



**Πολυτεχνείο Κρήτης**

Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος

Μοντελοποίηση της υδρολογίας της λεκάνης  
απορροής του ποταμού Γιόφυρου

Ιωάννης Κοντογεώργος

Χανιά, Μάιος 2014

Επιβλέπων: Καθηγητής Ν. Π. Νικολαΐδης

Ευχαριστίες,

Πρωτίστως θέλω να ευχαριστήσω τους γονείς μου, οι οποίοι με στήριξαν και με στηρίζουν σε όλη τη διάρκεια της ζωής μου και εκπαίδευσής μου, υλικά και ηθικά, δίνοντάς μου τη δυνατότητα να ζήσω ελεύθερος, στο σώμα και τη σκέψη, και να μορφωθώ ώστε να μπορέσω να παράξω έργο και γνώση, εν τέλει με τη μορφή αυτής της εργασίας, με την οποία ολοκληρώνω το στάδιο της προπτυχιακής εκπαίδευσης. Η στήριξή τους ήταν και είναι διαρκής και ανιδιοτελής και αποτελεί την πρωταρχική αιτία που δύναμαι να παρουσιάσω την παρακάτω εργασία.

Θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή Νικόλαο Νικολαΐδη για την δυνατότητα που μου παρείχε να εκπονήσω τη συγκεκριμένη εργασία, τη συμβολή του σε αυτή, την καθοδήγηση, παράλληλα με την ελευθερία δράσης που μου άφησε, και την υπομονή που έδειξε απέναντί μου. Ευχαριστώ την Καθηγήτρια Ουρανία Τζωράκη για τη βοήθεια που μου έδωσε στα πρώτα βήματα εκπόνησης της εργασίας, την εκτίμησή της προς τις ικανότητές μου, την υπομονή της και το ειλικρινές ενδιαφέρον που έδειξε για την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας. Και επίσης ευχαριστώ τον Δρ. Μαρίνο Κριτσωτάκη και την Περιφέρεια Κρήτης για την παροχή των απαραίτητων δεδομένων για την εκπόνηση αυτής της εργασίας.

Στη συνέχεια θέλω να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές που με τη μετάδοση γνώσεων και ερεθισμάτων βοήθησαν τις σπουδές και κυρίως τη μόρφωσή μου, καθώς και την Ελληνική Πολιτεία που μου παρείχε τη δυνατότητα να σπουδάσω και να μορφωθώ.

Τέλος ευχαριστώ τα αδέρφια μου για την ηθική συμπαράστασή τους και την Κωνσταντίνα Κωστάκη για το ειλικρινές ενδιαφέρον της προς την ολοκλήρωση αυτού του κύκλου σπουδών μου.

# Περιεχόμενα

|                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------|-----|
| Περιεχόμενα .....                                                        | 3   |
| Πίνακες.....                                                             | 4   |
| Εικόνες .....                                                            | 6   |
| 1. Εισαγωγή.....                                                         | 11  |
| 2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση .....                                        | 14  |
| 2.1. Θεωρητικό υπόβαθρο του SWAT .....                                   | 14  |
| 2.1.1. Γενικά χαρακτηριστικά .....                                       | 14  |
| 2.1.2. Κλίμα .....                                                       | 15  |
| 2.1.3. Υδρολογία .....                                                   | 16  |
| 2.2. SWAT, εφαρμογές και σύγκριση με άλλα μοντέλα.....                   | 23  |
| 2.2.1. Εφαρμογές .....                                                   | 23  |
| 2.2.2. Σύγκριση με άλλα μοντέλα .....                                    | 24  |
| 2.2.3. Περιορισμοί και τροποποιήσεις .....                               | 27  |
| 2.3. Στατιστικά Εργαλεία .....                                           | 28  |
| 2.3.1. Βαθμονόμηση .....                                                 | 28  |
| 2.3.2. Ανάλυση συχνότητας πλημμυρών.....                                 | 32  |
| 2.3.3. Κατανομή log Pearson III .....                                    | 33  |
| 2.3.4. Κατανομή Gumbel (EV I).....                                       | 36  |
| 2.3.5. Γενικευμένη Κατανομή Ακραίων Τιμών (GEV) .....                    | 37  |
| 2.3.6. Έλεγχοι στατιστικών κατανομών .....                               | 40  |
| 2.4. Κλιματική Αλλαγή .....                                              | 41  |
| 3. Περιγραφή της λεκάνης απορροής του Γιόφυρου και του Ξηροπόταμου ..... | 46  |
| 3.1. Κλίμα-Μετεωρολογικά στοιχεία.....                                   | 46  |
| 3.2. Υδρολογία - Μορφολογία.....                                         | 50  |
| 3.3. Έδαφος-Υπέδαφος.....                                                | 55  |
| 3.4. Χρήσεις γης - Χρήσεις ύδατος .....                                  | 58  |
| 4. Μεθοδολογία και Αποτελέσματα.....                                     | 62  |
| 4.1. Πρόγραμμα - Εισαγωγές.....                                          | 62  |
| 4.2. Μοντελοποίηση - Βαθμονόμηση.....                                    | 62  |
| 4.3. Ανάλυση δεδομένων ροής Γιόφυρου και Ξηροπόταμου .....               | 76  |
| 4.4. Ανάλυση πλημμύρας για το Γιόφυρο και Ξηροπόταμο .....               | 79  |
| 4.4.1. Μελέτη της τάσης εμφάνισης πλημμυρών .....                        | 80  |
| 4.4.2. Ανάλυση συχνότητας αιχμών πλημμύρας .....                         | 84  |
| 5. Συμπεράσματα.....                                                     | 91  |
| 6. Βιβλιογραφία .....                                                    | 93  |
| Παράρτημα .....                                                          | 101 |

## Πίνακες

|                                                                                                                                                                                                                               |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Πίνακας 1. Σύγκριση της δυνατότητας των μοντέλων στο πρόγραμμα EUROHARP μοντελοποίησης ως προς το άζωτο (N) και το φώσφορο (P) (++πολύ ικανό, +ικανό, ο μερικώς ικανό, - μη ικανό) (Schoumans et al, 2009).....               | 25  |
| Πίνακας 2. Στατιστικοί δείκτες και κριτήρια επιτυχούς αναπαράστασης .....                                                                                                                                                     | 32  |
| Πίνακας 3. Τιμές των παραμέτρων $w_{ij}$ για τον υπολογισμό του τυπικού σφάλματος της παροχής σύμφωνα με τη μέθοδο PWM κατανομής GEV, (Hosking et al, 1985) ..                                                                | 39  |
| Πίνακας 4. Οριακές τιμές για διάφορες κατανομές, αγνώστων παραμέτρων, του κριτηρίου Anderson-Darling $A^2$ για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%, (D' Agostino and Stephens, 1986) .....                                               | 41  |
| Πίνακας 5. Δεδομένα υδροσημείων της εικόνας #22 (IGME, 2009).....                                                                                                                                                             | 58  |
| Πίνακας 6. Αρδευτικές περίοδοι για διάφορες καλλιέργειες στην Κρήτη (ΠΚΔΥ, 2002) .....                                                                                                                                        | 61  |
| Πίνακας 7. Παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη βαθμονόμηση του SWAT. ....                                                                                                                                                 | 68  |
| Πίνακας 8. Στατιστικοί ποσοτικοί δείκτες εκτίμησης της σύγκλισης μοντελοποιημένων τιμών και μετρήσεων.....                                                                                                                    | 74  |
| Πίνακας 9. Στατιστικοί ποσοτικοί δείκτες εκτίμησης της σύγκλισης μοντελοποιημένων τιμών και μετρήσεων, η περίοδος ημερήσιας βαθμονόμησης περιέχει μόνο τη χρονιά 1996 .....                                                   | 74  |
| Πίνακας 10. Μέσες ετήσιες μοντελοποιημένες τιμές συνολικά των λεκανών Γιόφυρου και Ξηροπόταμου για την περίοδο 1960 - 2011.....                                                                                               | 79  |
| Πίνακας 11. Πλημμυρικά δεδομένα για το Γιόφυρο στο σημείο της Φοινικιάς για την περίοδο 1960 - 2011.....                                                                                                                      | 81  |
| Πίνακας 12. Πλημμυρικά δεδομένα για τον Ξηροπόταμο στο σημείο εκβολής για την περίοδο 1960 - 2011 .....                                                                                                                       | 83  |
| Πίνακας 13. Παράμετροι των κατανομών για την περίπτωση του Γιόφυρου .....                                                                                                                                                     | 85  |
| Πίνακας 14. Παράμετροι των κατανομών για την περίπτωση του Ξηροπόταμου .....                                                                                                                                                  | 85  |
| Πίνακας 15. Μέσες ημερήσιες παροχές και (σφάλμα) αιχμών πλημμύρας για συγκεκριμένες περιόδους επαναφοράς του Γιόφυρου στο σημείο της Φοινικιάς....                                                                            | 88  |
| Πίνακας 16. Μέσες ημερήσιες παροχές και (σφάλμα) αιχμών πλημμύρας για συγκεκριμένες περιόδους επαναφοράς του Ξηροπόταμου στην εκβολή.....                                                                                     | 88  |
| Πίνακας 17. Κριτήρια καταλληλότητας της εκάστοτε συνάρτησης κατανομής για την ανάλυση συχνότητας αιχμών πλημμύρας του Γιόφυρου στο σημείο της Φοινικιάς, τα κριτήρια δίνονται από τους D' Agostino and Stephens, (1986) ..... | 90  |
| Πίνακας 18. Κριτήρια καταλληλότητας της εκάστοτε συνάρτησης κατανομής για την ανάλυση συχνότητας αιχμών πλημμύρας του Ξηροπόταμου στην εκβολή, τα κριτήρια δίνονται από τους D' Agostino and Stephens, (1986) .....           | 90  |
| Πίνακας 19. Βαθμονόμηση εδαφικών παραμέτρων ανά τομέα, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 62 .....                                                                                                                                | 106 |
| Πίνακας 20. Βαθμονόμηση υπεδάφειων παραμέτρων ανά τομέα, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 62 .....                                                                                                                              | 106 |
| Πίνακας 21. Τιμές του CN <sub>2</sub> ανά HRU όπως απεικονίζονται στο output.std .....                                                                                                                                        | 110 |

|                                                                                           |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Πίνακας 21. Τιμές του CN_2 ανά HRU όπως απεικονίζονται στο output.std<br>(συνέχεια) ..... | 111 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

## ΕΙΚΟΝΕΣ

|                                                                                                                                                                                                                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Εικόνα 1. Σχηματική αναπαράσταση της εδαφικής φάσης του υδρολογικού κύκλου (Arnold et al, 1998) .....                                                                                                                                                                      | 17 |
| Εικόνα 2. Διάγραμμα ροής του υπολογισμού της παροχής του ποταμού σε επίπεδο υπολεκάνης (Arnold et al, 1998) .....                                                                                                                                                          | 18 |
| Εικόνα 3. Σχηματικό μοντέλο της οριζόντιας υπεδάφιας κίνησης του νερού σε πλαγιά με έντονη κλίση (Neitsch <sup>2</sup> et al, 2009) .....                                                                                                                                  | 20 |
| Εικόνα 4. Σχηματική αναπαράσταση της θεωρητικής σύλληψης της κοίτης ποταμού και της πλημμυρική επιφάνειας στο SWAT (Neitsch <sup>2</sup> et al, 2009).....                                                                                                                 | 22 |
| Εικόνα 5. Αλλαγή στη μέση ετήσια ποταμική απορροή στις Ευρωπαϊκές λεκάνες απορροής μεταξύ του 2000 και του 2070 με βάση τα κλιματικά μοντέλα ECHAM4 και HadCM3 (Henrichs and Alcamo, 2001).....                                                                            | 42 |
| Εικόνα 6. Διαφορά στη, (a) μέγιστη, (b) μέση και (c) ελάχιστη, μέση ετήσια θερμοκρασία μεταξύ 1961-1990 και 2031-2060, κλιματικό μοντέλο HadCM3 A2/B2 (Giannakopoulos et al, 2009).....                                                                                    | 42 |
| Εικόνα 7. Αύξηση στις, (a) καλοκαιρινές μέρες, (b) θερμές μέρες, (c) μέρες καύσωνα, (d) τροπικές νύχτες και (e) μείωση στις νύχτες πάγου μεταξύ 1961-1990 και 2031-2060, κλιματικό μοντέλο HadCM3 A2/B2 (Giannakopoulos et al, 2009).....                                  | 43 |
| Εικόνα 8. Αλλαγή, ποσοστιαία αριστερά και απόλυτη δεξιά, στην ετήσια, (a) χειμερινή, (b) ανοιξιάτικη, (c) καλοκαιρινή, (d) φθινοπωρινή και (e) όλου του χρόνου βροχόπτωση μεταξύ 1961-1990 και 2031-2060, κλιματικό μοντέλο HadCM3 A2/B2 (Giannakopoulos et al, 2009)..... | 43 |
| Εικόνα 9. Μέση μεταφορά, (a) της αρχής και (b) του τέλους της μακρύτερης περιόδου ξηρασίας μεταξύ 1961-1990 και 2031-2060, κλιματικό μοντέλο HadCM3 A2/B2 (Giannakopoulos et al, 2009).....                                                                                | 44 |
| Εικόνα 10. Διαφορά στη μέση βροχόπτωση, μέση ένταση βροχόπτωσης και στις υγρές μέρες για το A2 σενάριο RegCM, μεταξύ 1961-1990 και 2071-2100 (Giorgi et al, 2004) .....                                                                                                    | 44 |
| Εικόνα 11. Ετήσιες βροχομετρικές μετρήσεις, υδρολογικών ετών 1956-2011 .....                                                                                                                                                                                               | 47 |
| Εικόνα 12. Κινητοί μέσοι όροι δεκαετίας ετήσιων βροχομετρικών μετρήσεων, υδρολογικών ετών 1956-2011.....                                                                                                                                                                   | 47 |
| Εικόνα 13. Ετήσια θερμοκρασιακά μέγιστα και ελάχιστα, υδρολογικών ετών 1956-2011 .....                                                                                                                                                                                     | 47 |
| Εικόνα 14. Κινητοί μέσοι όροι δεκαετίας ετήσιων θερμοκρασιακών μεγίστων και ελαχίστων, υδρολογικών ετών 1956-2011.....                                                                                                                                                     | 48 |
| Εικόνα 15. Ετήσια θερμοκρασιακά μέγιστα και ελάχιστα, υδρολογικών ετών 1956-2011, με αποτυπωμένους τους ρυθμούς μεταβολής .....                                                                                                                                            | 49 |
| Εικόνα 16. Ετήσια θερμοκρασιακά μέγιστα, υδρολογικών ετών 1984-2011, με αποτυπωμένους τους ρυθμούς μεταβολής .....                                                                                                                                                         | 49 |
| Εικόνα 17. Χάρτης μετεωρολογικών σταθμών.....                                                                                                                                                                                                                              | 50 |
| Εικόνα 18. Χάρτης ανάγλυφου - υψομέτρου των λεκανών απορροής Γιόφυρου και Ξηροπόταμου.....                                                                                                                                                                                 | 52 |

|                                                                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Εικόνα 19. Χάρτης πεδινής, ημι-ορεινής, ορεινής επιφάνειας των λεκανών απορροής Γιόφυρου και Ξηροπόταμου .....                                           | 53 |
| Εικόνα 20. Χάρτης κλίσεων των λεκανών απορροής Γιόφυρου και Ξηροπόταμου, μετά την επανακατηγοριοποίηση (reclassify) του SWAT.....                        | 54 |
| Εικόνα 21. Εδαφικός χάρτης των λεκανών απορροής Γιόφυρου και Ξηροπόταμου, μετά την επανακατηγοριοποίηση (reclassify) του SWAT.....                       | 56 |
| Εικόνα 22. Υδρολιθικός χάρτης και χάρτης υδροσημείων των λεκανών απορροής Γιόφυρου και Ξηροπόταμου, πηγή ΙΓΜΕ.....                                       | 57 |
| Εικόνα 23. Χάρτης χρήσεων γης των λεκανών απορροής Γιόφυρου και Ξηροπόταμου, μετά την επανακατηγοριοποίηση (reclassify) του SWAT.....                    | 59 |
| Εικόνα 24. Διαθεσιμότητα νερού και υδροληψία στην Κρήτη (Chartzoulakis et al, 2001) .....                                                                | 60 |
| Εικόνα 25. Ζήτηση νερού ανά τομέα στην Κρήτη (Chartzoulakis et al, 2001) .....                                                                           | 61 |
| Εικόνα 26. Απώλειες ύδατος κατά τη μεταφορά και την άρδευση στην Κρήτη (Chartzoulakis et al, 2001) .....                                                 | 61 |
| Εικόνα 27. Χάρτης υπολεκάνων Γιόφυρου και Ξηροπόταμου μετά την οριοθέτηση από το SWAT.....                                                               | 64 |
| Εικόνα 28. Χάρτης με την πλήρη κατανομή των HRUs μετά την κατηγοριοποίηση του SWAT.....                                                                  | 66 |
| Εικόνα 29. Σύγκριση υδρογραφήματων ημερησίων μετρήσεων και μοντελοποίησης του Γιόφυρου στο σημείο Φοινικιά για την περίοδο βαθμονόμησης 1978 -1984.....  | 69 |
| Εικόνα 30. Σύγκριση υδρογραφήματων ημερησίων μετρήσεων και μοντελοποίησης του Γιόφυρου στο σημείο Φοινικιά για την περίοδο επαλήθευσης 1995 - 1996 ..... | 69 |
| Εικόνα 31. Σύγκριση υδρογραφήματων ημερησίων μετρήσεων και μοντελοποίησης του Γιόφυρου στο σημείο Φοινικιά για τη χρονιά βαθμονόμησης 1978 .....         | 70 |
| Εικόνα 32. Σύγκριση υδρογραφήματων ημερησίων μετρήσεων και μοντελοποίησης του Γιόφυρου στο σημείο Φοινικιά για τη χρονιά βαθμονόμησης 1979 .....         | 70 |
| Εικόνα 33. Σύγκριση υδρογραφήματων ημερησίων μετρήσεων και μοντελοποίησης του Γιόφυρου στο σημείο Φοινικιά για τη χρονιά βαθμονόμησης 1980 .....         | 70 |
| Εικόνα 34. Σύγκριση υδρογραφήματων ημερησίων μετρήσεων και μοντελοποίησης του Γιόφυρου στο σημείο Φοινικιά για τη χρονιά βαθμονόμησης 1981 .....         | 71 |
| Εικόνα 35. Σύγκριση υδρογραφήματων ημερησίων μετρήσεων και μοντελοποίησης του Γιόφυρου στο σημείο Φοινικιά για τη χρονιά βαθμονόμησης 1982 .....         | 71 |
| Εικόνα 36. Σύγκριση υδρογραφήματων ημερησίων μετρήσεων και μοντελοποίησης του Γιόφυρου στο σημείο Φοινικιά για τη χρονιά βαθμονόμησης 1983 .....         | 71 |
| Εικόνα 37. Σύγκριση υδρογραφήματων ημερησίων μετρήσεων και μοντελοποίησης του Γιόφυρου στο σημείο Φοινικιά για τη χρονιά βαθμονόμησης 1984 .....         | 72 |
| Εικόνα 38. Σύγκριση υδρογραφήματων ημερησίων μετρήσεων και μοντελοποίησης του Γιόφυρου στο σημείο Φοινικιά για τη χρονιά επαλήθευσης 1996.....           | 72 |
| Εικόνα 39. Σύγκριση υδρογραφήματων ημερησίων μετρήσεων και μοντελοποίησης του Γιόφυρου στο σημείο Φοινικιά για τη χρονιά επαλήθευσης 1997.....           | 72 |
| Εικόνα 40. Σύγκριση υδρογραφήματων μηνιαίων μετρήσεων και μοντελοποίησης του Γιόφυρου στο σημείο Φοινικιά για την περίοδο βαθμονόμησης 1978 -1984.....   | 73 |

|                                                                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Εικόνα 41. Σύγκριση υδρογραφήματων ημερησίων μετρήσεων και μοντελοποίησης του Γιόφυρου στο σημείο Φοινικιά για την περίοδο επαλήθευσης 1990 - 1999 .....                | 73 |
| Εικόνα 42. Μοντελοποιημένο υδρογράφημα του Γιόφυρου στο σημείο της Φοινικιάς για την περίοδο 1960 - 2011.....                                                           | 76 |
| Εικόνα 43. Μοντελοποιημένο υδρογράφημα του Ξηροπόταμου στην εκβολή για την περίοδο 1960 - 2011.....                                                                     | 77 |
| Εικόνα 44. Συνολική ετήσια παροχή για το Γιόφυρο στη Φοινικιά και την εκβολή και στον Ξηροπόταμο στην εκβολή για την περίοδο 1960 - 2011 .....                          | 77 |
| Εικόνα 45. Σύγκριση παροχών Ξηροπόταμου και Γιόφυρου κατά τη διάρκεια υγρού έτους, υδρολογικό έτος 1997 .....                                                           | 78 |
| Εικόνα 46. Σύγκριση παροχών Ξηροπόταμου και Γιόφυρου κατά τη διάρκεια ξηρού έτους, υδρολογικό έτος 1993 .....                                                           | 78 |
| Εικόνα 47. Μοντελοποιημένες μέγιστες ετήσιες παροχές του Γιόφυρου στο σημείο της Φοινικιάς και στην εκβολή για την περίοδο 1960 - 2011.....                             | 80 |
| Εικόνα 48. Αριθμός πλημμυρικών παροχών μεγαλύτερων των $8.971\text{m}^3/\text{sec}$ ανά δεκαετία του Γιόφυρου στο σημείο της Φοινικιάς για την περίοδο 1960 - 2010..... | 80 |
| Εικόνα 49. Συχνότητα υπέρβασης ροής για τον ποταμό Γιόφυρο στο σημείο της Φοινικιάς για τις περιόδους 1960-1990 και 1991-2011 .....                                     | 81 |
| Εικόνα 50. Μοντελοποιημένες μέγιστες ετήσιες παροχές του Ξηροπόταμου στο σημείο εκβολής για την περίοδο 1960 - 2011.....                                                | 82 |
| Εικόνα 51. Αριθμός πλημμυρικών παροχών μεγαλύτερων των $2.5\text{m}^3/\text{sec}$ ανά δεκαετία του Ξηροπόταμου στο σημείο εκβολής για την περίοδο 1960 - 2010.....      | 82 |
| Εικόνα 52. Συχνότητα υπέρβασης ροής για τον Ξηροπόταμο στο σημείο εκβολής για τις περιόδους 1960-1990 και 1991-2011 .....                                               | 83 |
| Εικόνα 53. Ανάλυση συχνότητας αιχμών πλημμύρας log Pearson III, για το Γιόφυρο στο σημείο της Φοινικιάς, με μοντελοποιημένα δεδομένα της περιόδου 1960-2011 .....       | 86 |
| Εικόνα 54. Ανάλυση συχνότητας αιχμών πλημμύρας Gumbel, για το Γιόφυρο στο σημείο της Φοινικιάς, με μοντελοποιημένα δεδομένα της περιόδου 1960-2011.....                 | 86 |
| Εικόνα 55. Ανάλυση συχνότητας αιχμών πλημμύρας GEV, για το Γιόφυρο στο σημείο της Φοινικιάς, με μοντελοποιημένα δεδομένα της περιόδου 1960-2011 .....                   | 86 |
| Εικόνα 56. Ανάλυση συχνότητας αιχμών πλημμύρας log Pearson III, για τον Ξηροπόταμο στην εκβολή, με μοντελοποιημένα δεδομένα της περιόδου 1960-2011 .....                | 87 |
| Εικόνα 57. Ανάλυση συχνότητας αιχμών πλημμύρας log Pearson III, για τον Ξηροπόταμο στην εκβολή, με μοντελοποιημένα δεδομένα της περιόδου 1960-2011 .....                | 87 |
| Εικόνα 58. Ανάλυση συχνότητας αιχμών πλημμύρας log Pearson III, για τον Ξηροπόταμο στην εκβολή, με μοντελοποιημένα δεδομένα της περιόδου 1960-2011 .....                | 87 |
| Εικόνα 59. Διάγραμμα πιθανοτήτων Q-Q για τις κατανομές log Pearson III, Gumbel και GEV για το Γιόφυρο στο σημείο της Φοινικιάς .....                                    | 89 |



|                                                                                                                                                      |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Εικόνα 60. Διάγραμμα πιθανοτήτων Q-Q για τις κατανομές log Pearson III, Gumbel και GEV για τον Ξηροπόταμο στην εκβολή .....                          | 89  |
| Εικόνα 61. Ετήσιες βροχομετρικές μετρήσεις, υδρολογικών ετών 1956-2011 .....                                                                         | 104 |
| Εικόνα 62. Χάρτης τμηματοποίησης εδαφικών και υπεδάφινων παραμέτρων των λεκανών απορροής Γιόφυρου και Ξηροπόταμου κατά τη βαθμονόμηση στο SWAT ..... | 105 |

Αυτός που μετακίνησε ένα βουνό, ξεκίνησε μετακινώντας πρώτα μικρές πέτρες. (Κομφούκιος)

# 1. Εισαγωγή

Σκοπός αυτής της εργασίας είναι η μελέτη της υδρολογικής συμπεριφοράς της λεκάνης απορροής του εφήμερου ποταμού Γιόφυρου, ώστε εν πρώτοις, να μοντελοποιηθεί η υδρολογία του, δεύτερον να εφαρμοστεί το μοντέλο αυτού του εφήμερου και χωρίς πλήρη επάρκεια μετρήσεων ποταμού ως πρώτη εκτίμηση στην όμορη λεκάνη απορροής του Ξηροπόταμου ο οποίος έχει παρόμοια χαρακτηριστικά και τρίτον να χρησιμοποιηθούν τα αποτελέσματα του μοντέλου για την ανάλυση της συμπεριφοράς των δύο ποταμών, όσον αφορά τη συχνότητα πλημμυρών και την επίδραση της κλιματικής αλλαγής.

Η μοντελοποίηση της υδρολογίας μιας περιοχής συνιστά ένα σημαντικό εργαλείο ώστε να μπορούν να εκτιμηθούν οι επιπτώσεις και να παρθούν αποφάσεις σχετικά με τον κύριο φυσικό πόρο, το νερό, αλλά παράλληλα, να σχεδιαστούν και να εκπονηθούν μελέτες και έργα προστατευτικά, όσον αφορά τα υδάτινα σώματα για την πρόληψη και αποφυγή καταστροφών. Έχει συνεπώς, ως εργαλείο, διττό χαρακτήρα. Η σημασία της προστασίας και χρηστής, αειφορικής, διαχείρισης του νερού, εκτός από την επιστημονική σκοπιά ή και από την απλή, κοινή σκοπιά που τα τελευταία χρόνια ο καθένας μπορεί να έχει διαμορφώσει βιώνοντας περιόδους λειψυδρίας, έχει αποτυπωθεί και θεσμικά σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ένωσης και κρατών μελών με την οδηγία νερών 2000/60/EK. Στην ανωτέρω οδηγία γίνεται επίσης λόγος και για την ποιότητα των υδάτινων πόρων σε συνάρτηση με την προστασία της βιοποικιλότητας. Παράλληλα η ανάγκη προστασίας απέναντι και αντιμετώπισης των πλημμυρών έχει θεσμοθετηθεί επίσης σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ένωσης με την οδηγία πλημμυρών 2007/60/EK, η οποία απαιτεί χάρτες επικινδυνότητας πλημμυρικών φαινομένων και σύνταξη μεθόδων πρόληψης και αντιμετώπισης. Από την οδηγία 2000/60/EK έχει επιλεγεί, όχι τυχαία, ως μονάδα διαχείρισης η λεκάνη απορροής ενός ποταμού, διότι αποτελεί ενιαίο υδρολογικό τμήμα, τις περισσότερες φορές, αλλά ταυτόχρονα και ενιαίο διαχειριστικό, καθώς οι υδατικές ανάγκες της ανθρώπινης δραστηριότητας στο πλαίσιο της λεκάνης απορροής καλύπτονται συνήθως συνολικά από τους ιδίους υδάτινους πόρους ενώ παράλληλα οι επιπτώσεις της επηρεάζουν το σύνολό της. Από τα παραπάνω διαφαίνεται η αναγκαιότητα επιστημονικής και μεθοδικής προσέγγισης της υδρολογίας μιας περιοχής σε επίπεδο λεκάνης απορροής η οποία θα αποτελέσει το εργαλείο το οποίο αναφέρθηκε στην αρχή της παραγράφου και αποτελεί το αντικείμενο αυτής της εργασίας.

Τα κύρια χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής του Γιόφυρου είναι η διαλείπουσα ροή του, καθώς κατά τους θερινούς μήνες διακόπτεται, το ημίξηρο κλίμα του και η περιορισμένη διάθεση μετρήσεων, μετεωρολογικών αλλά κυρίως υδατικών. Για αυτό το λόγο επιλέχτηκε ως πρόγραμμα μοντελοποίησης το SWAT, Soil and Water Assessment Tool, της USDA Agricultural Research Service, καθώς ως μοντέλο (Neitsch<sup>1</sup> et al, 2005):

- έχει φυσική σημασία η σχέση μεταξύ των δεδομένων και των αποτελεσμάτων του δίνοντας τη δυνατότητα εφαρμογής σε περιπτώσεις ανεπάρκειας ή και πλήρους απουσίας στοιχείων
- απαιτεί ως ελάχιστα δεδομένα, στοιχεία τα οποία συνήθως είναι διαθέσιμα, χωρίς να αποκλείει τη χρησιμοποίηση περισσότερων

- είναι χρονικά συνεχές με δυνατότητα ημερησίου αλλά και μικρότερου χρονικά βήματος αποτυπώνοντας έτσι τις υδρολογικές διεργασίες σε επαρκή βαθμό
- δίνει τη δυνατότητα μελέτης μακροπρόθεσμων αλλαγών και επιπτώσεων
- μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατάρτιση διαχειριστικών πλάνων ενώ περιλαμβάνει χρήσεις γης και διαχειριστικές πρακτικές

Λόγω της φυσικής σημασίας της σχέσης του μετά τη βαθμονόμησή του σε μια λεκάνη απορροής μπορεί να εφαρμοστεί με την ίδια βαθμονόμηση, ως πρώτη εκτίμηση σε παρεμφερείς λεκάνες απορροής οι οποίες έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά αλλά μπορεί να μη διαθέτουν μετρήσεις. Συνεπώς παράλληλα με τη μοντελοποίηση του ποταμού Γιόφυρου, μπορεί να παρουσιαστεί μια πρώτη εκτίμηση της υδρολογίας του διπλανού ποταμού Ξηροπόταμου για τον οποίο υπάρχει απουσία μετρήσεων.

Ο ποταμός Γιόφυρος πλήττεται συχνά από σύντομα και βίαια πλημμυρικά επεισόδια τα οποία προκαλούνται από μεγάλης έντασης βροχοπτώσεις, με αποκορύφωμα την πλημμύρα της 13-14ης Ιανουαρίου του 1994 κατά την οποία έγιναν εκτεταμένες καταστροφές της τάξεως των 10 δισεκατομμυρίων δραχμών της εποχής (Καραμάνου και Ροδολάκης, 2006). Η ποσότητα και η ένταση των χειμερινών βροχοπτώσεων έχει αυξητική τάση λόγω της κλιματικής αλλαγής δημιουργώντας πρόσθετα προβλήματα πλημμυρών στο μέλλον (Tsanis et al, 2011). Τη μοντελοποίηση συνεπώς ακολουθεί ανάλυση συχνότητας πλημμυρών με βάση τις μοντελοποιημένες παροχές του ποταμού για την εξέταση της τάσης και την πιθανή επιρροή της κλιματικής αλλαγής στην εμφάνιση των πλημμυρικών φαινομένων. Ανάλυση συχνότητας πλημμυρών με βάση τις μοντελοποιημένες παροχές θα γίνει και για τον ποταμό Ξηροπόταμο.

Η περιοχή της Μεσογείου και ως εκ τούτου και η Κρήτη αντιμετωπίζει πρόβλημα τις τελευταίες δεκαετίες ως αποτέλεσμα της κλιματικής αλλαγής με μειούμενες βροχοπτώσεις και αυξημένες θερμοκρασίες φαινόμενα τα οποία αναμένεται να ενταθούν (EEA Report, 12/2012). Οι κύριες επιπτώσεις είναι η μείωση της διαθεσιμότητας ύδατος και μειωμένες αποδόσεις σοδειάς, αυξανόμενος κίνδυνος ξηρασίας και εμφάνισης καυσώνων, αύξηση του κινδύνου δασικών πυρκαγιών και μείωση της βιοποικιλότητας (EEA Report, 12/2012). Μελλοντικά, οι αρδευτικές απαιτήσεις ακόμα και αν αυξηθεί η αποδοτικότητά τους θα κινδυνεύουν με αδυναμία κάλυψης, ενώ αναμένονται και επιπτώσεις στον τουρισμό κατά την καλοκαιρινή περίοδο (EEA Report, 12/2012). Τέλος η ελάχιστη περιβαλλοντική ροή, η οποία είναι σημαντική για τη διατήρηση των οικοσυστημάτων απειλείται από την κλιματική αλλαγή και την κοινωνικο-οικονομική ανάπτυξη (EEA Report, 12/2012). Η τελευταία επίπτωση έχει ιδιαίτερη σημασία για τη Νότια Μεσογειακή περιοχή καθώς το 26% της επιφάνειάς της αποτελείται από λεκάνες απορροής ποταμών προσωρινής ροής, διαλείπουσας, εφήμερων ή χειμαρρωδών (Tzoraki and Nikolaidis, 2004), των οποίων τα οικοσυστήματα είναι ήδη, λόγω της διαλείπουσας ροής υπό πίεση.

Εκτός αυτών αναμένεται λόγω της κλιματικής αλλαγής να ενταθούν προβλήματα τα οποία ήδη αντιμετωπίζει η Κρήτη, όπως οι πιέσεις στους υδάτινους πόρους, τα φαινόμενα ξηρασίας, η υποχώρηση του υδροφόρου ορίζοντα, η υφαλμύριση και οι πλημμύρες. Τέλος, οι υδρολογικές μεταβολές επηρεάζουν πιο

έντονα τους προσωρινούς ποταμούς, όπως ο Γιόφυρος, οι οποίοι βρίσκονται ήδη σε καθεστώς πίεσης των υδάτινων ταμιευτήρων τους και έχουν πρόβλημα στη διατήρηση της ελάχιστης οικολογικής παροχής και συνεπώς προσθέτουν ένα επιπλέον λόγο που κάνει πιο επιτακτική τη μοντελοποίηση της υδρολογίας τους.

## 2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

### 2.1. Θεωρητικό υπόβαθρο του SWAT

από Neitsch<sup>2</sup> et al, (2009)

#### 2.1.1. Γενικά χαρακτηριστικά

Το SWAT είναι ακρωνύμιο για το Soil Water Assessment Tool, και είναι ένα πρόγραμμα που χρησιμεύει στη μοντελοποίηση της υδρολογίας, της κίνησης του ιζήματος, των θρεπτικών συστατικών και διάφορων ρύπων σε επίπεδο λεκάνης απορροής, λαμβάνοντας υπόψη τα μετεωρολογικά στοιχεία, την τοπογραφία, το έδαφος, τις χρήσεις γης και τις διαχειριστικές πρακτικές, με στόχο να βοηθήσει στη μελέτη της επίδρασης των τελευταίων στο περιβάλλον.

Είναι ένα μοντέλο συνεχούς λειτουργίας, μακράς διάρκειας, το οποίο εστιάζεται στη μη σημειακή ρύπανση και το οποίο είναι ημικατανεμημένο δηλαδή χωρίζει τη λεκάνη απορροής σε υπολεκάνες οι οποίες αποτελούνται από ξεχωριστές, υδρολογικές, αθροιστικές μονάδες με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά κλίσης, εδάφους και χρήσεως γης που ονομάζονται HRUs (Hydrologic Response Units).

Το βασικότερο πλεονέκτημά του είναι η φυσική σημασία των σχέσεων δεδομένων - αποτελεσμάτων, υπό την έννοια ότι απαιτεί συγκεκριμένες πληροφορίες για τον καιρό, την τοπογραφία, το έδαφος, τις χρήσεις γης και τις διαχειριστικές πρακτικές ώστε να μοντελοποιηθούν μέσω αυτών ως δεδομένων απευθείας οι φυσικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στη λεκάνη απορροής. Συνέπεια αυτού του χαρακτηριστικού είναι η δυνατότητα μοντελοποίησης λεκανών απορροής με ελάχιστες ή καθόλου μετρήσεις αλλά και η δυνατότητα μελέτης και εκπόνησης διαχειριστικών πλάνων και σεναρίων εξετάζοντας τη σχετική επίδραση των αλλαγμένων μεταβλητών.

Άλλα πλεονεκτήματα του προγράμματος είναι η σχετική διαθεσιμότητα των ελάχιστων απαιτούμενων δεδομένων από τις εκάστοτε κρατικές υπηρεσίες, η υπολογιστική αποδοτικότητά του και η δυνατότητα μοντελοποίησης μακράς χρονικής διάρκειας γεγονός σημαντικό όταν θέλουμε να μελετήσουμε ρυπαντές οι οποίοι συσσωρεύονται σταδιακά.

Δημιουργήθηκε το 1990 και ενσωματώνει αρκετά προγράμματα της ARS (Agricultural Research Service), αποτελεί προϊόν του SWRRB (Simulation for Water Resources in Rural Basins), ενώ συγκεκριμένα μοντέλα που βοήθησαν στη εξέλιξή του ήταν το GLEAMS (Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems), το CREAMS (Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems) και το EPIC (Erosion-Productivity Impact Calculator). Από το 1990 έχει εξελιχθεί σε αρκετό βαθμό ενώ πλέον περιλαμβάνεται ως εφαρμογή σε περιβάλλον Windows (Visual Basic), GRASS και ArcView το τελευταίο είναι και το οποίο θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία.

Η έκδοση του SWAT που θα χρησιμοποιηθεί είναι η 2009 και το κομμάτι που θα παρουσιαστεί είναι το κλιματικό και το υδρολογικό, τα υπόλοιπα κομμάτια του που αφορούν ιζήμα και θρεπτικά δεν θα χρησιμοποιηθούν στην παρούσα εργασία και συνεπώς στερούνται ενδιαφέροντος.

Στο SWAT η λεκάνη απορροής χωρίζεται σε υπολεκάνες ανάλογα με την γεωμορφολογία της περιοχής. Αυτός ο χωρικός διαχωρισμός συμβάλλει κατά πολύ στην ταχύτητα μοντελοποίησης και παράλληλα επιτρέπει τη σύγκριση διαφορετικών περιοχών. Τα δεδομένα της εκάστοτε υπολεκάνης χωρίζονται σε κλιματολογικά, HRUs (Hydrologic Response Units), λίμνες/βάλτους, υπέδαφος και το κυρίως κανάλι.

Τα HRU είναι μονάδες με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά χρήσεων γης, κλίσης και εδάφους και η χρησιμοποίησή τους συμβάλλει στην καλύτερη απόδοση της απόκριση του εδάφους στη βροχόπτωση και στην υλοποίηση βέλτιστων διεργασιών διαχείρισης καθώς η εξατμισοδιαπνοή και η απορροή υπολογίζεται ξεχωριστά για κάθε HRU.

### 2.1.2. Κλίμα

Για την αναπαράσταση των κλιματικών συνθηκών το SWAT απαιτεί ημερήσιες τιμές για τη βροχόπτωση, τη μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία αέρα, την ηλιακή ακτινοβολία, τη σχετική υγρασία και την ταχύτητα του ανέμου.

Στην περίπτωση που δεν είναι διαθέσιμες ημερήσιες τιμές, τότε μπορεί να τις αναπαράγει με βάση μέσους όρους μερικών ετών, χρησιμοποιώντας το κλιματικό μοντέλο WXGEN (Sharpley and Williams, 1990). Επίσης το ίδιο μοντέλο αναπαράγει τιμές για ωριαίο βήμα όταν οι τιμές που έχουν δοθεί είναι ημερήσιες.

Όταν δεν είναι διαθέσιμες μετρήσεις, η ημερήσια βροχόπτωση αναπαράγεται με μία ασύμμετρη (skewed) σειρά Markov (Nicks, 1974) ή με μία εκθετική σειρά Markov (Williams, 1995), μια πρώτης τάξης σειρά Markov χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της ημέρας ως υγρής ή ξηρής και στην περίπτωση υγρής μέρας, μια κατανομή skewed χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ποσότητας. Η μέγιστη βροχόπτωση μισάωρου απαιτείται στην περίπτωση του υπολογισμού της επιφανειακής απορροής αιχμής, και υπολογίζεται με βάση τα ωριαία δεδομένα βροχοπτώσεων, στην περίπτωση που η βροχόπτωση δίνεται σε ημερήσιο βήμα ή δεν δίνεται, τότε υπολογίζεται με βάση μία τριγωνική κατανομή χρησιμοποιώντας τη μέση μηνιαία τιμή. Σε περίπτωση που απαιτούνται ωριαίες τιμές βροχόπτωσης αυτές αναπαράγονται με βάση τις ημερήσιες με τη μέθοδο από το CLIGEN (Nicks et al, 1995).

Το SWAT καθορίζει εάν η βροχόπτωση θα έχει τη μορφή βροχής ή χιονιού με βάση μια ρυθμιζόμενη θερμοκρασία σχηματισμού χιονιού, το χιόνι στην επιφάνεια του εδάφους υπολογίζεται με βάση το εξής ισοζύγιο ως ισοδύναμο νερού:

$$SNO = SNO + R_{day} - E_{sub} - SNO_{mlt}$$

όπου:

- SNO η ποσότητα χιονιού στην υπολεκάνη τη δοσμένη ημέρα (mm H<sub>2</sub>O)
- R<sub>day</sub> η ποσότητα βροχόπτωσης στη δοσμένη μέρα εάν η θερμοκρασία είναι μικρότερη της θερμοκρασίας σχηματισμού χιονιού (mm H<sub>2</sub>O)
- E<sub>sub</sub> η ποσότητα εξάχνωσης τη δοσμένη ημέρα (mm H<sub>2</sub>O)
- SNO<sub>mlt</sub> η ποσότητα χιονιού που έλιωσε τη δοσμένη ημέρα (mm H<sub>2</sub>O)

Η καλυμμένη με χιόνι επιφάνεια υπολογίζεται με βάση την ποσότητα του χιονιού ανά υπολεκάνη (Anderson, 1976) και η υποχώρησή του, λιώσιμο, υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$SNO_{mlt} = b_{mlt} * sno_{cov} * \left[ \frac{T_{snow} + T_{max}}{2} - T_{mlt} \right]$$

όπου:

$SNO_{mlt}$  η ποσότητα χιονιού που έλιωσε τη δοσμένη μέρα (mm H<sub>2</sub>O)

$b_{mlt}$  ο ρυθμός λιώσιμου του χιονιού τη συγκεκριμένη ημέρα (mm H<sub>2</sub>O/day-°C)

$sno_{cov}$  το ποσοστό της επιφάνειας του HRU που είναι καλυμμένο με χιόνι

$T_{snow}$  η θερμοκρασία του χιονιού στο έδαφος (°C)

$T_{max}$  η μέγιστη θερμοκρασία της ημέρας (°C)

$T_{mlt}$  η θερμοκρασία λιώσιμου του χιονιού (°C)

Η μέθοδος του υπολογισμού της ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας και των ελάχιστης και μέγιστης θερμοκρασίας γίνεται με τη μέθοδο των (Richardson, 1981; Richardson and Wright, 1984). Η σχετική υγρασία είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό της πίεσης ατμών και για τη μέθοδο υπολογισμού δυνητικής εξατμισοδιαπνοής Penman-Monteith και υπολογίζεται από τις μέσες μηνιαίες τιμές με τη μέθοδο των Sharpley and Williams, (1990). Η ταχύτητα του ανέμου επίσης απαιτείται για τη μέθοδο υπολογισμού δυνητικής εξατμισοδιαπνοής Penman-Monteith και υπολογίζεται ως εξής:

$$\mu_{10m} = \mu w n d_{mon} * (-\ln(m d_1))^{0.3}$$

όπου:

$\mu_{10m}$  η μέση ημερήσια ταχύτητα ανέμου (m/sec)

$\mu w n d_{mon}$  η μέση μηνιαία ταχύτητα ανέμου (m/sec)

$rnd_1$  ένας τυχαίος αριθμός από το 0.0 μέχρι το 1.0

Τέλος, το SWAT δίνει τη δυνατότητα αναπαράστασης των ορεογραφικών επιπτώσεων στη βροχόπτωση και θερμοκρασία με τη χρησιμοποίηση των elevation bands. Αυτή η μέθοδος χωρίζει την υπολεκάνη σε μέχρι και δέκα περιοχές ανάλογα με το υψόμετρό τους και αναπροσαρμόζει τη θερμοκρασία και τη βροχόπτωσή τους με βάση μια δοσμένη θερμοβαθμίδα (Temperature lapse rate) και μία δοσμένη βροχοβαθμίδα (Precipitation lapse rate).

