. DAILY CIVIL:

<https://dailycivil.com/types-of-dams-detailed-classification-of-dams/>

10. Αθανάσιος Χασιακός και Παναγιώτης Φαρμάκης .ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΕΡΓΩΝ & ΕΡΓΟΤΑΞΙΩΝ Φράγματα & κατασκευαστικές μέθοδοι.

<https://eclass.upatras.gr/modules/document/file.php/CIV1528/%CE%A0->

[07.%20%CE%A6%CF%81%CE%AC%CE%B3%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B1%20%CE%BA%CE%B1%CE%B9%20%CE%BA%CE%B1%CF%84%CE%B1%CF%83%CE%BA%CE%B5%CF%85%CE%B1%CF%83%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%AD%CF%82%20%CE%BC%CE%AD%CE%B8%CE%BF%CE%B4%CE%BF%CE%B9.pdf](https://eclass.upatras.gr/modules/document/file.php/CIV1528/%CE%A0-07.%20%CE%A6%CF%81%CE%AC%CE%B3%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B1%20%CE%BA%CE%B1%CE%B9%20%CE%BA%CE%B1%CF%84%CE%B1%CF%83%CE%BA%CE%B5%CF%85%CE%B1%CF%83%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%AD%CF%82%20%CE%BC%CE%AD%CE%B8%CE%BF%CE%B4%CE%BF%CE%B9.pdf)