### 2.1.3. Υδρολογία

Το κύριο κομμάτι της μοντελοποίησης στο SWAT πέραν της κίνησης ιζήματος, θρεπτικών και ρύπων είναι η υδρολογία της λεκάνης απορροής, καθώς αυτή καθορίζει στη συνέχεια την κίνηση των υπολοίπων παραμέτρων. Η φιλοσοφία προσέγγισης της υδρολογίας είναι η μοντελοποίηση της εδαφικής φάσης του υδρολογικού κύκλου με βάση το παρακάτω ισοζύγιο:

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

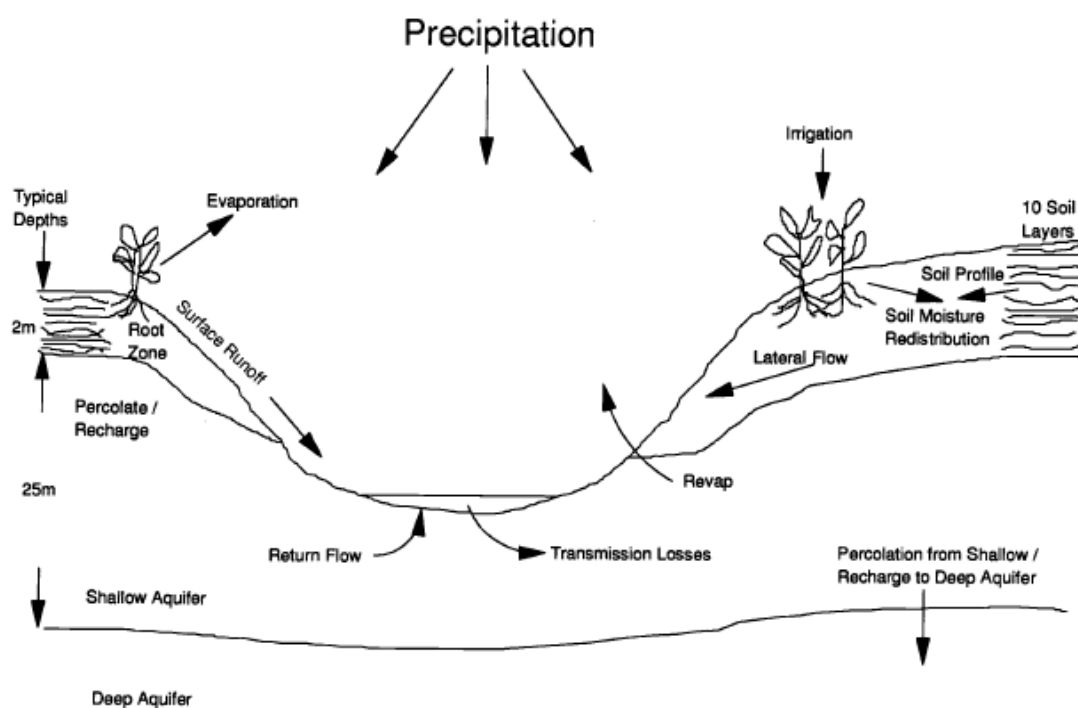
όπου:

$SW_t$  η τελική ποσότητα υγρασίας στο έδαφος (mm H<sub>2</sub>O)

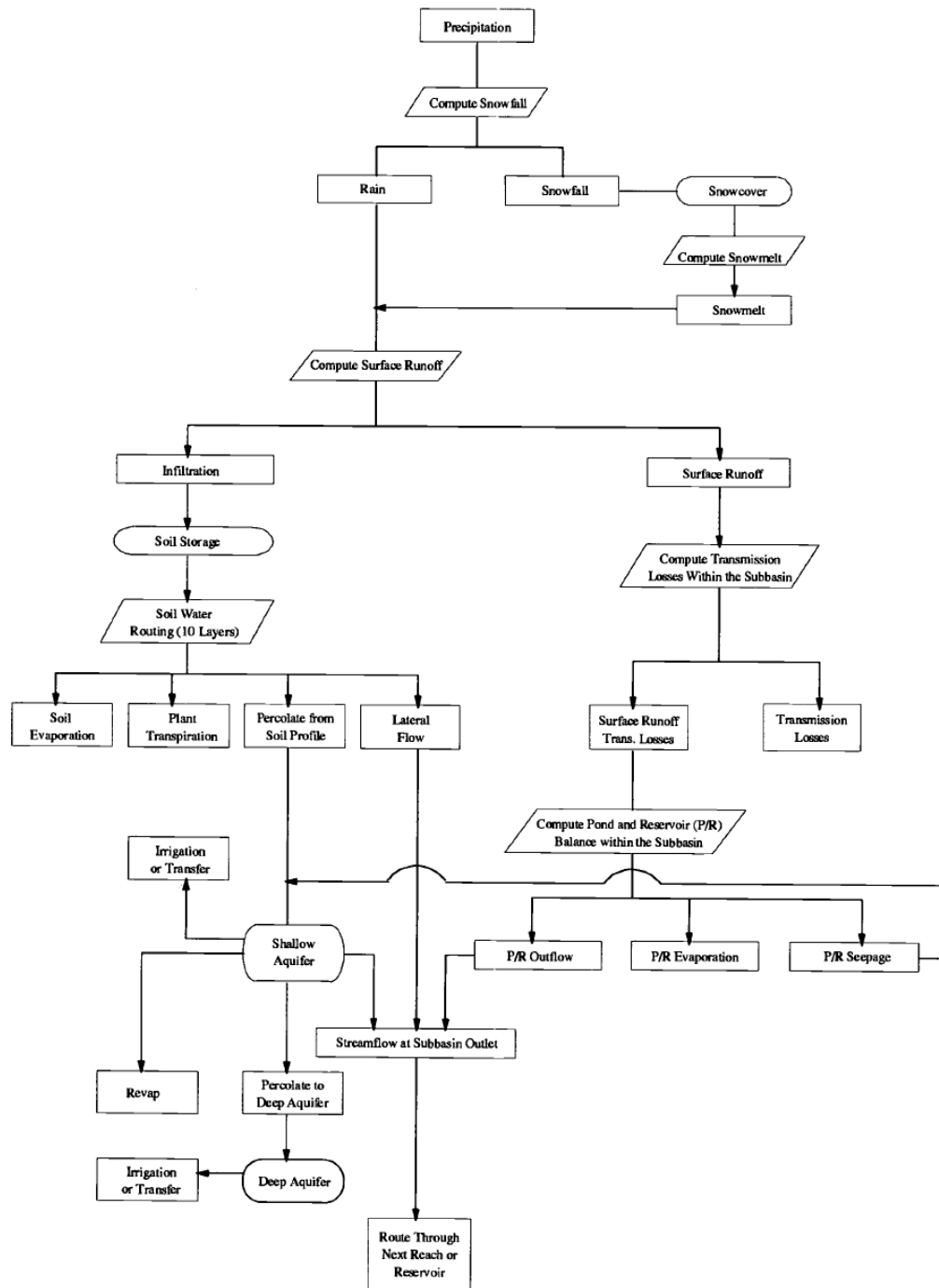
$SW_0$  η αρχική ποσότητα υγρασίας την ημέρα i (mm H<sub>2</sub>O)



- $t$  ο χρόνος (days)  
 $R_{\text{day}}$  η ποσότητα βροχόπτωσης την ημέρα  $i$  ( $\text{mm H}_2\text{O}$ )  
 $Q_{\text{surf}}$  η επιφανειακή απορροή την ημέρα  $i$  ( $\text{mm H}_2\text{O}$ )  
 $E_a$  η εξατμισοδιαπνοή την ημέρα  $i$  ( $\text{mm H}_2\text{O}$ )  
 $W_{\text{seep}}$  η ποσότητα νερού που διηθείται στην κορεσμένη ζώνη από το εδαφικό προφίλ την ημέρα  $i$  ( $\text{mm H}_2\text{O}$ )  
 $Q_{\text{gw}}$  η ροή βάσης (base flow) την ημέρα  $i$  ( $\text{mm H}_2\text{O}$ )



Εικόνα 1. Σχηματική αναπαράσταση της εδαφικής φάσης του υδρολογικού κύκλου (Arnold et al, 1998)



Εικόνα 2. Διάγραμμα ροής του υπολογισμού της παροχής του ποταμού σε επίπεδο υπολεκάνης (Arnold et al, 1998)

Για τον υπολογισμό της επιφανειακής απορροής το SWAT παρέχει δύο μεθόδους, την ημιεμπειρική SCS Curve Number (SCS Engineering Division, 1986) και τη θεωρητική μέθοδο Green and Ampt. Στη συγκεκριμένη εργασία, αν και η Green and Ampt μέθοδος αποδίδει ακριβέστερα την επιφανειακή παροχή, γίνεται χρήση της μεθόδου SCS Curve Number, διότι όταν παρέχονται ημερήσια δεδομένα βροχόπτωσης η διαφορά εκτίμησης είναι αμελητέα. Η μέθοδος Curve Number είναι συνάρτηση της διηθητικότητας του εδάφους, των χρήσεων γης και της

επικρατούσας εδαφικής υγρασίας ενώ παράλληλα χρειάζεται αναπροσαρμογή ανάλογα με την κλίση του εδάφους.

$$Q_{sur} = \frac{(R_{day} - I_a)^2}{R_{day} - I_a + S} \approx \frac{(R_{day} - 0.2 * S)^2}{R_{day} + 0.8 * S}$$

όπου:

|            |                                                                                                                               |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $Q_{surf}$ | η επιφανειακή απορροή (mm H <sub>2</sub> O)                                                                                   |
| $R_{day}$  | η ποσότητα βροχόπτωσης (mm H <sub>2</sub> O)                                                                                  |
| $I_a$      | η αναχαίτιση από το φυλλικό σύστημα, η διήθηση πριν την επιφανειακή απορροή και η αποθήκευση στο έδαφος (mm H <sub>2</sub> O) |
| $S$        | ένας παράγοντας κατακράτησης (mm H <sub>2</sub> O)                                                                            |

$$S = 25.4 * \left( \frac{1000}{CN} - 10 \right)$$

όπου:

|    |              |
|----|--------------|
| CN | Curve Number |
|----|--------------|

Παράλληλα χρησιμοποιείται και ένας εμπειρικός συντελεστής καθυστέρησης εκφόρτισης της απορροής (surface runoff lag) στο κυρίως κανάλι. Εκτός από τη συσχέτιση με το έδαφος, το SWAT δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού των Curve Number και ως συνάρτηση της εξατμισοδιαπνοής.

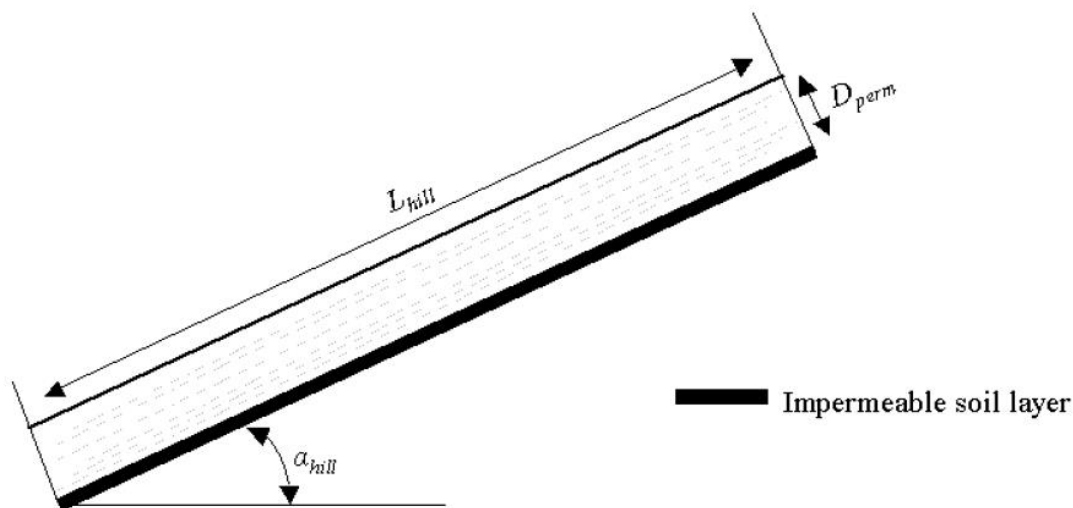
Το έδαφος χωρίζεται σε παράλληλα τμήματα με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Αφού διηθηθεί στο έδαφος το νερό, είτε κινείται οριζόντια, είτε διηθείται στον υπόγειο υδροφόρο. Η διήθηση στον υπόγειο υδροφόρο γίνεται όταν η υγρασία του εδάφους ξεπεράσει την εδαφική, υδατική, ικανότητα συγκράτησης. Για την οριζόντια ροή γίνεται χρησιμοποίηση του δισδιάστατου, κινηματικού, αποθηκευτικού μοντέλου των [Sloan et al, \(1983\)](#) το οποίο μοντελοποιεί την κίνηση του νερού κατά μήκος πλαγιών απότομης κλίσης. Η προσέγγιση αυτή χρησιμοποιεί την εξίσωση συνεχείας λαμβάνοντας ως όγκο ελέγχου όλη τη πλαγιά και θεωρώντας την ύπαρξη αδιαπέρατου στρώματος παράλληλου με την επιφάνεια.

$$Q_{lat} = 0.024 * \left( \frac{2 * SW_{ly, excess} * K_{sat} * slp}{\phi_d * L_{hill}} \right)$$

όπου:

|                   |                                                                       |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| $Q_{lat}$         | η οριζόντια παροχή (mm H <sub>2</sub> O/day)                          |
| $SW_{ly, excess}$ | η στραγγίσιμη ποσότητα νερού στην ακόρεστη ζώνη (mm H <sub>2</sub> O) |
| $K_{sat}$         | η υδραυλική αγωγιμότητα (mm/hr)                                       |
| $slp$             | η κλίση της πλαγιάς                                                   |
| $\phi_d$          | η στραγγίσιμη διαπερατότητα του εδάφους (mm/mm)                       |
| $L_{hill}$        | το μήκος της πλαγιάς (m)                                              |

Και εδώ χρησιμοποιείται εμπειρικός συντελεστής απόκρισης εκφόρτισης της ροής (lateral flow lag) στο κυρίως κανάλι. Η εικόνα #3 παριστάνει την προσέγγιση σχηματοποιημένα.



Εικόνα 3. Σχηματικό μοντέλο της οριζόντιας υπεδάφιας κίνησης του νερού σε πλαγιά με έντονη κλίση (Neitsch<sup>2</sup> et al, 2009)

όπου:

- $L_{hill}$  το μήκος ολόκληρης της πλαγιάς
- $D_{perm}$  το βάθος μέχρι το αδιαπέρατο στρώμα
- $\alpha_{hill}$  η κλίση της πλαγιάς

Ο υπόγειος υδροφορέας χωρίζεται σε δύο τμήματα, τον αβαθή ο οποίος αλληλεπιδρά στον υδρολογικό κύκλο, και τον βαθύ, στον οποίο θεωρείται ότι το νερό έχει βγει από το σύστημα. Ο όγκος του νερού στον αβαθή υδροφορέα καθορίζεται με την επίλυση του παρακάτω ισοζυγίου:

$$aq_{sh,i} = aq_{sh,i-1} + w_{rchrg,sh} - Q_{gw} - w_{revap} - w_{pump,sh}$$

όπου:

- $aq_{sh,i}$  η ποσότητα νερού στον αβαθή υδροφορέα την ημέρα  $i$  (mm H<sub>2</sub>O/day)
- $aq_{sh,i-1}$  η ποσότητα νερού στον αβαθή υδροφορέα την ημέρα  $i-1$  (mm H<sub>2</sub>O)
- $w_{rchrg,sh}$  η ποσότητα νερού που διηθείται στον αβαθή υδροφορέα την ημέρα  $i$  (mm H<sub>2</sub>O)
- $Q_{gw}$  η ροή βάσης (base flow) την ημέρα  $i$  (mm H<sub>2</sub>O)
- $w_{revap}$  η ποσότητα νερού που επανέρχεται στην ακόρεστη ζώνη από τον υδροφόρο ορίζοντα την ημέρα  $i$  (mm H<sub>2</sub>O)
- $L_{pump,sh}$  η ποσότητα νερού που αντλείται από τον αβαθή υδροφορέα ημέρα  $i$  (mm H<sub>2</sub>O)

Η ροή βάσης εξαρτάται από το εκάστοτε ύψος του υδροφορέα, ένα συντελεστή καθυστέρησης και ένα συντελεστή καθυστέρησης απόκρισης (base flow alpha factor) ενώ η τριχοειδής ανύψωση (revap) και η εκφόρτιση στο βαθύ υδροφορέα καθορίζονται ως ποσοστά του όγκου νερού που εισέρχεται στο υπόγειο σύστημα.

Για τον υπολογισμό της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής το SWAT διαθέτει τρεις μεθόδους, την αναθεωρημένη Penman-Monteith (Jensen et al, 1990), την Priestley-Taylor (Priestley and Taylor, 1972) και την Hargreaves (Hargreaves and Samani, 1985). Ο υπολογισμός της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής στην εργασία γίνεται με την αναθεωρημένη Penman-Monteith η οποία είναι η εξής:

$$\lambda E_t = \frac{\Delta * (H_{net} - G) + \gamma * K_1 * \frac{0.622 * \lambda * \rho_{air} * (e_z^0 - e_z)}{P * r_a}}{\Delta + \gamma * \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)}$$

όπου:

|              |                                                                                                    |
|--------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\lambda$    | η λανθάνουσα θερμότητα εξατμησης (MJ/kg)                                                           |
| $E_t$        | ο μέγιστος ρυθμός εξατμισοδιαπνοής (mm/day)                                                        |
| $\Delta$     | η κλίση της καμπύλης κορεσμένων υδρατμών-θερμοκρασίας (kPa/°C)                                     |
| $H_{net}$    | το καθαρό ποσό ακτινοβολίας (MJ/m <sup>2</sup> -day)                                               |
| $G$          | η πυκνότητα ροής θερμότητας προς το έδαφος (MJ/m <sup>2</sup> -day)<br>(θεωρείται ίση με το μηδέν) |
| $\gamma$     | η ψυχρομετρική σταθερά (kPa/°C)                                                                    |
| $K_1$        | ένας συντελεστής διάστασης, ανάλογος με τις μονάδες                                                |
| $\rho_{air}$ | η πυκνότητα του αέρα (kg/m <sup>3</sup> )                                                          |
| $P$          | η ατμοσφαιρική πίεση (kPa)                                                                         |
| $e_z^0$      | πίεση κορεσμένων υδρατμών σε ύψος z (kPa)                                                          |
| $e_z$        | πραγματική πίεση υδρατμών σε ύψος z (kPa)                                                          |
| $r_a$        | αεροδυναμική αντίσταση (sec/m)                                                                     |
| $r_c$        | αντίσταση φυτοκάλυψης (sec/m)                                                                      |

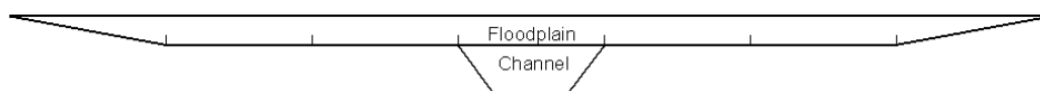
Για τον υπολογισμό της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής αυτή υπολογίζεται ως το άθροισμα της υγρασίας που έχει ανακοπεί από τα φυλλικό σύστημα των φυτών, της εξάχνωσης του χιονιού, της εξατμησης από το κυρίως κανάλι και άλλα σώματα νερού, της εξατμησης από το έδαφος και τη διαπνοή των φυτών. Το ποσοστό εξατμησης της υγρασίας από το έδαφος καθορίζεται από ένα συντελεστή ο οποίος καθορίζει το ποσοστό εξατμησης ανά βάθος (esco), ενώ το ποσοστό της διαπνοής εξαρτάται από ένα συντελεστή που ρυθμίζει τη δυνατότητα πρόσληψης νερού των φυτών από το έδαφος (epco).

Οι απώλειες μετάδοσης (transmission losses) υπολογίζονται με βάση το SCS Hydrology Handbook (Lane, 1983) και καταλήγουν είτε στον αβαθή είτε στο βαθύ υδροφόρα με τη χρησιμοποίηση ενός ποσοστιαίου συντελεστή.

Τέλος, η ανάπτυξη της βλάστησης καθορίζεται με το αναθεωρημένο σύστημα των heat units (Barnard, 1948; Phillips, 1950). Το σύστημα αυτό χρησιμοποιεί τη μέση θερμοκρασία ανά ημέρα για να υπολογίσει την ανάπτυξη των φυτών. Κάθε τύπος φυτού έχει μια θερμοκρασία ανάπτυξης, όταν η μέση θερμοκρασία της ημέρας είναι μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία ανάπτυξης, η διαφορά τους προστίθεται στις heat units του φυτού. Με βάση αυτό το σύστημα μπορεί να προβλεφθεί ο χρόνος διαφόρων σταδίων ανάπτυξης του φυτού, και γεωργικών

εργασιών όπως η άρδευση. Ο υπολογισμός της ανάπτυξης των φυτών είναι πολύ σημαντικός καθώς επηρεάζει την εξατμισοδιαπνοή, το χρονικό προγραμματισμό της άρδευσης και της λίπανσης αλλά και την επιφανειακή απορροή, καθώς το SWAT επιτρέπει τη ρύθμιση των Curve Number ανάλογα με την ανάπτυξη των φυτών.

Όσον αφορά τα κανάλια νερού το SWAT τα διαχωρίζει σε δύο τύπους, τα συμβαλλόμενα (tributary), και το κυρίως κανάλι, τον ποταμό. Τα συμβαλλόμενα κανάλια διοχετεύουν νερό, ίζημα και θρεπτικά από τα HRUs στο κυρίως κανάλι, δεν δέχονται νερό από τον υπόγειο υδροφορέα και χρησιμοποιούνται για να υπολογιστεί ο χρόνος συγκέντρωσης της υπολεκάνης. Όσον αφορά την κοίτη του ποταμού, αυτή θεωρείται τραπεζοειδούς μορφής, το ίδιο ισχύει και για την πλημμυρική επιφάνεια.



**Εικόνα 4. Σχηματική αναπαράσταση της θεωρητικής σύλληψης της κοίτης ποταμού και της πλημμυρική επιφάνειας στο SWAT (Neitsch<sup>2</sup> et al, 2009)**

Για τον υπολογισμό του νερού στο κυρίως κανάλι χρησιμοποιείται το εξής ισοζύγιο:

$$V_{stored,2} = V_{stored,1} + V_{in} - V_{out} - tloss - E_{ch} + div + V_{bnk}$$

όπου:

$V_{stored,2}$  η ποσότητα νερού στο κανάλι στο τέλος της ημέρας ( $m^3 H_2O$ )

$V_{stored,1}$  η ποσότητα νερού στο κανάλι στην αρχή της ημέρας ( $m^3 H_2O$ )

$V_{in}$  η ποσότητα νερού που εισέρχεται στο κανάλι κατά τη διάρκεια της ημέρας ( $m^3 H_2O$ )

$V_{out}$  η ποσότητα νερού που εξέρχεται από το κανάλι κατά τη διάρκεια της ημέρας ( $m^3 H_2O$ )

$tloss$  η ποσότητα νερού που χάνεται από το κανάλι λόγω απωλειών μετάδοσης κατά τη διάρκεια της ημέρας ( $m^3 H_2O$ )

$E_{ch}$  η εξατμισοδιαπνοή στο κανάλι κατά τη διάρκεια της ημέρας ( $m^3 H_2O$ )

$div$  η ποσότητα νερού που αφαιρείται από το κανάλι για χρήση κατά τη διάρκεια της ημέρας ( $m^3 H_2O$ )

$V_{bnk}$  η ποσότητα νερού που επανέρχεται στο κανάλι λόγω παρόχθιας αποθήκευσης κατά τη διάρκεια της ημέρας ( $m^3 H_2O$ )

Η εξάτμιση καθορίζεται ως ποσοστό της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής και η παρόχθια αποθήκευση καθορίζεται από ένα συντελεστή καθυστέρησης απόκρισης (alpha bank factor). Τέλος, για την παροχή του κυρίως καναλιού το SWAT χρησιμοποιεί την εξίσωση του Manning

$$q_{ch} = \frac{A_{ch} * R_{ch}^{2/3} * \sqrt{slp_{ch}}}{n}$$

όπου:

$q_{ch}$  η παροχή στο κανάλι ( $mm H_2O/day$ )

|            |                                                                |
|------------|----------------------------------------------------------------|
| $A_{ch}$   | η εγκάρσια επιφάνεια της ροής στο κανάλι (mm H <sub>2</sub> O) |
| $R_{ch}$   | η υδραυλική ακτίνα (m)                                         |
| $slp_{ch}$ | η κλίση της κοίτης του ποταμού                                 |
| $n$        | ο συντελεστής Manning                                          |

και για τη δρομολόγηση του νερού στο κυρίως κανάλι δίνεται η δυνατότητα επιλογής από δύο μεθόδους οι οποίες είναι παραλλαγές του κινηματικού κυματικού μοντέλου (Chow et al, 1998), η μέθοδος μεταβλητής αποθήκευσης (Williams et al, 1969), η οποία και χρησιμοποιείται στην εργασία, και η μέθοδος Muskingum (Overton et al, 1966).

Τέλος σημειώνεται η δυνατότητα του SWAT να προσομοιώνει λιμνάζοντα νερά από επιφανειακή απορροή σε επίπεδο υπολεκάνης. Αυτές οι λιμνούλες μοντελοποιούνται εκτός του κυρίως ποταμού και δέχονται εισροές μόνο από τη συγκεκριμένη υπολεκάνη. Σε αυτή την εργασία δεν μοντελοποιούνται οπότε δεν γίνεται περαιτέρω ανάλυση.

## 2.2. SWAT, εφαρμογές και σύγκριση με άλλα μοντέλα

### 2.2.1. Εφαρμογές

Το SWAT είναι ένα μοντέλο που λόγω των αναφερομένων στην εισαγωγή χαρακτηριστικών του αλλά και λόγω της φιλικότητάς του προς τον χρήστη χρησιμοποιείται ευρέως σε όλο τον κόσμο. Επίσης, χρησιμοποιείται σε πολλά επίσημα προγράμματα και στις δύο μεριές του Ατλαντικού.

Στις Η.Π.Α. η χρήση του έχει εστιαστεί στις επιπτώσεις της αλλαγής χρήσεων γης και στις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στην παροχή και ποιότητα νερού (Arnold and Fohrer, 2005).

Έχει ενσωματωθεί στο πρόγραμμα BASINS (Better Assessment Science Integrating Point and Non-point Sources) 3.0 και χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση των προγραμμάτων για τα TMDLs (Total Maximum Daily Loads) της EPA (Environmental Protection Agency) (Di Luzio et al, 2002). Έχει εφαρμοστεί στα πλαίσια του προγράμματος HUMUS (Hydrologic Unit Model of the USA) το οποίο είχε ως αρχικό στόχο να αποτελέσει την τεχνική βάση για την εκτίμηση των υδάτινων πόρων για την αναφορά RCA Appraisal Report 1997, όσον αφορά τις χρήσεις νερού στην αγροτική γη, και τις επιπτώσεις από την αλλαγή γεωργικών πρακτικών στους υδάτινους πόρους (Arnold et al, 2010). Έχει επίσης χρησιμοποιηθεί από την NOAA στα πλαίσια του προγράμματος National Coastal Pollutant Discharge Inventory, για τη μοντελοποίηση της υδρολογίας και της ποιότητας των παράκτιων λεκανών απορροής (Arnold and Fohrer, 2005).

Στην Ευρώπη έχει χρησιμοποιηθεί στο πρόγραμμα EUROHARP, το οποίο περιλαμβάνει 17 χώρες και αφορά την επιστημονική εκτίμηση 9 μοντέλων λεκανών απορροής και της δυνατότητάς τους να μοντελοποιούν τη διάχυτη ρύπανση αζώτου και φωσφόρου και τη σύγκρισή τους (Schoumans et al, 2009). Έχει επίσης χρησιμοποιηθεί στο πρόγραμμα BMW (Benchmark Models for the Water Framework Directive), το οποίο έχει ως στόχο να δοκιμάσει τη χρήση ενσωματωμένων μοντέλων στην υλοποίηση των στόχων της Ευρωπαϊκής Οδηγίας για τα Νερά (Arnold and Fohrer, 2005). Έχει χρησιμοποιηθεί στα πλαίσια του προγράμματος CHESS για την ανάλυση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής



στην ποιότητα νερού των Ευρωπαϊκών ποταμών (Arnold and Fohrer, 2005). Έχει χρησιμοποιηθεί στο πρόγραμμα TempQsim, που είχε ως πρώτο στόχο την ανάπτυξη μοντέλων για τη μελέτη της ποιότητας των νερών στην περιοχή της Μεσογείου (Arnold and Fohrer, 2005). Στη Μεσόγειο επικρατούν ξηρές συνθήκες και πολλοί ποταμοί έχουν διαλείπουσα ροή, ευνοώντας τη συσσώρευση θρεπτικών, στα πλαίσια του προγράμματος TempQsim, η συσσώρευση εμπειρίας μέσα από τον έλεγχο και τη βελτίωση διαφόρων μοντέλων λεκανών απορροής, συμπεριλαμβανομένου και του SWAT, οδήγησε στην ανάπτυξη των εργαλείων του προγράμματος PESCAS, tempQsim-stream, tempQsim-reach (Froeblich et al, 2006). Τέλος έχει χρησιμοποιηθεί και στο πρόγραμμα SoilTrEC με τη μοντελοποίηση του ποταμού Κουλιάρη στην Κρήτη και την ανάπτυξη του Καρστικού μοντέλου (Nikolaidis et al, 2013).

Όσον αφορά την εφαρμογή του στη Μεσόγειο, το SWAT έχει εφαρμοστεί σε αρκετές λεκάνες απορροής με ικανοποιητικά αποτελέσματα σε ετήσιο (Nunes et al, 2008), μηνιαίο (Panagopoulos et al, 2011; Molina-Navarro et al, 2014) και ημερήσιο βήμα (Gikas et al, 2006; Conan et al, 2003; Glavan et al, 2012; Boskidis et al, 2010).

### 2.2.2. Σύγκριση με άλλα μοντέλα

Στα πλαίσια του προγράμματος EUROHARP οι μελέτες των Schoumans et al, (2009), αφού εξέτασαν τα μοντέλα NL-CAT (το οποίο είναι συνδυασμός των μοντέλων ANIMO (OSPAR Commission 2007), SWAP, SWQN και SWQL) (Silgram et al, 2009), REALTA (OSPAR Commission 2007), NLES-CAT (Simmelsgaard et al, 2005 in Danish; OSPAR Commission 2007), MONERIS (Venohr et al, 2011; OSPAR Commission 2007), TRK (το οποίο είναι συνδυασμός των μοντέλων SOILNDB, HBV και HBV-N) (Swedish EPA, 1997; OSPAR Commission, 2007), SWAT, EveNFlow (Silgram et al, 2009; OSPAR Commission, 2007), NOPOLU (Terres et al, 2001; OSPAR Commission, 2007) και SA (Kronvang et al, 2005; OSPAR Commission, 2007) κατέληξαν στα εξής συμπεράσματα:

- όλα τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν μπορούν να μοντελοποιήσουν επαρκώς την ροή, το ίζημα και την κίνηση των θρεπτικών σε ημερήσιο βήμα
- όσον αφορά την αποτύπωση των διεργασιών της κίνησης του αζώτου το SWAT ήταν τρίτο, στην τριάδα με τη λεπτομερέστερη απεικόνιση

*NL – CAT > TRK > SWAT >> EveNFlow=*

*MONERIS > NLES – CAT > NOPOLU > SA*

- όσον αφορά την αποτύπωση των διεργασιών της κίνησης του φωσφόρου το SWAT ήταν δεύτερο, στην ομάδα με τη λεπτομερέστερη απεικόνιση

*NL – CAT > SWAT >> MONERIS > TRK = NOPOLU = REALTA > SA*

- σημαντικές αποκλίσεις από τις παρατηρήσεις οι οποίες κυρίως διαπιστώνονταν στις λεκάνες της νότιας Ευρώπης αποδίδονται στην έλλειψη δεδομένων
- η απόδοση των μοντέλων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την οικειότητα του μελετητή με τη λεκάνη απορροής, τονίζοντας ότι αυξάνεται η εμπιστοσύνη στην αποτύπωση των φυσικών διεργασιών και πρακτικών διαχείρισης
- κανένα μοντέλο δεν ξεχωρίζει τόσο ώστε να προταθεί ως βέλτιστο



Στον πίνακα #1 οι συντομογραφίες καθορίζονται ως εξής:

Climatic conditions, Κλιματικές Συνθήκες

N, W, M Βόρεια, Δυτική και Μέση Ευρώπη

S, SE, NE Νότια, Νοτιο-Ανατολική και Βόρειο-Ανατολική Ευρώπη

Topology, Τοπογραφία

M Ορεινή ζώνη, κλίση >10%

H Λοφώδης ζώνη, κλίση 2-10%

P Πεδινή ζώνη, κλίση <2%

D Ζώνη του δέλτα

R Παρόχθια ζώνη

Flow paths, Υδρολογικά μονοπάτια

R Επιφανειακή απορροή

SS Ροή στην εδαφική ζώνη

AD Τεχνητή παροχέτευση (drainage)

DG Ροή στον υδροφόρο ορίζοντα

Agricultural activity, Αγροτική δραστηριότητα

I Έντονη, >150kg N/ha-yr και/ή >10 kg P/ha-yr

M Μέτρια, 50-150kg N/ha-yr και/ή 0-10 kg P/ha-yr

E Εκτενής, <50kg N/ha-yr και/ή <0 kg P/ha-yr

**Πίνακας 1. Σύγκριση της δυνατότητας των μοντέλων στο πρόγραμμα EUROHARP μοντελοποίησης ως προς το άζωτο (N) και το φώσφορο (P) (++πολύ ικανό, +ικανό, ο μερικώς ικανό, - μη ικανό) (Schoumans et al, 2009)**

|              | Climatic conditions |    |     |   |    |    | Landscape |    |    |    |   | Flow paths |    |    |    | Agricultural activity |    |    |
|--------------|---------------------|----|-----|---|----|----|-----------|----|----|----|---|------------|----|----|----|-----------------------|----|----|
|              | N                   | W  | M   | S | SE | NE | M         | H  | P  | D  | R | R          | SS | AD | DG | I                     | M  | E  |
| NLCAT – N    | o                   | ++ | ++  | o | +  | o  | o         | +  | ++ | ++ | + | o          | ++ | ++ | ++ | ++                    | ++ | +  |
| NLCAT – P    | o                   | ++ | ++  | o | +  | o  | o         | +  | ++ | ++ | + | o          | ++ | ++ | ++ | ++                    | ++ | +  |
| SWAT – N     | o                   | ++ | ++  | + | +  | o  | o         | ++ | +  | o  | + | ++         | ++ | ++ | ++ | ++                    | ++ | ++ |
| SWAT – P     | o                   | ++ | ++  | + | +  | o  | o         | ++ | +  | o  | + | ++         | ++ | ++ | ++ | ++                    | ++ | ++ |
| TRK – N      | ++                  | ++ | ++  | o | o  | ++ | o         | ++ | ++ | o  | o | o          | ++ | ++ | ++ | +                     | ++ | ++ |
| TRK – P      | +                   | o  | +/+ | o | o  | o  | o         | +  | +  | o  | o | +          | ++ | ++ | +  | –                     | o  | –  |
| MONERIS – N  | +                   | ++ | ++  | + | ++ | ++ | +         | ++ | ++ | ++ | + | ++         | ++ | ++ | o  | ++                    | +  | ++ |
| MONERIS – P  | +                   | ++ | ++  | + | ++ | ++ | +         | ++ | ++ | +  | + | ++         | ++ | ++ | o  | ++                    | ++ | ++ |
| EVENFLOW – N | o                   | +  | +   | o | +  | +  | +         | +  | +  | –  | – | +          | +  | +  | o  | ++                    | ++ | o  |
| NLES-CAT – N | o                   | ++ | +   | o | o  | +  | o         | +  | +  | o  | o | –          | –  | –  | –  | ++                    | ++ | +  |
| NOPOLU – N   | o                   | +  | +   | + | +  | +  | o         | +  | +  | +  | + | +          | +  | –  | +  | +                     | +  | o  |
| NOPOLU – P   | o                   | +  | +   | + | +  | +  | o         | +  | +  | +  | + | +          | +  | +  | +  | +                     | +  | o  |
| REALTA – P   | –                   | ++ | o   | o | o  | –  | o         | ++ | –  | o  | – | ++         | –  | –  | –  | ++                    | ++ | ++ |
| SA – N       | +                   | +  | +   | + | +  | +  | +         | +  | +  | +  | + | +          | +  | +  | +  | +                     | +  | +  |
| SA – P       | +                   | +  | +   | + | +  | +  | +         | +  | +  | +  | – | +          | +  | +  | +  | +                     | +  | +  |

<sup>a</sup> ++ = highly capable, + = capable, o = partially capable, – = not capable.

Συνεπώς από τα αποτελέσματα του προγράμματος EUROHARP φαίνεται η ανταγωνιστικότητα του SWAT, ως προς τη φιλοσοφία και την ικανότητα απόδοσης, σε σχέση με πληθώρα άλλων μοντέλων.

Αντίθετα, μελέτη των Van Liew et al, (2007) που έγινε σε πέντε Αμερικάνικες, πειραματικές λεκάνες απορροής, οι οποίες καλύπτουν μεγάλο εύρος τοπολογικών, εδαφολογικών, κλιματικών συνθηκών και χρήσεων γης, με στόχο την ανάδειξη των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων του SWAT αλλά και των δυνατοτήτων του, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι παρόλο που το SWAT ανταποκρίνεται δυναμικά στην εκτίμηση των υδρολογικών αποκρίσεων σε μεγάλο εύρος συνθηκών,

συμπεριφέρεται καλύτερα σε πιο υγρά κλίματα παρά σε ξηρά ή ημίξηρα. Η μελέτη κάλυπτε μηνιαίο και ημερήσιο βήμα, η έκδοση του SWAT που χρησιμοποιήθηκε ήταν η AVSWAT 2003 και αναφέρεται μόνο σε αυτόματη βαθμονόμηση (Van Liew et al, 2007), ενώ πρέπει να σημειωθεί ότι έχουν πλέον αναπτυχθεί κατά πολύ οι τεχνικές αυτόματης βαθμονόμησης, ένα παράδειγμα είναι το πρόγραμμα SWAT-CUP (Abbaspour, 2013), αλλά και το ίδιο το μοντέλο έχει αναπτυχθεί (Neitsch<sup>3</sup> et al, 2011).

Στα πλαίσια βιβλιογραφικής μελέτης οι Borah and Bera, (2003) εξέτασαν 11 μοντέλα λεκάνης απορροής, συνεχή ή μεμονωμένων περιστατικών, με βάση τα χαρακτηριστικά και τις δυνατότητές τους. Στην εργασία τους το SWAT συγκρίνεται με τα μοντέλα HSPF (Bicknell et al, 1993), AnnAGNPS (Bingner and Theurer, 2011), ANSWERS-Continuous (Bouraoui et al, 2002) και MIKE-SHE (Refsgaard and Storm, 1996) τα οποία έχουν δυνατότητα μοντελοποίησης συνεχούς βήματος. Με βάση την προσέγγιση και τις δυνατότητές τους:

- το SWAT προτείνεται για αγροτικές/δασικές λεκάνες, ενώ δεν μπορεί να αποδώσει έντονα μεμονωμένα φαινόμενα, έντονες καταιγίδες και τις επακόλουθες πλημμύρες
- το HSPF προτείνεται για αστικές/ημι-αστικές λεκάνες και επίσης δεν μπορεί να αποδώσει έντονα μεμονωμένα φαινόμενα
- το AnnAGNPS είναι πιο νέο μοντέλο και παρόμοιο με το SWAT
- το ANSWERS-Continuous δεν διαθέτει διεργασίες διάβρωσης της κοίτης και μεταφοράς ιζήματος, συνεπώς δεν μπορούν να μοντελοποιηθούν το ίζημα και τα θρεπτικά
- το MIKE-SHE μπορεί να αποδώσει έντονα μεμονωμένα περιστατικά αλλά δεν προτείνεται για μεγάλες λεκάνες λόγω υπολογιστικού φόρτου

Επειδή εάν η σύγκριση μεταξύ μοντέλων μείνει σε βιβλιογραφικό επίπεδο τότε είναι ημιτελής, παρουσιάζονται πέντε μελέτες στις οποίες το SWAT αντιπαραβάλλεται με το HSPF (Bicknell et al, 1993), το MIKE-SHE (Refsgaard and Storm, 1996), το AnnAGNPS (Bingner and Theurer, 2003) και το SHETRAN (Ewen et al, 2000), και παρουσιάζει συγκρίσιμα αποτελέσματα και στις πέντε.

Μελέτη που έγινε στη λεκάνη απορροής του ποταμού Jerker στο Βέλγιο και συνέκρινε την απόδοση του SWAT με το MIKE-SHE το οποίο είναι ένα ντετερμινιστικό, φυσικής σημασίας, πλήρως κατανεμημένο μοντέλο, έδειξε ότι τα δύο μοντέλα, παρόλο που διαφέρουν σε φιλοσοφία και χωρική κατανομή, είχαν αποδεκτά αποτελέσματα στην προσομοίωση της υδρολογίας με ημερήσιο βήμα βαθμονόμησης, με το MIKE-SHE να έχει ελαφρώς καλύτερη απόδοση (El Nasr et al, 2005).

Στη λεκάνη απορροής του Polecat Creek στη Virginia, μελέτη που συνέκρινε την απόδοση απορροής του SWAT με το HSPF έδειξε ότι και τα δύο μοντέλα είχαν καλά αποτελέσματα στη μοντελοποίηση της ροής και του ιζήματος με μηνιαίο βήμα, με το HSPF να έχει λίγο καλύτερα αποτελέσματα (Im et al, 2007). Παρόλα αυτά, το SWAT ως πρόγραμμα ήταν πιο φιλικό προς το χρήστη απαιτώντας λιγότερη προσπάθεια από τη χρήση στη βαθμονόμηση των παραμέτρων του, καθώς οι παράμετροί του είναι λιγότεροι σε αριθμό, μπορούν να λάβουν τιμές αυτόματα από βάσεις δεδομένων και τέλος προσαρμόζονται πιο εύκολα (Im et al, 2007). Σε

παρόμοιο συμπέρασμα καταλήγει και η μελέτη των [Saleh and Du, \(2004\)](#), στη λεκάνη απορροής του Upper North Bosque River στο Texas, σε βαθμονόμηση ημερησίου βήματος αυτή τη φορά και με το SWAT να έχει καλύτερα αποτελέσματα στη φόρτιση των θρεπτικών, γεγονός που αποδόθηκε στη φιλικότητα προς το χρήστη κατά τη βαθμονόμηση.

Σε μελέτη δύο λεκανών απορροής, του Red Rock Creek και του Goose Creek που είναι υπολεκάνες, της λεκάνης απορροής της λίμνης Cheney στο νότιο-κεντρικό Kansas, έγινε σύγκριση του SWAT με το AnnAGNPS ([Bingner and Theurer, 2003](#)) που κατέληξε στο συμπέρασμα ότι και τα δύο μοντέλα προσομοιάζουν σε αποδεκτό βαθμό τη ροή και το ιζήμα σε μηνιαίο βήμα, με το SWAT να παρουσιάζει καλύτερη απόδοση στη μηνιαία φόρτιση φωσφόρου ([Parajuli et al, 2009](#)).

Τέλος στη μελέτη των [Nasr et al, \(2007\)](#), όπου εξετάζονται τρεις λεκάνες απορροής στην Ιρλανδία, έγινε σύγκριση του SWAT με το HSPF και το SHETRAN όπου και τα τρία μοντέλα είχαν αποδεκτά αποτελέσματα κατά την αναπαράσταση των ημερησίων ροών, ιζήματος και φωσφόρου, με το HSPF να έχει καλύτερα αποτελέσματα στη μοντελοποίηση της ροής και το SWAT στη μοντελοποίηση του φωσφόρου.

### **2.2.3. Περιορισμοί και τροποποιήσεις**

Στις εφαρμογές του μοντέλου στη Μεσόγειο και όχι μόνο τονίζονται προβλήματα και περιορισμοί του προγράμματος. Οι [Conan et al, \(2003\)](#) και [Panagopoulos et al, \(2011\)](#) τονίζουν την έλλειψη χωρικής κατανομής στην περίπτωση του υδροφόρου ορίζοντα και προσθέτουν ότι το μοντέλο δεν μπορεί να πιάσει κάποιες παροχές αιχμής. Οι [Panagopoulos et al, \(2011\)](#) αναφέρουν ότι η πληθώρα των βαθμονομήσιμων παραμέτρων αυξάνουν τη δυσκολία εφαρμογής σε περιπτώσεις με περιορισμένα δεδομένα χωρίς να αποτελούν αποτρεπτικό παράγοντα, αλλά αναπόφευκτα χάνεται η χωρική κατανομή των διεργασιών καθώς μειώνονται τα σημεία μετρήσεων, και συνεπώς βαθμονόμησης. Όμως η χωρική ομογενοποίηση των παραμέτρων σε επίπεδο λεκάνης κυρίως εδαφικών και χρήσεων γης, λόγω έλλειψης σημείων παρακολούθησης, μπορεί να μειώνει τη χωρική κατανομή των διεργασιών αλλά αυξάνει τη δυνατότητα μεταφοράς της βαθμονόμησης σε όμορες λεκάνες απορροής για τις οποίες μπορεί να μην υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία ([Panagopoulos et al, 2011](#)).

Επίσης αναφέρεται από τους [Panagopoulos et al, \(2011\)](#) και [Gassman et al, \(2007\)](#) το πρόβλημα με την ημι-κατανεμημένη σύλληψη των HRU τα οποία θεωρούνται ως ισαπέχοντα από το κυρίως κανάλι και συνεπώς αγνοείται η δρομολογία ροής και ρυπαντών στο εσωτερικό της υπολεκάνης μειώνοντας τη χωρική κατανομή και αλλοιώνοντας την απόκρισή της στις αλλαγές.

Τέλος, πρέπει να αναφερθεί μία από τις σημαντικότερες δυσκολίες που αντιμετωπίζει ο μελετητής ακόμα και με τη χρησιμοποίηση μοντέλων τα οποία έχουν φυσική σημασία, το πρόβλημα της ύπαρξης ισοδύναμων λύσεων (equifinality) ([Grayson and Bloschl, 2000; Panagopoulos et al, 2011](#)). Αυτό σημαίνει ότι δεν υπάρχει μοναδικός συνδυασμός παρατηρήσεων ο οποίος μπορεί να προσομοιώσει τις παρατηρήσεις, συνεπώς η εύρεση μιας ικανοποιητικής προσέγγισης δεν αποκλείει την ύπαρξη άλλης και δεν εγγυάται την απόδοση των φυσικών διεργασιών ([Grayson and Bloschl, 2000](#)). Αυτό το θέμα κάνει πιο

επιτακτική την ανάγκη της εξοικείωσης του μελετητή με τη λεκάνη απορροής, ώστε να αυξηθεί η εμπιστοσύνη για την απόδοσή τους.

Το SWAT έχει τροποποιηθεί αρκετά, έχει βγάλει διάφορες εκδόσεις με συγκεκριμένο στόχο κάθε φορά και έχει συνδυαστεί με άλλα μοντέλα ώστε να γίνει καλύτερη εκμετάλλευση των δυνατοτήτων του (Arnold and Fohrer, 2005; Gassman et al, 2007; El Nasr et al, 2005).

Ένας συνδυασμός είναι με το MODFLOW για την καλύτερη αναπαράσταση του υπόγειου υδροφορέα, αντικαθιστώντας την κατανεμημένη σε επίπεδο υπολεκάνης αντιμετώπιση του υδροφορέα, από το SWAT, με την πλήρως κατανεμημένη αντιμετώπισή του από το MODFLOW, αναπαριστώντας καλύτερα την χωρική ανομοιογένεια των χαρακτηριστικών του (Sophocleous et al, 1999; Kim et al, 2008).

Επίσης ο συνδυασμός του SWAT με το Καρστικό μοντέλο δίνει τη δυνατότητα ακριβέστερης μοντελοποίησης της απορροής καρστικών πηγών χωρίζοντας τον υπόγειο υδροφορέα σε δύο σχηματισμούς, ένα άμεσης απόκρισης και ένα αργής (Nikolaidis et al, 2013).

Μια άλλη τροποποίηση από τους Jeong et al, (2010) η οποία έδωσε το ESWAT (Enhanced SWAT), είναι η εισαγωγή βήματος μοντελοποίησης μικρότερο της ώρας, με στόχο την καλύτερη αποτύπωση έντονων καταιγίδων. Σε συνδυασμό με τη μέθοδο διήθησης Green and Ampt που έχει εξαρχής το SWAT μπορεί να αποδώσει καλύτερα από τα ωριαία ή ημερήσια βήματα τις υψηλές παροχές (Jeong et al, 2010).

Τελικό συμπέρασμα από την αναδρομή των εφαρμογών, των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων, είναι ότι το SWAT έχει τη δυνατότητα να μοντελοποιήσει ικανοποιητικά την υδρολογία της λεκάνης απορροή του Γιόφυρου και αφήνεται στην προσπάθεια του μελετητή η προσπάθεια πληρέστερης απόδοσης των φυσικών διεργασιών, ώστε να μπορεί το μοντέλο να χρησιμοποιηθεί για μελλοντικές προβλέψεις.

## **2.3. Στατιστικά Εργαλεία**

### **2.3.1. Βαθμονόμηση**

Οι στατιστικοί δείκτες χρησιμοποιούνται από τους υδρολόγους για την εκτίμηση των βελτιώσεων κατά τη βαθμονόμηση του μοντέλου, για την ποσοτική εκτίμηση της δυνατότητας του μοντέλου να αναπαράγει την παρελθοντική και μελλοντική συμπεριφορά του αντικειμένου του και τέλος για τη σύγκριση της εκάστοτε προσπάθειας μοντελοποίησης με προγενέστερες (Krause et al, 2005). Πρέπει παράλληλα να τονιστεί, διότι κατέχει κύριο ρόλο στην ανάλυση των αποτελεσμάτων του μοντέλου, ότι εκτός από τις μοντελοποιημένες τιμές και οι μετρήσεις δεν είναι άνευ σφαλμάτων και συνεπώς πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τη στατιστική ανάλυση (Moriasi et al, 2007).

Οι Moriasi et al (2007) προτείνουν ως κριτήρια για την εκτίμηση των υδρολογικών μοντέλων πέραν των γραφικών μεθόδων, τις οποίες θεωρούν μεγίστης σημασίας υιοθετώντας την γνώμη των Legates and McCabe (1999), το συντελεστή αποτελεσματικότητας Nash-Sutcliffe (NSE), το δείκτη Percent Bias (PBIAS) και την αναλογία της ρίζας του τετραγώνου του μέσου σφάλματος προς την τυπική απόκλιση (RSR). Εκτός από αυτούς τους δείκτες παραθέτουν και διάφορους άλλους οι οποίοι εξετάστηκαν και απορρίφθηκαν είτε επειδή δεν ήταν

αντιπροσωπευτικοί είτε επειδή δεν ήταν αρκετά διαδεδομένοι ώστε να υπάρχουν δεδομένα προς σύγκριση.

Οι Krause et al (2005) μελετούν τους εξής δείκτες, το συντελεστή προσδιορισμού  $R^2$  και τη ζυγισμένη μορφή του  $wr^2$ , το δείκτη NSE, το δείκτη συμφωνίας d καθώς και τις λογαριθμικές, σχετικές και τροποποιημένες μορφές των δύο τελευταίων δεικτών.

Ο συντελεστής προσδιορισμού  $R^2$  έχει ως βασικό μειονέκτημα την ποσοτικοποίηση μόνο της διασποράς και συνεπώς δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνος καθώς συστηματική υπερεκτίμηση ή υποεκτίμηση μπορεί να δώσει καλές τιμές κοντά στο 1.

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

Επίσης, καλές τιμές μπορούν να επιτευχθούν ακόμα και για φτωχές αναπαραστάσεις, στην περίπτωση που το μοντέλο ακολουθεί τις μετρήσεις στις υψηλές τιμές (Legates and McCabe, 1999). Υψηλές τιμές του  $R^2$  επιτυγχάνονται ακόμα και όταν η κλίση της παλινδρόμησης διαφέρει από το 1 και η τεταγμένη επί την αρχή των αξόνων διαφέρει από το 0 (Legates and McCabe, 1999). Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα πρέπει να συνυπολογιστούν οι δύο αυτοί παράγοντες. Για μια πιο αντιπροσωπευτική εκτίμηση των δεδομένων εκτιμάται ο ζυγισμένος συντελεστής προσδιορισμού  $wr^2$  ο οποίος συνεκτιμάει την κλίση b της παλινδρόμησης (Krause et al, 2005).

$$wr^2 = |b| * r^2 \text{ for } b \leq 1$$

$$wr^2 = |b|^{-1} * r^2 \text{ for } b > 1$$

Ο συντελεστής Nash-Sutcliffe κανονικοποιεί την διακύμανση των παρατηρήσεων, οι τιμές εκτείνονται από το μείον άπειρο μέχρι το 1, το οποίο αποτελεί τέλεια αποτύπωση, ενώ το 0 υποδεικνύει ότι η χρησιμοποίηση της μέσης τιμής θα είχε το ίδιο στατιστικό αποτέλεσμα.

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

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

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

$$mNSE = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - P_i|}{\sum_{i=1}^n |O_i - \bar{O}|} \right]$$

Το μεγαλύτερο μειονέκτημά του είναι η υπερευαισθησία του στις μεγάλες παροχές σε σχέση με τις χαμηλές, ενώ όπως και με ο  $R^2$  δεν έχει ευαισθησία στη συστηματική υπερεκτίμηση ή υποεκτίμηση του μοντέλου, ειδικά στις χαμηλές παροχές (Legates and McCabe, 1999). Η χρησιμοποίηση λογαριθμικών τιμών lnNSE αυξάνει την ευαισθησία του μοντέλου και στις χαμηλές παροχές και στα συστηματικά λάθη αλλά απαιτεί μη μηδενικές τιμές. Επίσης η σχετικοποίηση του δείκτη rNSE αυξάνει την ευαισθησία κυρίως στις χαμηλές παροχές και επίσης απαιτεί μη μηδενικές μετρήσεις (Krause et al, 2005). Τέλος η χρησιμοποίηση του τροποποιημένου δείκτη mNSE βελτιώνει κατά πολύ την ευαισθησία στις χαμηλές παροχές αλλά έχει ως μειονέκτημα τη δυσχέρεια στην επίτευξη υψηλών τιμών (Krause et al, 2005).

Ο δείκτης PBIAS μετράει τη μέση τάση των μοντελοποιημένων τιμών να είναι μεγαλύτερες ή μικρότερες από τις αντίστοιχες μετρήσεις, η καλύτερη τιμή είναι το μηδέν ενώ αρνητικές τιμές δείχνουν υπερεκτίμηση και θετικές υποεκτίμηση αντίστοιχα (Gupta et al, 1999).

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

Αποδεκτές τιμές είναι αυτές που ορίζονται ως -25% έως 25% (Moriassi et al, 2007). Συνεπώς έχει ανεκτίμητη αξία όσον αφορά την ποσοτικοποίηση της συστηματικής υποεκτίμησης ή υπερεκτίμησης.

Ο δείκτης RSR κανονικοποιεί τη ρίζα του μέσου του τετραγώνου του σφάλματος RMSE, διαιρώντας την με την τυπική απόκλιση συνδυάζοντας έτσι ένα δείκτη απολύτου σφάλματος με πρόσθετες πληροφορίες όπως προτείνουν οι Legates and McCabe (1999) (Moriassi et al, 2007).

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

Οι τιμές του έχουν εύρος από 0 έως 1 με το 0 να είναι η καλύτερη εκτίμηση ενώ το 0,7 είναι κατώφλι επάρκειας (Moriassi et al, 2007).

Ο δείκτης συμφωνίας d προτάθηκε από τον Wilmot το 1981 για να υπερκεράσει την έλλειψη ευαισθησίας των Nash-Sutcliffe και  $R^2$  στις διαφοροποιήσεις των παρατηρούμενων και μοντελοποιημένων μέσων όρων και τις διακυμάνσεις (Legates and McCabe, 1999), αλλά απέτυχε.

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



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

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

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

Έχει τιμές από 0 μέχρι 1 με τις τιμές >0.65 να είναι επαρκείς, και τα μειονεκτήματά του είναι η σχετικά εύκολη επίτευξη υψηλών τιμών και η μη ευαισθησία του στις χαμηλές παροχές και τη συστηματική υπερεκτίμηση και υποεκτίμηση (Krause et al, 2005). Το πλεονέκτημά του είναι ότι λόγω του εύρους τιμών από 0 έως 1 τα αποτελέσματά του μπορούν να αναγνωσθούν και να συγκριθούν καλύτερα από τον NSE (Legates and McCabe, 1999). Οι λογαριθμικοί  $\ln d$ , σχετικοί  $rd$  και τροποποιημένοι  $md$  δείκτες συμφωνίας έχουν τα ίδια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα με τους αντίστοιχους NSE συν την ευκολία επίτευξης σχετικά υψηλών τιμών (Krause et al, 2005).

Το συμπέρασμα είναι ότι κατ' αρχήν, κανένα κριτήριο δεν είναι αρκετά αντιπροσωπευτικό ώστε να χρησιμοποιηθεί μόνο του στην εκτίμηση των αποτελεσμάτων της μοντελοποίησης, συνεπώς θα γίνει συνδυασμός κριτηρίων (Krause et al, 2005; Legates and McCabe, 1999). Οι Legates and McCabe (1999) προτείνουν τη χρησιμοποίηση τουλάχιστον ενός goodness of fit δείκτη όπως οι τροποποιημένοι NSE και  $d$  ακολουθούμενοι από τουλάχιστον ένα δείκτη απόλυτου σφάλματος με συμπληρωματικές πληροφορίες. Ειδικό βάρος έχουν οι γραφικές μέθοδοι και κυρίως το υδρογράφημα, καθώς σε αυτό ο μελετητής μπορεί να εξακριβώσει κατά πόσο έχει πετύχει τις φυσικές διεργασίες όπως αυτές αποτυπώνονται, δηλαδή ακριβής απόδοση της επιφανειακής απορροής, της βασικής ροής και της αποφόρτισης των ταμειωτήρων ύδατος (Moriasi et al, 2007; Grayson and Blöschl, 2000), πλευρές οι οποίες δεν μπορούν να αποτυπωθούν με τους στατιστικούς δείκτες. Στη συνέχεια επιλέγονται οι δείκτες RSR, NSE και PBIAS καθώς είναι ευρέως διαδεδομένοι και υπάρχει η δυνατότητα σύγκρισής τους με άλλες μελέτες, ενώ ειδικά για τον PBIAS επιλέγεται και λόγω του τονισμού των συστηματικών λαθών. Τέλος επιλέγονται οι τροποποιημένες μορφές των δεικτών NSE και  $d$  λόγω της αυξημένης ευαισθησίας τους στις χαμηλές παροχές και τη συστηματική υποεκτίμηση ή υπερεκτίμηση περιλαμβάνοντας πλέον όλες τις προτάσεις των Legates and McCabe (1999).

Στον πίνακα #2 παρατίθενται οι επιλεγμένοι στατιστικοί δείκτες και οι προτεινόμενες τιμές-κριτήρια επαρκούς σύγκλισης μοντελοποιημένων τιμών και μετρήσεων για τον καθένα.

**Πίνακας 2. Στατιστικοί δείκτες και κριτήρια επιτυχούς αναπαράστασης**

| Δείκτης | Κριτήριο |
|---------|----------|
| NSE     | >0.5     |
| mNSE    | >0.5     |
| d       | >0.65    |
| md      | >0.65    |
| RSR     | <0.70    |
| PBIAS   | < 25 %   |

### **2.3.2. Ανάλυση συχνότητας πλημμυρών**

Στην ανάλυση συχνότητας πλημμυρών χρησιμοποιούνται στατιστικές κατανομές πιθανότητας με τις οποίες γίνεται προσπάθεια να προσεγγιστεί η κατανομή πιθανότητας εμφάνισης της πλημμύρας, με στόχο την εξαγωγή των μεγεθών του φαινομένου για διάφορες περιόδους επαναφοράς και τη χρησιμοποίηση αυτής της πληροφορίας για τη μείωση της αβεβαιότητας στη μελέτη υδραυλικών έργων και στη διαχείριση της λεκάνης απορροής. Δεν υπάρχει συγκεκριμένη κατανομή η οποία να μπορεί να εκτιμήσει με ακρίβεια το πλημμυρικό δυναμικό οποιασδήποτε λεκάνης απορροής συνεπώς η επιλογή της πρέπει να γίνεται αφού έχει ελεγχθεί η ακρίβεια και η αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων της (IACWD, 1982).

Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση συχνότητας πλημμύρας πρέπει να τηρούν τις εξής προδιαγραφές, να είναι στατιστικά τυχαία, ομογενή, επαρκή και ακριβή. Αυτό σημαίνει πρώτον ότι πρέπει να μην υπάρχει εξάρτηση μεταξύ των τιμών του δείγματος, π.χ. ημερήσιες τιμές παροχής που προκύπτουν από την ίδια ατμοσφαιρική διαταραχή δεν είναι στατιστικά τυχαίες. Δεύτερον να μην έχουν υπάρξει μεταβολές στην υπό μελέτη περιοχή κατά τα έτη συλλογής του δείγματος όπως υδραυλικά έργα διευθέτησης ροής και κλιματική αλλαγή. Τρίτον πρέπει το δείγμα να ανήκει στον ίδιο πληθυσμό, δηλαδή πλημμυρικές παροχές που να προέρχονται μόνο από βροχοπτώσεις ή μόνο από λιώσιμο χιονιού και όχι ανακατωμένες τιμές.

Στην περίπτωση του Γιόφυρου και του Ξηροπόταμου δεν υπάρχουν επαρκή δεδομένα παροχών για την εκπόνηση ανάλυσης συχνότητας πλημμυρών, μπορούν όμως να χρησιμοποιηθούν τα αποτελέσματα του βαθμονομημένου μοντέλου της λεκάνης απορροής του Γιόφυρου. Η IACWD, (1982) θεωρεί δυνατή την εκπόνηση ανάλυσης συχνότητας πλημμυρών χρησιμοποιώντας κλιματικά δεδομένα, προϋποθέτοντας επαρκή και ακριβή δεδομένα σε συνδυασμό με κατάλληλα βαθμονομημένο μοντέλο λεκάνης απορροής, το οποίο θα μετατρέψει τα κλιματικά δεδομένα σε παροχές. Παράλληλα, η IACWD, (1982) θεωρεί ότι η σύγκριση μεταξύ καμπύλων περιόδων επαναφοράς δύο λεκανών απορροής που ανήκουν σε ίδια υδρολογική περιοχή είναι δυνατή και την προτείνει για τον έλεγχο αποτελεσμάτων αναλύσεως συχνότητας πλημμυρών.

Καθώς δεν έχει υπάρξει ακόμα η απαραίτητη εξέλιξη στον τομέα της στατιστικής η οποία θα κάνει εφικτή την πλήρη συστηματοποίηση της εκπόνησης ανάλυσης συχνότητας πλημμυρών (WRC, 1967), στη συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποιούνται τρεις μέθοδοι οι οποίες προτείνονται ως βασικές μέθοδοι για τη διευκόλυνση της συστηματοποίησης και ελέγχου των αποτελεσμάτων. Η πρώτη είναι η λογαριθμική Pearson τύπου III (log Pearson III) που προτείνεται από την



(WRC, 1967; IACWD, 1982), η δεύτερη είναι η Ακραίων Τιμών τύπου I (EV I) ή Gumbel που χρησιμοποιείται στον Καναδά και η τρίτη είναι η Γενικευμένη Κατανομή Ακραίων Τιμών (Generalized Extreme Value, GEV) η οποία αρχίζει να γίνεται αποδεκτή (Millington, 2011). Και οι τρεις χρησιμοποιούνται και προτείνονται από πολλά κράτη (NERC, 1975). Για τον υπολογισμό των παραμέτρων των κατανομών θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος των ροπών για την log Pearson III και την Gumbel και η μέθοδος των σταθμισμένων πιθανοτικά ροπών για την GEV. Και οι δύο μέθοδοι έχουν αποδεκτά αποτελέσματα σε σύγκριση με άλλες μεθόδους όπως η μέθοδος μέγιστης πιθανοφάνειας (Maximum Likelihood), με το πρόσθετο πλεονέκτημα της υπολογιστικής απλότητας.

Ως δείκτες ελέγχου απόκλισης των κατανομών από την κανονικότητα θα χρησιμοποιηθούν τα τεστ Kolmogorov-Smirnov (KS) και Anderson-Darling (AD), το οποίο είναι μια τροποποίηση του KS καθώς και το διάγραμμα Q-Q για την οπτική απεικόνιση της απόκλισης. Και οι δύο έλεγχοι εξετάζουν το γεγονός η ελεγχόμενη αθροιστική πιθανότητα κατανομής να μην ταιριάζει με την αναμενόμενη. Θετικό αποτέλεσμα δεν σημαίνει ότι η κατανομή είναι η προσδοκώμενη, αλλά ότι δεν απορρίπτεται. Και οι δύο έλεγχοι θεωρούνται καλύτεροι από τον έλεγχο  $\chi^2$ , συνεπώς δεν θα χρησιμοποιηθεί, με τον έλεγχο AD να θεωρείται ως ο πιο δυνατός καθώς δίνει περισσότερο βάρος στην ουρά της κατανομής από ότι ο KS.

### 2.3.3. Κατανομή log Pearson III

από Rao and Hamed, (2000)

Για τον υπολογισμό της κατανομής log Pearson III θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος των ροπών. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας για τη log Pearson III δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$f(x) = \frac{1}{\alpha * x * \Gamma(\beta)} * \left[ \frac{\ln(x) - \gamma}{\alpha} \right]^{\beta-1} * e^{-\left\{ \frac{\ln(x) - \gamma}{\alpha} \right\}}$$

όπου:

$\alpha, \beta, \gamma$  οι παράμετροι της log Pearson III

$\Gamma(\beta)$  η συνάρτηση της κατανομής Γάμμα για την παράμετρο  $\beta$

Όσον αφορά την ανάλυση συχνότητας πλημμυρών οι τιμές ενδιαφέροντος είναι για την παράμετρο  $\alpha > 0$  και τη  $\beta > 1$ , αλλιώς για αρνητικές τιμές του  $\alpha$  η κατανομή είναι περιορισμένη στο άνω άκρο. Η συνάρτηση αθροιστικής πιθανότητας δίνεται από την εξίσωση:

$$F(x) = \frac{1}{\alpha * \Gamma(\beta)} * \int_0^x \frac{1}{x} * \left[ \frac{\ln(x) - \gamma}{\alpha} \right]^{\beta-1} * e^{-\left\{ \frac{\ln(x) - \gamma}{\alpha} \right\}} dx$$

Εάν γίνει η αντικατάσταση  $y = \log(x)$  η κατανομή παίρνει τη μορφή της Pearson III και οι εκτιμητές των ροπών υπολογίζονται ως εξής:

$$\mu_1' = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N}$$

$$\mu_2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}{N - 1}$$

$$\mu_3 = \frac{N * \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^3}{(N-1) * (N-2)}$$

όπου:

N το σύνολο του δείγματος

$\bar{y}$  η μέση τιμή του δείγματος

Οι εκτιμητές των παραμέτρων  $\alpha, \beta, \gamma$  της κατανομής υπολογίζονται ως εξής:

$$C_{s,y} = \frac{\mu_3}{(\sqrt{\mu_2})^3}$$

$$\hat{\beta} = \left( \frac{2}{C_{s,y}} \right)^2$$

$$\hat{\alpha} = \sqrt{\frac{\mu_2}{\hat{\beta}}}$$

$$\hat{\gamma} = \mu_1' - \sqrt{\mu_2 * \hat{\beta}}$$

όπου:

$C_{s,y}$  ο εκτιμητής του δείκτη ασυμμετρίας

Η εκτίμηση της πλημμυρικής παροχής για δεδομένη περίοδο επαναφοράς δίνεται από τον παρακάτω τύπο μετά από την αντικατάσταση  $\hat{x}_T = e^{\hat{y}_T}$ :

$$\hat{y}_T = \bar{y} + K_T * \sigma_y$$

όπου:

$\sigma_y = \sqrt{\mu_2}$  ο εκτιμητής της τυπικής απόκλισης

$K_T$  ο παράγοντας συχνότητας της κατανομής

Ο παράγοντας συχνότητας  $K_T$  δίνεται από τη σχέση:

$$K_T = \frac{\chi^2 * C_{s,y}}{4} - \frac{2}{C_{s,y}}$$

όπου:

$\chi^2$  η κατανομή  $\chi^2$

$C_{s,y}$  ο εκτιμητής του δείκτη ασυμμετρίας

Στη συγκεκριμένη μελέτη ο παράγοντας συχνότητας της log Pearson III θα υπολογιστεί με την προσέγγιση των [Wilson-Hilferty, \(1931\)](#):

$$K_T = \frac{2}{C_{s,y}} * \left[ \left\{ \frac{C_{s,y}}{6} * \left( u - \frac{C_{s,y}}{6} \right) + 1 \right\}^3 - 1 \right], 0 < C_{s,y} \leq 1$$

όπου:

u είναι η παράμετρος x της κανονικής κατανομής (0, 1) που αντιστοιχεί στην πιθανότητα μη υπέρβασης  $F = 1 - \frac{1}{T}$ , T η περίοδος επαναφοράς, και υπολογίζεται από την προσέγγιση των [Abramowitz and Stegun, \(1965\)](#):

$$u = W - \frac{C_0 + C_1 * W + C_2 + W}{1 + d_1 * W + d_2 * W^2 + d_3 * W^3} + \varepsilon(P), P < 0.5$$

όπου:

$$C_0 = 2.515517$$

$$C_1 = 0.802853$$

$$C_2 = 0.010328$$

$$d_1 = 1.432788$$

$$d_2 = 0.189269$$

$$d_3 = 0.001308$$

$$\varepsilon(P) < 4.5 * 10^{-4} \text{ το σφάλμα προσέγγισης}$$

$$W = \sqrt{-2 * \ln(P)}, P < 0.5$$

όπου:

$$P = 1 - F \quad \text{η πιθανότητα υπέρβασης}$$

Για  $P > 0.5$ , το u υπολογίζεται όπως πριν αλλά με αντίθετο πρόσημο και το P αντικαθίσταται από το 1-P.

Ο υπολογισμός του τυπικού σφάλματος της παροχής για κάθε περίοδο επαναφοράς γίνεται ως εξής:

$$s_T^2 = \left( \frac{\partial x_T}{\partial y_T} \right)^2 * \text{var}(y_T) = x_T^2 * \text{var}(y_T)$$

όπου:

$\text{var}(y_T)$  το τυπικό σφάλμα της παροχής στην κατανομή Pearson III

$$\text{var}(y_T) = \frac{\mu_2}{N} * \left[ 1 + K_T * C_{s,y} + \frac{K_T^2}{2} * \left( \frac{3 * C_{s,y}^2}{4} + 1 \right) + 3 * K_T * \frac{\partial K_T}{\partial C_{s,y}} * \left( C_{s,y} + \frac{C_{s,y}^3}{4} \right) + 3 * \left( \frac{\partial K_T}{\partial C_{s,y}} \right)^2 * \left( 2 + 3 * C_{s,y}^2 + 5 * \frac{C_{s,y}^4}{8} \right) \right]$$

$$\frac{\partial K_T}{\partial C_{s,y}} = \frac{-2}{C_{s,y}^2} * \left[ \left\{ \frac{C_{s,y}}{6} * \left( u - \frac{C_{s,y}}{6} \right) + 1 \right\}^3 - 1 \right] + \frac{2}{C_{s,y}} * \left[ 3 * \left\{ \frac{C_{s,y}}{6} * \left( u - \frac{C_{s,y}}{6} \right) + 1 \right\}^2 * \left\{ \frac{u}{6} - \frac{2 * C_{s,y}}{36} \right\} \right]$$

Ο υπολογισμός του διαστήματος εμπιστοσύνης 95% γίνεται θεωρώντας ότι η κατανομή του  $x_T$  είναι ασυμπτωτικά κανονική ( $x_T, s_T^2$ ) και συνεπώς το διάστημα εμπιστοσύνης (1-α) δίνεται ως εξής:

$$x_T + z_{\alpha/2} * s_T$$

όπου:

$z_{\alpha/2}$  είναι το  $x$  της κανονικής κατανομής (0,1) και για διάστημα εμπιστοσύνης 95% είναι  $z_{\alpha/2} = 1.96$

### 2.3.4. Κατανομή Gumbel (EV I)

από Rao and Hamed, (2000)

Η κατανομή Gumbel ανήκει στην κατηγορία των κατανομών Ακραίων Τιμών και αποτελεί μία από τις κατανομές που ενυπάρχουν στην Γενικευμένη κατανομή Ακραίων Τιμών. Για τον υπολογισμό της κατανομής Gumbel θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος των ροπών. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας για την Gumbel δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma} * \exp \left[ - \left( \frac{x - \mu}{\sigma} \right) - e^{-\left\{ \frac{x - \mu}{\sigma} \right\}} \right]$$

όπου:

$\mu$  συνεχής παράμετρος θέσης

$\sigma$  συνεχής παράμετρος τάξης

Η συνάρτηση αθροιστικής πιθανότητας δίνεται από την εξίσωση:

$$F(x) = \exp \left[ - e^{-\left\{ \frac{x - \mu}{\sigma} \right\}} \right]$$

Οι εκτιμητές των ροπών υπολογίζονται ως εξής:

$$\mu'_1 = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}$$

$$\mu_2 = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}$$

όπου:

$N$  το σύνολο του δείγματος

$\bar{x}$  η μέση τιμή του δείγματος

Οι εκτιμητές των παραμέτρων  $\mu$ ,  $\sigma$  της κατανομής υπολογίζονται ως εξής:

$$\hat{\mu} = \mu'_1 - 0.45005 * \sqrt{\mu_2}$$

$$\hat{\sigma} = 0.7797 * \sqrt{\mu_2}$$

Η εκτίμηση της πλημμυρικής παροχής για δεδομένη περίοδο επαναφοράς δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\hat{x}_T = \hat{\mu} - \hat{\sigma} * \ln(-\ln(F))$$

όπου:

$$F = 1 - \frac{1}{T} \quad \text{η πιθανότητα μη υπέρβασης}$$

Ο παράγοντας συχνότητας  $K_T$  δίνεται από τη σχέση:

$$K_T = -0.45 - 0.7797 \ln(-\ln F)$$

Ο υπολογισμός του τυπικού σφάλματος της παροχής για κάθε περίοδο επαναφοράς γίνεται ως εξής:

$$s_T^2 = \frac{\sigma^2}{N} * (1.15894 + 0.19187 * Y + 1.1 * Y^2)$$

$$Y = -\ln(-\ln F)$$

Ο υπολογισμός του διαστήματος εμπιστοσύνης 95% γίνεται θεωρώντας ότι η κατανομή του  $x_T$  είναι ασυμπτωτικά κανονική ( $x_T, s_T^2$ ) και συνεπώς το διάστημα εμπιστοσύνης (1- $\alpha$ ) δίνεται ως εξής:

$$x_T + z_{\alpha/2} * s_T$$

όπου:

$z_{\alpha/2}$  είναι το  $x$  της κανονικής κατανομής (0,1) και για διάστημα εμπιστοσύνης 95% είναι  $z_{\alpha/2} = 1.96$

### 2.3.5. Γενικευμένη Κατανομή Ακραίων Τιμών (GEV)

από Rao and Hamed, (2000)

Για τον υπολογισμό της κατανομής GEV θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος των σταθμισμένων πιθανοτικά ροπών (Probability Weighted Moments, PWM) όπως δίνεται από τους Hosking et al, (1985). Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας για την GEV δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma} * \left[ 1 - k * \frac{x - \mu}{\sigma} \right]^{1/k-1} * e^{-\left[ 1 - k * \frac{x - \mu}{\sigma} \right]^{1/k}}$$

όπου:

- $\mu$  συνεχής παράμετρος θέσης
- $\sigma$  συνεχής παράμετρος τάξης
- $k$  συνεχής παράμετρος σχήματος

Ανάλογα με την τιμή της παραμέτρου σχήματος  $k$ , όταν  $k=0$  η GEV παίρνει την μορφή της EV 1, Gumbel, όταν η  $k$  είναι θετική η GEV παίρνει τη μορφή της EV 3, ανεστραμμένη Weibull και είναι περιορισμένη στο άνω άκρο, τέλος όταν η  $k$  είναι αρνητική παίρνει τη μορφή της EV 2, Frechet και είναι η περίπτωση που ενδιαφέρει την ανάλυση συχνότητας πλημμύρων. Η συνάρτηση αθροιστικής πιθανότητας δίνεται από την εξίσωση:

$$F(x) = e^{-\left[ 1 - k * \frac{x - \mu}{\sigma} \right]^{1/k}}$$

Οι εκτιμητές των ροπών υπολογίζονται ως εξής:

$$\mu_1' = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N}$$

$$\mu_2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}{N-1}$$

$$\mu_3 = \frac{N * \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^3}{(N-1) * (N-2)}$$

όπου:

N το σύνολο του δείγματος

$\bar{y}$  η μέση τιμή του δείγματος

Από τις ροπές υπολογίζονται οι L-ροπές:

$$\lambda_1 = \mu_1''$$

$$\lambda_2 = 2 * \mu_2 - \mu_1''$$

$$\lambda_3 = 6 * \mu_3 - 6 * \mu_2 + \mu_1''$$

Στη συνέχεια υπολογίζονται οι εκτιμητές της διασποράς L-C<sub>v</sub> και ασυμετρίας L-C<sub>s</sub>:

$$LC_v = \tau = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$$

$$LC_s = \tau_3 = \frac{\lambda_3}{\lambda_2}$$

Οι εκτιμητές των παραμέτρων μ, σ, k της κατανομής υπολογίζονται ως εξής:

$$\hat{k} = 7.8590 * c + 2.9554 * c^2$$

όπου:

$$c = \frac{2}{3 + \tau_3} - \frac{\ln 2}{\ln 3}$$

$$\hat{\mu} = \lambda_1 - \hat{\sigma} * \frac{1 - \Gamma(1+k)}{k}$$

$$\hat{\sigma} = \frac{\lambda_2 * \hat{k}}{(1 - 2^{-k}) * \Gamma(1+k)}$$

όπου:

Γ() η συνάρτηση Γάμμα για τη δεδομένη τιμή

Η εκτίμηση της πλημμυρικής παροχής για δεδομένη περίοδο επαναφοράς δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\hat{x}_T = \hat{\mu} + \frac{\hat{\sigma}}{\hat{k}} * [1 - (-\ln F)^k]$$

όπου:

$F = 1 - \frac{1}{T}$  η πιθανότητα μη υπέρβασης

Ο παράγοντας συχνότητας  $K_T$  δίνεται από τη σχέση:

$$K_T = \frac{\hat{k} * \Gamma(1 + \hat{k}) - (-\log F)^{\hat{k}}}{|\hat{k}| * \sqrt{\Gamma(1 + 2 * \hat{k}) - \Gamma^2(1 + \hat{k})}}$$

όπου:

$\Gamma()$  η συνάρτηση Γάμμα για τη δεδομένη τιμή

Ο υπολογισμός του τυπικού σφάλματος της παροχής για κάθε περίοδο επαναφοράς γίνεται ως εξής:

$$s^2_{\tau} = \left( \frac{\partial x_T}{\partial \mu} \right)^2 * \text{var} \mu + \left( \frac{\partial x_T}{\partial \sigma} \right)^2 * \text{var} \sigma + \left( \frac{\partial x_T}{\partial k} \right)^2 * \text{var} k + 2 * \frac{\partial x_T}{\partial \mu} * \frac{\partial x_T}{\partial \sigma} * \text{cov}(\mu, \sigma) + 2 * \frac{\partial x_T}{\partial \mu} * \frac{\partial x_T}{\partial k} * \text{cov}(\mu, k) + 2 * \frac{\partial x_T}{\partial \sigma} * \frac{\partial x_T}{\partial k} * \text{cov}(\sigma, k)$$

όπου:

$$\frac{\partial x_T}{\partial \mu} = 1$$

$$\frac{\partial x_T}{\partial \sigma} = \frac{1}{k} * [1 - (-\ln F)^k]$$

$$\frac{\partial x_T}{\partial \sigma} = -\frac{\alpha}{k^2} * [1 - (-\ln F)^k] - \frac{\alpha}{k} * [(-\ln F)^k * \ln\{-\ln F\}]$$

$$\begin{bmatrix} \text{var} \mu & \text{cov}(\sigma, \mu) & \text{cov}(\mu, k) \\ \text{cov}(\sigma, \mu) & \text{var} \sigma & \text{cov}(\sigma, k) \\ \text{cov}(\mu, k) & \text{cov}(\sigma, k) & \text{var} k \end{bmatrix} = \frac{1}{N} * \begin{bmatrix} \alpha^2 * w_{11} & \alpha^2 * w_{12} & \alpha * w_{13} \\ \alpha^2 * w_{12} & \alpha^2 * w_{22} & \alpha * w_{23} \\ \alpha * w_{13} & \alpha * w_{23} & w_{33} \end{bmatrix}$$

όπου οι τιμές των  $w_{ij}$  δίνονται στον πίνακα #3:

**Πίνακας 3.** Τιμές των παραμέτρων  $w_{ij}$  για τον υπολογισμό του τυπικού σφάλματος της παροχής σύμφωνα με τη μέθοδο PWM κατανομής GEV, (Hosking et al, 1985)

| $k$  | $w_{11}$ | $w_{12}$ | $w_{13}$ | $w_{22}$ | $w_{23}$ | $w_{33}$ |
|------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| -0.4 | 1.6637   | 1.3355   | 1.1405   | 1.8461   | 1.1628   | 2.9092   |
| -0.3 | 1.4153   | 0.8912   | 0.5640   | 1.2574   | 0.4442   | 1.4090   |
| -0.2 | 1.3322   | 0.6727   | 0.3926   | 1.0013   | 0.2697   | 0.9139   |
| -0.1 | 1.2915   | 0.5104   | 0.3245   | 0.8440   | 0.2240   | 0.6815   |
| 0.0  | 1.2686   | 0.3704   | 0.2992   | 0.7390   | 0.2247   | 0.5633   |
| 0.1  | 1.2551   | 0.2411   | 0.2966   | 0.6708   | 0.2447   | 0.5103   |
| 0.2  | 1.2474   | 0.1177   | 0.3081   | 0.6330   | 0.2728   | 0.5021   |
| 0.3  | 1.2438   | -0.0023  | 0.3297   | 0.6223   | 0.3033   | 0.5294   |
| 0.4  | 1.2433   | -0.1205  | 0.3592   | 0.6368   | 0.3329   | 0.5880   |

Ο υπολογισμός του διαστήματος εμπιστοσύνης 95% γίνεται θεωρώντας ότι η κατανομή του  $x_T$  είναι ασυμπτωτικά κανονική ( $x_T, s_T^2$ ) και συνεπώς το διάστημα εμπιστοσύνης  $(1-\alpha)$  δίνεται ως εξής:

$$x_T + z_{\alpha/2} * s_T$$

όπου:

$z_{\alpha/2}$  είναι το  $x$  της κανονικής κατανομής (0,1) και για διάστημα εμπιστοσύνης 95% είναι  $z_{\alpha/2} = 1.96$

### 2.3.6. Έλεγχος στατιστικών κατανομών

Ο έλεγχος Kolmogorov-Smirnov αφού οι τιμές του δείγματος έχουν συνταχθεί σε αύξουσα σειρά δίνεται ως εξής:

$$D_N = \max |F_N(x_i) - F_0(x_i)|$$

όπου:

$F_N(x_i)$  η θεωρητική αθροιστική πιθανότητα της εκάστοτε τιμής

$$F_0(x_i) = \frac{1+i}{N}$$

όπου:

$N$  ο αριθμός του δείγματος

$i=1, \dots, N$  ο αύξων αριθμός της δεδομένης τιμής αφού οι τιμές έχουν συνταχθεί σε αύξουσα σειρά

Για το επίπεδο σημαντικότητας 95% η τιμή που έχει η δοκιμαζόμενη κατανομή ώστε να μην απορριφθεί ως αποκλίνουσα από την κανονικότητα πρέπει να είναι μικρότερη από την οριακή τιμή 0.186.

Ο έλεγχος Anderson-Darling αφού οι τιμές του δείγματος έχουν συνταχθεί σε αύξουσα σειρά δίνεται από τον εξής τύπο:

$$A^2 = -N - \frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N [(2*i-1) * \{\ln(F_N(x_i)) + \ln(1 - F_N(x_{N-i+1}))\}]$$

όπου:

$F_N(x_i)$  η θεωρητική αθροιστική πιθανότητα της εκάστοτε τιμής

$F_N(x_{N-i+1})$  η θεωρητική αθροιστική πιθανότητα της εκάστοτε αντίστροφης τιμής

$N$  ο αριθμός του δείγματος

$i=1, \dots, N$  ο αύξων αριθμός της δεδομένης τιμής αφού οι τιμές έχουν συνταχθεί σε αύξουσα σειρά

Για τον έλεγχο Anderson-Darling η οριακή τιμή από την οποία πρέπει να είναι μικρότερη η τιμή της ελεγχόμενης κατανομής για να μην απορριφθεί λόγω μη κανονικότητας διαφέρει από κατανομή σε κατανομή. Στον πίνακα #4 παρατίθενται οι οριακές τιμές ενδιαφέροντος για τις κατανομές Γάμμα, στην οποία ανήκει η log Pearson III, Gumbel και GEV για την περίπτωση στην οποία όλοι οι παράμετροι είναι άγνωστοι και έχουν χρησιμοποιηθεί εκτιμητές.



**Πίνακας 4. Οριακές τιμές για διάφορες κατανομές, αγνώστων παραμέτρων, του κριτηρίου Anderson-Darling  $A^2$  για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%, (D' Agostino and Stephens, 1986)**

|                                                                    | $A^2, (\alpha=0.05\%)$ |
|--------------------------------------------------------------------|------------------------|
| <b>Γάμμα (log Pearson III)<br/>(<math>0&lt;\alpha&lt;1</math>)</b> | 0.786                  |
| <b>Gumbel</b>                                                      | 0.752                  |
| <b>GEV</b>                                                         | 0.752                  |

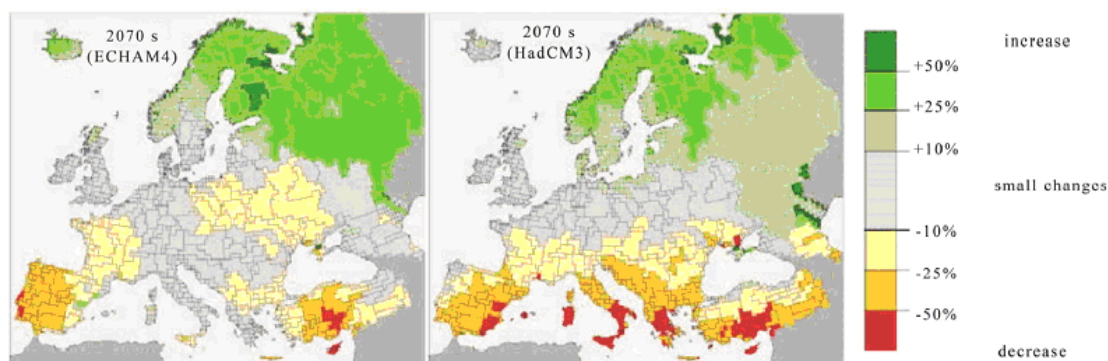
Το διάγραμμα Q-Q κατασκευάζεται τοποθετώντας στον άξονα x τις τιμές  $F_0(x_i) = \frac{1+i}{N}$  και στον άξονα y τις τιμές  $F_N(x_i)$ , οι οποίες υπολογίζονται όπως στην περίπτωση του ελέγχου Kolmogorov-Smirnov. Απόκλιση από την ευθεία με κλίση 1 δηλώνει απόκλιση από την κανονικότητα και συνεπώς η θεωρητική στατιστική κατανομή δεν αντιπροσωπεύει το συγκεκριμένο φαινόμενο.

## 2.4. Κλιματική Αλλαγή

Η κλιματική αλλαγή όπως ορίζεται από την IPCC, (2007) είναι η οποιαδήποτε αλλαγή του κλίματος σε βάθος χρόνου που μπορεί να είναι είτε αποτέλεσμα φυσικής αναδρομικότητας είτε αποτέλεσμα της ανθρώπινης δραστηριότητας. Από την IPCC, (2007) ορίζεται ως ευαισθησία (vulnerability) ο βαθμός στον οποίο ένα σύστημα είναι ευάλωτο και αδυνατεί να ανταπεξέλθει σε δυσχερείς επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής και είναι συνάρτηση του χαρακτήρα, του μεγέθους, της έντασης και της διακύμανσης (variation) της κλιματικής αλλαγής στην οποία εκτίθεται αλλά και της ευαισθησίας και της προσαρμοστικότητας αυτού του συστήματος προς τις αλλαγές.

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

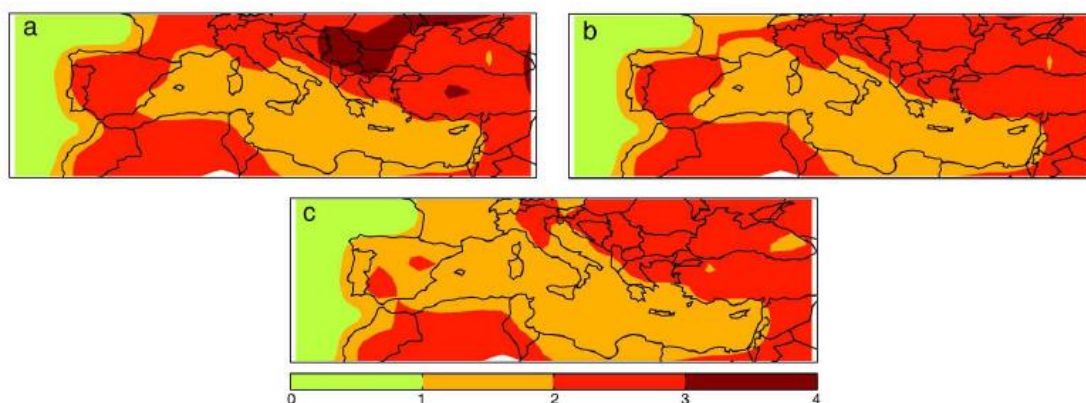
Για την Ευρώπη είναι γενικά αποδεκτό ότι βρίσκεται ήδη υπό την επήρεια κλιματικής αλλαγής με τις επιπτώσεις στους υδατικούς πόρους να είναι εμφανείς, όπως αυξημένη ευαισθησία σε πλημμύρες και ξηρασίες, αυξημένος κίνδυνος των επιφανειακών υδατικών οικοσυστημάτων, υπερεκμετάλλευση του υπόγειου υδροφόρου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



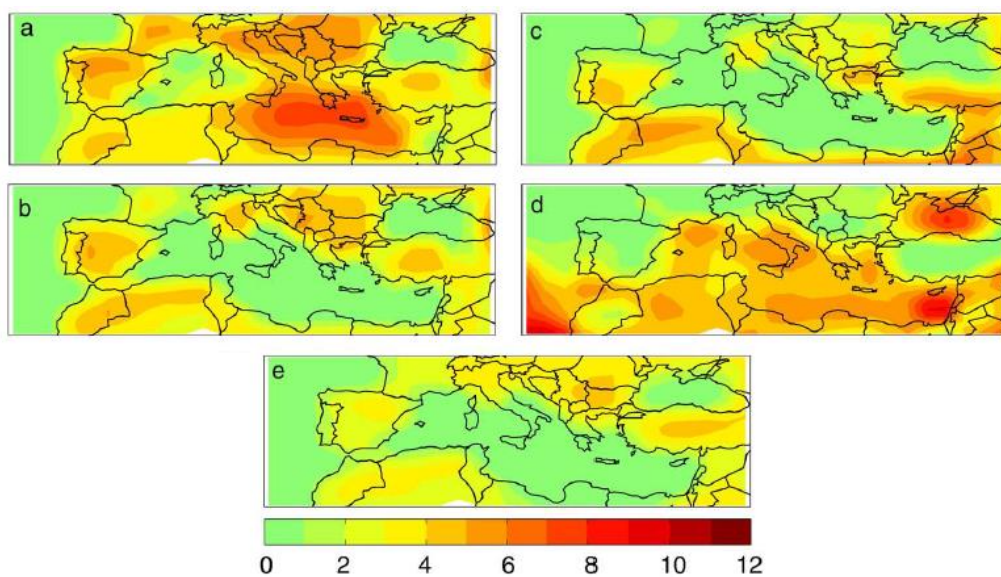
Εικόνα 5. Αλλαγή στη μέση ετήσια ποταμική απορροή στις Ευρωπαϊκές λεκάνες απορροής μεταξύ του 2000 και του 2070 με βάση τα κλιματικά μοντέλα ECHAM4 και HadCM3 (Henrichs and Alcamo, 2001)

Ειδικότερα η περιοχή της Μεσογείου χαρακτηρίζεται από αυξημένη ευαισθησία στην κλιματική αλλαγή και συγκεκριμένα ως "hot spot" κινδύνου για τον επόμενο αιώνα (Kundzewicz et al, 2008; Tsanis et al, 2011).

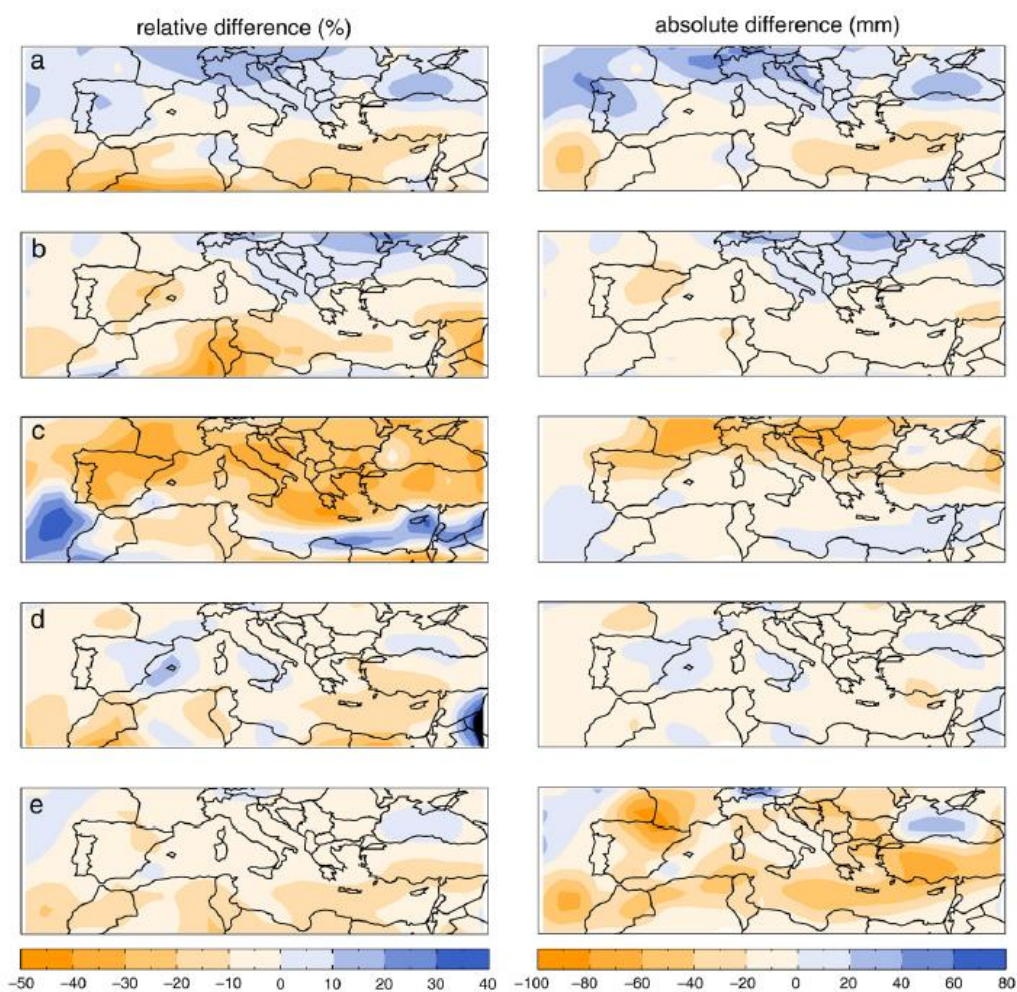
Μέχρι το 2060 αναμένεται αύξηση της μέσης θερμοκρασίας κατά 2°C, ιδιαίτερα τη χειμωνιάτικη περίοδο, αύξηση των ξηρών ημερών και των επεισοδίων καύσωνα, μετατόπιση του καλοκαιριού και μείωση των βροχοπτώσεων κατά 10-20% ιδιαίτερα την καλοκαιρινή περίοδο στη λεκάνη της Μεσογείου (Giannakopoulos et al,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



Εικόνα 6. Διαφορά στη, (a) μέγιστη, (b) μέση και (c) ελάχιστη, μέση ετήσια θερμοκρασία μεταξύ 1961-1990 και 2031-2060, κλιματικό μοντέλο HadCM3 A2/B2 (Giannakopoulos et al, 2009)

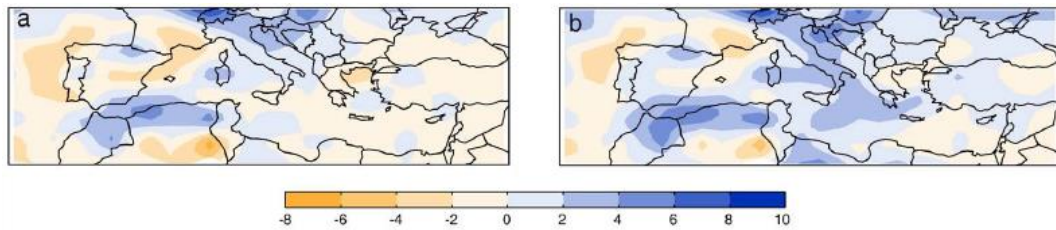


Εικόνα 7. Αύξηση στις, (a) καλοκαιρινές μέρες, (b) θερμές μέρες, (c) μέρες καύσωνα, (d) τροπικές νύχτες και (e) μείωση στις νύχτες πάγου μεταξύ 1961-1990 και 2031-2060, κλιματικό μοντέλο HadCM3 A2/B2 (Giannakopoulos et al, 2009)



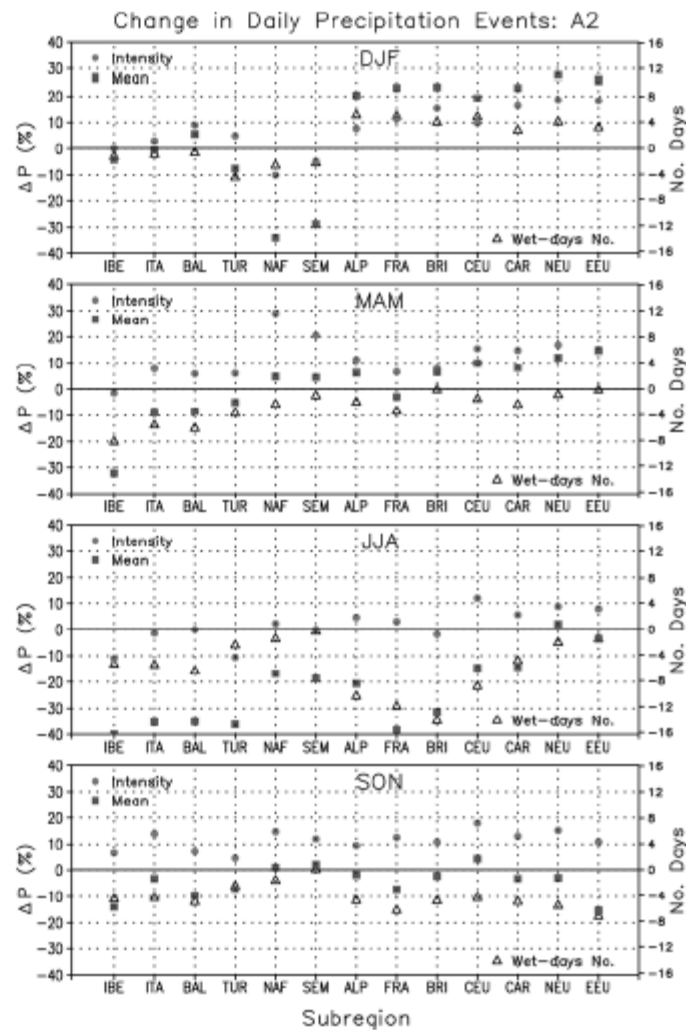
Εικόνα 8. Αλλαγή, ποσοστιαία αριστερά και απόλυτη δεξιά, στην ετήσια, (a) χειμερινή, (b) ανοιξιάτικη, (c) καλοκαιρινή, (d) φθινοπωρινή και (e) όλου του χρόνου βροχόπτωση μεταξύ 1961-1990 και 2031-2060, κλιματικό μοντέλο HadCM3 A2/B2 (Giannakopoulos et al, 2009)





Εικόνα 9. Μέση μεταφορά, (α) της αρχής και (β) του τέλους της μακρύτερης περιόδου ξηρασίας μεταξύ 1961-1990 και 2031-2060, κλιματικό μοντέλο HadCM3 A2/B2 (Giannakopoulos et al, 2009)

Οι Giorgi et al, (2004) για την λεκάνη της Μεσογείου και πιο ειδικά για την χερσόνησο της Βαλκανικής αναφέρουν ότι η αύξηση της θερμοκρασίας κατά την περίοδο 2070-2100 θα είναι μεγαλύτερη το καλοκαίρι από ότι το χειμώνα ενώ οι βροχοπτώσεις θα είναι ελαφρά αυξημένες το χειμώνα και μειωμένες το καλοκαίρι με την ετήσια τιμή να είναι μειωμένη. Οι Giorgi et al, (2004) τονίζουν επίσης ότι η ένταση των βροχοπτώσεων θα αυξηθεί, γεγονός το οποίο έχει αντίκτυπο στη συχνότητα πλημμυρών, τη διήθηση στο έδαφος και τη διάβρωση κατά τη χειμερινή περίοδο.



Εικόνα 10. Διαφορά στη μέση βροχόπτωση, μέση ένταση βροχόπτωσης και στις υγρές μέρες για το A2 σενάριο RegCM, μεταξύ 1961-1990 και 2071-2100 (Giorgi et al, 2004)

Στην Εικόνα #10, η επεξήγηση των συμβόλων είναι ως εξής:

DJF Δεκέμβριος-Ιανουάριος-Φεβρουάριος

MAM Μάρτιος-Απρίλιος-Μάιος

JJA Ιούνιος-Ιούλιος-Αύγουστος

SON Σεπτέμβριος-Οκτώβριος-Νοέμβριος

και η υποπεριοχή (subregion) ενδιαφέροντος είναι η

BAL Βαλκανική

Και στην Ελλάδα παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας και της εξατμισοδιαπνοής με παράλληλη μείωση της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης και απορροής και επιμήκυνσης της καλοκαιρινής περιόδου (Mimikou and Baltas, 2013). Οι αλλαγές αυτές είναι σημαντικές καθώς μικρές αλλαγές στην ετήσια βροχόπτωση μπορούν να προκαλέσουν δραματική αύξηση της επικινδυνότητας της στάθμης των ταμιευτήρων ύδατος ενώ παράλληλα η προσαρμοστική ικανότητα των ταμιευτήρων στην Ελλάδα δεν είναι υψηλή συνεπώς αναμένεται να υπάρξει πρόβλημα οικονομικό και οικολογικό (Mimikou and Baltas, 2013). Αποτέλεσμα της μείωσης των υδατικών ταμιευτήρων είναι και η μείωση της ποτάμιας απορροής, γεγονός που επιδρά ιδιαίτερα έντονα στα οικοσυστήματα των προσωρινών ποταμών των οποίων στην Ελλάδα η επιφάνεια αποτελεί το 42.5% της συνολικής της επιφάνειας (Tzoraki et al, 2007) με τον αριθμό τους να αναμένεται να αυξηθεί στο μέλλον λόγω της κλιματικής αλλαγής και της λειψυδρίας (Moraetis, 2010).

Για την Κρήτη οι Giannakopoulos et al, (2009) αναφέρουν ότι ο αντίκτυπος της κλιματικής αλλαγής σε σχέση με τον αντίκτυπο γενικά στη Μεσόγειο αναμένεται να είναι ελαφρά μειωμένος καθώς είναι παράλια περιοχή. Παρόλα αυτά οι Koutroulis et al, (2011) αναφέρουν την περίοδο 2010-2100 αναμένεται μείωση των βροχοπτώσεων και αύξηση των περιόδων ήπιας ξηρασίας οι οποίες θα προκαλέσουν αρνητικές επιπτώσεις στα οικοσυστήματα και τη διαθεσιμότητα νερού. Οι Tsanis et al, (2011) προβλέπουν μείωση των βροχοπτώσεων έως και 30% κατά τη θερινή περίοδο και αύξησή τους σε όγκο και ένταση κατά τη χειμερινή περίοδο έως το 2100. Οι Tsanis et al, (2011) αναφέρουν επίσης αύξηση της συχνότητας και έντασης των ακραίων φαινομένων, όπως πλημμύρες και ξηρασίες, και μείωση της διήθησης στο έδαφος και της ποταμικής απορροής με παράλληλη σημαντική μείωση της διαθεσιμότητας ύδατος.

Όλα τα παραπάνω δημιουργούν μια αβεβαιότητα ως προς τις μελλοντικές απαιτήσεις του νησιού σε νερό και μια κατάσταση αυξημένης ανησυχίας για τη μελλοντική δυνατότητα κάλυψης αυτών των αναγκών. Πιο συγκεκριμένα για την Κρήτη, αυξημένο ενδιαφέρον πρέπει να έχει ο υδροφόρος ορίζοντας καθώς καλύπτει σχεδόν το σύνολο των απαιτήσεων του νησιού (Chartzoulakis et al, 2001; Vardavas et al, 2005), και παράλληλα κινδυνεύει ήδη με υφαλμύριση σε ορισμένες περιοχές, και συνεπώς η ετήσια φόρτιση και άντλησή του πρέπει να γίνει αντικείμενο μελέτης. Σε αυτή τη σκοπιά η εργασία συμβάλλει, σε επίπεδο λεκάνης απορροής Γιόφυρου, μέσω της μοντελοποίησης της υδρολογίας της, σημαντικό κομμάτι το οποίο είναι η αλληλεπίδραση με τον υδροφόρο ορίζοντα.

### 3. Περιγραφή της λεκάνης απορροής του Γιόφυρου και του Ξηροπόταμου

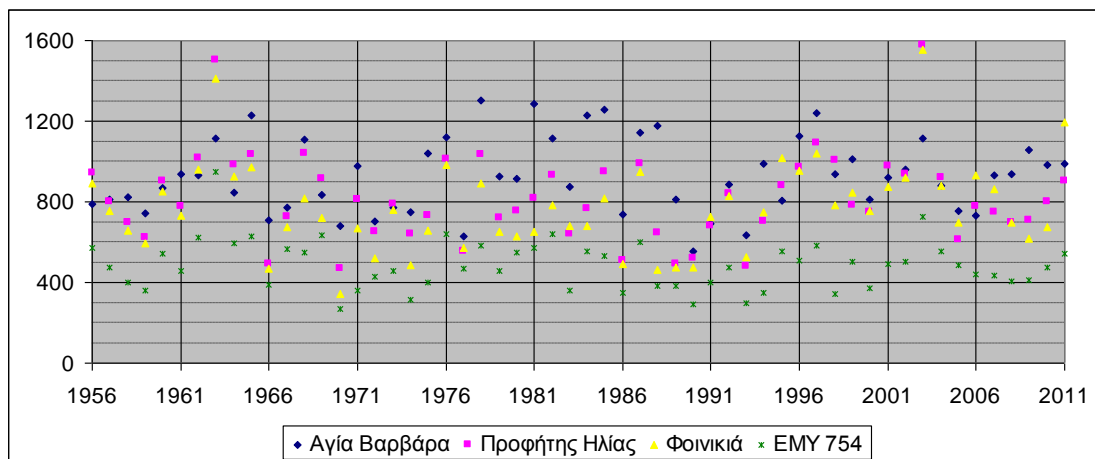
Στην παρούσα εργασία μελετάται η υδρολογία της λεκάνης απορροής του Γιόφυρου με στόχο τη μοντελοποίησή της και στη συνέχεια, την εφαρμογή του βαθμονομημένου μοντέλου στην όμορη λεκάνη του Ξηροπόταμου η οποία έχει παρόμοια χαρακτηριστικά και καθόλου μετρήσεις ώστε να μπορεί να εξεταστεί αυτόνομα. Αυτή η προσπάθεια γίνεται ως πρώτη εκτίμηση της συμπεριφοράς του Ξηροπόταμου και βασίζεται στη φυσική σχέση δεδομένων - αποτελεσμάτων του μοντέλου SWAT. Συνεπώς, καθώς οι δύο λεκάνες μοντελοποιήθηκαν παράλληλα, (τονίζεται ότι κατά τη βαθμονόμηση δεν λήφθηκαν υπόψη τα αποτελέσματα του μοντέλου για τον Ξηροπόταμο) γίνεται περιγραφή και των δύο λεκανών απορροής για καλύτερη σύγκριση μεταξύ τους.

#### 3.1. Κλίμα-Μετεωρολογικά στοιχεία

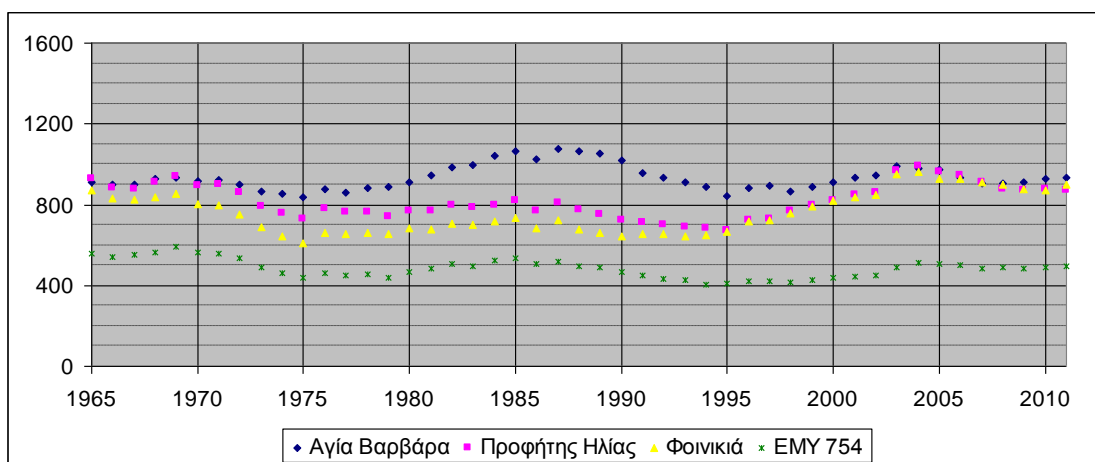
Το κλίμα της Κρήτης θεωρείται εύκρατο Μεσογειακό με υγρούς και σχετικά κρύους χειμώνες και ξηρά και θερμά καλοκαίρια. Η μέση βροχόπτωση μειώνεται από τα δυτικά στα ανατολικά ενώ κυμαίνεται από 300-700mm κοντά στις ακτές, σε 700-1000mm στην ενδοχώρα έως και 2000mm στα ορεινά του νησιού. Ο χειμώνας αρχίζει το Νοέμβριο, κατά τον οποίο ο καιρός αποσταθεροποιείται λόγω συχνών αλλαγών από χαμηλά σε υψηλά βαρομετρικά. Η άνοιξη είναι σχετικά σύντομη εξαιτίας ψυχρών μετώπων που επηρεάζουν την περιοχή κατά το Μάρτιο ενώ ο Μάιος είναι σχετικά θερμός λόγω της εμφάνισης νότιων ανέμων και της εξασθένησης των χαμηλών βαρομετρικών. Οι βόρειοι άνεμοι είναι οι επικρατέστεροι στο νησί. Κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού οι βόρειοι άνεμοι δημιουργούν ιδιαίτερα ξηρές συνθήκες, επηρεαζόμενες από την εξασθένηση των χαμηλών βαρομετρικών στην Ανατολική Μεσόγειο και διακόπτονται μόνο από τοπικές καταιγίδες τροπικού τύπου. Τα καλοκαιρινά κύματα καύσωνα διαρκούν αρκετά, επηρεαζόμενα από νότιους ανέμους που πνέουν από την Αφρική. Η εποχιακή διακύμανση της θερμοκρασίας είναι μεγάλη καθώς κατά το χειμώνα η θερμοκρασία στα χαμηλά κυμαίνεται λίγο πιο πάνω από τους 0°C ενώ το καλοκαίρι μπορεί να ξεπεράσει και τους 40°C. (Chartzoulakis et al, 2001)

Στην Κρήτη η χωρική διακύμανση των βροχοπτώσεων είναι ορεογραφικά εξαρτώμενη (Naoum and Tsanis, 2003). Η χρονιά 1989-1990 υπήρξε η πιο ξηρή για την περίοδο 1967-1997 ενώ η μείωση των βροχοπτώσεων κατά την ίδια περίοδο αν και μικρής αρνητικής τάσης, ήταν πιο έντονη σε μεγαλύτερα υψόμετρα (Naoum and Tsanis, 2003). Πιο γενικά, η περίοδος 1987-1994 χαρακτηρίζεται ως επιτευνόμενης ξηρασίας ενώ άλλοι περίοδοι ξηρασίας ήταν το 1973-74, 1976-77, 1985-86 και το 1999-2000 (Koutroulis et al, 2010).

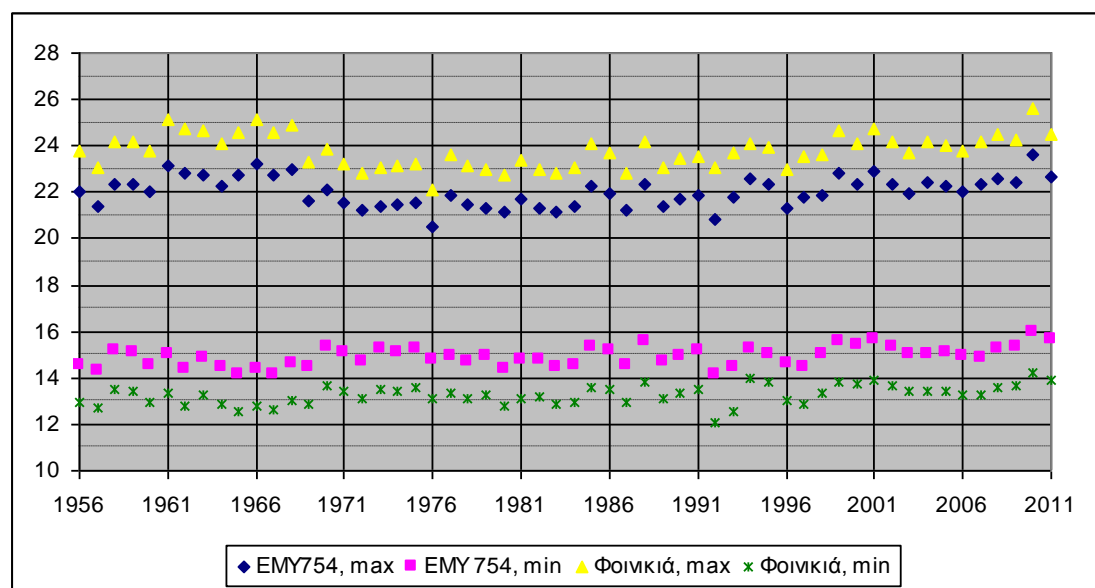
Για τη μοντελοποίηση της υδρολογίας της λεκάνης απορροής του Γιόφυρου χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα των μετεωρολογικών σταθμών Αγίας Βαρβάρας, Προφήτη Ηλία, Φοινικιάς και ΕΜΥ 754 Ηρακλείου, οι οποίοι έχουν αντίστοιχα υψόμετρο 620m, 272m, 79m και 94m και θέση όπως φαίνεται στον επόμενο χάρτη.



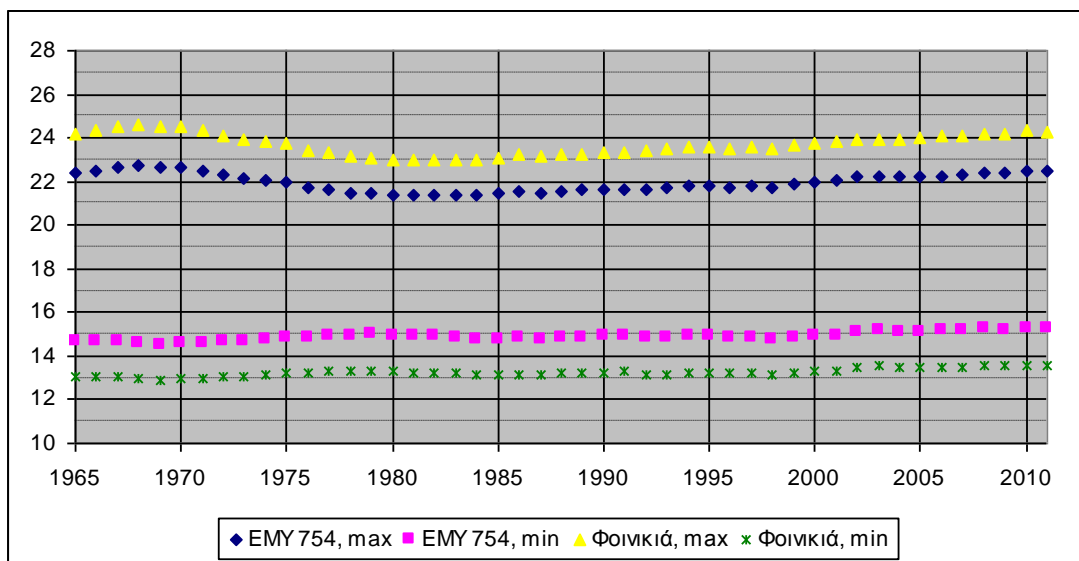
**Εικόνα 11. Ετήσιες βροχομετρικές μετρήσεις, υδρολογικών ετών 1956-2011**



**Εικόνα 12. Κινητοί μέσοι όροι δεκαετίας ετήσιων βροχομετρικών μετρήσεων, υδρολογικών ετών 1956-2011**



**Εικόνα 13. Ετήσια θερμοκρασιακά μέγιστα και ελάχιστα, υδρολογικών ετών 1956-2011**



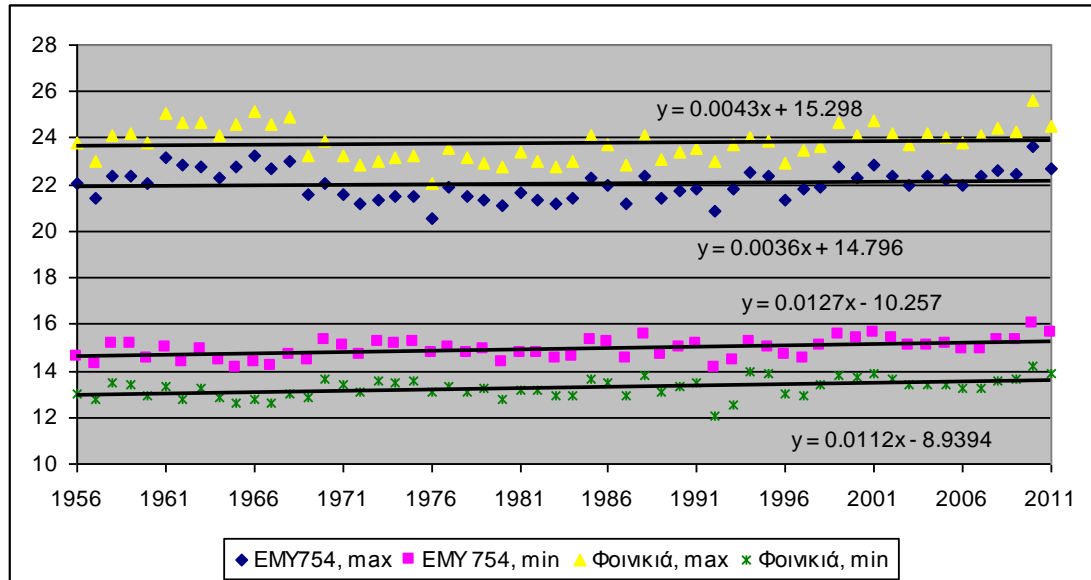
**Εικόνα 14. Κινητοί μέσοι όροι δεκαετίας ετήσιων θερμοκρασιακών μεγίστων και ελαχίστων, υδρολογικών ετών 1956-2011**

Αναλύοντας τις βροχομετρικές μετρήσεις των σταθμών Αγίας Βαρβάρας, Προφήτη Ηλία, Φοινικιάς και της EMY 754 Ηρακλείου από το 1956 μέχρι το 2011 παρατηρούμε ότι όσο πιο νότιοι και συνεπώς σε μεγαλύτερο υψόμετρο βρίσκονται οι μετεωρολογικοί σταθμοί, οι βροχοπτώσεις αυξάνονται πιθανώς λόγω ορεογραφικού φαινομένου. Επικεντρώνοντας στους κινητούς μέσους όρους δεκαετίας παρατηρείται μειούμενη τάση όσον αφορά τους σταθμούς Προφήτη Ηλία και Φοινικιάς με παράλληλη μεγάλη αύξηση της βροχόπτωσης στο σταθμό της Αγίας Βαρβάρας το διάστημα 1970-1995 ενώ μέχρι το 2005 τα επίπεδα βροχόπτωσης έχουν φτάσει επανέλθει σε αυτά του πριν του 1970. Ειδικότερα την περίοδο 1980-1985 παρατηρείται μεγάλη αύξηση της βροχόπτωσης στο σταθμό της Αγίας Βαρβάρας, γεγονός που θα μας απασχολήσει στο στάδιο της βαθμονόμησης καθώς. Αντίθετα όσον αφορά το σταθμό της EMY 754 Ηρακλείου ο οποίος βρίσκεται κοντά στη θάλασσα, η βροχόπτωση ακολουθεί την εναλλαγή υγρών-ξηρών περιόδων αλλά έχει εμφανώς μειούμενη τάση τα τελευταία 50 χρόνια.

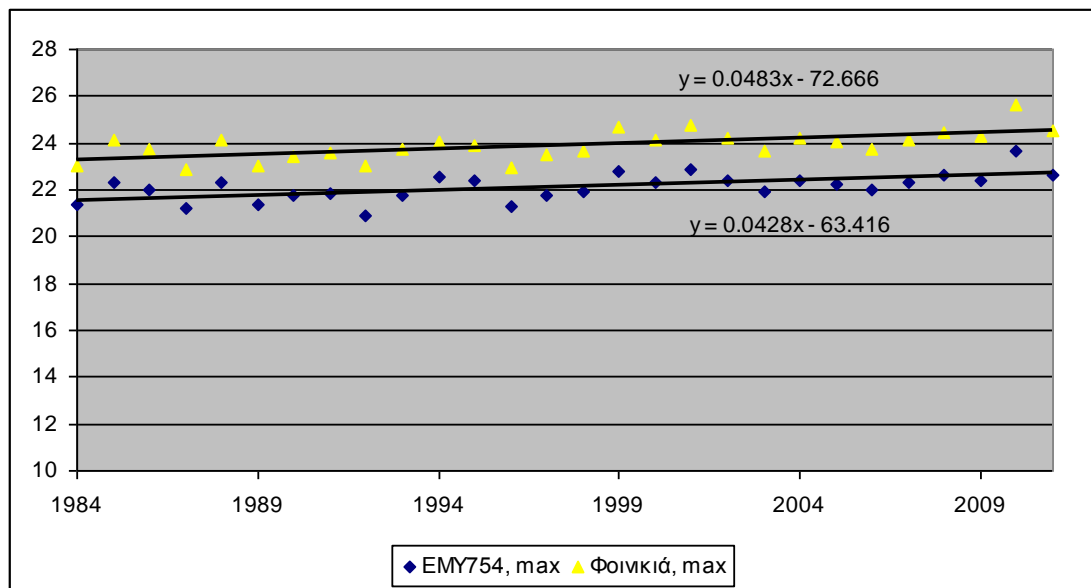
Αναλύοντας τις μετρήσεις θερμοκρασιακών μεγίστων και ελαχίστων των σταθμών EMY 740 και Φοινικιάς και εστιάζοντας στους κινητούς όρους δεκαετίας παρατηρούμε ότι οι μέγιστες ακολουθούν παρόμοια συμπεριφορά με τις βροχοπτώσεις, την περίοδο 1970-1980 η τάση είναι μειωτική και την περίοδο 1980-1984 σταθερή σε χαμηλές τιμές, ξεκινώντας από το 1985 και μετά να αυξάνεται ώστε το 2010 να φτάσει στα επίπεδα του 1970. Αντίθετα τα θερμοκρασιακά ελάχιστα παρουσιάζουν μικρότερη διακύμανση από τις μέγιστες και παράλληλα μια ελαφρά αύξηση τα τελευταία πενήντα χρόνια. Βέβαια σημειώνεται ότι δεν έχουμε θερμοκρασιακά δεδομένα σε μεγάλα υψόμετρα όπως π.χ. στο υψόμετρο του σταθμού της Αγίας Βαρβάρας τα οποία θα μας έδιναν μια καλύτερη εικόνα του κλίματος της λεκάνης απορροής. Στην εικόνα #15 φαίνονται οι τάσεις των θερμοκρασιών. Τα ετήσια μέγιστα έχουν ανεπαίσθητη αυξητική τάση της τάξεως του  $4.3 \cdot 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C/yr}$  και  $3.6 \cdot 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C/yr}$  για το σταθμό της Φοινικιάς και της EMY αντίστοιχα, ενώ αντίστοιχα τα ετήσια ελάχιστα παρουσιάζουν αύξηση της τάξης του  $0.011 \text{ }^{\circ}\text{C/yr}$  και  $0.013 \text{ }^{\circ}\text{C/yr}$  για την περίοδο 1956-2011 που σημαίνει αύξηση κατά  $0.57 \text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $0.62 \text{ }^{\circ}\text{C}$  για την ετήσια ελάχιστη θερμοκρασία του σταθμού της Φοινικιάς



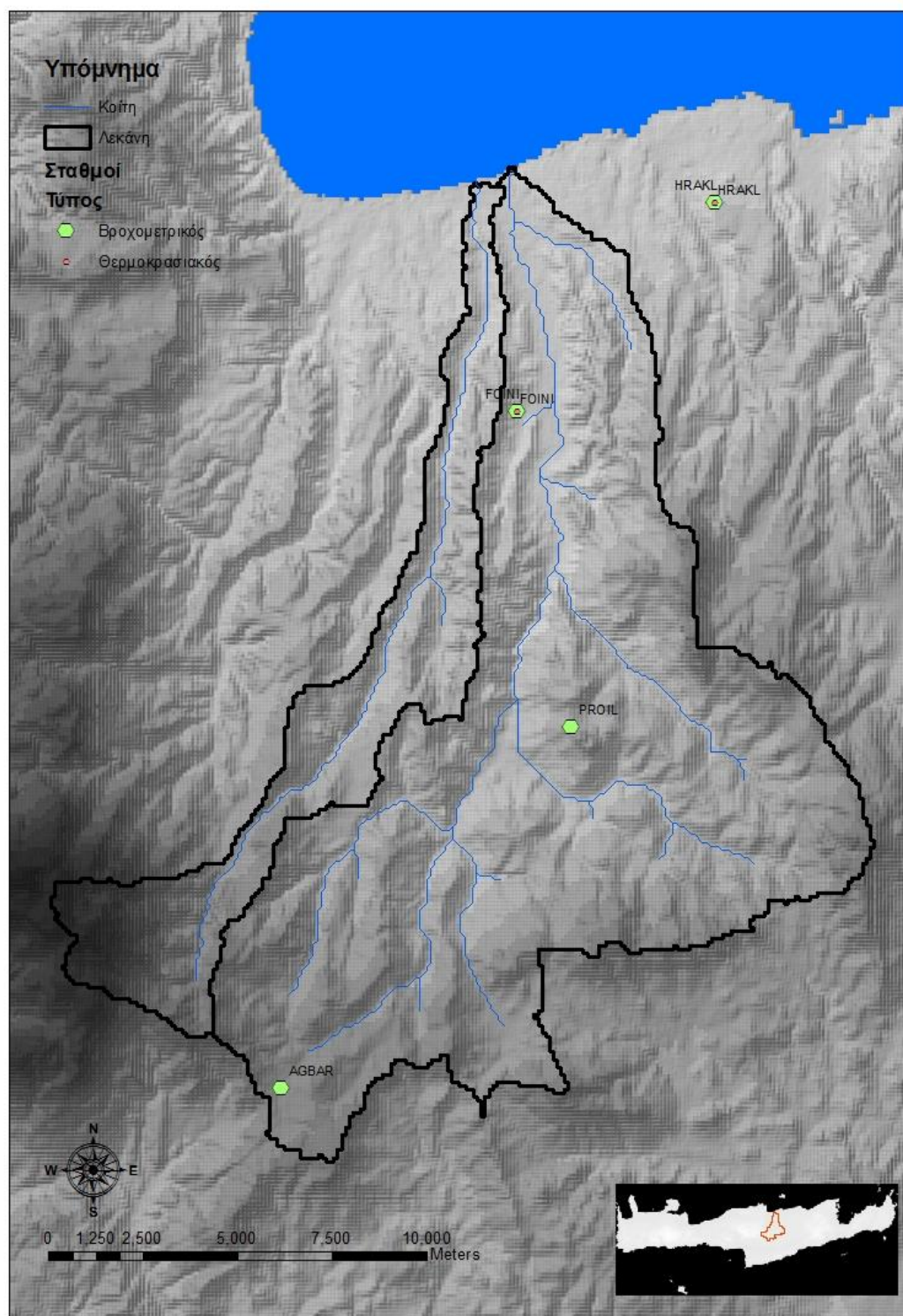
και της EMY 754 Ηράκλειο από το 1956 μέχρι το 2011. Στην εικόνα #16 φαίνεται η αύξηση των θερμοκρασιακών μεγίστων από το 1985 και μετά η οποία είναι  $0.048^{\circ}\text{C}/\text{yr}$  για το σταθμό της Φοινικιάς και  $0.043^{\circ}\text{C}/\text{yr}$  για το σταθμό της EMY 754 Ηρακλείου που σημαίνει αύξηση  $1.30^{\circ}\text{C}$  και  $1.16^{\circ}\text{C}$  αντίστοιχα, από το 1984 μέχρι το 2011.



Εικόνα 15. Ετήσια θερμοκρασιακά μέγιστα και ελάχιστα, υδρολογικών ετών 1956-2011, με αποτυπωμένους τους ρυθμούς μεταβολής



Εικόνα 16. Ετήσια θερμοκρασιακά μέγιστα, υδρολογικών ετών 1984-2011, με αποτυπωμένους τους ρυθμούς μεταβολής



Εικόνα 17. Χάρτης μετεωρολογικών σταθμών

### 3.2. Υδρολογία - Μορφολογία

Τα προσωρινά ποτάμια, εφήμερα, διαλείπουσας ροής ή χειμαρρώδη, χαρακτηρίζονται από επαναλαμβανόμενες ξηρές περιόδους μηδενικής ροής (Uys and O' Keeffe, 1997). Η προσωρινή ροή του ποταμού είναι σημαντική καθώς με βάση αυτό το δεδομένο μπορούν να καθοριστούν διάφορα χαρακτηριστικά και

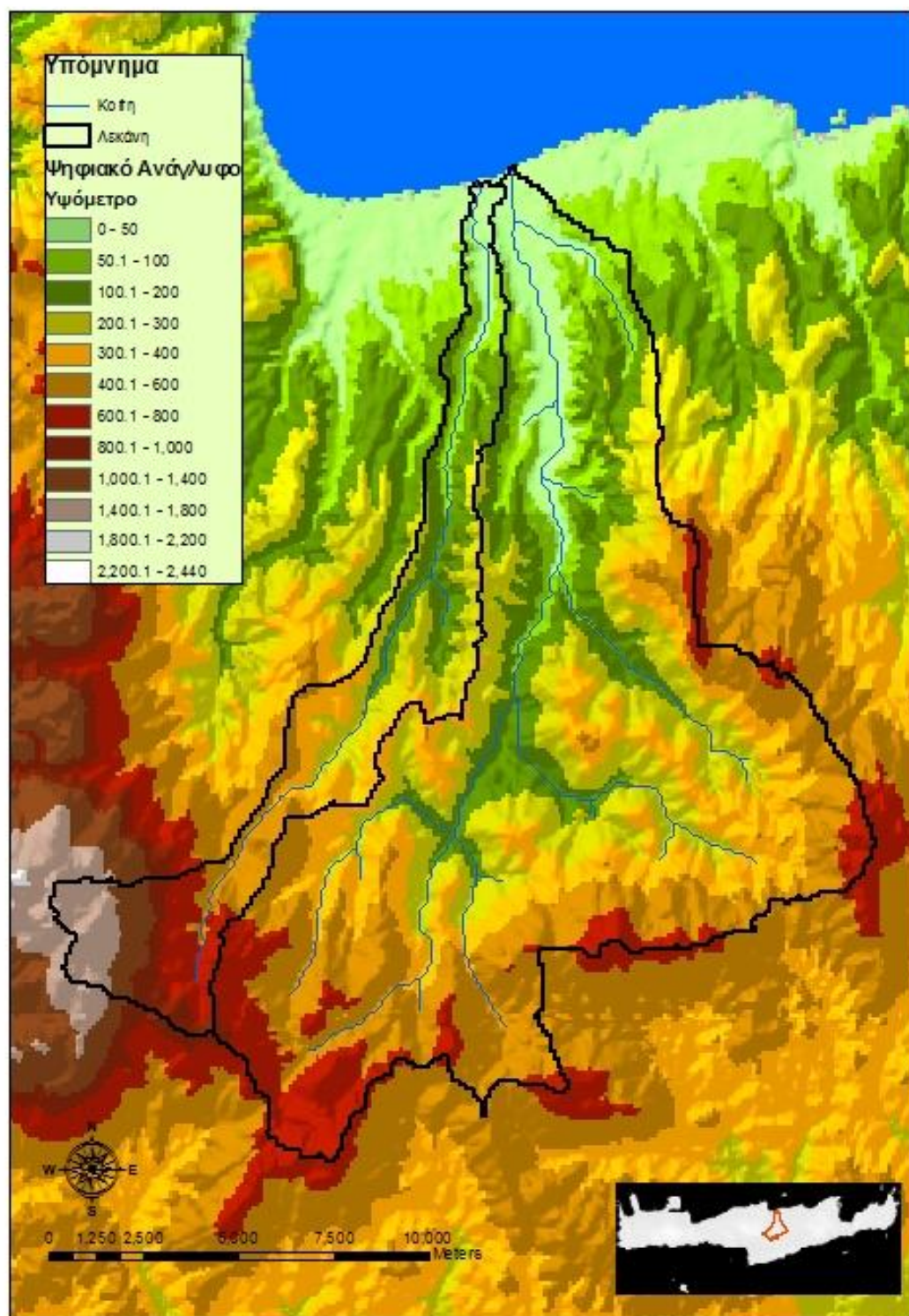
δυσκολίες για τη μελέτη της υδρολογίας του ποταμού. Σύμφωνα με τους [Uys and O' Keeffe, \(1997\)](#) όσο αυξάνεται η διαλείπουσα φάση της ροής μειώνεται η προβλεψιμότητα της, αυξάνεται η σημασία της διακύμανσης της ροής καθώς πλέον, ξεπερνάται το κατώφλι της οικολογικής ροής δημιουργώντας πιέσεις στα οικοσυστήματα ενώ παράλληλα οι φυσικές οχλήσεις αυξάνονται σε συχνότητα και μέγεθος. Κατά τη διάρκεια της ξηρής περιόδου παρατηρείται έλλειψη νερού λόγω ξηρασίας, εντεινόμενης εξατμισοδιαπνοής, διήθησης και απωλειών μετάδοσης (transmission losses), άμεσης υδροληψίας, κυρίως για αρδευτικούς λόγους, και πτώση του υδροφόρου ορίζοντα ([Tzoraki et al, 2007](#)). Γεωμορφολογικά, οι λεκάνες απορροής έχουν ακραίες κλίσεις, πεπλεγμένη μορφολογία κοίτης, γρήγορους χρόνους απόκρισης και διευρυμένα δέλτα ([Tzoraki et al, 2007](#)). Τα ποτάμια προσωρινής παροχής συνήθως δεν παρακολουθούνται λόγω της μειωμένης οικονομικής σημασίας τους ([Tzoraki et al, 2007](#)). Τα προσωρινά ποτάμια κυριαρχούν στην Ελλάδα καθώς καλύπτουν το 42.5% της επιφάνειάς της χωρίς να προσμετρούνται παραπόταμοι προσωρινής ροής, μεγαλύτερων ποταμών ([Tzoraki et al, 2007](#)).

Ο Γιόφυρος μπορεί να χαρακτηριστεί ως ποτάμι χειμερινής διαλείπουσας ροής κατά [Uys and O' Keeffe, \(1997\)](#) ή ως ακραίας χειμερινής ροής τύπου 13 κατά ([Haines et al, 1988; Uys and O' Keeffe, 1997](#)). Παρουσιάζει αυξημένη ροή κατά τη διάρκεια του χειμώνα ενώ τη θερινή περίοδο η ροή του διακόπτεται λόγω απουσίας βροχοπτώσεων και υποβάθμισης του υδροφόρου ορίζοντα. Παρόμοια εκτίμηση κάνουμε και για τον Ξηροπόταμο, καθώς δεν υπάρχουν μετρήσεις για διατυπωθεί εμπειριστατωμένη γνώμη.

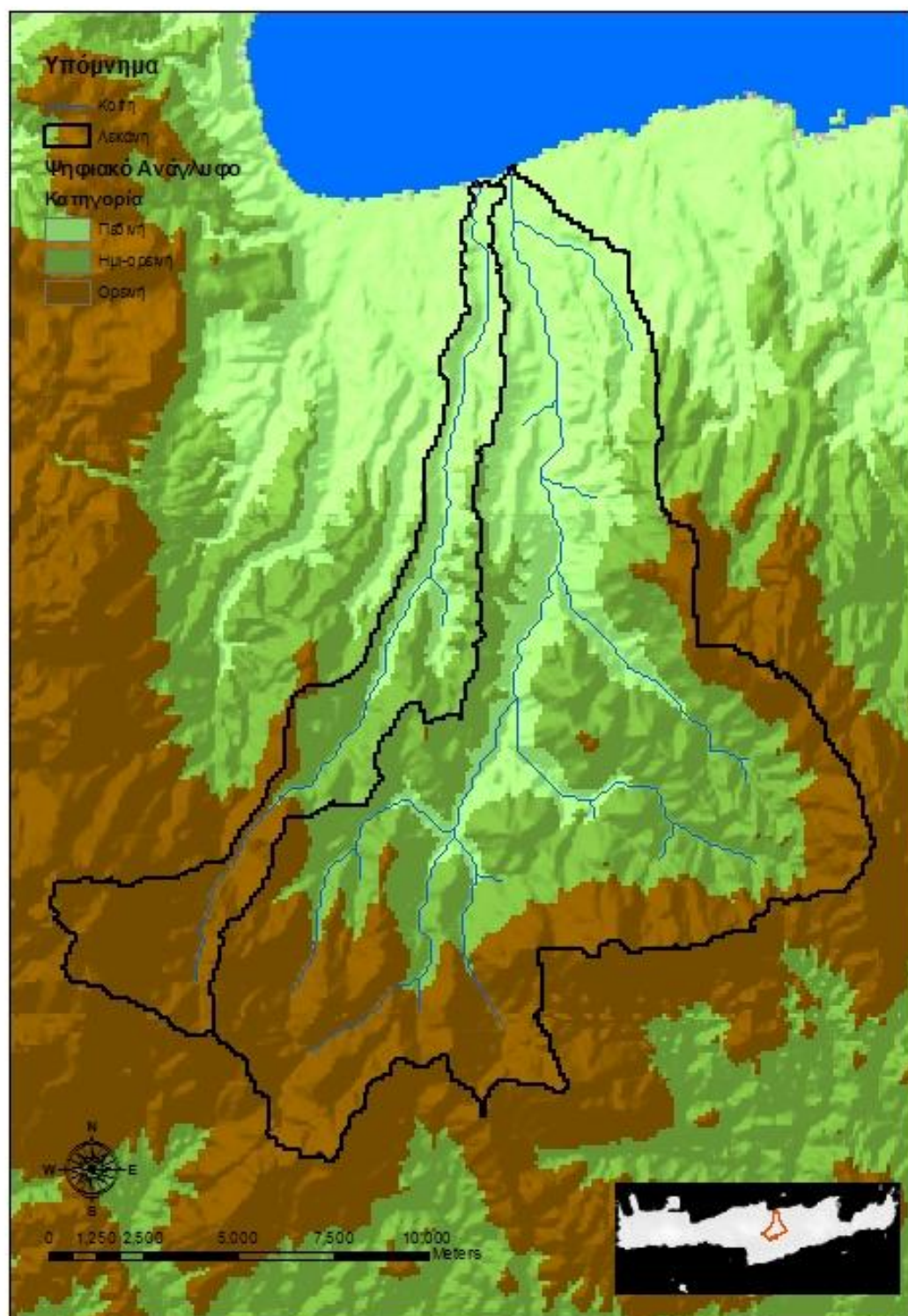
Τέλος, όσον αφορά την πορεία του νερού στο εδαφικό κομμάτι του υδρολογικού κύκλου, για την περιοχή της Κρήτης, μοντελοποίηση κατά την περίοδο 1970-99 καταλήγει στο 10-15% να καταλήγει ως απορροή, το 14-17% να διηθείται στο έδαφος ενώ το κύριο κομμάτι της βροχόπτωσης, 68-76%, να χάνεται ως εξατμισοδιαπνοή ([Koutroulis et al, 2013](#)), παρόμοια αποτελέσματα δίνει και η αναφορά της [ΠΚΔΥ, \(2002\)](#) κατά την οποία υπολογίζεται ότι από τη μέση ετήσια βροχόπτωση το κύριο μέρος της, 62%, χάνεται ως εξατμισοδιαπνοή, το 10% καταλήγει ως απορροή στη θάλασσα και μόνο το 28% καταλήγει στον υδροφόρο ορίζοντα. Αυτή η πληροφορία θα χρησιμοποιηθεί κατά την περίοδο της βαθμονόμησης.

Η λεκάνη απορροής του Γιόφυρου έχει έκταση  $186.5\text{km}^2$ , είναι πεδινή κατά 27% στο βόρειο τμήμα, ημι-ορεινή κατά 39% και ορεινή κατά 34% στο νότιο τμήμα της, το μέσο υψόμετρο είναι 330m και το μέγιστο φτάνει τα 900m. Η επιφάνεια μέχρι το σημείο της Φοινικιάς όπου θα γίνει η βαθμονόμηση είναι  $160.7\text{km}^2$ . Αντίστοιχα η λεκάνη απορροής του Ξηροπόταμου καλύπτει έκταση  $48.6\text{km}^2$ , είναι πεδινή κατά 31%, ημι-ορεινή κατά 31% και ορεινή κατά 38% ενώ το μέσο υψόμετρο είναι 475m και το μέγιστο φτάνει τα 1764m. Όσον αφορά τις κλίσεις, η λεκάνη απορροής του Γιόφυρου έχει κλίση 0-8% στο 14% της επιφάνειάς της, 8-16% στο 33%, 16-24% στο 36% και 24-100% στο 17%, ενώ η λεκάνη απορροής του Ξηροπόταμου αντίστοιχα έχει κλίση 0-8% στο 12%, 8-16% στο 22%, 16-24% στο 25% και 24-100% στο 41% της επιφάνειάς της. Γενικά η κλίση και των δύο λεκανών είναι έντονη και χάριν τούτου ευνοείται η επιφανειακή απορροή.



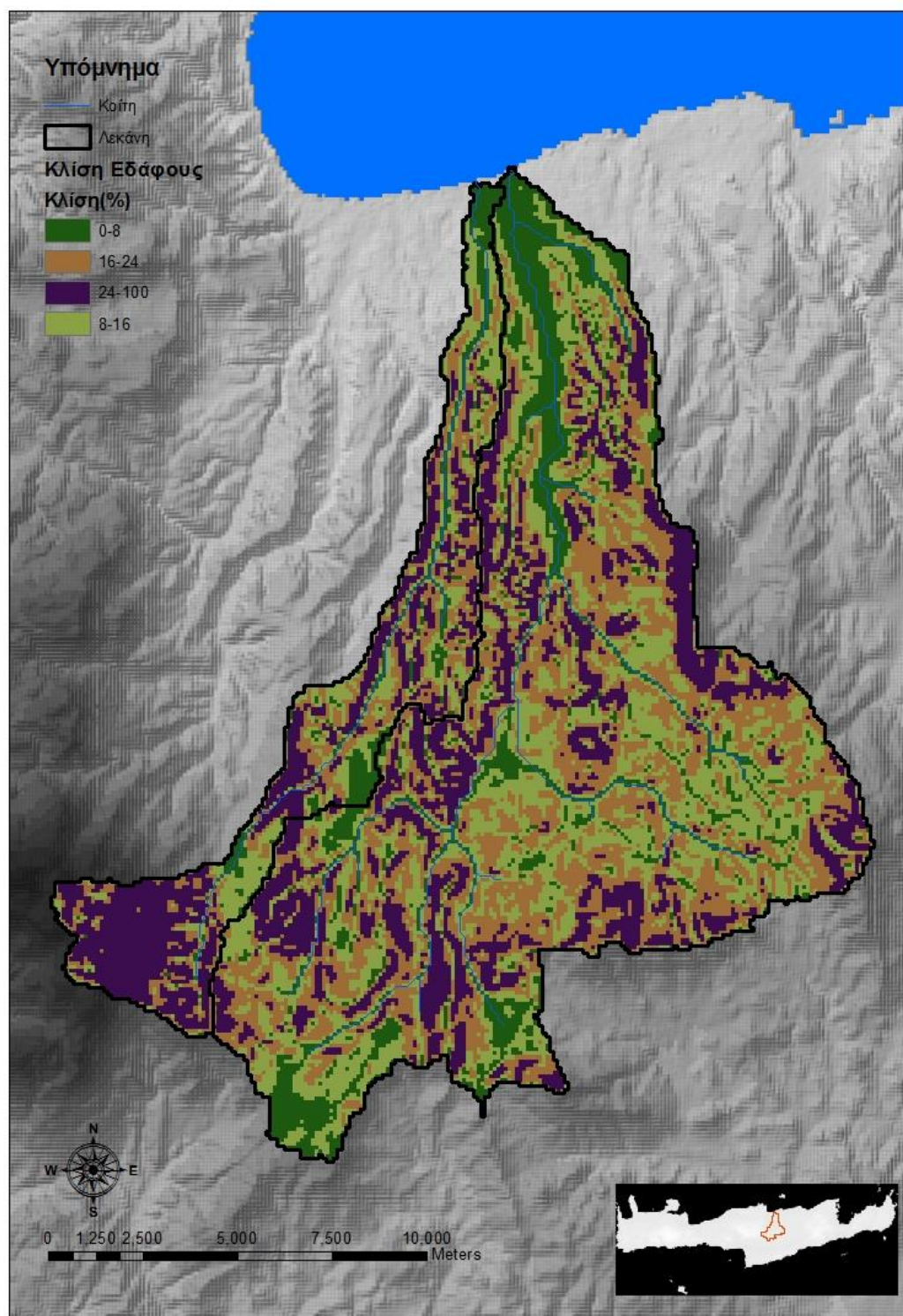


Εικόνα 18. Χάρτης ανάγλυφου - υψομέτρου των λεκανών απορροής Γιόφυρου και Ξηροπόταμου



Εικόνα 19. Χάρτης πεδινής, ημι-ορεινής, ορεινής επιφάνειας των λεκανών απορροής Γιόφυρου και Ξηροπόταμου



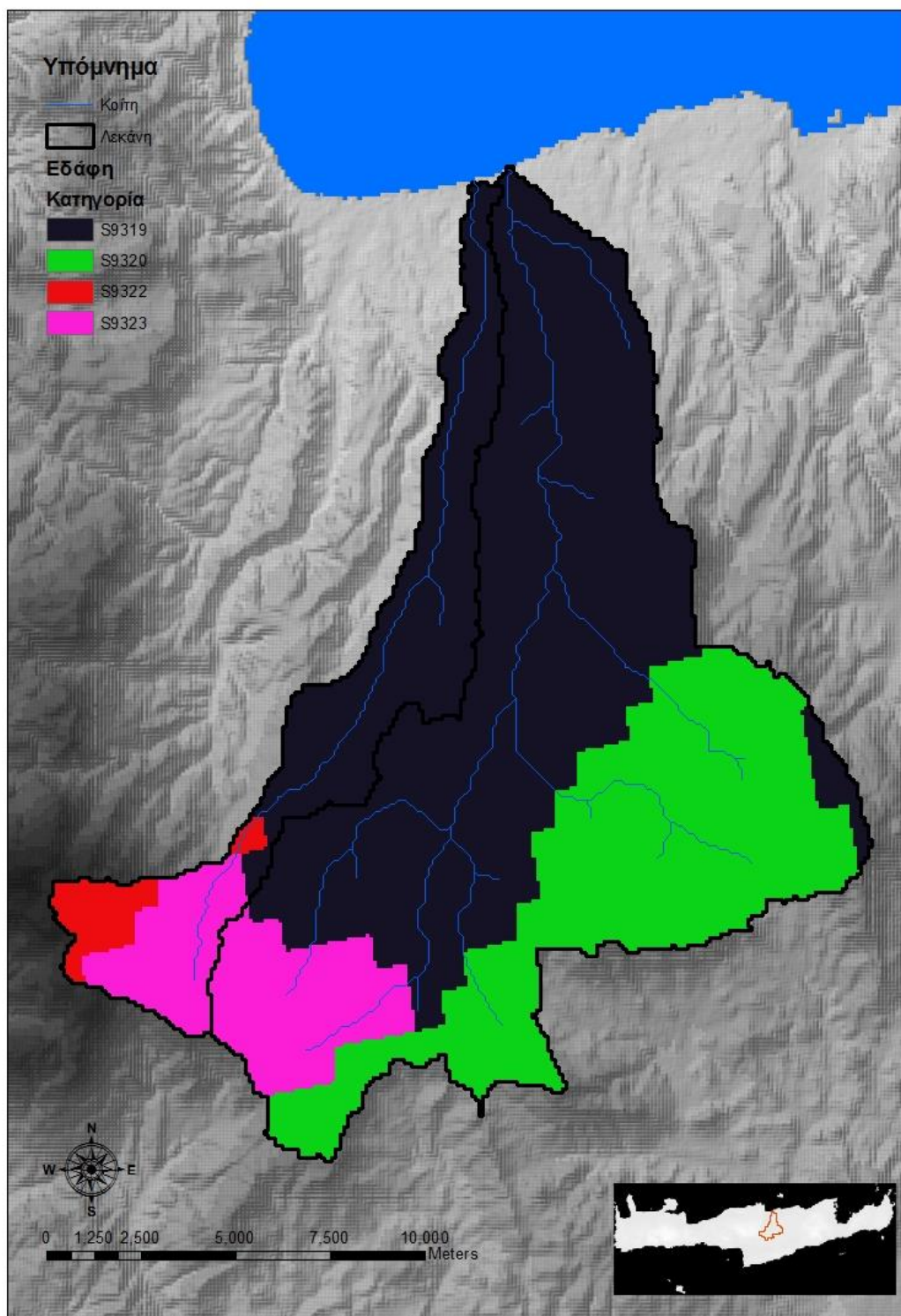


Εικόνα 20. Χάρτης κλίσεων των λεκανών απορροής Γιόφυρου και Ξηροπόταμου, μετά την επανακατηγοριοποίηση (reclassify) του SWAT

### 3.3. Έδαφος-Υπέδαφος

Το έδαφος των λεκανών απορροής του Γιόφυρου και του Ξηροπόταμου αποτελείται κυρίως από Regosols αλλουβιακών αποθέσεων και Leptosols από σχιστόλιθο και ασβεστόλιθο. Το βάθος των εδαφών είναι μέτριο έως ρηχό ενώ ανήκουν στη Β υδρολογική κατηγορία όπως καθορίζεται από την U.S. Natural Resource Conservation Service (NRCS) ([NRCS Soil Survey Staff, 1996](#)).

Το υπέδαφος αποτελείται κυρίως από αλλουβιακές αποθέσεις ενώ η λεκάνη απορροής του Ξηροπόταμου έχει μερικά καρστικά τμήματα τα οποία όμως δεν αναφέρονται ως κύριες πηγές εκφόρτισης του υδρογεωλογικού συστήματος του Ψηλορείτη στο οποίο ανήκει ([Ομπετσάνοφ et al, 2004](#); [ΠΚΔΥ, 2008](#)). Ο υδροφόρος ορίζοντας θεωρείται ενιαίος και μικρής έως μέτριας υδροπερατότητας, βρίσκεται σε μεγάλο βάθος όσον αφορά το μεγαλύτερο μέρος των δύο λεκανών απορροής εκτός από το βόρειο τμήμα κοντά στις εκβολές των δύο ποταμών το οποίο είναι πιθανότατα και το μοναδικό που δέχεται υπόγεια συνεισφορά ύδατος. Επίσης, σύμφωνα με τους [Παπαδοπούλου et al, \(2005\)](#) οι οποίοι μελέτησαν την υφαλμύριση όμορης περιοχής στις δύο λεκάνες απορροής, η διακύμανση του ύψους του υπόγειου υδροφορέα μεταξύ της χειμερινής και της καλοκαιρινής περιόδου, όσον αφορά το βόρειο τμήμα, είναι μεγάλη και αυξάνεται όσο προχωρούμε νότια και το υψόμετρο αυξάνεται.

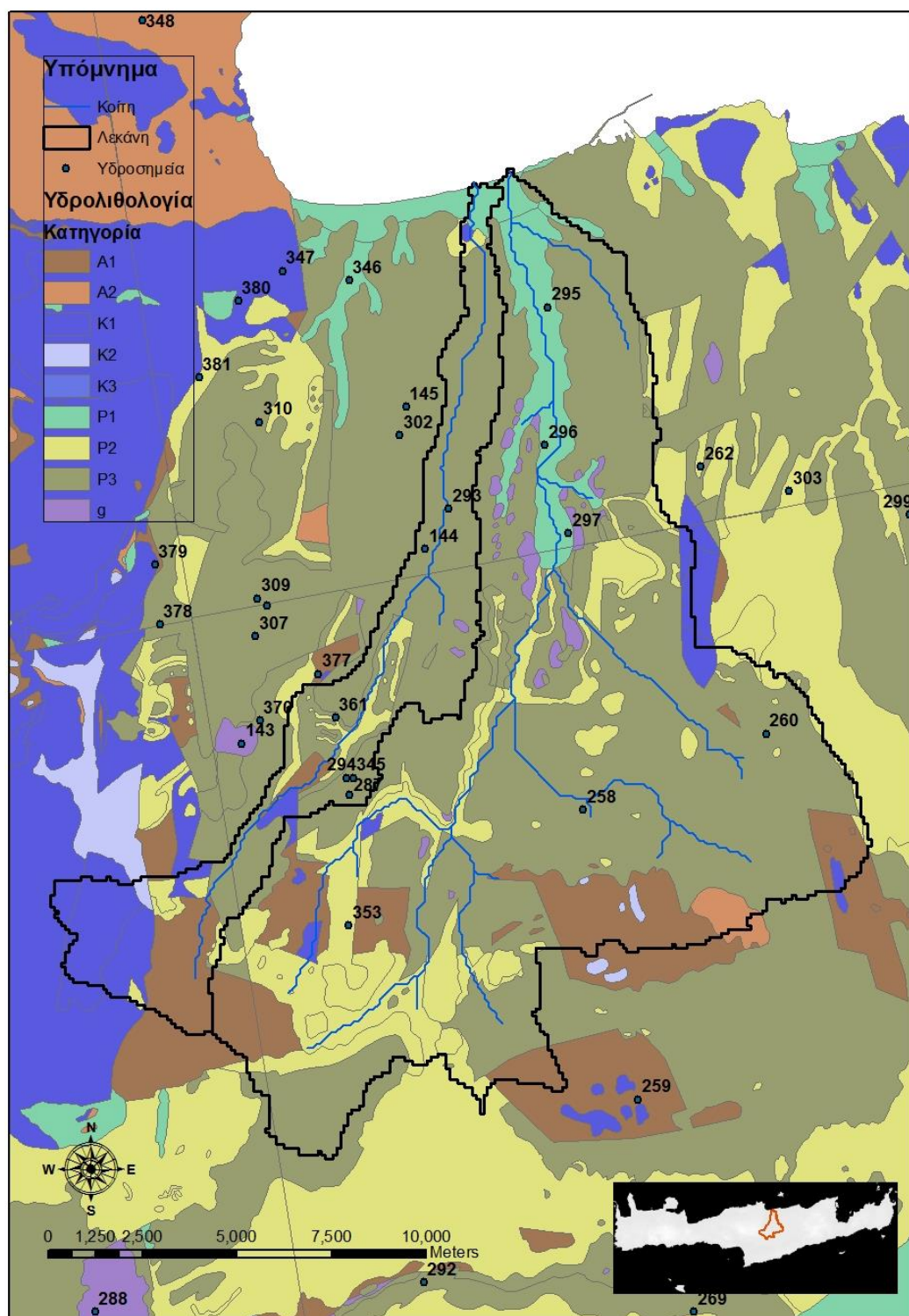


Εικόνα 21. Εδαφικός χάρτης των λεκανών απορροής Γιόφυρου και Ξηροπόταμου, μετά την επανακατηγοριοποίηση (reclassify) του SWAT

Η επεξήγηση του υπομνήματος του εδαφικού χάρτη είναι η εξής:

- S9319 Regosols αλλουβιακών αποθέσεων
- S9320 Leptosols σχιστόλιθου
- S9322 Leptosols ασβεστόλιθου
- S9323 Leptosols σχιστόλιθου





Εικόνα 22. Υδρολιθικός χάρτης και χάρτης υδροσημείων των λεκανών απορροής Γιόφυρου και Ξηροπόταμου, πηγή ΙΓΜΕ

Η επεξήγηση του υπομνήματος του υδρολιθικού χάρτη είναι η εξής:

- A1 Πρακτικά αδιαπέρατοι σχηματισμοί
- A2 Πρακτικά αδιαπέρατοι ή εκλεκτικής κυκλοφορίας σχηματισμοί
- K1 Καρστικός σχηματισμός υψηλής έως μέτριας υδροπερατότητας

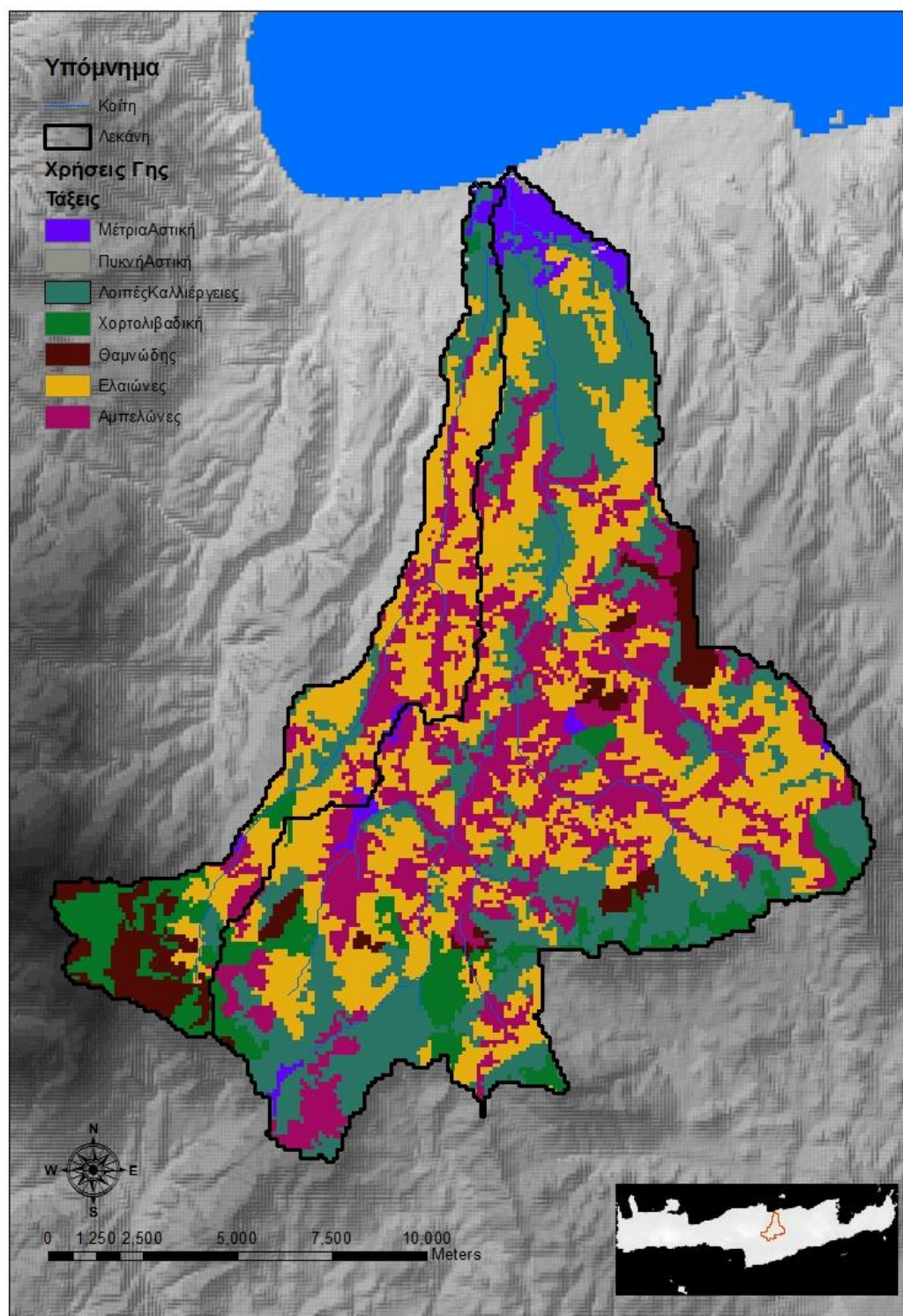
- K2 Καρστικός σχηματισμός μέτριας έως μικρής υδροπερατότητας
- K3 Μειοκαινικά ασβεστολιθικά λατυποκροκαλοπαγή Τοπολίων, μέτριας έως υψηλής υδροπερατότητας
- P1 Κοκκώδεις προσχωματικές κυρίως αποθέσεις κυμαινόμενης υδροπερατότητας
- P2 Μειοκαινικές και πλειοκαινικές αποθέσεις μέτριας έως μικρής υδροπερατότητας
- P3 Κοκκώδεις μη προσχωματικές αποθέσεις μικρής έως πολύ μικρής υδροπερατότητας
- g Γύψοι, υψηλού δυναμικού υδροφορία λόγω διάλυσής τους

Πίνακας 5. Δεδομένα υδροσημείων της εικόνας #22 (ΙΓΜΕ, 2009)

| Αριθμός στο χάρτη | Αριθμός Απογραφής | Υψόμετρο (m) | Στατική στάθμη (m) | Βάθος (m) | ΗΜ/ΝΙΑ Απογραφής |
|-------------------|-------------------|--------------|--------------------|-----------|------------------|
| 144               | ΓΚΠΣ3             | 131          | 75                 | 316       | 20/01/2007       |
| 145               | ΓΚΠΣ4             | 82           | 72                 | 190       | 13/03/2007       |
| 258               | ΛΗ2               | 412          | 385                | 450       | 30/04/2004       |
| 260               | ΛΗ4               | 333          | 280                | 350       | 29/03/2005       |
| 262               | ΛΗ6               | 322          | 302                | 350       | 30/04/2004       |
| 287               | ΝΗ1               | 302          | 260                | 160       | 18/02/2004       |
| 293               | ΝΗ19              | 98           | 95                 | 200       | 06/04/2004       |
| 294               | ΝΗ2               | 304          | 280                | 105       | 18/02/2004       |
| 295               | ΝΗ20              | 17           | 10                 | 30        | 07/04/2004       |
| 296               | ΝΗ21              | 38           | 24                 | 50        | 07/04/2004       |
| 297               | ΝΗ22              | 46           | 35                 | 120       | 07/04/2004       |
| 302               | ΝΗ3               | 79           | Αρτεσιανό          | 220       | 19/02/2004       |
| 345               | Ψ1                | 298          | 35                 | 380       | 07/04/2004       |
| 346               | Ψ10               | 35           | 5                  | 132       | 16/04/2004       |
| 353               | Ψ2                | 313          | 35                 | 470       | 07/04/2004       |
| 361               | Ψ3                | 253          | 60                 | 430       | 29/03/2005       |
| 370               | Ψ4                | 330          | 280                | 138       | 07/04/2004       |
| 377               | Ψ5                | 389          | 35                 | 450       | 07/04/2004       |

### 3.4. Χρήσεις γης - Χρήσεις ύδατος

Όσον αφορά τις χρήσεις γης, οι δύο λεκάνες απορροής, του Γιόφυρου και του Ξηροπόταμου, είναι κυρίως αγροτικές, όπως φαίνεται και στον επόμενο χάρτη οι κύριες καλλιέργειες είναι οι ελαιώνες και οι αμπελώνες, ενώ οι λοιπές καλλιέργειες είναι κυρίως καλλιέργειες λαχανικών. Το βόρειο κομμάτι των δύο λεκανών, κυρίως του Γιόφυρου είναι αστικό και το νότιο κομμάτι του Ξηροπόταμου είναι δασική έκταση. Ο χάρτης χρήσεων γης προέκυψε από επεξεργασία του χάρτη επιφανειακής κάλυψης του προγράμματος Corine Land Cover 2000, στη συνέχεια στα πλαίσια της μελέτης επανακατηγοριοποιήθηκε μέσω του SWAT.

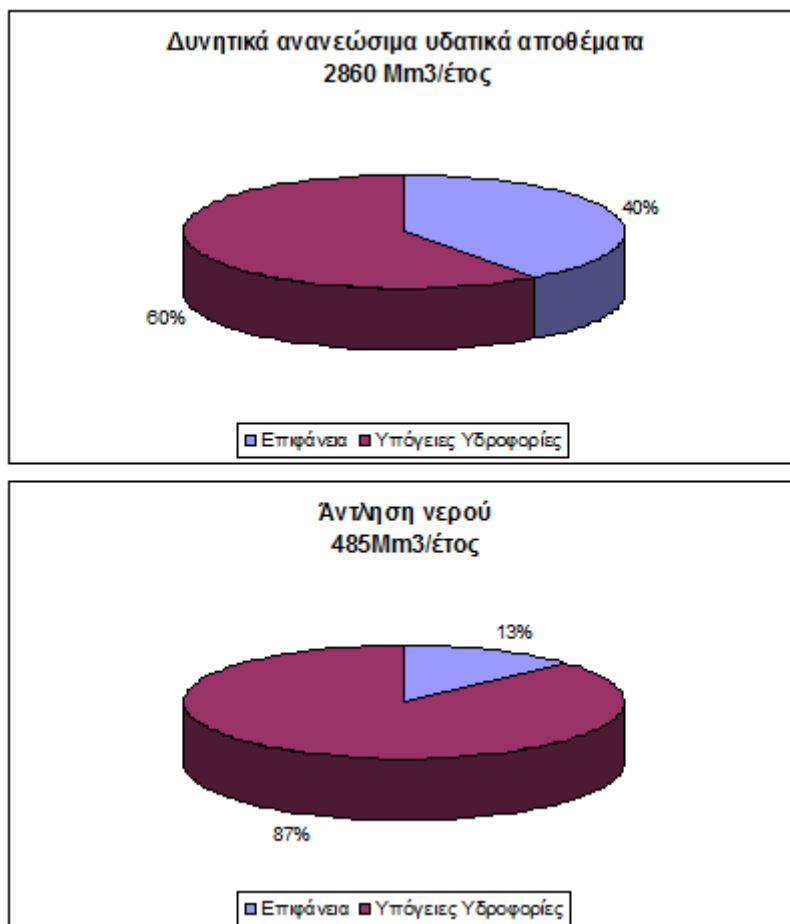


**Εικόνα 23. Χάρτης χρήσεων γης των λεκανών απορροής Γιόφυρου και Ξηροπόταμου, μετά την επανακατηγοριοποίηση (reclassify) του SWAT**

Όσον αφορά τις απολήψεις ύδατος δεν υπάρχουν δεδομένα ειδικά για τις δύο λεκάνες απορροής ενδιαφέροντος αλλά συνολικά για την Κρήτη τα οποία και λαμβάνονται υπόψη στην εργασία. Η Κρήτη έχει σχετικά υψηλή επάρκεια ύδατος  $4800 \text{ m}^3/\text{κατ.-έτος}$ , πολύ υψηλότερο συγκριτικά με άλλα νησιά της Μεσογείου



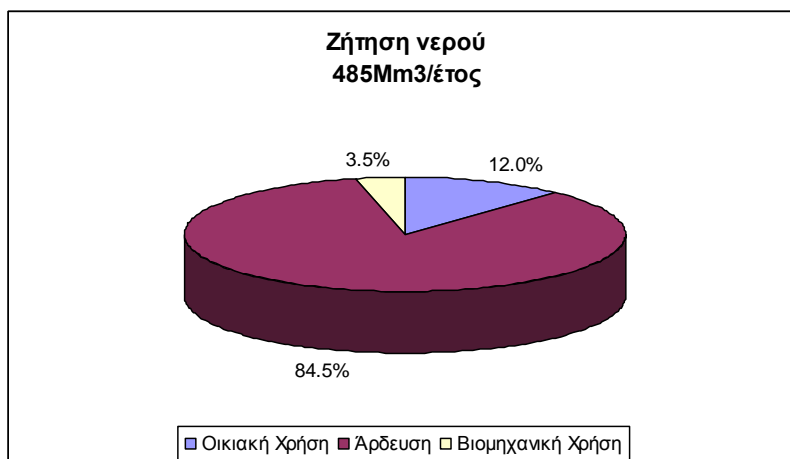
(Chartzoulakis et al, 2001). Οι δυνητικές ανανεώσιμες υδατικές ποσότητες ύδατος του νησιού είναι 2650 Mm<sup>3</sup>/έτος ενώ η πραγματική ζήτηση είναι περίπου 485 Mm<sup>3</sup>/έτος (Υπουργείο Βιομηχανίας, Ενέργειας και Τεχνολογίας, 1989), και ικανοποιείται σχεδόν εξ ολοκλήρου από υπόγειους ταμιευτήρες (πηγές, πηγάδια και γεωτρήσεις) (Chartzoulakis et al, 2001; Vardavas et al, 2005).



Εικόνα 24. Διαθεσιμότητα νερού και υδροληψία στην Κρήτη (Chartzoulakis et al, 2001)

Σημειώνεται ότι η διαθεσιμότητα νερού δεν είναι ο περιοριστικός παράγοντας αλλά οι χωρικές και εποχιακές διακυμάνσεις που έχει η Κρήτη όσον αφορά τη διαθεσιμότητα και τη ζήτηση υδατικών πόρων έχει μεγαλύτερη σημασία (Chartzoulakis et al, 2001). Ενώ το 70-80% της ετήσιας βροχόπτωσης προκύπτει το χειμώνα, κατά την περίοδο του καλοκαιριού αυξάνεται η ζήτηση αρδευτικού νερού λόγω των καλλιεργειών και η ζήτηση για οικιακή χρήση λόγω της τουριστικής περιόδου, κατά την οποία οι επισκέπτες το 1999 ήταν πάνω από 2 εκατομμύρια (Chartzoulakis et al, 2001).

Η κύρια ζήτηση νερού στην Κρήτη είναι για αρδευτικούς λόγους και αγγίζει το 84.5%, για οικιακή χρήση κυμαίνεται στο 12% και για βιομηχανική χρήση μόνο 3.5% (Chartzoulakis et al, 2001), παρά το γεγονός ότι το 1997 μόνο το 36% της διαθέσιμης γεωργικής γης αρδευόταν κατά τους Tsagarakis et al, (2004), ενώ κατά τους Chartzoulakis et al, (2001) το ποσοστό για το 1998 ήταν 31%. Η τάση της ζήτησης αρδευτικού νερού είναι αυξητική ακολουθώντας την αύξηση της αρδευόμενης γης, η οποία κατά την περίοδο 1985-2000 ήταν της τάξης του 55% (Chartzoulakis et al, 2001).

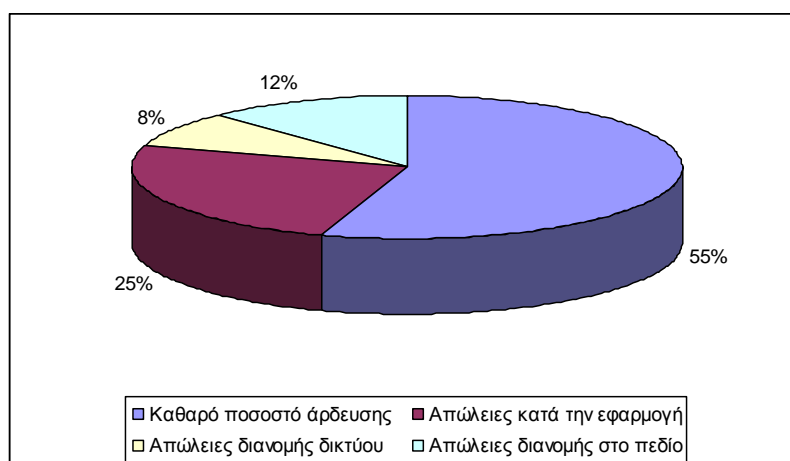


Εικόνα 25. Ζήτηση νερού ανά τομέα στην Κρήτη (Chartzoulakis et al, 2001)

Πίνακας 6. Αρδευτικές περίοδοι για διάφορες καλλιέργειες στην Κρήτη (ΠΚΔΥ, 2002)

| Καλλιέργεια        | Αρδευτική περίοδος |
|--------------------|--------------------|
| Αμπέλια            | 1 ΑΠΡ - 30 ΙΟΥΛ    |
| Κτηνοτροφικά Φυτά  | 1 ΑΠΡ - 30 ΟΚΤ     |
| Ελιές              | 1 ΑΠΡ - 30 ΟΚΤ     |
| Κηπευτικά υπαίθρου | 1 ΑΠΡ - 30 ΝΟΕ     |
| Θερμοκήπια         | 1 ΙΑΝ - 31 ΔΕΚ     |
| Οπωρώνες           | 1 ΑΠΡ - 30 ΟΚΤ     |
| Πατάτες-Μποστανία  | 1 ΑΠΡ - 30 ΟΚΤ     |
| Υποτροπικά         | 1 ΑΠΡ - 30 ΟΚΤ     |

Τέλος οι μέθοδοι άρδευσης που χρησιμοποιούνται είναι η στάγδην κατά 80%, ο καταΐονισμός κατά 15% και οι παραδοσιακές μέθοδοι κατά 5% (ΠΚΔΥ, 2002) ενώ η αποδοτικότητα της άρδευσης κυμαίνεται γύρω στο 55% κατά τους Chartzoulakis et al, (2001).



Εικόνα 26. Απώλειες ύδατος κατά τη μεταφορά και την άρδευση στην Κρήτη (Chartzoulakis et al, 2001)

## 4. Μεθοδολογία και Αποτελέσματα

### 4.1. Πρόγραμμα - Εισαγωγές

Για τη μοντελοποίηση χρησιμοποιήθηκε η έκδοση του ArcMap 9.3, Service Pack 1 (Build 1850), με επίπεδο άδειας ArcInfo, και η έκδοση του SWAT 2009.93.5 (19/08/2010). Ως εισαγωγές χρησιμοποιήθηκαν:

- το ψηφιακό ανάγλυφο της Κρήτης, DEM (Digital Elevation Model), αφού πρώτα κόπηκε από το αντίστοιχο της Ελλάδας, στο σύστημα συντεταγμένων ETRS 1989 LAEA (Lambert Azimuthal Equal Area), με πλευρές κελιού (100x100)m και μονάδα κατακόρυφου άξονα 1m
- πολυγωνικός χάρτης εδαφών Κρήτης στο σύστημα συντεταγμένων ETRS 1989 LAEA
- ο χάρτης χρήσεων γης Κρήτης όπως επεξεργάστηκε από το χάρτη επιφανειακής κάλυψης του Corine Land Cover 2000, στο σύστημα συντεταγμένων ETRS 1989 LAEA, με πλευρές κελιού (100x100)m και μονάδα κατακόρυφου άξονα 1m
- οι ημερήσιες βροχομετρικές μετρήσεις των σταθμών Αγίας Βαρβάρας, Προφήτη Ηλία, Φοινικιάς και EMY 754 Ηρακλείου από την 01/09/1955 μέχρι τις 31/08/2011
- οι ημερήσιες μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασιακές μετρήσεις των σταθμών Φοινικιάς και EMY 754 Ηρακλείου από την 01/01/1955 μέχρι τις 31/12/2011

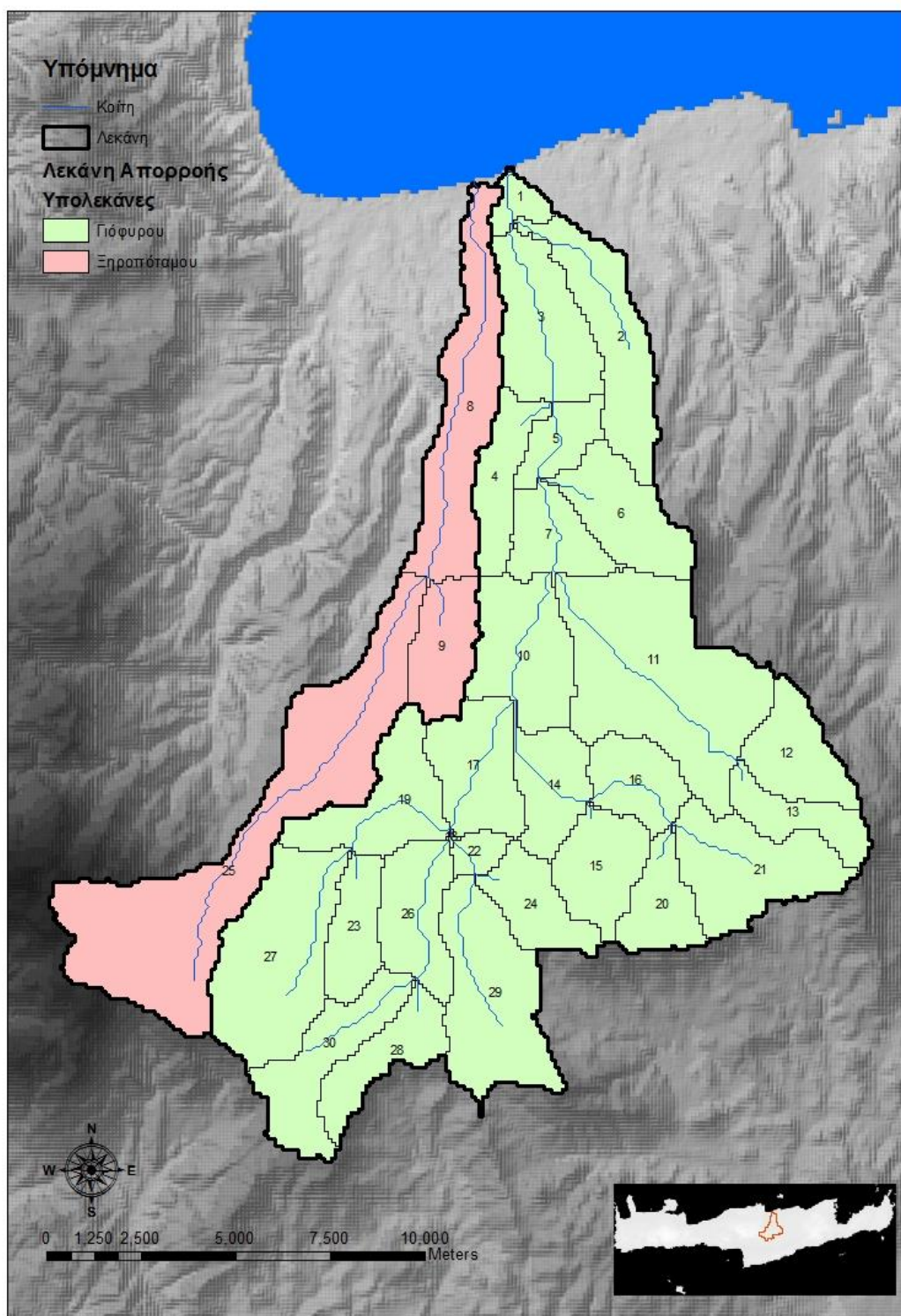
Παράλληλα για τη διαδικασία της βαθμονόμησης και της εμβάθυνσης στις φυσικές διεργασίες της περιοχής χρησιμοποιήθηκαν:

- ο γεωλογικός/υδρολιθικός χάρτης της Κρήτης, σε πολυγωνική μορφή, στο σύστημα συντεταγμένων ETRS 1989 LAEA, από μετατροπή από το GCS ETRS 1989
- σημειακός χάρτης με τις καταχωρημένες γεωτρήσεις της Κρήτης σε σύστημα συντεταγμένων Greek Grid, από μετατροπή από το GCS ETRS 1989
- οι ημερήσιες και μηνιαίες μετρήσεις παροχής του υδρομετρικού σταθμού Φοινικιάς κατά τις περιόδους 01/09/1977 με 31/08/1984, 01/09/1995 με 30/06/1997 και οι μηνιαίες μετρήσεις παροχής του ίδιου σταθμού κατά την περίοδο 09/1989 με 08/2003.

### 4.2. Μοντελοποίηση - Βαθμονόμηση

Η βαθμονόμηση του μοντέλου δεν υπήρξε ευθύγραμμη διαδικασία. Το μειονέκτημα του SWAT να δίνει ίδια αποτελέσματα με πολλούς συνδυασμούς παραμέτρων (equifinality problem) και το γεγονός ότι οι ποσοτικοί δείκτες (NSE, d, RSR, PBIAS) εμφάνιζαν αποδεκτές τιμές για βαθμονομήσεις οι οποίες με βάση τα υδρογραφήματα απέκλιναν, ανάγκασαν το μελετητή να επαναξιολογήσει αρκετές προτάσεις βαθμονόμησης τις οποίες είχε ολοκληρώσει, ώστε η καταληκτική να αποδίδει όσο το δυνατόν καλύτερα τις φυσικές διεργασίες αλλά και να μπορεί να προβλέπει όσο το δυνατόν ακριβέστερα σε βάθος χρόνου και ποικιλία περιπτώσεων.

Το πρώτο πρόβλημα που παρουσιάστηκε είχε σχέση με το DEM και προέκυψε κατά την εκκίνηση της επεξεργασίας του. Λόγω της αδρότητας του κελιού, 100x100m, στο στάδιο της δημιουργίας της κοίτης και των απολήξεων των υπολεκάνων παρουσιαζόταν η συνένωση της κοίτης του Γιόφυρου με τον Ξηροπόταμο λίγες εκατοντάδες μέτρα πριν την εκβολή τους. Για να λυθεί αυτό το πρόβλημα και να αποδοθεί η πραγματικότητα όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικά, η αναπαράσταση της εκβολής του Γιόφυρου σχεδιάστηκε σε ένα χαρακτηριστικό (feature) γραμμής το οποίο χρησιμοποιήθηκε ως βάση για τη μεταβολή του DEM ώστε να αποδοθεί μια καλύτερη προσέγγιση της πραγματικής κοίτης στο κομμάτι της εκβολής του Γιόφυρου κατά τον καθορισμό της διεύθυνσης και της συσσώρευσης ροής. Στη συνέχεια έλαβε χώρα ο καθορισμός της διεύθυνσης και της συσσώρευσης ροής με κατώφλι τα 400ha αποστραγγιζόμενης περιοχής με στόχο να εμφανιστεί ικανοποιητικό μήκος ως κύρια κοίτη, να αποδοθεί ένας αντιπροσωπευτικός αριθμός υπολεκάνων και κυρίως να σχεδιαστεί απόληξη υπολεκάνης κοντά στο σημείο μετρήσεων παροχής (Φοινικιά) για τη διευκόλυνση της βαθμονόμησης. Μετά τη χάραξη της κοίτης επιλέχτηκε η προσθήκη σημειακών πηγών και στη συνέχεια έγινε η οριοθέτηση των δύο λεκανών απορροής, του Γιόφυρου και του Ξηροπόταμου με τον επακόλουθο υπολογισμό των παραμέτρων των υπολεκάνων τους. Ο αριθμός υπολεκάνων ήταν 27 για το Γιόφυρο και 3 για τον Ξηροπόταμο. Ο λόγος για τον οποίο έγινε παράλληλα η των δύο λεκανών απορροής ήταν για να εφαρμοστούν άμεσα οι αλλαγές των παραμέτρων στον Ξηροπόταμο και να κερδηθεί χρόνος και ακρίβεια στη μεταφορά των αλλαγών.



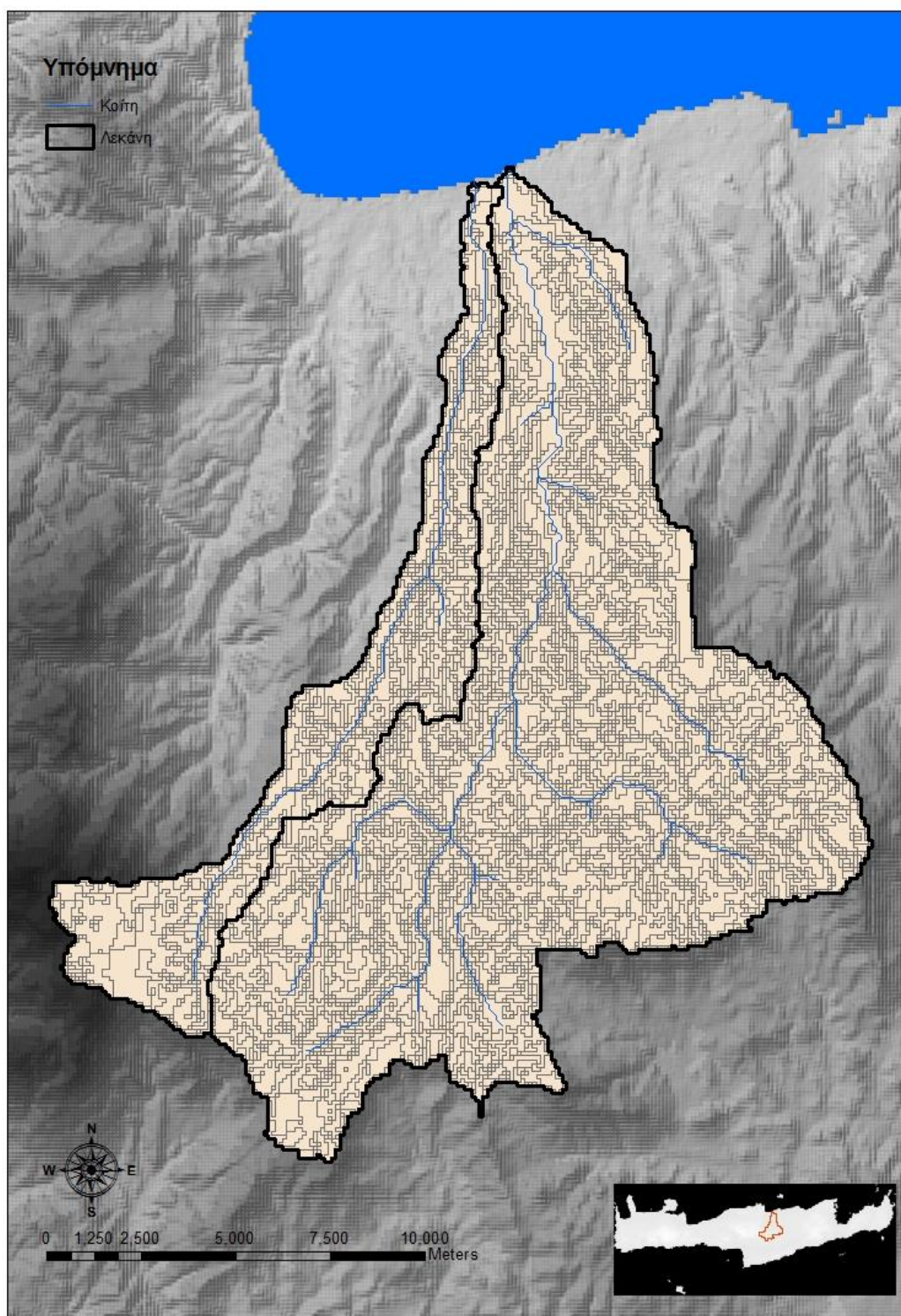
Εικόνα 27. Χάρτης υπολεκάνων Γιόφυρου και Ξηροπόταμου μετά την οριοθέτηση από το SWAT

Έπειτα έγινε η επανακατηγοριοποίηση εδαφών, χρήσεων γης και κλίσης όπως φαίνεται στους αντίστοιχους χάρτες στην περιγραφή. Η επανακατηγοριοποίηση κλίσεων έγινε χρησιμοποιώντας τα συγκεκριμένα εύρη λόγω του γεγονότος ότι οι κλίσεις γενικά είχαν μεγάλη διασπορά, από μηδενικές έως πολύ απότομες και επειδή στις κλίσεις άνω του 25% αυξάνεται πολύ η διάβρωση, λόγω της μείωσης της



φυτοκάλυψης σε περίπτωση δασικών εκτάσεων (Koulouri and Giourga, 2007). Συνεπώς κρίθηκε ότι χρειάζεται σταθερό εύρος κλάσης προσπαθώντας να διαχωριστεί το κομμάτι των άνω του 25% σε μία συγκεκριμένη κλάση.

Στη συνέχεια, ο καθορισμός των HRUs (Hydrologic Response Units) έγινε χρησιμοποιώντας ως τιμές κατωφλίου τα 300ha για το έδαφος, τα 100ha για τις χρήσεις γης και τα 50ha για την κλίση. Με αυτόν τον τρόπο η επιφάνεια των HRU ήταν περίπου 1km<sup>2</sup> αποδίδοντας σε ικανοποιητικό βαθμό τη χωρική κατανομή και διευκολύνοντας την εφαρμογή BMPs (Best Managerial Practices) μέσω του μοντέλου, καθώς στην Κρήτη δεν υπάρχουν μεγάλες καλλιέργειες, αλλά μικρές ανεξάρτητες καλλιέργειες. Χρησιμοποιώντας μικρότερο κατώφλι στην κλίση δόθηκε εσκεμμένα έμφαση στην κλίση του εδάφους με το σκεπτικό να παρουσιαστεί η χωρική της κατανομή όσο το δυνατόν περισσότερο, διότι το έδαφος και οι χρήσεις γης παρουσιάζουν πολύ μικρότερη ανομοιογένεια σε αυτή την κλίμακα. Το αποτέλεσμα ήταν 136 HRUs για το Γιόφυρο και 29 HRUs για τον Ξηροπόταμο.



**Εικόνα 28.** Χάρτης με την πλήρη κατανομή των HRUs μετά την κατηγοριοποίηση του SWAT

Το επόμενο βήμα ήταν η καταχώρηση των μετεωρολογικών σταθμών και των βροχομετρικών και θερμοκρασιακών δεδομένων. Για την εξαγωγή της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής το SWAT χρειάζεται δεδομένα ανέμου, ηλιακής ακτινοβολίας και σχετικής υγρασίας τα οποία μπορεί να τα εξάγει με βάση τους μέσους όρους αρκετών ετών, συνεπώς χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα για τους σταθμούς

ενδιαφέροντος, Αγιά Βαρβάρα, Προφήτης Ηλείας, Φοινικιάς και EMY 754 Ηρακλείου, οι μέσοι όροι της Κρήτης, θεωρώντας ότι το σφάλμα αυτής της εκτίμησης είναι μικρό και δεν επηρεάζει τον υπολογισμό της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής.

Τελικά εγγράφηκαν όλοι οι απαιτούμενοι πίνακες στη βάση δεδομένων και αφού δεν παρατηρήθηκε κάποιο σφάλμα άρχισε η διαδικασία της βαθμονόμησης με τη μέθοδο trial and error με βάση το υδρογράφημα του ποταμού Γιόφυρου στο σταθμό Φοινικιάς.

Η φιλοσοφία που χρησιμοποιήθηκε κατά τη βαθμονόμηση ήταν η εξής. Πρώτα γίνεται προσπάθεια να απεικονιστεί σωστά η ετήσια βροχόπτωση, η ετήσια χιονόπτωση και η ετήσια εξατμισοδιαπνοή. Μετά γίνεται προσπάθεια να κατανεμηθεί η απορροή σε επιφανειακή, εδαφική και υπόγεια σε ετήσιο βήμα. Αφού γίνει αυτό εμβαθύνουμε σε μηνιαίο βήμα όπου γίνονται κάποιες αδρές διορθώσεις και επισημάνσεις, καθώς τα υδρολογικά φαινόμενα δεν αναπαριστώνται επιτυχώς στο επίπεδο του μήνα. Έπειτα έρχεται η ανάλυση σε ημερήσιο βήμα και με τη βοήθεια του υδρογραφήματος, όπου γίνεται προσπάθεια να εμφανιστούν οι πλημμυρικές αιχμές. Στη συνέχεια προσπαθείται, με βάση το υδρογράφημα, να απεικονιστεί σωστά η εκφόρτιση του υπόγειου υδροφορέα σε συνδυασμό με την εκφόρτιση της ακόρεστης ζώνης. Εφαρμόζονται οι ποσοτικοί δείκτες για επαλήθευση και μικροδιορθώσεις. Ελέγχεται η βαθμονόμηση χρησιμοποιώντας τη χρονοσειρά επαλήθευσης (validation), διαπιστώνονται ανακρίβειες και γίνεται επαναβαθμονόμηση έχοντας πληρέστερη εικόνα των φυσικών διεργασιών.

Κατά τη συγκεκριμένη μελέτη, τέσσερις φορές η βαθμονόμηση ξεκίνησε από λευκό χαρτί, χρησιμοποιώντας διάφορες περιόδους βαθμονόμησης, καθώς μετά από προσεκτική αξιολόγηση και παρότι προηγουμένως μπορεί να έδινε ικανοποιητικά αποτελέσματα για την περίοδο βαθμονόμησης δεν μπορούσε να προβλέψει ικανοποιητικά άλλες περιόδους, με συνέπεια να δοκιμάζεται διαφορετική προσέγγιση που εκλάμβανε διαφορετικά τις φυσικές διεργασίες. Αυτό δείχνει ότι κατά την πορεία της μελέτης εμβάθυνε παράλληλα και ο μελετητής στις φυσικές διεργασίες της λεκάνης απορροής του Γιόφυρου αλλά και στις αδυναμίες του προγράμματος, προσπαθώντας να τις ξεπεράσει.

Κατά την τελική προσπάθεια βαθμονόμησης ως περίοδος βαθμονόμησης χρησιμοποιήθηκε το διάστημα 1/09/1977 με 31/08/1984 σε ημερήσιο και μηνιαίο βήμα, και ως περίοδοι επαλήθευσης το διάστημα 1/09/1995 με 30/06/1997 σε ημερήσιο βήμα και το διάστημα 09/1989 με 08/1999 σε μηνιαίο βήμα. Οι μετρήσεις από τον υδρομετρικό σταθμό Φοινικιάς συγκρίνονταν με την έξοδο από την υπολεκάνη 5 η οποία βρίσκεται κοντά σε αυτό το σημείο. Κάθε τρέξιμο, για να εξαλειφθεί η πιθανότητα σφάλματος λόγω μη πλήρωσης των ταμιευτήρων νερού είχε αρχική ημερομηνία τρεξίματος πέντε χρόνια πριν την περίοδο ενδιαφέροντος. Επίσης σημειώνεται ότι κατά τη διαδικασία βαθμονόμησης έγιναν προσπάθειες αυτόματης βαθμονόμησης χρησιμοποιώντας το SWAT-CUP συμπληρωματικά ως προς την χειρωνακτική βαθμονόμηση οι οποίες δεν απέδωσαν καθώς η χρησιμοποίηση των στατιστικών δεικτών και συγκεκριμένα του NSE κατέληγε σε οριακά καλύτερα αποτελέσματα ως προς τον δείκτη, αλλά λιγότερο αντιπροσωπευτικό υδρογράφημα. Συνεπώς δεν χρησιμοποιήθηκε καθόλου

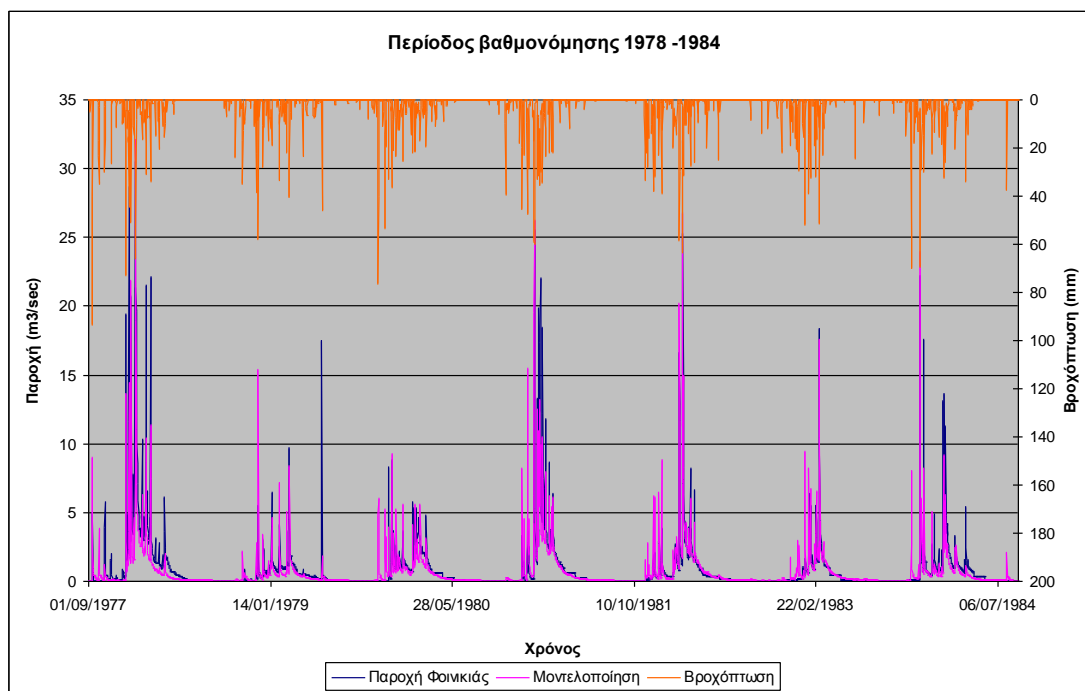
αυτόματη βαθμονόμηση κατά τη μελέτη αυτή. Η διαδικασία της βαθμονόμησης παρατίθεται λεπτομερώς στο παράρτημα. Οι κύριες παράμετροι που βαθμονομήθηκαν παρατίθενται στον πίνακα #7.

**Πίνακας 7. Παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη βαθμονόμηση του SWAT**

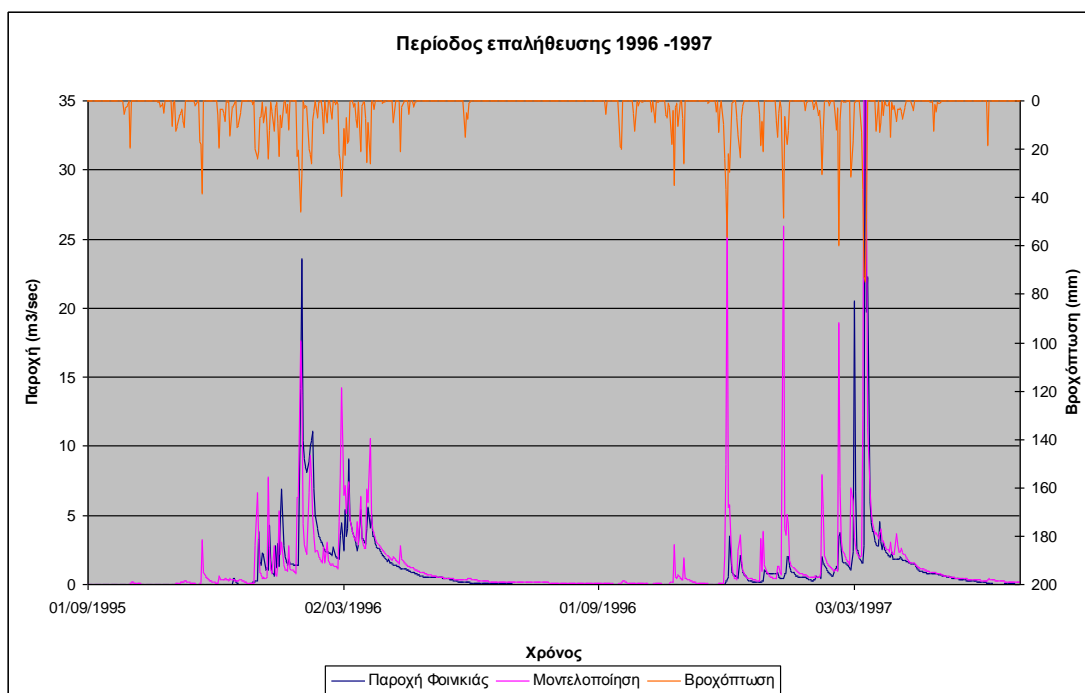
| Γενικές | Έδαφος    | Υπέδαφος  |
|---------|-----------|-----------|
| TLAPS   | SOL_Z     | GWQMN     |
| SFTMP   | SOL_AWC   | GW_DELAY  |
| SMTMP   | SOL_K     | ALPHA_BF  |
| SMFMX   | SOL_ZMX   | REVAPMN   |
| SMFMN   |           | GW_REVAP  |
| ESCO    |           | RCHRG_DP  |
| EPCO    | Κανάλι    | HRU       |
| TRNSRCH | CH_K2     | CN2       |
| CANMX   | ALPHA_BNK | LAT_TTIME |

Όσον αφορά τη μοντελοποίηση της λεκάνης απορροής του Ξηροπόταμου, αυτή έγινε μέσω της βαθμονόμησης της λεκάνης απορροής του Γιόφυρου καθώς δεν υπάρχουν στοιχεία παροχής για το συγκεκριμένο ποταμό. Οι μόνες βασικές διαφορές ανάμεσα στις δύο λεκάνες είναι η παρουσία ενός μικρού καρστικού τμήματος στη γεωλογία του Ξηροπόταμου, η διαφορά του ανώτατου υψομέτρου καθώς η λεκάνη απορροής του Ξηροπόταμου έχει διπλάσιο μέγιστο υψόμετρο από του Γιόφυρου και συνακόλουθα η αυξημένη επίδραση του λιώσιμου των χιονιών στην υδρολογία του Ξηροπόταμου. Σχετικά με την επίδραση του λιώσιμου του χιονιού αυτό λήφθηκε υπόψη κατά το στάδιο της βαθμονόμησης και αναφέρεται στο αντίστοιχο υποκεφάλαιο του παραρτήματος. Σχετικά με το καρστικό τμήμα του Ξηροπόταμου, αυτό δεν αναφέρεται ως κύρια καρστική πηγή του υδρογεωλογικού συστήματος του Ψηλορείτη, στο οποίο ανήκει, καθώς σχεδόν το σύνολο της εκφόρτισης γίνεται στην πηγή του Αλμυρού η οποία βρίσκεται εκτός της λεκάνης απορροής (Ομπρετσάνοφ et al, 2004; ΠΚΔΥ, 2008).

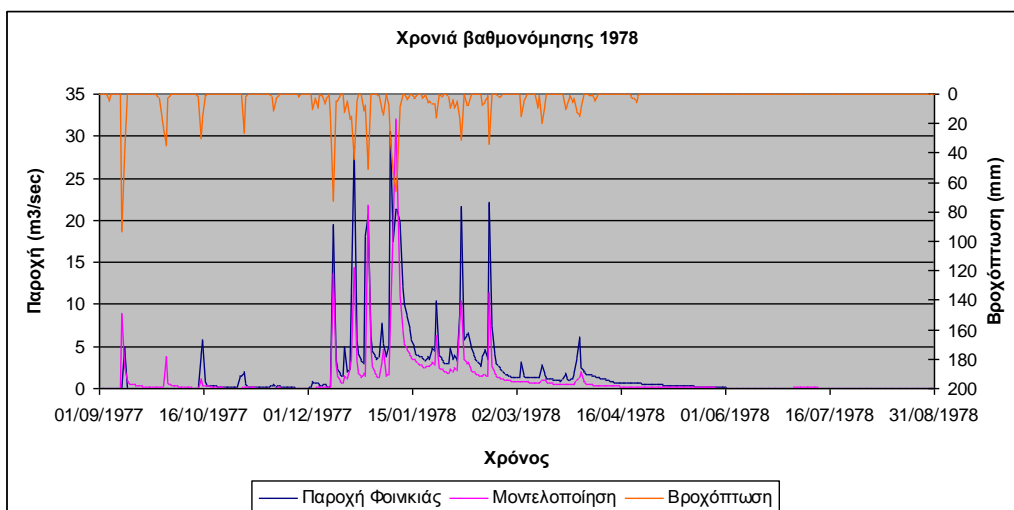
Στις εικόνες #29 με #41 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης και της επαλήθευσης του μοντέλου, ενώ στους πίνακες #8 και #9 τα αντίστοιχα αποτελέσματα των στατιστικών δεικτών. Συγκεκριμένα στις εικόνες #29 και #30 παρουσιάζονται τα υδρογραφήματα μετρήσεων και μοντελοποίησης για τις περιόδους βαθμονόμησης και επαλήθευσης συγκεντρωτικά. Στις εικόνες #31 μέχρι #37 τα υδρογραφήματα ανά χρονιά βαθμονόμησης και στις εικόνες #38 και #39 τα υδρογραφήματα ανά χρονιά επαλήθευσης, για καλύτερη σύγκριση των μετρήσεων με τις μοντελοποιημένες τιμές. Τέλος στη εικόνα #40 παρατίθεται το υδρογράφημα της περιόδου βαθμονόμησης σε μηνιαίο βήμα και στην εικόνα #41 το αντίστοιχο για την περίοδο 1990-1990. Ο πίνακας #8 παρουσιάζει τους στατιστικούς δείκτες για τις περιόδους βαθμονόμησης και επαλήθευσης ενώ ο πίνακας #9 τα ίδια αποτελέσματα εξαιρουμένης της περιόδου επαλήθευσης σε ημερήσιο βήμα που αντιπροσωπεύει μόνο τη χρονιά 1996.



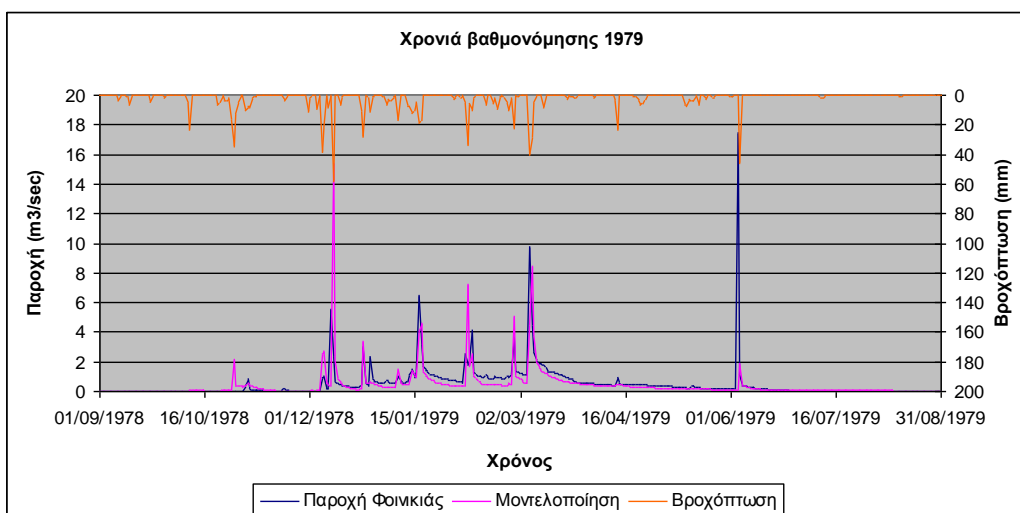
**Εικόνα 29. Σύγκριση υδρογραφήματων ημερησίων μετρήσεων και μοντελοποίησης του Γιόφυρου στο σημείο Φοινικιά για την περίοδο βαθμονόμησης 1978 -1984**



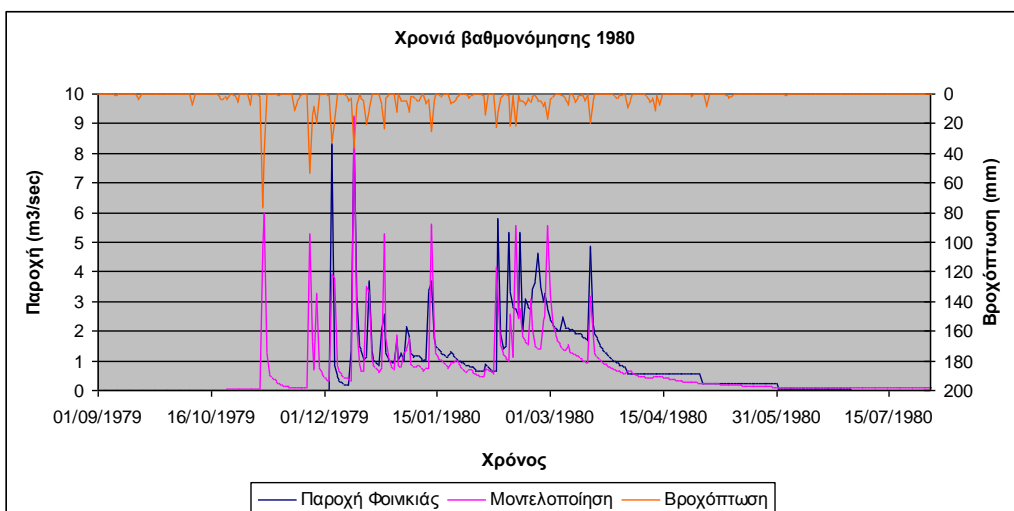
**Εικόνα 30. Σύγκριση υδρογραφήματων ημερησίων μετρήσεων και μοντελοποίησης του Γιόφυρου στο σημείο Φοινικιά για την περίοδο επαλήθευσης 1995 - 1996**



**Εικόνα 31. Σύγκριση υδρογραφήματων ημερησίων μετρήσεων και μοντελοποίησης του Γιόφυρου στο σημείο Φοινικιά για τη χρονιά βαθμονόμησης 1978**

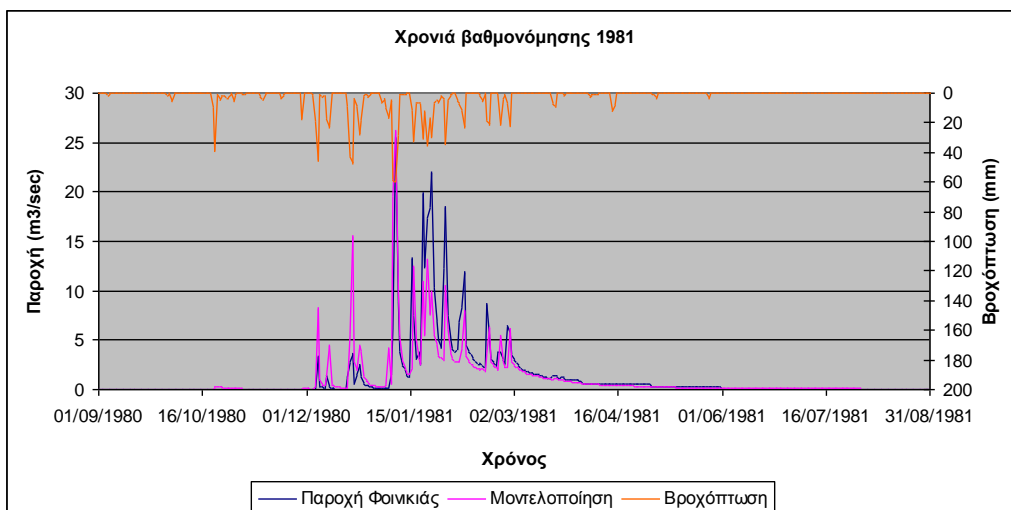


**Εικόνα 32. Σύγκριση υδρογραφήματων ημερησίων μετρήσεων και μοντελοποίησης του Γιόφυρου στο σημείο Φοινικιά για τη χρονιά βαθμονόμησης 1979**

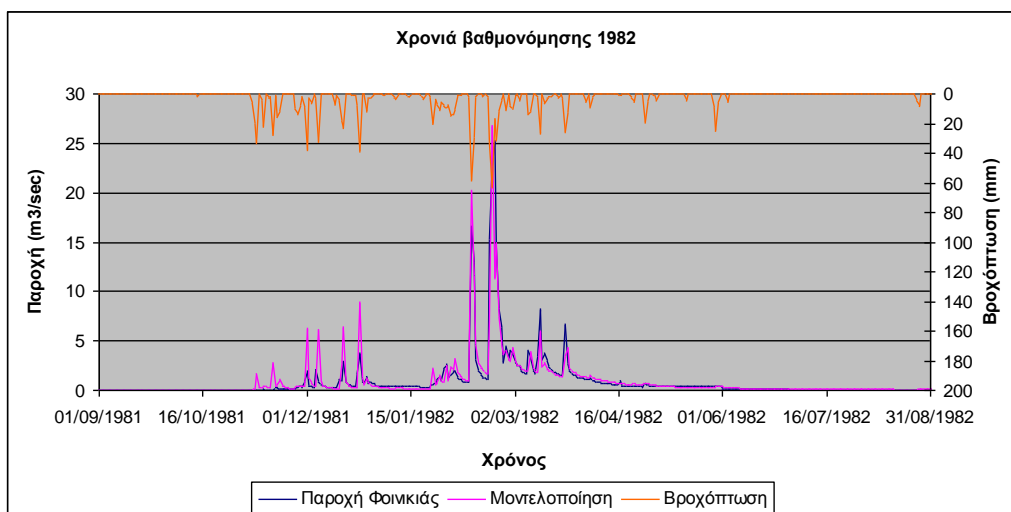


**Εικόνα 33. Σύγκριση υδρογραφήματων ημερησίων μετρήσεων και μοντελοποίησης του Γιόφυρου στο σημείο Φοινικιά για τη χρονιά βαθμονόμησης 1980**

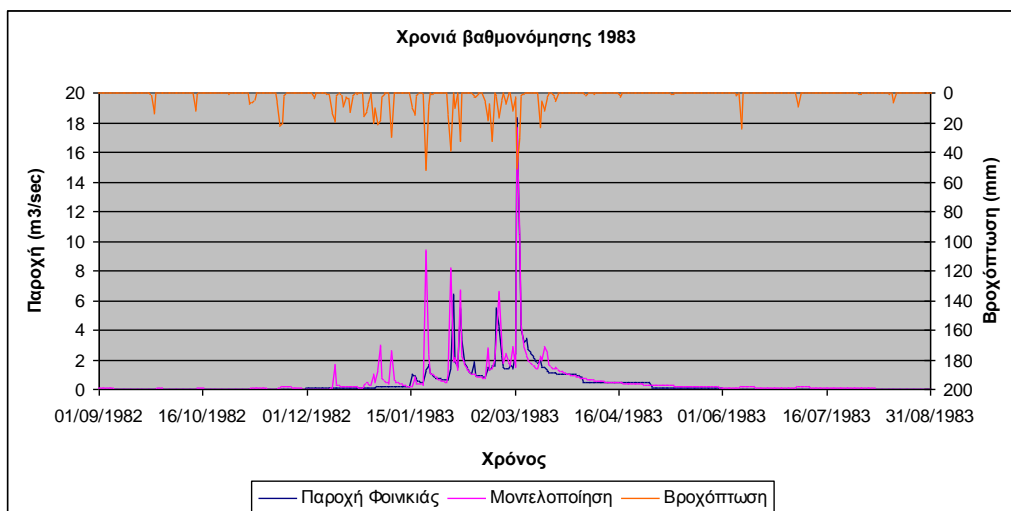




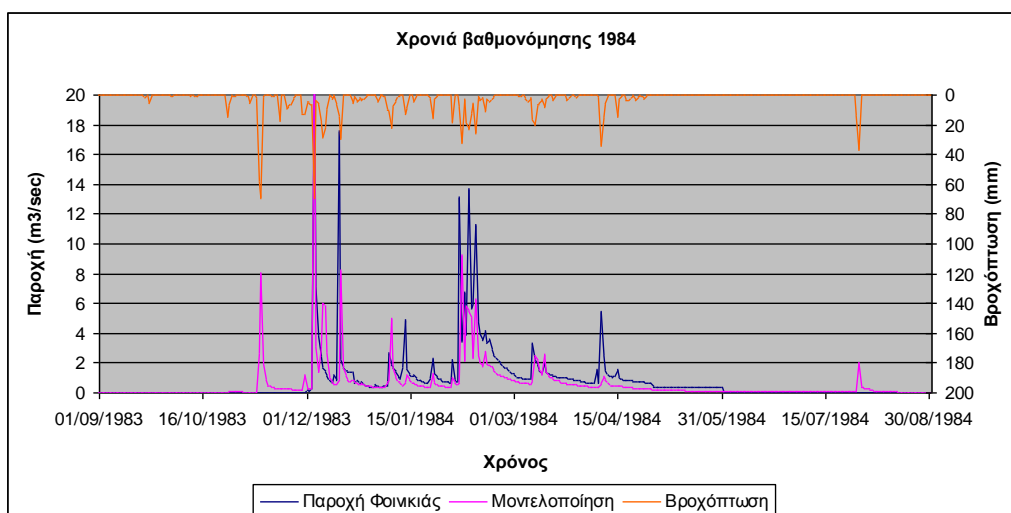
**Εικόνα 34. Σύγκριση υδρογραφήματων ημερησίων μετρήσεων και μοντελοποίησης του Γιόφυρου στο σημείο Φοινικιά για τη χρονιά βαθμονόμησης 1981**



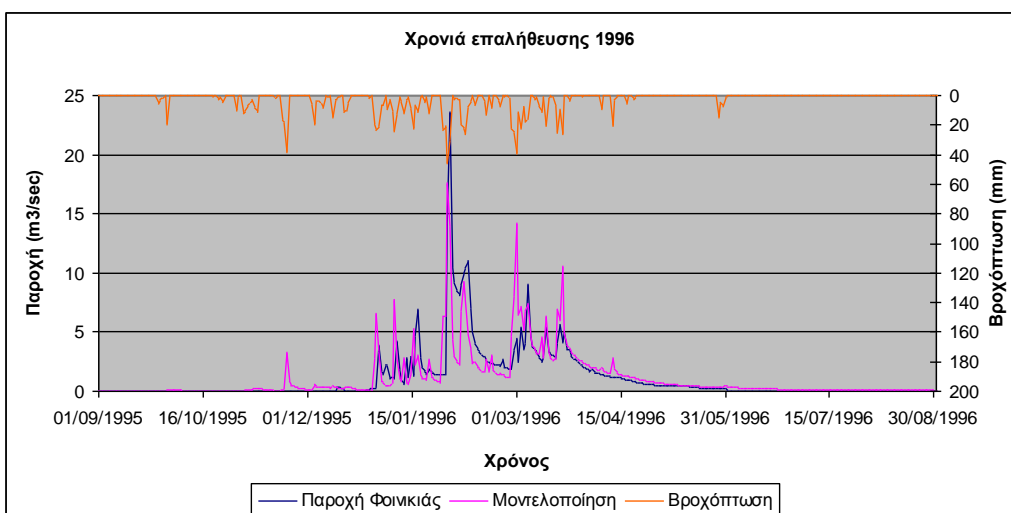
**Εικόνα 35. Σύγκριση υδρογραφήματων ημερησίων μετρήσεων και μοντελοποίησης του Γιόφυρου στο σημείο Φοινικιά για τη χρονιά βαθμονόμησης 1982**



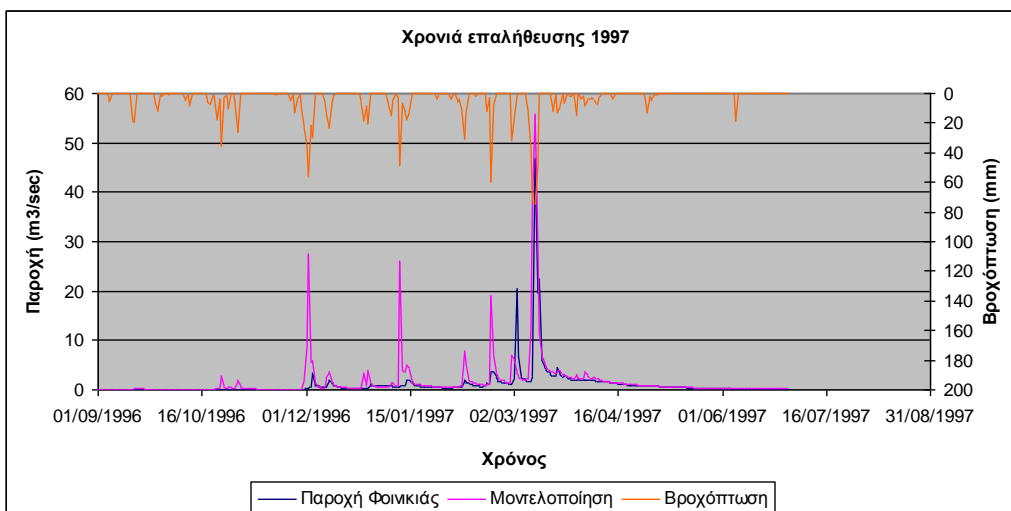
**Εικόνα 36. Σύγκριση υδρογραφήματων ημερησίων μετρήσεων και μοντελοποίησης του Γιόφυρου στο σημείο Φοινικιά για τη χρονιά βαθμονόμησης 1983**



**Εικόνα 37. Σύγκριση υδρογραφήματων ημερησίων μετρήσεων και μοντελοποίησης του Γιόφουρου στο σημείο Φοινικιά για τη χρονιά βαθμονόμησης 1984**

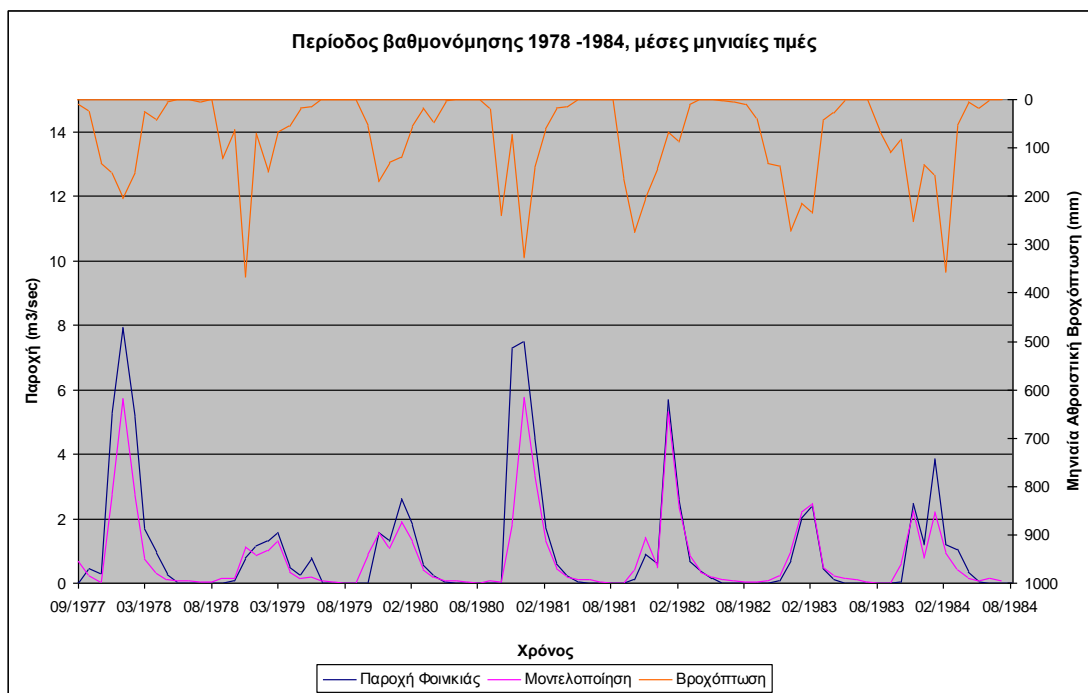


**Εικόνα 38. Σύγκριση υδρογραφήματων ημερησίων μετρήσεων και μοντελοποίησης του Γιόφουρου στο σημείο Φοινικιά για τη χρονιά επαλήθευσης 1996**

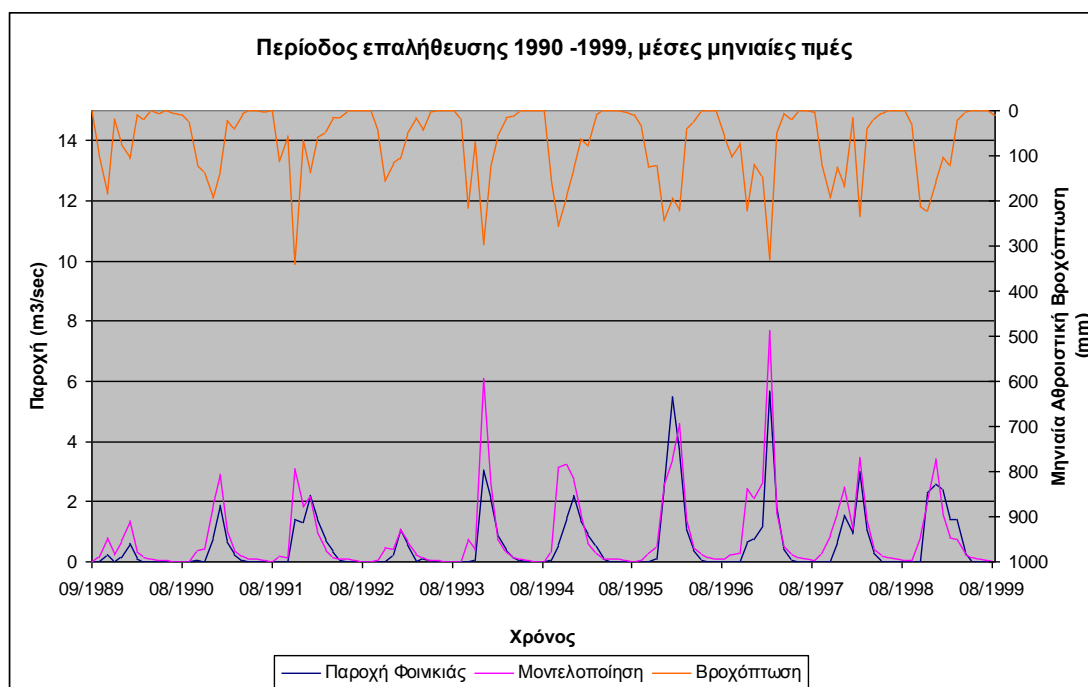


**Εικόνα 39. Σύγκριση υδρογραφήματων ημερησίων μετρήσεων και μοντελοποίησης του Γιόφουρου στο σημείο Φοινικιά για τη χρονιά επαλήθευσης 1997**





**Εικόνα 40. Σύγκριση υδρογραφήματων μηνιαίων μετρήσεων και μοντελοποίησης του Γιόφυρου στο σημείο Φοινικιά για την περίοδο βαθμονόμησης 1978 -1984**



**Εικόνα 41. Σύγκριση υδρογραφήματων ημερησίων μετρήσεων και μοντελοποίησης του Γιόφυρου στο σημείο Φοινικιά για την περίοδο επαλήθευσης 1990 - 1999**

Πίνακας 8. Στατιστικοί ποσοτικοί δείκτες εκτίμησης της σύγκλισης μοντελοποιημένων τιμών και μετρήσεων

| Στατιστικά Ροής Γιόφυρου |                         |         |                         |         |          |
|--------------------------|-------------------------|---------|-------------------------|---------|----------|
|                          | Περίοδος<br>Βαθμονόμηση |         | Περίοδος<br>Επαλήθευσης |         | Σύγκλιση |
|                          | Ημερήσια                | Μηνιαία | Ημερήσια                | Μηνιαία | Κριτήριο |
| NSE                      | 0.64                    | 0.77    | 0.17                    | 0.64    | >0.5     |
| mNSE                     | 0.59                    | 0.67    | 0.42                    | 0.59    | >0.5     |
| d                        | 0.88                    | 0.92    | 0.82                    | 0.92    | >0.65    |
| md                       | 0.78                    | 0.81    | 0.73                    | 0.80    | >0.65    |
| RSR                      | 0.60                    | 0.48    | 0.91                    | 0.60    | <0.70    |
| PBIAS                    | 15.37                   | 22.67   | -34.18                  | -30.79  | < 25 %   |

Πίνακας 9. Στατιστικοί ποσοτικοί δείκτες εκτίμησης της σύγκλισης μοντελοποιημένων τιμών και μετρήσεων, η περίοδος ημερήσιας βαθμονόμησης περιέχει μόνο τη χρονιά 1996

| Στατιστικά Ροής Γιόφυρου |                          |         |                         |         |          |
|--------------------------|--------------------------|---------|-------------------------|---------|----------|
|                          | Περίοδος<br>Βαθμονόμησης |         | Περίοδος<br>Επαλήθευσης |         | Σύγκλιση |
|                          | Ημερήσι<br>α             | Μηνιαία | Ημερήσι<br>α            | Μηνιαία | Κριτήριο |
| NSE                      | 0.64                     | 0.77    | 0.60                    | 0.64    | >0.5     |
| mNSE                     | 0.59                     | 0.67    | 0.57                    | 0.59    | >0.5     |
| d                        | 0.88                     | 0.92    | 0.88                    | 0.92    | >0.65    |
| md                       | 0.78                     | 0.81    | 0.78                    | 0.80    | >0.65    |
| PBIAS                    | 15.37                    | 22.67   | -3.90                   | 0.60    | <25%     |
| RSR                      | 0.60                     | 0.48    | 0.63                    | -30.79  | <0.70    |

Κατ' αρχάς πρέπει να επισημανθεί ότι ως περίοδος επαλήθευσης ορίστηκε το χρονικό διάστημα 1996 - 1997, αλλά παρατίθεται συμπληρωματικά ως περίοδος επαλήθευσης και το χρονικό διάστημα 1990 - 1999 με μηνιαίες τιμές λόγω της απουσίας ημερήσιων τιμών για μακρύ χρονικό διάστημα, το οποίο μπορεί να δώσει μια ικανοποιητική εικόνα για την απόδοση του μοντέλου, στη συνέχεια και για καλύτερη σύγκριση παρατίθενται και οι μέσες μηνιαίες τιμές της περιόδου βαθμονόμησης. Επίσης πολύ σημαντικό είναι το γεγονός ότι για τις περιόδους στις οποίες υπάρχουν ημερήσια δεδομένα οι μέσες μηνιαίες τιμές προκύπτουν μέσα

από τις ημερήσιες τιμές, ενώ για τις περιόδους στις οποίες δεν υπάρχουν ημερήσια δεδομένα πολλές φορές, αλλά άγνωστο σε ποιο βαθμό, οι μέσες μηνιαίες τιμές προκύπτουν μέσα από μία μέτρηση το μήνα, αυξάνοντας έτσι το σφάλμα και μειώνοντας την αντιπροσωπευτικότητα των μετρήσεων. Επίσης όσον αφορά τις ημερήσιες μετρήσεις δεν μπορούμε να ξέρουμε πότε έγινε η λήψη τους, πριν ή μετά από το γεγονός βροχόπτωσης, αυξάνοντας έτσι την αβεβαιότητα των μετρήσεων. Τέλος μέσα από την ανάγνωση των φύλλων μετρήσεων παρατηρήθηκε ότι κατά τους μήνες Μάιο - Ιούνιο ήταν πιο συχνή η χρήση μέσων μηνιαίων τιμών ή επαναλαμβανόμενων τιμών ενώ κατά την έναρξη της βροχερής περιόδου έπειτα από αντιπαραβολή με τα δεδομένα των βροχομετρικών σταθμών υπάρχουν κενά στις μετρήσεις. Λόγω αυτών συμπεραίνουμε ότι κατά τους θερινούς και φθινοπωρινούς μήνες, μέχρι και το Νοέμβριο ο έλεγχος του υδρομετρικού σταθμού ήταν ελλιπής ή απουσίαζε καταλήγοντας σε έλλειψη δεδομένων.

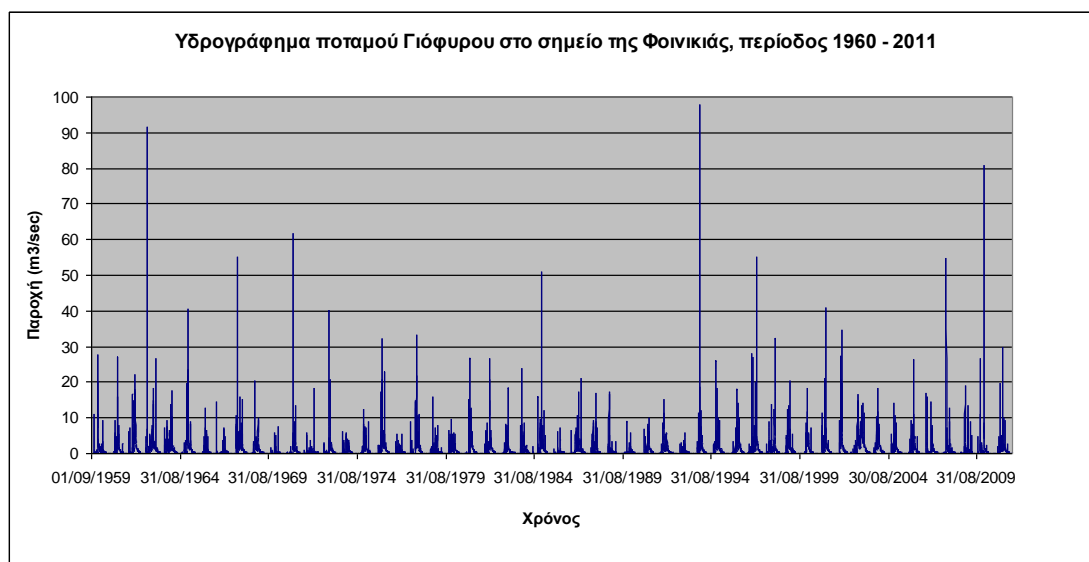
Παρατηρώντας τα υδρογραφήματα μπορούμε να συμπεράνουμε ότι το μοντέλο δίνει ρεαλιστικά αποτελέσματα με βάση τις μετρήσεις, γεγονός το οποίο επαληθεύεται και από τους ποσοτικούς δείκτες, το οποίο ήταν και ο κύριος σκοπός αυτής της μελέτης, βοηθούν όμως στην εξαγωγή και άλλων συμπερασμάτων. Παρατηρείται, ιδιαίτερα στις μηνιαίες τιμές, μία επαναλαμβανόμενη υπέρβαση παροχών των μηνών Οκτωβρίου - Νοεμβρίου σχεδόν όλων των ετών η οποία πιθανότατα εξηγείται μέσω της έλλειψης μετρήσεων. Παρατηρώντας το Φεβρουάριο του 1980 και την ιδιαίτερη διαφορά ανάμεσα στις μετρήσεις και τη μοντελοποίηση μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η διαφορά οφείλεται πιθανόν σε εμφάνιση χιονιού την οποία δεν μπόρεσε να μοντελοποιήσει το πρόγραμμα, γεγονός που αναδεικνύεται ως αδυναμία δεδομένων. Επίσης, όσον αφορά τη χρονιά 1997, μετά από την αντιπαραβολή των βροχοπτώσεων με τις μετρήσεις και τη μοντελοποίηση, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι οι μετρήσεις δεν είναι αντιπροσωπευτικές για την εκάστοτε ποσότητα βροχόπτωσης σχετικά με τρία πλημμυρικά γεγονότα, το Δεκέμβριο, τον Ιανουάριο και το Φεβρουάριο, περιμένουμε όμως ότι θα επηρεαστούν οι ποσοτικούς δείκτες για τη συγκεκριμένη περίοδο. Τέλος παρατηρούμε ότι τα περισσότερα πλημμυρικά γεγονότα και η βραχυπρόθεσμη εκφόρτιση αντιπροσωπεύονται ικανοποιητικά με βάση τα ημερήσια υδρογραφήματα, καθώς και η μεσοπρόθεσμη εκφόρτιση, το οποίο απεικονίζεται και στις ημερήσιες και στις μέσες μηνιαίες τιμές.

Όσον αφορά τους ποσοτικούς δείκτες, αυτοί κυμαίνονται σε αποδεκτά έως καλά επίπεδα με μόνη εξαίρεση την περίοδο επαλήθευσης σε ημερήσιο βήμα, λόγω του μικρού αριθμού ετών, το οποίο επαυξάνει την επίδραση των πλημμυρικών γεγονότων του 1997 τα οποία δεν έχουν αποδοθεί στις μετρήσεις. Αυτό φαίνεται παραβάλλοντας τους ποσοτικούς δείκτες για το 1995 μόνο οι οποίοι είναι ικανοποιητικοί και από το γεγονός ότι οι δείκτες mNSE και md, που αποδίδουν την προσέγγιση των χαμηλών τιμών, είναι αρκετά υψηλοί. Συγκρίνοντας τους δείκτες PBIAS της περιόδου βαθμονόμησης και της περιόδου επαλήθευσης παρατηρούμε ότι κατά τη βαθμονόμηση το μοντέλο τείνει να υποεκτιμήσει την παροχή ενώ κατά την επαλήθευση τείνει σε μεγαλύτερο βαθμό να την υπερεκτιμήσει που οφείλεται στο γεγονός ότι η περίοδος βαθμονόμησης είναι σχετικά υγρή περίοδος ενώ η περίοδος επαλήθευσης ξηρή καθώς και στο γεγονός ότι όσον αφορά την περίοδο επαλήθευσης τα περισσότερα δεδομένα είναι μηνιαία και όχι ημερήσια. Για την περίοδο επαλήθευσης έχουμε διαθέσιμα κυρίως μηνιαία στοιχεία στα οποία, εάν

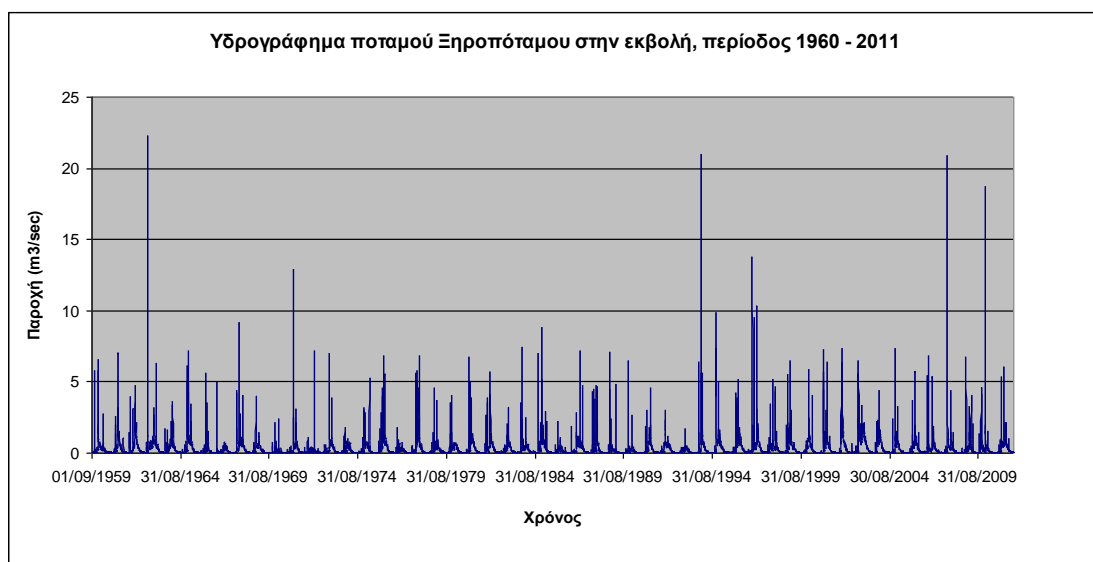
αντιπροσωπεύουν μία μέτρηση το μήνα, χάνονται τυχόν έντονα φαινόμενα, γεγονός που επαυξάνει την επίδραση της ξηρασίας όσον αφορά τις μετρήσεις. Κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης, με στόχο να αμβλυνθεί η υπερεκτίμηση κατά τις ξηρές περιόδους, εσκεμμένα επιλέχτηκε να γίνει ελαφρά υποεκτίμηση της περιόδου βαθμονόμησης, η οποία είναι υγρή, ώστε να αποδίδεται καλύτερα μεγαλύτερο φάσμα φαινομένων.

#### 4.3. Ανάλυση δεδομένων ροής Γιόφυρου και Ξηροπόταμου

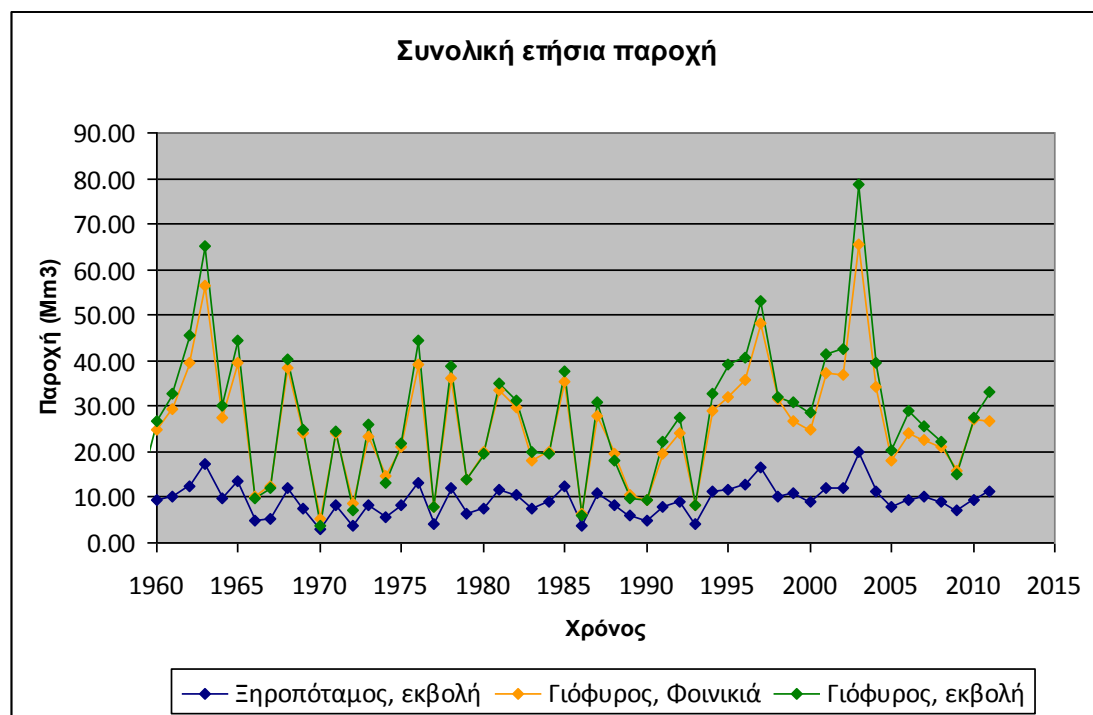
Μετά την οριστικοποίηση της βαθμονόμησης το μοντέλο έτρεξε για 56 χρόνια, από το 1957 έως το 2011 με σκοπό να παρέχει δεδομένα για την ανάλυση πλημμύρας που θα γίνει ως επόμενο βήμα. Στη συνέχεια παρατίθενται τα υδρογραφήματα του Γιόφυρου και του Ξηροπόταμου για το διάστημα 1960 - 2011, καθώς τα πρώτα τρία χρόνια είναι περίοδος προθέρμανσης (warm up period), τα υδρογραφήματα συνολικής ετήσιας παροχής και τα υδρογραφήματα ενός υγρού και ενός ξηρού έτος για την κάθε λεκάνη απορροής.



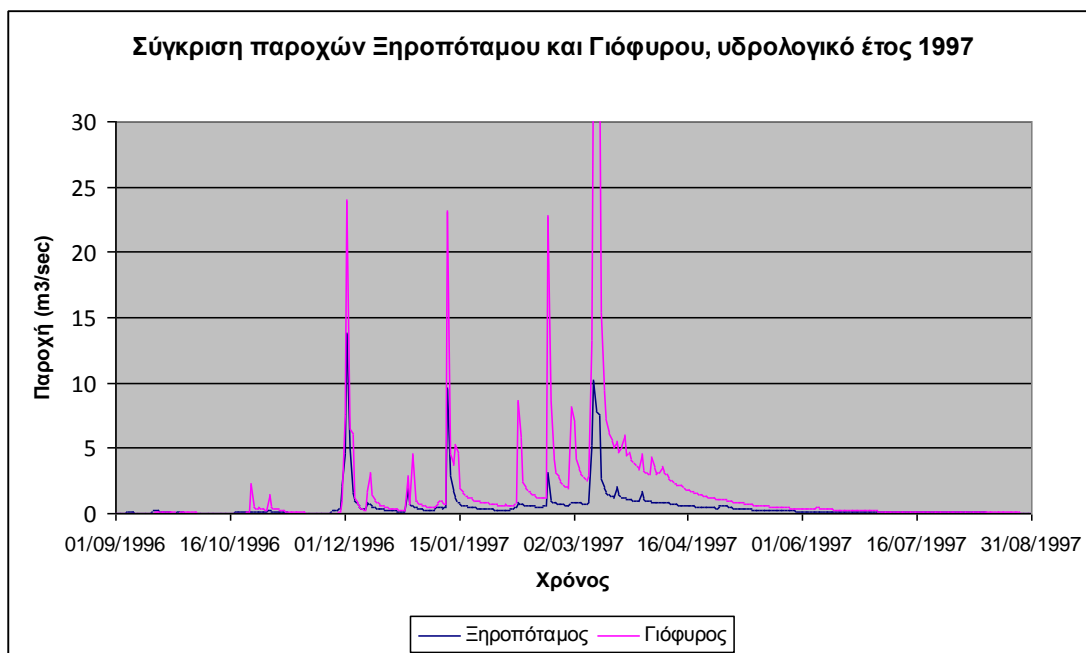
Εικόνα 42. Μοντελοποιημένο υδρογράφημα του Γιόφυρου στο σημείο της Φοινικιάς για την περίοδο 1960 - 2011



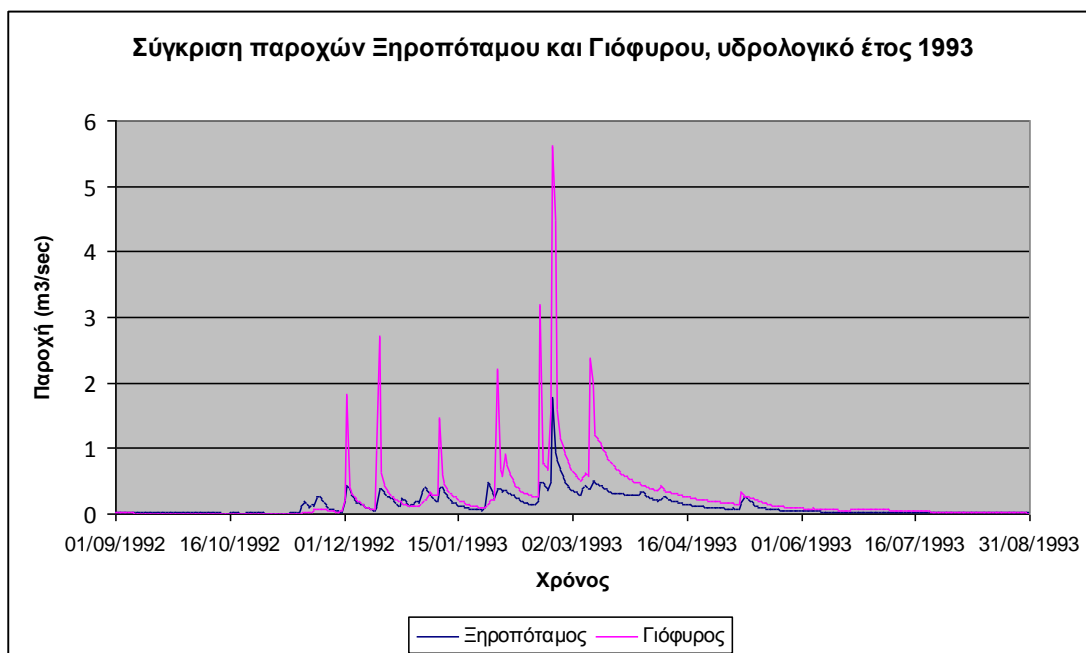
**Εικόνα 43. Μοντελοποιημένο υδρογράφημα του Ξηροπόταμου στην εκβολή για την περίοδο 1960 - 2011**



**Εικόνα 44. Συνολική ετήσια παροχή για το Γιόφυρο στη Φοινικιά και την εκβολή και στον Ξηροπόταμο στην εκβολή για την περίοδο 1960 - 2011**



Εικόνα 45. Σύγκριση παροχών Ξηροπόταμου και Γιόφυρου κατά τη διάρκεια υγρού έτους, υδρολογικό έτος 1997



Εικόνα 46. Σύγκριση παροχών Ξηροπόταμου και Γιόφυρου κατά τη διάρκεια ξηρού έτους, υδρολογικό έτος 1993

Αυτό που παρατηρείται άμεσα είναι η διαφορά του μεγέθους της παροχής ανάμεσα στις δύο λεκάνες απορροής καθώς ο Ξηροπόταμος έχει έκταση λεκάνης περίπου όσο το 1/4 της λεκάνης απορροής του Γιόφυρου. Επίσης παρατηρείται ότι η βασική ροή είναι περίπου η ίδια και στα δύο ποτάμια κατά τη μεγαλύτερη διάρκεια του έτους εκτός από τους μήνες Φεβρουάριο-Μάρτιο όπου και μεγιστοποιείται η συνεισφορά του υπογείου νερού. Η κύρια διαφορά στα δύο υδρογραφήματα δημιουργείται από την επιφανειακή και εδαφική ροή κυρίως κατά τη διάρκεια υγρών ετών.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι μέσες ετήσιες μοντελοποιημένες τιμές και για τις δύο λεκάνες συνολικά, όπως προκύπτουν στο αρχείο output.std του προγράμματος. Τονίζεται ότι οι μέσες ετήσιες τιμές ισοδυναμούν με το ετήσιο υδατικό ισοζύγιο και των δύο λεκανών απορροής συνολικά.

**Πίνακας 10. Μέσες ετήσιες μοντελοποιημένες τιμές συνολικά των λεκανών Γιόφυρου και Ξηροπόταμου για την περίοδο 1960 - 2011**

| Στάδιο υδατικού κύκλου               | mm   |
|--------------------------------------|------|
| Κατακρημνίσεις                       | 841  |
| Χιονόπτωση                           | 14   |
| Λιώσιμο χιονιού                      | 12   |
| Εξάχνωση                             | 2    |
| Επιφανειακή απορροή                  | 35   |
| Εδαφική απορροή                      | 107  |
| Υπόγεια εκφόρτιση                    | 127  |
| Ολική παροχή                         | 269  |
| Διήθηση εκτός εδάφους                | 349  |
| Ολική φόρτιση<br>υπόγειου υδροφορέα  | 349  |
| Φόρτιση βαθέως<br>υπόγειου υδροφορέα | 223  |
| Τριχοειδής ανύψωση<br>(Revar)        | 0    |
| Εξατμισοδιαπνοή                      | 506  |
| Δυνητική<br>εξατμισοδιαπνοή          | 1452 |

Η μέση ετήσια βροχόπτωση είναι σε λογικά επίπεδα και η χιονόπτωση είναι σχεδόν αμελητέα. Η ολική απορροή του ποταμού κυμαίνεται περίπου στο 32% των κατακρημνίσεων με κύριο συντελεστή την υπόγεια εκφόρτιση, ενώ η ολική απορροή πλην της υπόγειας συνισταμένης κυμαίνεται στο 17%, και η διήθηση στον υπόγειο υδροφορέα κυμαίνεται στο 41%. Τέλος η εξατμισοδιαπνοή κυμαίνεται περίπου στο 60% των κατακρημνίσεων. Όσον αφορά τη φόρτιση του βαθέως υπόγειου υδροφορέα αυτή προέκυψε από την ανάγκη ρεαλιστικότερης αναπαράστασης του υπόγειου νερού κατά τη βαθμονόμηση και όσον αφορά το μοντέλο παύει να αλληλεπιδρά πλέον με τον υδρολογικό κύκλο. Δεχόμενοι ότι το νερό του αβαθούς υδροφορέα εκφορτίζεται όλο στο ποτάμι στο μοντέλο, διότι το **GWQMN** είναι στο μηδέν και τους θερινούς μήνες δεν υπάρχει ροή, μπορούμε να υποθέσουμε ότι το νερό του βαθέως υπόγειου υδροφορέα αντιστοιχεί στην αναπλήρωση του νερού γενικά του υπόγειου υδροφορέα, πριν την εφαρμογή της άρδευσης, και κυμαίνεται στο 26% των κατακρημνισμάτων. Ενδεικτικά, παρατηρούμε ότι οι τιμές υπόγειας φόρτισης, εξατμισοδιαπνοής και απορροής ως προς τα κατακρημνίσματα κυμαίνονται στα επίπεδα του μέσου όρου της Κρήτης.

#### **4.4. Ανάλυση πλημμύρας για το Γιόφυρο και Ξηροπόταμο**

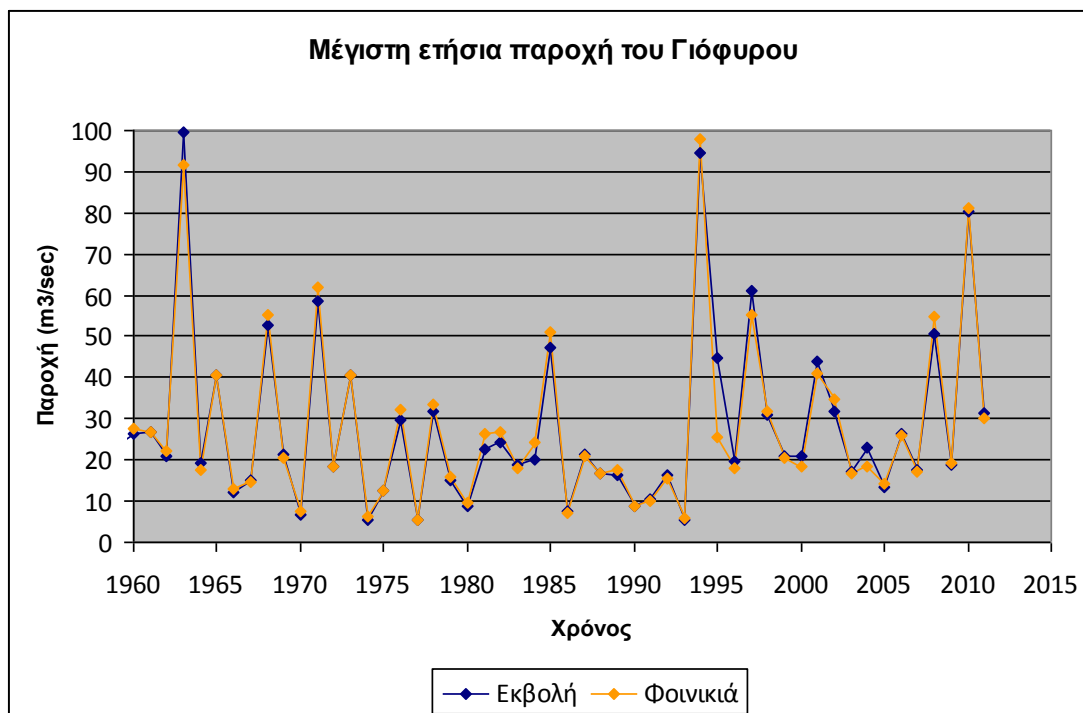
Κατ' αρχάς μελετήθηκε η τάση εμφάνισης πλημμυρικών επεισοδίων καθώς γενικότερα στην Κρήτη και την Ελλάδα μετά την περίοδο ξηρασίας στα τέλη της δεκαετίας του '80 αυξήθηκε η τάση εμφάνισής τους. Στη συνέχεια έγινε ανάλυση



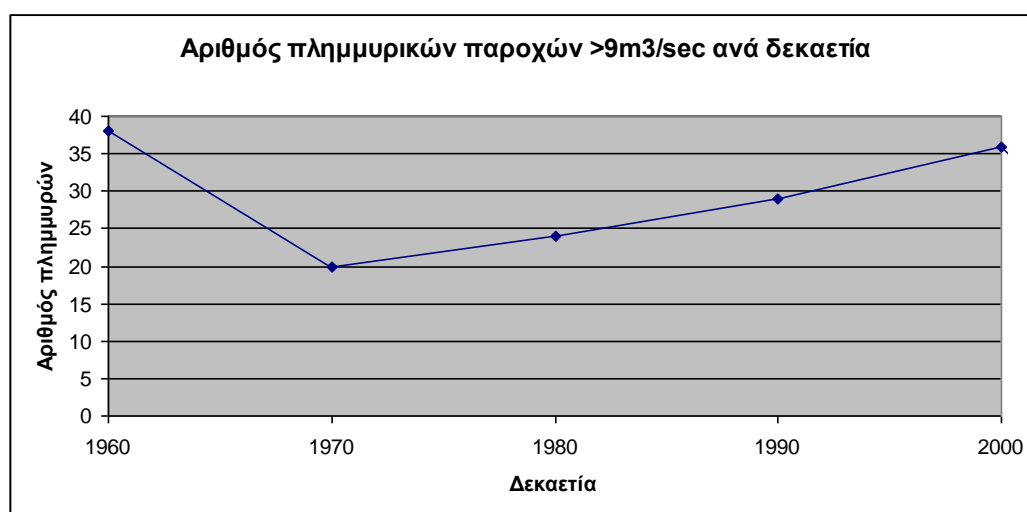
συχνότητας αιχμών πλημμύρας και υπολογίστηκαν οι παροχές που αντιστοιχούν σε ορισμένες περιόδους επαναφοράς για τα δύο ποτάμια.

#### 4.4.1. Μελέτη της τάσης εμφάνισης πλημμυρών

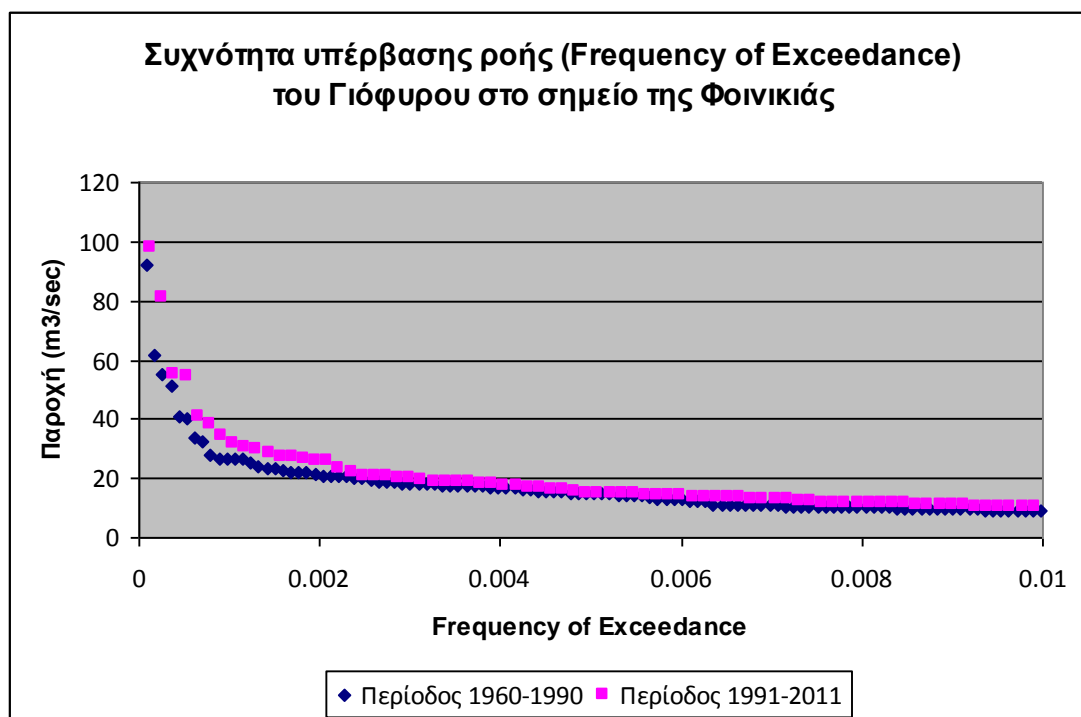
Από τα δεδομένα που παρέχει το μοντέλο για την περίοδο 1960 - 2011 επιλέχτηκαν 199 τιμές παροχής του Γιόφυρου που αντιστοιχούν σε τιμές μεγαλύτερες των  $9\text{m}^3/\text{sec}$ . Οι τιμές αυτές αντιστοιχούν σε 154 ανεξάρτητα πλημμυρικά φαινόμενα. Για τον Ξηροπόταμο επιλέχτηκαν επίσης 199 τιμές παροχής που αντιστοιχούν σε τιμές μεγαλύτερες των  $2.5\text{m}^3/\text{sec}$  και αντιστοιχούν σε 157 ανεξάρτητα πλημμυρικά φαινόμενα.



Εικόνα 47. Μοντελοποιημένες μέγιστες ετήσιες παροχές του Γιόφυρου στο σημείο της Φοινικιάς και στην εκβολή για την περίοδο 1960 - 2011



Εικόνα 48. Αριθμός πλημμυρικών παροχών μεγαλύτερων των  $8.971\text{m}^3/\text{sec}$  ανά δεκαετία του Γιόφυρου στο σημείο της Φοινικιάς για την περίοδο 1960 - 2010



Εικόνα 49. Συχνότητα υπέρβασης ροής για τον ποταμό Γιόφυρο στο σημείο της Φοινικιάς για τις περιόδους 1960-1990 και 1991-2011

Πίνακας 11. Πλημμυρικά δεδομένα για το Γιόφυρο στο σημείο της Φοινικιάς για την περίοδο 1960 - 2011

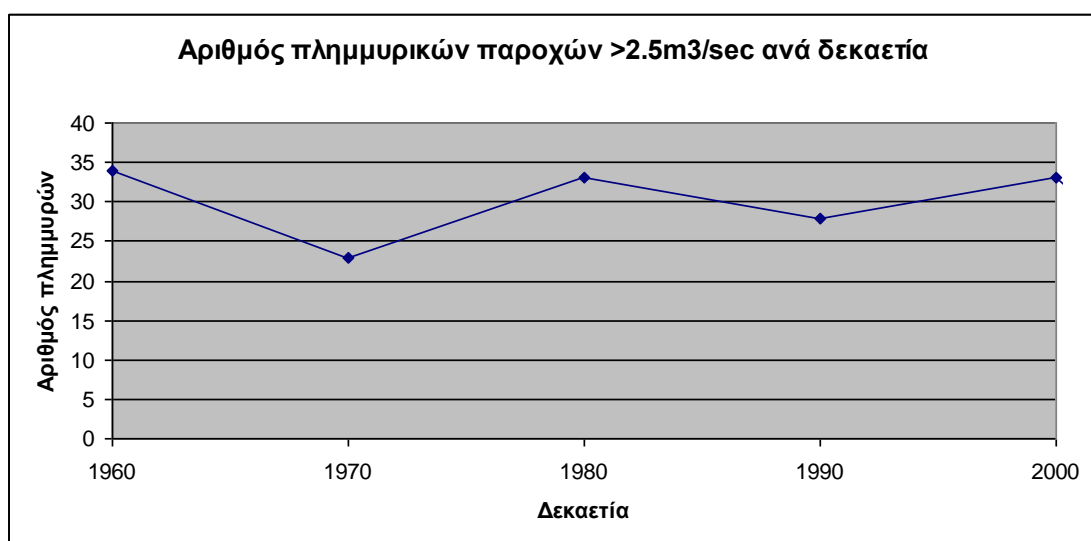
| Δεκαετία  | Πλημμύρες >9m³/sec | Μέγιστη πλημμύρα | Πλημμύρες ανά έτος |
|-----------|--------------------|------------------|--------------------|
| 1960-1969 | 38                 | 91.79            | 3.8                |
| 1970-1979 | 20                 | 61.73            | 2                  |
| 1980-1989 | 24                 | 50.99            | 2.4                |
| 1990-1999 | 29                 | 98               | 2.9                |
| 2000-2009 | 36                 | 54.81            | 3.6                |
| 2010-2011 | 7                  | 80.97            | 3.5                |
| Άθροισμα  | 154                |                  |                    |

Παρατηρούμε στον πίνακα #11 ότι η συχνότητα εμφάνισης πλημμυρικών παροχών  $>9\text{m}^3/\text{sec}$  μειώθηκε τη δεκαετία του '70, και αυξήθηκε κατά τη διάρκεια του '80 και του '90 έως ότου επανήλθε κατά τη δεκαετία του 2000 στα επίπεδα του '60. Όσον αφορά τη δεκαετία του '10, για αυτήν την περίοδο έχουμε δεδομένα μόνο για δύο έτη συνεπώς δεν μπορούν να βγουν σαφή συμπεράσματα. Στην εικόνα #49 παρατίθεται η συχνότητα υπέρβασης ροής για τις περιόδους 1960-1990 και 1991-2011 καθώς το 1991 ήταν κομβική χρονιά ελάχιστης ροής. Σε αυτό φαίνεται ότι δεν έχουν ενταθεί τα πλημμυρικά φαινόμενα σε ένταση.

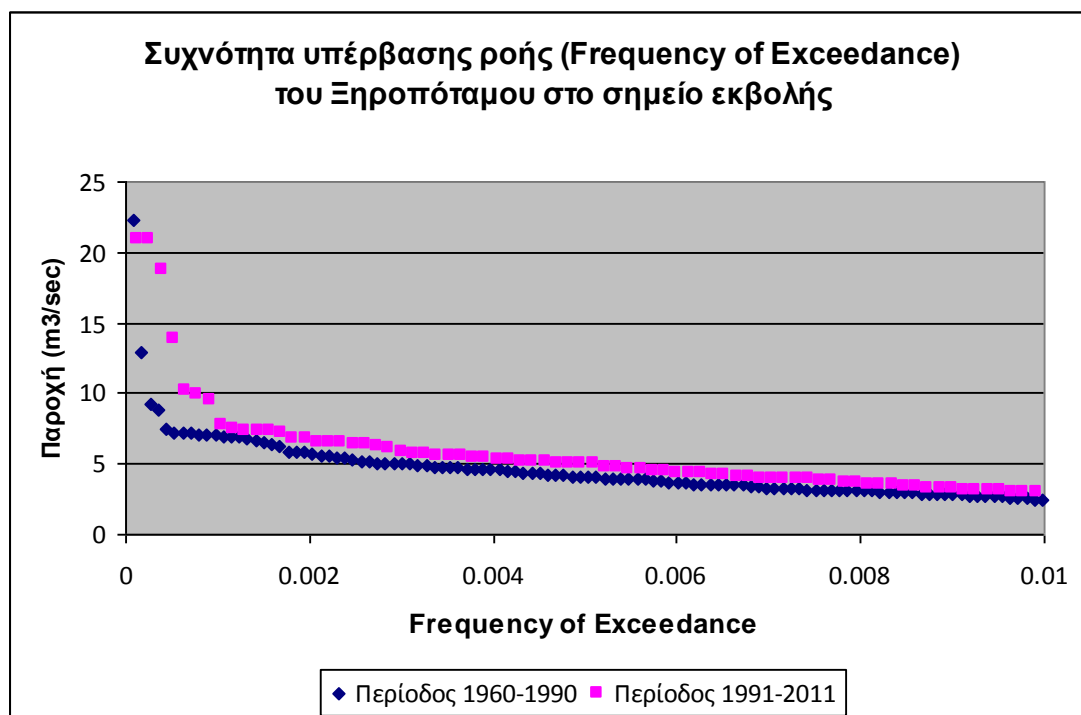
Αντίστοιχα παρατίθενται και τα αποτελέσματα για τον Ξηροπόταμο.



Εικόνα 50. Μοντελοποιημένες μέγιστες ετήσιες παροχές του Ξηροπόταμου στο σημείο εκβολής για την περίοδο 1960 - 2011



Εικόνα 51. Αριθμός πλημμυρικών παροχών μεγαλύτερων των 2.5m³/sec ανά δεκαετία του Ξηροπόταμου στο σημείο εκβολής για την περίοδο 1960 - 2010



Εικόνα 52. Συχνότητα υπέρβασης ροής για τον Ξηροπόταμο στο σημείο εκβολής για τις περιόδους 1960-1990 και 1991-2011

Πίνακας 12. Πλημμυρικά δεδομένα για τον Ξηροπόταμο στο σημείο εκβολής για την περίοδο 1960 - 2011

| Δεκαετία  | Πλημμύρες >2.5m3/sec | Μέγιστη πλημμύρα | Πλημμύρες ανά έτος |
|-----------|----------------------|------------------|--------------------|
| 1960-1969 | 34                   | 22.27            | 3.4                |
| 1970-1979 | 23                   | 12.95            | 2.3                |
| 1980-1989 | 33                   | 8.818            | 3.3                |
| 1990-1999 | 28                   | 20.98            | 2.8                |
| 2000-2009 | 33                   | 20.96            | 3.3                |
| 2010-2011 | 6                    | 18.76            | 3                  |
| Άθροισμα  | 157                  |                  |                    |

Για τον Ξηροπόταμο παρατηρείται αυξομειωτική τάση ανάλογα τη δεκαετία, με τη δεκαετία του '70 να έχει επίσης έντονη μειωτική τάση και παράλληλα να μην ξεπερνώνται τα επίπεδα της δεκαετίας του '60. Αντίθετα όμως από το Γιόφυρο στην εικόνα #52 παρατηρείται αύξηση της έντασης των πιο ακραίων πλημμυρικών επεισοδίων μετά το 1991.

Μελετώντας τα μετεωρολογικά δεδομένα, εικόνες #13, #14, παρατηρείται μια μείωση των ανώτατων θερμοκρασιών τη δεκαετία του '70, την περίοδο που μειώνονται αισθητά και τα πλημμυρικά φαινόμενα. Από τη δεκαετία του '80 και μετά παρατηρείται μια αισθητή αύξηση των θερμοκρασιακών μεγίστων, εικόνα #14, ενώ παράλληλα τα θερμοκρασιακά ελάχιστα εμφανίζουν μικρή και σταθερή αύξηση στο σύνολο των διαθέσιμων μετεωρολογικών δεδομένων, εικόνα #15, οι οποίες συμβαδίζουν με την αύξηση της εμφάνισης πλημμυρικών φαινομένων. Παράλληλα παρατηρείται αλλαγή στη διακύμανση των βροχοπτώσεων, ορεογραφικού χαρακτήρα, εικόνα #12. Κατά την περίοδο του '70 μειώνονται οι βροχοπτώσεις στα χαμηλά υψόμετρα, στη συνέχεια αυξάνονται μόνο στα υψηλά υψόμετρα τη

δεκαετία του '80 που έχουμε αύξηση των πλημμυρικών επεισοδίων και στους δύο ποταμούς, για να επανέλθουν στα επίπεδα της δεκαετίας του '60 στα τέλη της δεκαετίας του '90.

Βέβαια, η ανάλυση αυτή έχει περιορισμούς. Ο ορισμός της πλημμύρας όπως δίνεται από το [Oxford Dictionary, \(2014\)](#), είναι η υπερχείλιση μεγάλων ποσοτήτων νερού εκτός των συνήθων ορίων, σε περιοχές οι οποίες είναι συνήθως ξηρές. Όσον αφορά το συγκεκριμένο υδρολογικό τομέα ενδιαφέροντος πλημμύρα προκύπτει όταν εμφανίζεται επιφανειακή απορροή ή ροή του ποταμού εκτός κοίτης. Τα δεδομένα αυτής της ανάλυσης όμως, δεν επιλέχτηκαν με βάση την εμφάνιση επιφανειακής απορροής, καθώς όπως αναφέρθηκε στη βαθμονόμηση λόγω έλλειψης ωριαίων δεδομένων και συνεπώς μετρήσεων έντασης βροχόπτωσης πολλές ακραίες παροχές αποδίδονται ως εδαφική και όχι ως επιφανειακή απορροή. Δεν επιλέχτηκαν επίσης ούτε με βάση την εμφάνιση πλημμύρας, ροής εκτός της κοίτης, σε συγκεκριμένο σημείο του ποταμού. Απλώς επιλέχτηκε ένας ικανός αριθμός ακραίων παροχών, οι οποίες υποθέτουμε λόγω υψηλής τιμής, ότι αντιστοιχούν σε πλημμυρικά επεισόδια, και με βάση αυτές προσπαθήσαμε να βγάλουμε ένα πρώτο συμπέρασμα όσον αφορά τη συχνότητα εμφάνισης τέτοιων ακραίων φαινομένων.

#### **4.4.2. Ανάλυση συχνότητας αιχμών πλημμύρας**

Για την ανάλυση συχνότητας πλημμύρας χρησιμοποιήθηκαν οι ετήσιες μέγιστες ημερήσιες μοντελοποιημένες παροχές της περιόδου 1960 - 2011 των ποταμών Γιόφυρου και Ξηροπόταμου. Στα δεδομένα προσαρμόστηκαν οι κατανομές log Pearson III, Extreme Value 1 ή αλλιώς Gumbel και Generalized Extreme Value (GEV). Ο υπολογισμός των παραμέτρων, παροχών και σφαλμάτων έγινε με τη μέθοδο των ροπών για την κατανομή log Pearson III και Gumbel, και με τη μέθοδο Probability Weighted Moments (PMW) για την κατανομή GEV. Για τον έλεγχο της καταλληλότητας της εκάστοτε κατανομής χρησιμοποιήθηκαν τα κριτήρια Kolmogorov - Smirnov και Anderson - Darling. Οι υπολογισμοί έγιναν στο Excel 2003 και επαληθεύθηκαν με το πρόγραμμα Easy Fit Professional 5.5 (Evaluation Version).

Τα δεδομένα παροχής ελέγχθηκαν πρώτα ως προς τη στατιστική τυχαιότητα, την ομογένεια, την επάρκεια και την ακρίβειά τους. Όσον αφορά την κλιματική αλλαγή αυτή θεωρείται ότι τα αποτελέσματά της είναι ορατά σε κλίμακα χιλιάδων ετών και συνεπώς δεν λαμβάνεται υπόψη η επιρροή της στην μελέτη ανάλυσης συχνότητας πλημμύρας. Ως δεδομένα χρησιμοποιούνται τα ετήσια μέγιστα ημερήσια παροχής συνεπώς δεν υπάρχει εξάρτηση μεταξύ των δεδομένων. Οι πλημμυρικές παροχές στις υπό εξέταση παροχές προέρχονται από ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις καθώς η παρουσία χιονιού στις δύο λεκάνες παροχής δεν είναι σημαντική. Μεταβολές στις δύο αυτές λεκάνες απορροής δεν βρέθηκε να έχει υπάρξει τα τελευταία πενήντα χρόνια, η μόνη διευθέτηση ροής που έχει καταχωρηθεί είναι στην εκβολή του Γιόφυρου με τον εγκιβωτισμό της κοίτης, και η οποία βρίσκεται μετά το σημείο της Φοινικιάς από το οποίο είναι διαθέσιμες οι μετρήσεις παροχής, παράλληλα έντονη αστικοποίηση φαίνεται να έχει υπάρξει επίσης κοντά στην εκβολή και μετά τη Φοινικιά. Όσον αφορά την ακρίβεια των δεδομένων τα κλιματικά δεδομένα θεωρείται ότι δεν εμπεριέχουν μεγάλα σφάλματα και παράλληλα μέσω της βαθμονόμησης του μοντέλου έγινε προσπάθεια να επιτευχθεί μεγάλη ακρίβεια σε σχέση με τις αρχικές μετρήσεις

παροχής, συνυπολογίζοντας όμως και την αβεβαιότητα των αρχικών μετρήσεων καθώς οι ημερήσιες μετρήσεις βαθμονόμησης του μοντέλου αφορούσαν μία μέτρηση την ημέρα και όχι μέσο όρο, η αβεβαιότητα είναι αυξημένη αλλά όχι απαγορευτική. Τέλος, τα δεδομένα 52 ετών θεωρούνται επαρκή για τη συγκεκριμένη ανάλυση συχνότητας.

Στους πίνακες #13 και #14 παρατίθενται οι τιμές των παραμέτρων των κατανομών για την περίπτωση του κάθε ποταμού. Στις εικόνες #53 με #55 παρουσιάζονται γραφικά τα αποτελέσματα της κάθε κατανομής για το Γιόφυρο, στις εικόνες #56 με #58 παρουσιάζονται γραφικά τα αποτελέσματα της κάθε κατανομής για τον Ξηροπόταμο, ενώ στις εικόνες #59 και #60 παρουσιάζονται τα γραφήματα Q-Q για την εφαρμογή των κατανομών στους δύο ποταμούς. Στους πίνακες #15 και #16 παρατίθενται τα αποτελέσματα των παροχών μαζί με τα τυπικά σφάλματα για διάφορες περιόδους επαναφοράς και στους πίνακες #17 και #18 τα αποτελέσματα των ελέγχων K-S και A-D για κάθε κατανομή και ποταμό.

**Πίνακας 13. Παράμετροι των κατανομών για την περίπτωση του Γιόφυρου**

|                        |                  |                  |                   |
|------------------------|------------------|------------------|-------------------|
| <b>log Pearson III</b> | $\alpha=0.0305$  | $\beta=501.1403$ | $\gamma=-12.2138$ |
| <b>Gumbel</b>          | $\sigma=16.2271$ | $\mu=18.4010$    |                   |
| <b>GEV</b>             | $k=-0.2711$      | $\sigma=10.9489$ | $\mu=17.4873$     |

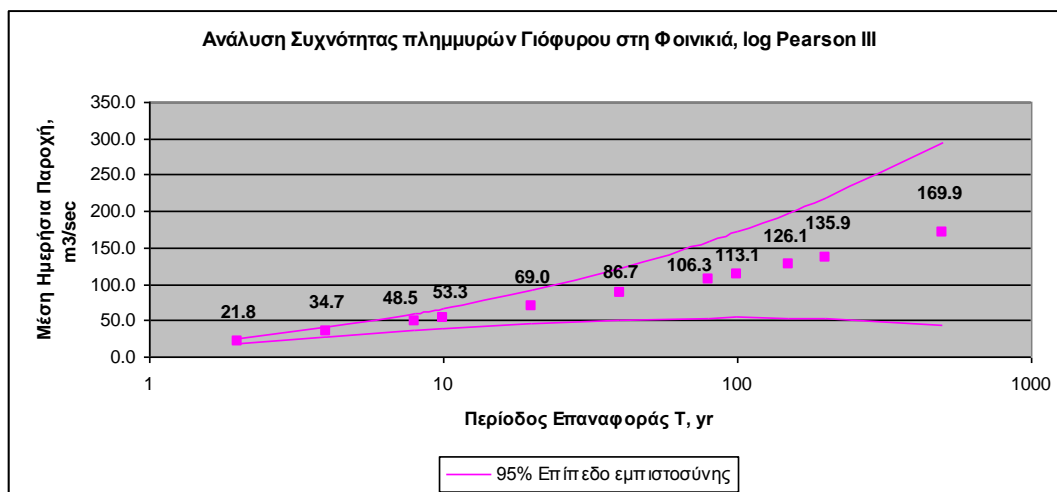
**Πίνακας 14. Παράμετροι των κατανομών για την περίπτωση του Ξηροπόταμου**

|                        |                 |                  |                   |
|------------------------|-----------------|------------------|-------------------|
| <b>log Pearson III</b> | $\alpha=0.0227$ | $\beta=625.7610$ | $\gamma=-12.4331$ |
| <b>Gumbel</b>          | $\sigma=3.6128$ | $\mu=5.0436$     |                   |
| <b>GEV</b>             | $k=-0.2361$     | $\sigma=2.4162$  | $\mu=5.0068$      |

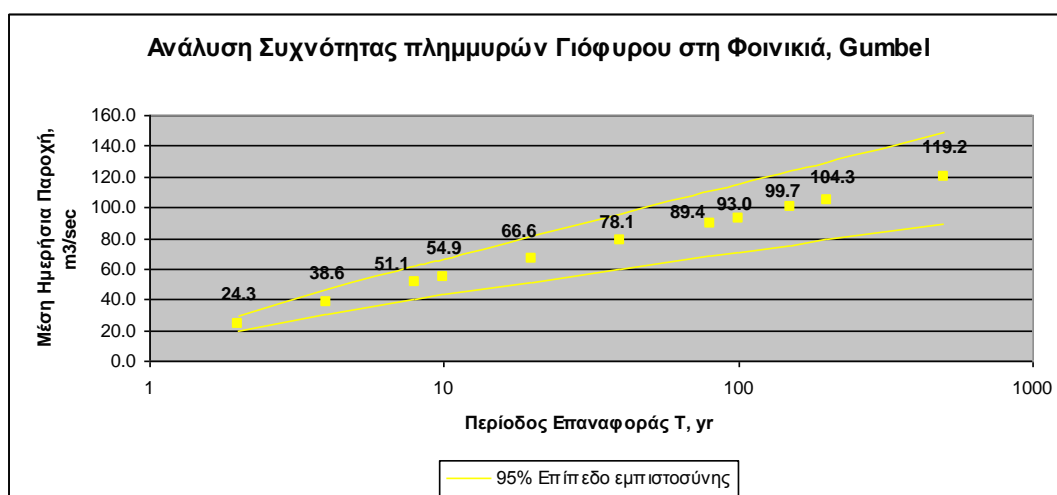
Όπου:

- $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  είναι οι εκτιμητές των παραμέτρων  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  της Γάμμα κατανομής
- $\mu$  είναι ο εκτιμητής της παραμέτρου θέσης (location parameter)
- $\sigma$  είναι ο εκτιμητής της παραμέτρου τάξης (scale parameter)
- $k$  είναι ο εκτιμητής της παραμέτρου σχήματος (shape parameter)

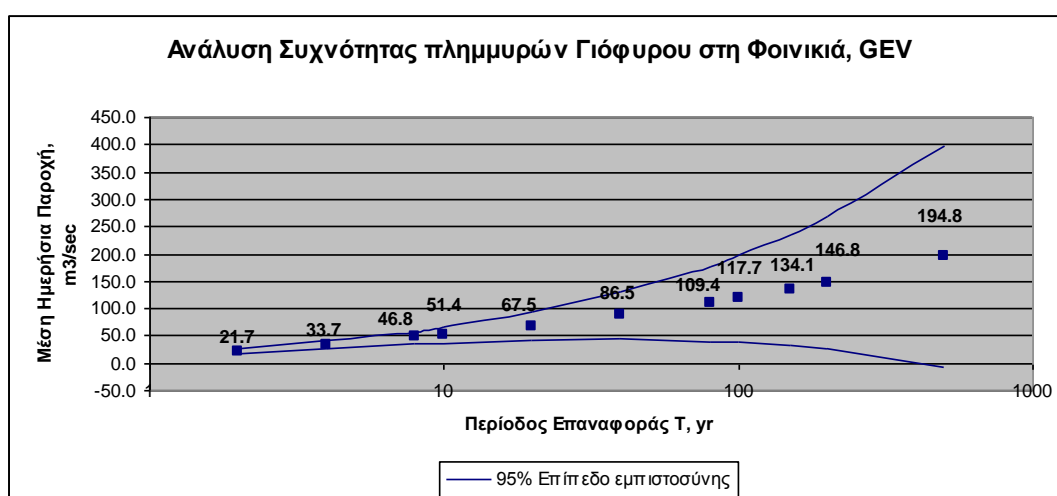




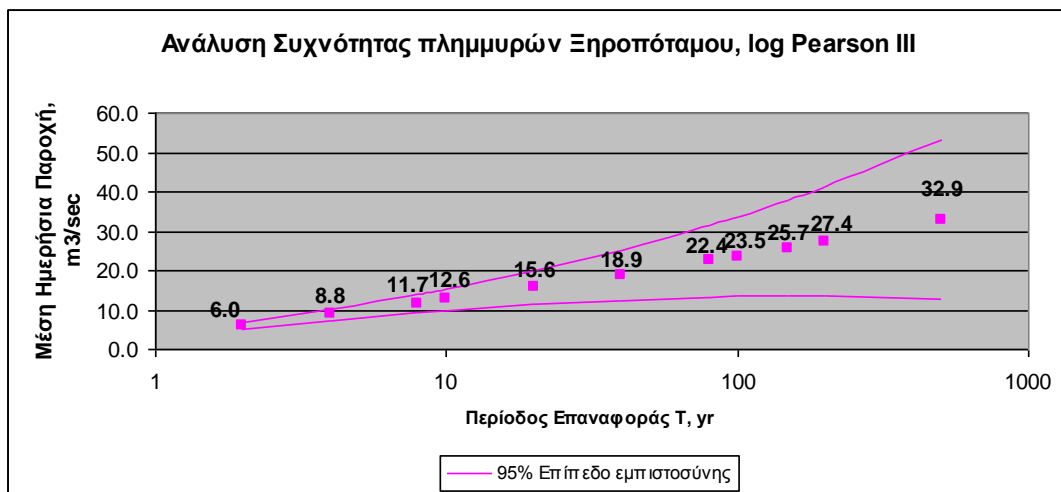
Εικόνα 53. Ανάλυση συχνότητας αιχμών πλημμύρας log Pearson III, για το Γιόφυρο στο σημείο της Φοινικιάς, με μοντελοποιημένα δεδομένα της περιόδου 1960-2011



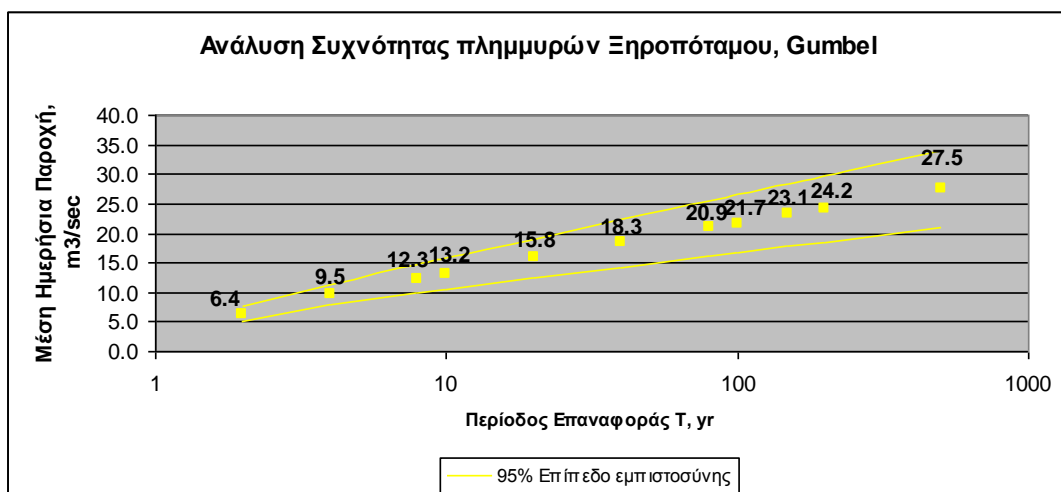
Εικόνα 54. Ανάλυση συχνότητας αιχμών πλημμύρας Gumbel, για το Γιόφυρο στο σημείο της Φοινικιάς, με μοντελοποιημένα δεδομένα της περιόδου 1960-2011



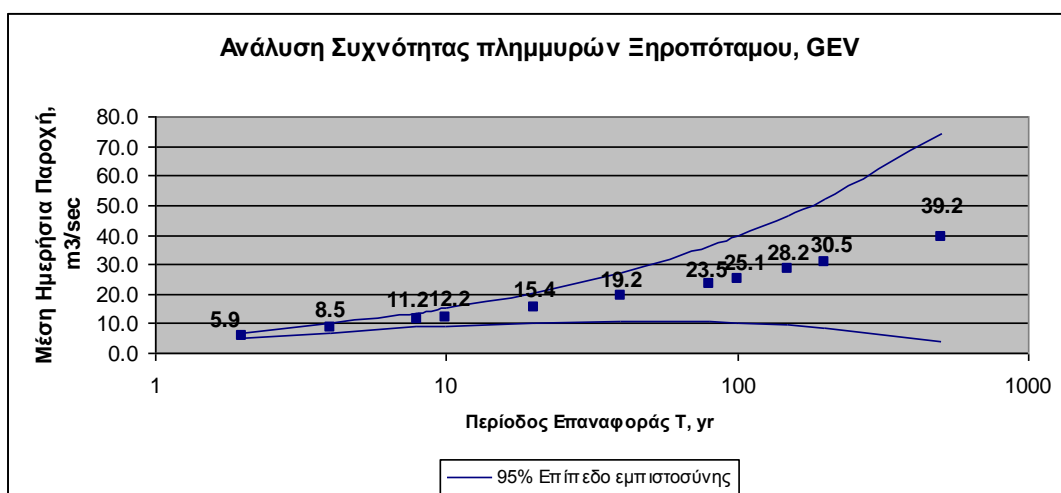
Εικόνα 55. Ανάλυση συχνότητας αιχμών πλημμύρας GEV, για το Γιόφυρο στο σημείο της Φοινικιάς, με μοντελοποιημένα δεδομένα της περιόδου 1960-2011



Εικόνα 56. Ανάλυση συχνότητας αιχμών πλημμύρας log Pearson III, για τον Ξηροπόταμο στην εκβολή, με μοντελοποιημένα δεδομένα της περιόδου 1960-2011



Εικόνα 57. Ανάλυση συχνότητας αιχμών πλημμύρας log Pearson III, για τον Ξηροπόταμο στην εκβολή, με μοντελοποιημένα δεδομένα της περιόδου 1960-2011



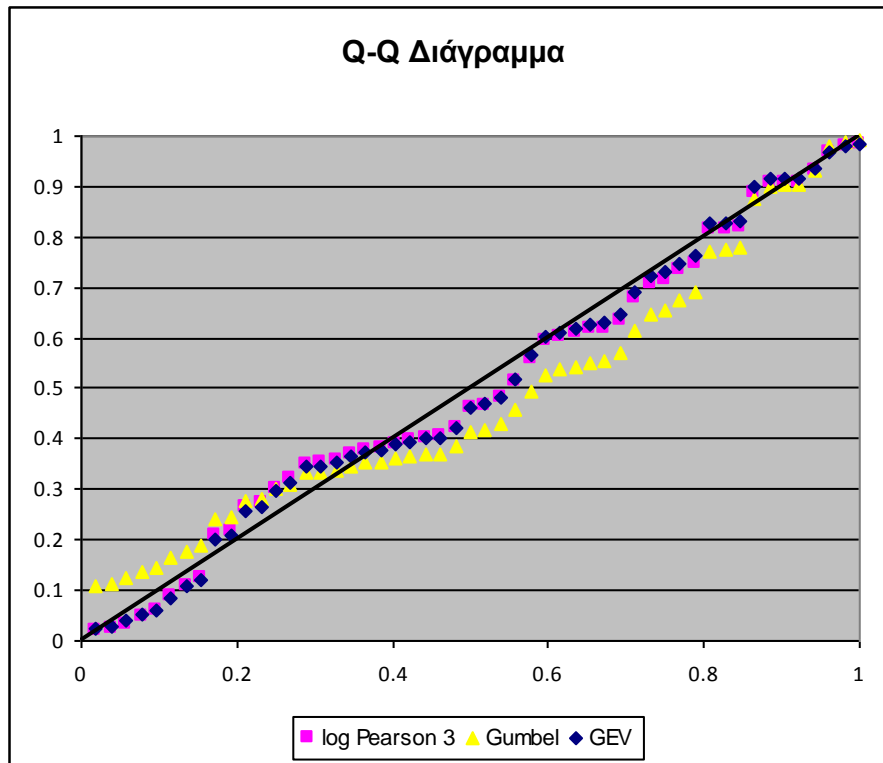
Εικόνα 58. Ανάλυση συχνότητας αιχμών πλημμύρας log Pearson III, για τον Ξηροπόταμο στην εκβολή, με μοντελοποιημένα δεδομένα της περιόδου 1960-2011

**Πίνακας 15. Μέσες ημερήσιες παροχές και (σφάλμα) αιχμών πλημμύρας για συγκεκριμένες περιόδους επαναφοράς του Γιόφυρου στο σημείο της Φοινικιάς**

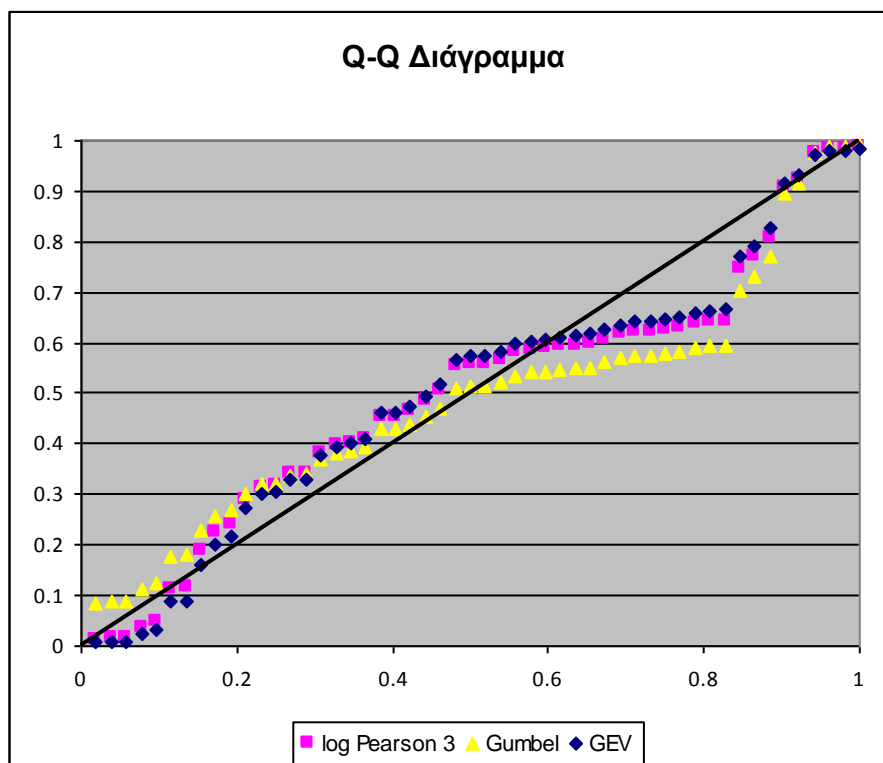
| <b>T</b>   | <b>log<br/>Pearson<br/>III</b> | <b>Gumbel</b>   | <b>GEV</b>       |
|------------|--------------------------------|-----------------|------------------|
| <b>2</b>   | 21.8<br>(2.2)                  | 24.3<br>(2.6)   | 21.7<br>(2.2)    |
| <b>4</b>   | 34.7<br>(3.8)                  | 38.6<br>(4.0)   | 33.7<br>(3.6)    |
| <b>8</b>   | 48.5<br>(6.2)                  | 51.1<br>(5.5)   | 46.8<br>(6.1)    |
| <b>10</b>  | 53.3<br>(7.2)                  | 54.9<br>(6.0)   | 51.4<br>(7.3)    |
| <b>20</b>  | 69.0<br>(11.6)                 | 66.6<br>(7.6)   | 67.5<br>(12.9)   |
| <b>40</b>  | 86.7<br>(17.9)                 | 78.1<br>(9.2)   | 86.5<br>(21.9)   |
| <b>80</b>  | 106.3<br>(26.6)                | 89.4<br>(10.8)  | 109.4<br>(35.2)  |
| <b>100</b> | 113.1<br>(30.0)                | 93.0<br>(11.3)  | 117.7<br>(40.7)  |
| <b>150</b> | 126.1<br>(36.9)                | 99.7<br>(12.3)  | 134.1<br>(52.3)  |
| <b>200</b> | 135.9<br>(42.4)                | 104.3<br>(12.9) | 146.8<br>(62.0)  |
| <b>500</b> | 169.9<br>(64.1)                | 119.2<br>(15.1) | 194.8<br>(103.1) |

**Πίνακας 16. Μέσες ημερήσιες παροχές και (σφάλμα) αιχμών πλημμύρας για συγκεκριμένες περιόδους επαναφοράς του Ξηροπόταμου στην εκβολή**

| <b>T</b>   | <b>log<br/>Pearson<br/>III</b> | <b>Gumbel</b> | <b>GEV</b>      |
|------------|--------------------------------|---------------|-----------------|
| <b>2</b>   | 6.0 (0.5)                      | 6.4 (0.6)     | 5.9 (0.5)       |
| <b>4</b>   | 8.8 (0.8)                      | 9.5 (0.9)     | 8.5 (0.8)       |
| <b>8</b>   | 11.7<br>(1.2)                  | 12.3<br>(1.2) | 11.2<br>(1.2)   |
| <b>10</b>  | 12.6<br>(1.4)                  | 13.2<br>(1.3) | 12.2<br>(1.5)   |
| <b>20</b>  | 15.6<br>(2.2)                  | 15.8<br>(1.7) | 15.4<br>(2.5)   |
| <b>40</b>  | 18.9<br>(3.2)                  | 18.3<br>(2.0) | 19.2<br>(4.2)   |
| <b>80</b>  | 22.4<br>(4.6)                  | 20.9<br>(2.4) | 23.5<br>(6.5)   |
| <b>100</b> | 23.5<br>(5.2)                  | 21.7<br>(2.5) | 25.1<br>(7.5)   |
| <b>150</b> | 25.7<br>(6.2)                  | 23.1<br>(2.7) | 28.2<br>(9.5)   |
| <b>200</b> | 27.4<br>(7.1)                  | 24.2<br>(2.9) | 30.5<br>(11.02) |
| <b>500</b> | 32.9<br>(10.3)                 | 27.5<br>(3.4) | 39.2<br>(18.0)  |



Εικόνα 59. Διάγραμμα πιθανοτήτων Q-Q για τις κατανομές log Pearson III, Gumbel και GEV για το Γιόφυρο στο σημείο της Φοινικιάς



Εικόνα 60. Διάγραμμα πιθανοτήτων Q-Q για τις κατανομές log Pearson III, Gumbel και GEV για τον Ξηροπόταμο στην εκβολή

**Πίνακας 17. Κριτήρια καταλληλότητας της εκάστοτε συνάρτησης κατανομής για την ανάλυση συχνότητας αιχμών πλημμύρας του Γιόφυρου στο σημείο της Φοινικιάς, τα κριτήρια δίνονται από τους D' Agostino and Stephens, (1986)**

| T                  | log Pearson III | Gumbel | GEV   | Κριτήριο Καταλληλότητας για $\alpha=0.05\%$ |
|--------------------|-----------------|--------|-------|---------------------------------------------|
| Kolmogorov-Smirnov | 0.068           | 0.110  | 0.062 | 0.186                                       |
| Anderson-Darling   | 0.335           | 1.351  | 0.302 | 0.786/0.752/0.752                           |

**Πίνακας 18. Κριτήρια καταλληλότητας της εκάστοτε συνάρτησης κατανομής για την ανάλυση συχνότητας αιχμών πλημμύρας του Ξηροπόταμου στην εκβολή, τα κριτήρια δίνονται από τους D' Agostino and Stephens, (1986)**

| T                  | log Pearson III | Gumbel | GEV   | Κριτήριο Καταλληλότητας για $\alpha=0.05\%$ |
|--------------------|-----------------|--------|-------|---------------------------------------------|
| Kolmogorov-Smirnov | 0.167           | 0.215  | 0.146 | 0.186                                       |
| Anderson-Darling   | 1.396           | 2.282  | 1.316 | 0.786/0.752/0.752                           |

Παρατηρώντας τα διαγράμματα Q-Q για τους δύο ποταμούς και τους πίνακες #17 και #18, φαίνεται ότι η GEV κατανομή προσεγγίζει καλύτερα τη σχέση μεταξύ περιόδου επαναφοράς και παροχής. Παρόλα αυτά και η log Pearson III πετυχαίνει καλά αποτελέσματα στα δύο τεστ, ενώ όπως φαίνεται και στα διαγράμματα Q-Q είναι πολύ κοντά στην καμπύλη της GEV. Η κατανομή Gumbel αποκλίνει από την κανονικότητα με βάση τα δύο τεστ και τα διαγράμματα Q-Q ενώ παράλληλα δίνει και τις μικρότερες τιμές παροχής για μεγάλες περιόδους επαναφοράς, συνεπώς υστερεί των άλλων δύο και θεωρείται μη αντιπροσωπευτική. Σημειώνεται ότι το διάστημα εμπιστοσύνης 95% στις μεγάλες περιόδους επαναφοράς είναι διευρυμένο για τις κατανομές log Pearson III και GEV σε σχέση με της Gumbel. Τέλος παρατηρείται ότι και οι τρεις κατανομές αποδίδουν καλύτερα στην περίπτωση του Γιόφυρου, όπου έχει γίνει και η βαθμονόμηση και χειρότερα στην περίπτωση του Ξηροπόταμου.

Τα δεδομένα των πινάκων #15 και #16 μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μελέτη υδραυλικών έργων καθώς παρέχουν τις περιόδους επαναφοράς ακραίων πλημμυρικών παροχών.

## 5. Συμπεράσματα

Ολοκληρώθηκε η μοντελοποίηση της υδρολογίας της λεκάνης απορροής του Γιόφυρου. Η χρησιμοποίηση του SWAT σε συνδυασμό με τα διαθέσιμα ημερήσια δεδομένα έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα στη μοντελοποίηση της υδρολογίας και στις χαμηλές και στις υψηλές ροές παρά την ανεπάρκεια δεδομένων. Η βαθμονόμηση της λεκάνης απορροής του Γιόφυρου μπόρεσε να χρησιμοποιηθεί και στην όμορη λεκάνη απορροής του Ξηροπόταμου για τον οποίο δεν υπάρχουν μετρήσεις παροχής. Δημιουργήθηκαν χρονοσειρές μοντελοποιημένων δεδομένων παροχής της τελευταίας πεντηκονταετίας για το Γιόφυρο και για τον Ξηροπόταμο, οι οποίες έδωσαν τη δυνατότητα να γίνει ανάλυση συχνότητας πλημμύρων και για τα δύο ποτάμια. Με αυτό τον τρόπο δημιουργήθηκε μεθοδολογία υπολογισμού υδραυλικών χαρακτηριστικών σε περιοχές χωρίς δεδομένα για την μελέτη υδραυλικών κατασκευών.

Ολοκληρώθηκε η ανάλυση συχνότητας αιχμών πλημμύρας η οποία παρέχει δεδομένα, περιόδους επαναφοράς πλημμυρικών φαινομένων, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε υδραυλικές κατασκευές. Επίσης μελετήθηκε η τάση εμφάνισης και έντασης πλημμυρικών επεισοδίων σε συνάρτηση με την αύξηση των κατώτατων ημερησίων θερμοκρασιών και της αλλαγής της διακύμανσης της βροχόπτωσης. Τα αποτελέσματα ήταν μεικτά όσον αφορά τα δύο ποτάμια αλλά παρατηρήθηκε ότι και στα δύο τα τελευταία δέκα χρόνια η εμφάνιση πλημμυρικών φαινομένων έχει αυξηθεί στα επίπεδα της δεκαετίας του '60 παράλληλα με την αύξηση των θερμοκρασιακών ελαχίστων και μεγίστων τα τελευταία 40 χρόνια.

Ταυτόχρονα αναδείχτηκαν δύο σοβαροί περιορισμοί οι οποίοι υπήρξαν καθοριστικοί αλλά όχι απροσπέλαστοι. Ο πρώτος αφορά τα δεδομένα και ο δεύτερος την αντιμετώπιση του υπογείου υδροφορέα από το πρόγραμμα. Όσον αφορά τα δεδομένα, η χρησιμοποίηση ημερήσιων δεδομένων αποδίδει τις υδρολογικές διεργασίες ως ένα βαθμό μόνο καθώς η ένταση βροχόπτωσης που διαμορφώνει την εμφάνιση επιφανειακής απορροής καθορίζεται πιθανολογικά αντί να υπολογίζεται και επίσης χάνονται οι αιχμές παροχής οι οποίες είναι σημαντικές και διαρκούν για διαστήματα λίγων ωρών καθώς η μέτρηση παροχής γίνεται μία φορά την ημέρα. Όσον αφορά τη φιλοσοφία αντιμετώπισης του υπόγειου υδροφορέα, αυτή δημιούργησε προβλήματα λόγω της απουσίας μεταφοράς νερού υπογείως μεταξύ των HRU και των υπολεκάνων η οποία εντάθηκε λόγω της υδρογεωλογικού χαρακτήρα της περιοχής και της παροδικής ροής του ποταμού. Επίσης αναδείχτηκε το ειδικό βάρος που έχει η χρησιμοποίηση των ποιοτικών δεικτών και συγκεκριμένα η σύγκριση των υδρογραφήματων, κατά την περίοδο της βαθμονόμησης, σε σχέση με τους στατιστικούς δείκτες οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν συμπληρωματικά.

Όσον αφορά τη μελλοντική έρευνα αυτή μπορεί να κατευθυνθεί στο κομμάτι της μεταφοράς ιζήματος και θρεπτικών, αζώτου και φωσφόρου, για τη λεκάνη απορροής του Γιόφυρου υπό την προϋπόθεση ότι είναι διαθέσιμη επαρκής ποσότητα μετρήσεων. Επίσης προτείνεται σε πρώτο βαθμό η δειγματοληψία αιωρούμενων στερεών και θρεπτικών σε τακτά χρονικά διαστήματα σε διάφορα σημεία του ποταμού καθώς ο Γιόφυρος είναι ένα περιβαλλοντικά επιβαρυνόμενο ποτάμι. Και επιπρόσθετα, η παρακολούθηση του υπόγειου υδροφορέα και η



συλλογή μετεωρολογικών δεδομένων και δεδομένων παροχής σε ωριαία βάση για ακριβέστερη υδρολογική αναπαράσταση.

## 6. Βιβλιογραφία

Abbaspour, K. C. 2013. SWAT-CUP 2012: SWAT Calibration and Uncertainty Programs - A User Manual. EAWAG, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology.

Abramowitz, M., and I. A. Stegun. 1965. Handbook of Mathematical Functions. Dover Publications: New York.

Alcamo, J., Florke, M., and M. Marker. 2007. Future long-term changes in global water resources driven by socio-economic and climatic changes. *Hydrological Sciences - Journal des Sciences Hydrologique* **52(2)**: 247-275.

Anderson, E. A. 1976. A point energy and mass balance model of snow cover. NOAA Technical Report NWS 19. USDC, National Weather Service.

Arnold, J. G., Chinnasamy, S., Di Luzio, M., Haney, E. B., Kannan, N., and M. White. 2010. The HUMUS/SWAT National Water Quality Modeling System. USDA-ARS, Grassland, Soil and Water Research Laboratory: Temple, TX; 1-2.

Arnold, J. G., and N. Fohrer. 2005. SWAT2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling. *Hydrological Processes* **19**: 563-572.

Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., and J. R. Williams. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment, Part I: Model development. *Journal of the American Water Resources Association* **34 (1)**: 73-89.

Barnard, J. D. 1948. Heat units as a measure of canning crop maturity. *The Canner* **106**: 28.

Bicknell, B. R., J. C. Imhoff, J. L. Kittle, Jr., A. S. Donigian, Jr., and R. C. Johanson. 1993. Hydrologic Simulation Program - FORTRAN (HSPF): User's Manual for Release 10. Report No.EPA/600/R-93/174. U.S. EPA Environmental Research Lab: Athens, Ga.

Bingner, R. L., and F. D. Theurer. 2005. AnnAGNPS Technical Processes: Documentation Version 2. Διαθέσιμο διαδικτυακά στη σελίδα [http://www.ars.usda.gov/SP2UserFiles/Place/64080510/AGNPS/PLModel/Document/Tech\\_Doc.PDF](http://www.ars.usda.gov/SP2UserFiles/Place/64080510/AGNPS/PLModel/Document/Tech_Doc.PDF). Προσπελάθηκε στις 12 Απριλίου 2014.

Borah, D. K., and M. Bera. 2003. Watershed-Scale Hydrologic and Nonpoint - Source Pollution Models: Review of Mathematical Bases. *Transaction of the ASAE* **46(6)**: 1553-1566.

Boskidis, I., Gikas, G. D., Pisinaras, V., and V. A. Tsihrintzis. 2010. Spatial and temporal changes of water quality, and SWAT modeling of Vosvozis river basin, North Greece. *Journal of Environmental Science and Health Part A* **45**: 1421-1440.

Bouraoui, F., I. Braud, and T. A. Dillaha. 2002. Chapter 22: ANSWERS: A nonpoint-source pollution model for water, sediment, and nutrient losses. In V. P. Singh and D. K. Frevert. Mathematical Models of Small Watershed Hydrology and Applications. Water Resources Publications: Highlands Ranch, Colo; 833-882.

Chartzoulakis, K. S., Paranychanakis, N. V., and A. N. Angelakis. 2001. Water resources management in the Island of Crete, Greece, with emphasis on the agricultural use. *Water Policy* **3**: 193-205.

Chow, V. T., Maidment D. R., and L. W. Mays. 1988. Applied Hydrology. McGraw-Hill, Inc: New York, NY.

Conan, C., De Marsily, G., Bouraoui, F., and G. Bidoglio. 2003. A long-term hydrological modelling of the Upper Guadiana river basin (Spain). *Physics and Chemistry of the Earth* **28**: 193-200.

D' Agostino, R., B., and M. A. Stephens. 1986. Goodnes-of-fit Techniques. Marcel Dekker: New York.

Di Luzio, M., Srinivasan, R., and J. G. Arnold. 2002. Integration of watershed tools and SWAT model into BASINS. *Journal of the AWRA* **38(4)**: 1127-1141.

El-Nasr, A. A., Arnold, J. G., Feyen, J., and J. Berlamont. 2005. Modelling the hydrology of a catchment using a distributed and a semi-distributed model. *Hydrologic Processes* **19**: 573-587.

European Environmental Agency. 2012. Report 12/2012, Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2012, An indicator-based report. Copenhagen, Denmark; 27.

Ewen, J., Parkin, G., and P. E. O' Connel. 2000. SHETRAN: Distributed River Basin Flow and Transport Modeling System. *Journal of Hydrologic Engineering* **5(3)**: 250-258.

Froebrich, J., and M. J. Kirkby. 2006. Applicability of tempQsim models to relevant processes in temporary streams. Geophysical Research Abstracts Vol. 8. European Geosciences Union.

Gassman, P. W., Reyes, M. R., Green, C. H., and J. G. Arnold. 2007. The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions. *Transaction of the ASABE* **50(4)**: 1211-1250.

Giannakopoulos, C., Le Sager, P., Bindi, M., Moriondo, M., Kostopoulou, E., and C. M. Coodess. 2009. Climatic changes and associated impacts in the Mediterranean resulting from a 2° C global warming. *Global and Planetary Change* In Press.

Gikas, G. D., Yiannakopoulou, T., and V. A. Tsihrintzis. 2006. Modeling of non-point source pollution in a Mediterranean drainage basin. *Environmental Modeling and Assessment* **11**: 219-233.

Giorgi, F., Bi, X., and J. Pal. 2004. Mean, interannual variability and trends in a regional climate change experiment over Europe. II: climate change scenarios (2071-2100). *Climate Dynamics* **23**: 839-858.

Glavan, M., Pintar, M., and M. Volk. 2012. Land use change in a 200-year period and its effect on blue and green water flow in two Slovenian Mediterranean catchments -- lessons for the future. *Hydrological Processes* **27(26)**: 3964-3980.

Grayson, R., and G. Blöschl. 2000. Chapter 3: Spatial Modelling of Catchment Dynamics. In *Spatial Patterns in Catchment Hydrology: Observation and Modelling*. Cambridge University Press: UK; 51-81.

Gupta, H. V., Sorooshian, S., and P. O. Yapo. 1999. Status of Automatic Calibration for Hydrologic Models: Comparison with Multilevel Expert Calibration. *Journal of Hydrologic Engineering* **4(2)**: 135-143.

Haines, A. T., B. L. Finlayson, and T. A. McMahon. 1988. A global classification of river regimes. *Applied Geography* **8**: 255-272.

Hargreaves, G. H., and Z. A. Samani. 1982. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture* **1**: 96-99.

Henrichs, T., and J. Alcamo. 2001. Chapter 5: Europe's water stress today and in the future. In *Euro-Wasser: Model-Based Assessment of European Water Resources and Hydrology in the Face of Global Change*. Centre for Environmental Systems Research, University of Kassel: Kassel; 5-1-5-10.

Hosking, J. R. M., Wallis, J. R., and E. F. Wood. 1985. Estimation of the Generalized Extreme-Value Distribution by the Method of Probability-Weighted Moments. *Technometrics* **27**(3): 251-261.

Im, S., Brannan, K. M., Mostaghimi, S., and S. M. Kim. 2014. Comparison of HSPF and SWAT models performance for runoff and sediment yield prediction. *Journal of Environmental Science and Health Part A* **42**: 1561-1570.

Interagency Advisory Committee on Water Data (IACWD). 1982. Guidelines for Determining Flood Flow Frequency, Bulletin #17 of the Hydrology Subcommittee. U.S. Department of the Interior Geological Survey, Office of Water Data Coordination: Reston, Virginia.

Intercontinental Panel on Climate Change (IPPC). 2007. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge University Press: Canada; 554-559.

Jensen, M. E., Burnman, R. G., and R. G. Allen. 1990. Evapotranspiration and irrigation water requirements. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 70. ASCE: N. Y.; 332.

Jeong, J., Kannan, N., Arnold, J., Glick, R., Gosselink, L., and R. Srinivasan. 2010. Development and Integration of Sub-hourly Rainfall-Runoff Modeling Capability Within a Watershed Model. *Water Resource Management* **45**: 4505-4527.

Kim, N. W., Chung, I. M., Won, Y. S., and J. G. Arnold. 2008. Development and application of the integrated SWAT-MODFLOW model. *Journal of Hydrology* **356**: 1-16.

Koulouri, M., and C. Giourga. 2007. Land abandonment and slope gradient as key factors of soil erosion in Mediterranean terraced lands. *Catena* **69**: 274-281.

Koutroulis, A. G., Tsanis, I. K., and I. N. Daliakopoulos. 2010. Seasonality of floods and their hydrometeorologic characteristics in the island of Crete. *Journal of Hydrology* **394**: 90-100.

Koutroulis, A. G., Vrochidou, A. E. K., and I. K. Tsanis. 2011. Spatiotemporal Characteristics of Meteorological Drought for the Island of Crete. *Journal of Hydrometeorology* **12**: 206-224.

Koutroulis, A. G., Tsanis, I. K., Daliakopoulos, I. N., and D. Jacob. 2013. Impact of climate change on water resources status: A case study for Crete Island, Greece. *Journal of Hydrology* **479**: 146-158.

Krause, P., Boyle, D. P., and F. Base. 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences* **5**: 89-97.

Kronvang, B., Jeppesen, E., Conley, D. J., Sondergaard, M., Larsen, S. E., Ovesen, N. B., and J. Carstensen. 2005. Nutrient pressures and ecological responses to nutrient loading reductions in Danish streams, lakes and coastal waters. *Journal of Hydrology* **304**: 274-288.

Kundzewicz, Z. W., Mata, L. J., Arnell, N. W., Döll, P., Jimenez, B., Miller, K., Oki, T., Sen, Z., and I. Shiklomanov. 2008. The implications of projected climate change for freshwater resources and their management. *Hydrological Sciences* **53**(1): 3-10.

Lane, L. J. 1983. Chapter 19: Transmission Losses. In Soil Conservation Service. National Engineering Handbook, section 4: Hydrology. U.S. Government Printing Office: Washington, D. C.; 19-1--19-21.

Legates, D. R., and G. J. McCabe Jr. 1999. Evaluating the use of "goodness of fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research* **35**(1): 233-241.

Mimikou, M. A., and E. A. Baltas. 2013. Assessment of Climate Change Impacts in Greece: A General Overview. *American Journal of Climate Change* **3**: 46-56.

Millington, N., Das, S., and S. P. Simonovic. 2011. The Comparison of GEV, Log-Pearson Type 3 and Gumbel Distributions in the Upper Thames River Watershed under Global Climate Models. University of Western Ontario, Depart. of Civil and Environ. Engineer.: London, Ontario, Canada.

Molina-Navarro, E., Martinez-Perez, S., Sastre-Merin, A., and R. Bienes-Allas. 2014. Hydrologic Modeling in a Small Mediterranean Basin as a Tool to Assess the Feasibility of a Limno-Reservoir. *Journal of Environmental Quality* **43**: 121-131.

Moraetis, D., Efstathiou, D., Stamati, F., Tzoraki, O., Nikolaidis, N. P., Schoor, J. L., and K. Vozinakis. 2010. High-frequency monitoring for the identification of hydrological and bio-geochemical processes in a Mediterranean river basin. *Journal of Hydrology* **389**: 127-136.

Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., and T. L. Veith. 2007. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE* **50**(3): 885-900.

Naoum, S., and I. K. Tsanis. 2003. Temporal and spatial variation of annual rainfall on the island of Crete, Greece. *Hydrological Processes* **17**:1899-1922.

Nasr, A., Bruen, M., Jordan, P., Moles, R., Kiely, G., and P. Byrne. 2007. A comparison of SWAT, HSPF and SHETRAN/GOPC for modelling phosphorus export from three catchments in Ireland. *Water Research* **41**: 1065-1073.

Natural Environmental Resource Council (NERC). 1975. Flood Studies Report. NERC: London; Vol. 1-5, 1100.

Natural Resources Conservation Service Soil Survey Staff. 1996. National soil survey handbook, Title 430-VI. U.S. Government Printing Office: Washington D.C.

Neitsch<sup>1</sup>, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., and J. R. Williams. 2011. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009. Technical Report-406. USDA-ARS, Grassland, Soil and Water Research Laboratory: Temple, Texas; 1-2.

Neitsch<sup>2</sup>, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., and J. R. Williams. 2011. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009. Technical Report-406. USDA-ARS, Grassland, Soil and Water Research Laboratory: Temple, Texas; 1-181.

Neitsch<sup>3</sup>, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., and J. R. Williams. 2011. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009. Technical Report-406. USDA-ARS, Grassland, Soil and Water Research Laboratory: Temple, Texas; 5-6.

Nicks, A. D. 1974. Stochastic generation of the occurrence, pattern and location of maximum amount of daily rainfall. In Proceedings Symposium on Statistical Hydrology, Aug.-Sep. 1971. Misc. Publ. No. 1275. USDA-ARS: Tucson, AZ; 154-171.

Nicks, A. D., Lane, L. J., and G. A. Gander. 1995. Chapter 2: Weather generator. In Flanagan, D. C., Nearing M. A. 1995. USDA-Water Erosion Prediction Project: Hillslope profile and watershed model documentation. NSERL Report 10. National Soil Erosion Research Laboratory: West Lafayette, IN; 2.1-2.22.

Nikolaidis, N., P., Bouraoui, F., and G. Bidoglio. 2013. Hydrologic and geochemical modeling of a karstic Mediterranean watershed. *Journal of Hydrology* **477**: 129-138.

Nunes, J. P., Seixas, J., and N. R. Pacheco. 2008. Vulnerability of water resources, vegetation productivity and soil erosion to climate change in Mediterranean watersheds. *Hydrological Processes* **22**: 3115-3134.

Ospar Commission. 2007. Guideline 6: Quantification and Reporting of Nitrogen and Phosphorus Losses from Diffuse Anthropogenic Sources and natural Background Losses. Διαθέσιμο διαδικτυακά στη σελίδα [http://www.ospar.org/v\\_measures/browse.asp?menu=00260303030125\\_000002\\_000000](http://www.ospar.org/v_measures/browse.asp?menu=00260303030125_000002_000000). Προσπελάθηκε στις 17 Απριλίου 2014.

Overton, D. E. 1966. Muskingum flood routing of upland streamflow. *Journal of Hydrology* **4**: 185-200.

Oxford Dictionary. 2014. Oxford University Press. Διαθέσιμο διαδικτυακά στη σελίδα <http://www.oxforddictionaries.com/definition/english/flood>. Προσπελάθηκε στις 13 Απριλίου 2014.

Panagopoulos, Y., Makropoulos, C., Baltas, E., and M. Mimikou. 2011. SWAT parameterization for the identification of critical diffuse pollution source areas under data limitations. *Ecological Modelling* **222**: 3500-3512.

Parajuli, P. B., Nelson, N. O., Frees, L. D., and K. R. Mankin. 2009. Comparison of AnnAGNPS and SWAT model simulation results in USDA-CEAP agricultural watersheds in south-central Kansas. *Hydrological Processes* **23**: 748-763.

Phillips, E. E. 1950. Heat summation theory as applied to canning crops. *The Canner* **27**: 13-15.

Priestley, C. H. B., and R. J. Taylor. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review* **100 (2)**:81-92.

Rao, A., R., and K. H. Hamed. 2000. Flood Frequency Analysis. CRC Press: USA.

Refsgaard, J. C., and B. Storm. 1995. Chapter 23: MIKE SHE. In V. P.Singh. Computer Models of Watershed Hydrology. Water Resources Publications: Highlands Ranch, Colo; 809-846.

Richardson, C. W. 1981. Stochastic simulation of daily precipitation, temperature and solar radiation. *Water Resources Research*. **17(1)**:182-190.

Richardson C. W., and D. A. Wright. 1984. WGEN: a model for generating daily weather variables. ARS-8. USDA-ARS.



Saleh, A., and B. Du. 2004. Evaluation of SWAT and HSPF within BASINS Program for the Upper North Bosque River Watershed in Central Texas. *Transactions of the ASAE* **47(4)**: 1039-1049.

Schoumans, O. F., Silgram, M., Groenendijk, P., Bouraoui, F., Andersen, H. E., Kronvang, B., Behrendt, H., Arheimer, B., Johnsson, H., Panagopoulos, Y., Mimikou, M., Lo Porto, A., Reisser, H., Le Gall, G., Barr, A., and S. G. Anthony. 2009. Description of nine nutrient loss models: capabilities and suitability based on their characteristics. *Journal of Environmental Monitoring* **11**: 506-514.

Sharpley, A. N., and J. R. Williams. 1990. EPIC-Erosion productivity impact calculator, 1, Model documentation. Technical Bulletin 1768. USDA-ARS, Grassland, Soil and Water Research Laboratory: Temple, Texas.

Silgram, M., Anthony, S. G., Collins, A. L., Stromqvist, J., Bouraoui, F., Schoumans, O., Lo Porto, A., Groenendijk, P., Arheimer, B., Mimikou, M., and H. Johnsson. 2009. Evaluation of diffuse pollution model applications in EUROHARP catchments with limited data. *Journal of Environmental Monitoring* **11**: 554-571.

Simmelsgaard, S. E., Kristensen, K., Andersen, H. E., Grant, R., Jorgensen, J. O., and H. S. Ostergaard. 2000. An empirical model for calculation of root zone nitrate leaching. DJF rapport Markbrug no. 32. Danmarks JordbrugsForskning, 67 pages. (in Danish)

Soil Conservation Service. 1986. Urban hydrology for small watersheds. Technical Release 55. USDA.

Sophocleous, M. A., Koelliker, J. K., Govindaraju, R. S., Birdie, T., Ramireddygar, S. R., and S. P. Perkins. 1999. Integrated numerical modeling for basin-wide water management: The case of the Rattlesnake Creek basin in south-central Kansas. *Journal of Hydrology* **214**: 179-196.

Swedish EPA. 1997. Nitrogen from land to sea, Main report, Report 4801. Swedish Environmental Protection Agency; Nordsteds tryckeri AB, Stockholm.

Terres, J. M., Campling, P., Vandewall, S., and J. Van Orshoven. 2001. Calculation of Agricultural Nitrogen Quantity for EU River Basins, Final Report: EUR 20256 EN. European Commission -Joint Research Centre; Ispra.

Tsagarakis, K. P., Dialynas, G. D., and A. N. Angelakis. 2004. Water resources management in Crete (Greece) including water recycling and reuse and proposed quality criteria. *Agricultural Water Management* **66**: 35-47.

Tsanis, I. K., Koutroulis, A. G., Daliakopoulos, I. N., and D. Jacob. 2011. Severe climate-induced water shortage and extremes in Crete. *Climate Change* **106**: 667-677.

Tzoraki, O., Amaxidis, Y., Skoulikidis, N. T., and N. P. Nikolaidis. 2004. In stream geochemical processes of temporary rivers - Krathis river case study. Proceedings of VII International Conference, Protection and restoration of the environment: Mykonos, Greece. Session 03, No. 110.

Tzoraki, O., Nikolaidis, N. P., Amaxidis, Y., and N. T. Skoulikidis. 2007. In-Stream Biogeochemical Processes of a Temporary River. *Environmental Science & Technology* **41(4)**: 1225-1231.

US Water Resources Council. 1967. A Uniform Technique for Determining Flood Flow Frequencies. Hydrology Committee Bulletin 15: Washington D.C.

Uys, M. C., and J. H. O'Keeffe. 1997. Simple words and Fuzzy Zones: Early Directions for Temporary River Research in South Africa. *Environmental Management* **21(4)**:517-531.

Van Liew, M., Veith, T. L., Bosch, D. D., and J. G. Arnold. 2007. Suitability of SWAT for the Conservation Effects Assessment Project: Comparison on USDA Agricultural Research Service Watersheds. *Journal of Hydrologic Engineering* **12**: 173-189.

Vardavas, I., Chartzoulakis, K., Papamastorakis, D., Xepapadeas, A., Spanoudaki, K., Zacharioudakis, G., Kritsotakis, M., Bertaki, M., Hatzidimitriou, D., and A. A. Donta. 2005. Report on Crete. In Water on Mediterranean Islands: Current conditions and prospects for sustainable management. ZUFO-Reports, Volume 5. Centre for Environmental Research, University of Muenster: Muenster; 327-346.

Venohr, M., Ulrike, H., Jurgen, H., Opitz, D., Gericke, A., Wetzig, A., Natho, S., Neuman, F., Hurdler, J., Matranga, M., Mahnkopf, J., Gadegast, M., and H. Behrendt. 2011. Modelling of Nutrient Emissions in River Systems --MONERIS-- Methods and Background. *International Rev. Hydrobiology* **96(5)**: 435-483.

Water Resources Council (WRC). 1967. A Uniform Technique for Determining Flood Flow Frequency, Bulletin #15. WRC: Washington D.C.

Williams, J. R. 1969. Flood routing with variable travel time or variable storage coefficients. *Transactions of the ASAE* **12(1)**: 100-103.

Williams, J. R. 1995. Chapter 25. The EPIC Model. In Computer Models of Watershed Hydrology. Water Resources Publications: Highlands Ranch, CO; 909-1000.

Wilson, B., G., and M. M. Hilferty. 1931. The Distribution of Chi-square. *Proceedings National Academy of Science (New York)* **17(12)**: 684-688.

Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (ΙΓΜΕ) Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος Διεύθυνσης Υδρογεωλογίας. 2009. Καταγραφή και αποτίμηση των υδρογεωλογικών χαρακτήρων των υπογείων νερών και των υδροφόρων συστημάτων της χώρας, Μελέτη υδροφόρων συστημάτων Ν. Κρήτης. Πηγές, Καρστικοί, Προσχωματικοί Υδροφόροι. Ποιοτική καταγραφή (Υ.Δ. 13): Αθήνα.

Καραμάνου, Ζ., και Ν. Ροδολάκης. 2006. Περιβαλλοντική προστασία και σχεδιασμός των χρήσεων γης στην παραποτάμια ζώνη και την εκβολή του ποταμού Γιόφυρου. Τεχνικά Χρονικά **Ιούλιος-Αύγουστος 2006**.

Ομπετσάνοφ, Ι., Κουμαντάκης, Ι., και Σ. Σταματάκη. 2004. Καρστικές πηγές στην Ελλάδα, Αποτύπωση και αξιολόγηση με τη χρήση Γεωγραφικού Συστήματος Πληροφοριών (G.I.S.). Τεχνικά Χρονικά **Μάρτιος-Απρίλιος 2004**.

Παπαδοπούλου, Μ., Π., Καραντζάς, Γ., Π., και Ι. Τριχάκης. 2005. Προσομοίωσης υπόγειας ροής παράκτιου υδροφορέα στη βιομηχανική περιοχή Ηρακλείου Κρήτης. Heleco '05. ΤΕΕ: Αθήνα.

Περιφέρεια Κρήτης Διεύθυνση Υδάτων (ΠΚΔΥ). 2002. Μελέτη Διαχείρισης Υδάτινων Πόρων: Ηράκλειο.

Περιφέρεια Κρήτης Διεύθυνση Υδάτων (ΠΚΔΥ). 2008. Κατάσταση Υπογείων Υδροφοριών Κρήτης, Παρατηρήσεις για το τρέχον υδρολογικό έτος. Τμήμα Παρακολούθησης και Ελέγχου της Ποιότητας και της Ποσότητας των Υδάτων: Ηράκλειο.

Υπουργείο Βιομηχανίας, Ενέργειας και Τεχνολογίας. 1989. Υδάτινοι πόροι στην Κρήτη: Αθήνα.

# Παράρτημα

## Α. Διαδικασία βαθμονόμησης

Πρώτο βήμα ήταν να χωριστούν οι λεκάνες απορροής σε υψομετρικές διαβαθμίσεις (elevation bands) περίπου των 100~150m για την καλύτερη αναπαράσταση της χιονόπτωσης χρησιμοποιώντας υψομετρική διαβάθμιση της θερμοκρασίας εντός της κάθε υπολεκάνης. Με τη χρήση της θερμοκρασιακής βαθμίδας (TLAPS) η θερμοκρασία εντός κάθε υψομετρικής διαβάθμισης (elevation band) αναπροσαρμόζεται σε σχέση με την υψομετρική διαφορά από το υψόμετρο του θερμοκρασιακού σταθμού, στην περίπτωση αυτής της μελέτης, οι δύο θερμοκρασιακοί σταθμοί που χρησιμοποιήθηκαν βρίσκονται σε πολύ χαμηλό υψόμετρο και η χρησιμοποίηση των υψομετρικών διαβαθμίσεων (elevation bands) αποδίδει ρεαλιστικότερα τη θερμοκρασιακή διακύμανση και συνεπώς την εμφάνιση χιονιού στα μεγαλύτερα υψόμετρα. Η θερμοκρασιακή βαθμίδα (TLAPS) ορίστηκε - 6.5°C/km, όσο δηλαδή η μέση υγρή θερμοβαθμίδα της ατμόσφαιρας. Οι υψομετρικές διαβαθμίσεις (elevation bands) χρησιμεύουν και για την υψομετρική ρύθμιση της βροχόπτωσης εντός της υπολεκάνης, μέσω της βαθμίδας βροχόπτωσης (PLAPS), χωρίς να χρειαστεί βέβαια στη συγκεκριμένη μελέτη καθώς οι βροχομετρικοί σταθμοί καλύπτουν τη χωρική διακύμανση της βροχόπτωσης εντός των λεκανών. Η λεκάνη απορροής του Γιόφυρου έχει χαμηλό υψόμετρο για την τακτική εμφάνιση χιονιού συνεπώς η χιονόπτωση βαθμονομήθηκε με τη βοήθεια του μοντελοποιημένου υδρογραφήματος του Ξηροπόταμου, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για να διαπιστωθούν μεγάλες αποκλίσεις λόγω λιώσιμου χιονιού, λόγω χάρη σε περίπτωση που εμφάνιζε αυξημένες ροές τον Μάιο ή τον Ιούνιο λόγω λιώσιμου χιονιού υπήρχε λάθος και με βάση γενικές παρατηρήσεις για την χιονοκάλυψη στα Κρητικά βουνά. Αυτή ήταν και η μοναδική φορά που χρησιμοποιήθηκε το μοντελοποιημένο υδρογράφημα του Ξηροπόταμου κατά την περίοδο της βαθμονόμησης. Τέλος βαθμονομήθηκαν η θερμοκρασία σχηματισμού χιονιού (SFTMP) στους 3°C και η θερμοκρασία λιώσιμου χιονιού (SMTMP) στους 2°C, καθώς και ο ελάχιστος και μέγιστος ρυθμός λιώσιμου χιονιού ανά ημέρα (SMFMX) και (SMFMN) στα 1.5mm/C-day. Με αυτόν τον τρόπο προσομοιάστηκε η χιονόπτωση στα υψηλότερα υψόμετρα, κυρίως στην υπολεκάνη 25 του ποταμού Ξηροπόταμου η οποία έχει το μεγαλύτερο υψόμετρο και υψομετρική διαφορά από τις υπόλοιπες 29 και στην οποία λαμβάνει χώρα το μεγαλύτερο ποσοστό χιονόπτωσης. Παρόλα αυτά, και αυτό φάνηκε μέσα από την αντιπαραβολή μοντελοποιημένου και μετρημένου υδρογραφήματος, το μοντέλο δεν μπορεί να προβλέψει καλά μεμονωμένα ακραία φαινόμενα χιονόπτωσης που προκύπτουν στη συνολική επιφάνεια των δύο λεκανών, ακόμα και σε πολύ χαμηλά υψόμετρα.

Δεύτερο βήμα ήταν η αύξηση της ετήσιας εξατμισοδιαπνοής σε ποσοστό περίπου 60% της ετήσιας βροχόπτωσης όπου κυμαίνεται ο μέσος όρος της Κρήτης (Koutroulis et al, 2013; ΠΚΔΥ, 2002). Σε πρώτο επίπεδο τη μεγαλύτερη επίδραση έχει το έδαφος και η περιεχόμενη υγρασία του, συνεπώς για να επιτευχθούν τα επιθυμητά επίπεδα εξατμισοδιαπνοής χρειαζόταν βαθύ έδαφος με υψηλή ικανότητα συγκράτησης υγρασίας το οποίο βαθμονομήθηκε έχοντας υπόψη και την κατεύθυνση αρκετού νερού προς τον υδροφόρο ορίζοντα. Σε δεύτερο επίπεδο, μεγάλη επίδραση, σχεδόν τη μισή ποσότητα εξατμισοδιαπνοής, την παρέχει η

άρδευση κατά τους ανοιξιάτικους μήνες καθώς στο μοντέλο διαρκεί μέχρι τον Ιούνιο. Εν τέλει, προσπαθώντας να αυξηθεί η επίδραση του εδάφους και της άρδευσης αποφεύγοντας ακραίες τιμές παραμέτρων για τα δύο αυτά κομμάτια της υδρολογίας, τέθηκαν το βάθος ριζοστρώματος (**SOL\_ZMX**) στα 1500mm, πρακτικά όλο το κάθετο προφίλ των εδαφών να ανήκει στη ριζόσφαιρα. Ο συντελεστής διαθεσιμότητας εξατμισοδιαπνοής εδάφους (Soil Evaporation Demand Factor) (**ESCO**) τέθηκε στο 0.2, αυξάνοντας το βάθος εδάφους άντλησης νερού προς εξάτμιση. Και ο συντελεστής φυτικής αντλητικής ικανότητας (Plant Uptake Compensation Factor) (**EPCO**) στο 1, αυξάνοντας το ποσό νερού που αντλείται από τα χαμηλότερα στρώματα εδάφους από τα φυτά και το οποίο χάνεται ως διαπνοή. Η βαθμονόμηση των παραμέτρων του εδάφους και της άρδευσης έγινε παράλληλα με άλλα βήματα και αφού καθορίστηκαν οι τρεις αυτοί συντελεστές.

Τρίτο βήμα της βαθμονόμησης ήταν η προσπάθεια κατεύθυνσης του νερού προς τον υδροφόρο ορίζοντα πολύ αδρά, περίπου στο ποσοστό του 30% ως προς τη βροχόπτωση βαθμονομώντας τις παραμέτρους του εδάφους για δεύτερη φορά.

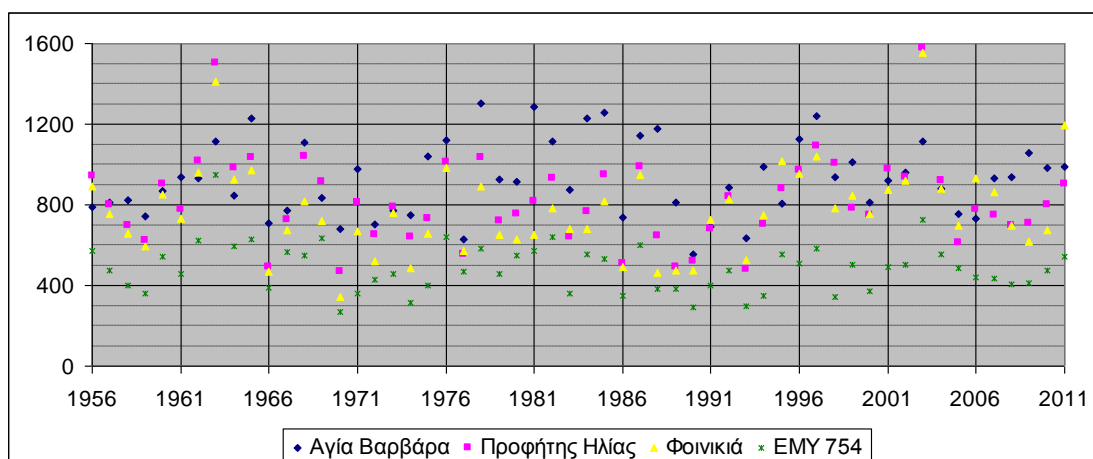
Τέταρτο βήμα της βαθμονόμησης ήταν η βαθμονόμηση σε μηνιαίο βήμα όπου και πριν, αλλά κυρίως μετά την εφαρμογή άρδευσης, παρατηρούνταν εκφόρτιση από το έδαφος κατά τους θερινούς μήνες, γεγονός το οποίο είναι ασύμβατο με τις μετρήσεις και από το οποίο έγινε προφανές ότι το ποτάμι, όπως αναμενόταν από τη διαλείπουσα φάση της ροής του και τα στοιχεία για το βάθος του υδροφορέα, πρέπει να θεωρηθεί ότι χάνει νερό από την κοίτη του σε επίπεδο περίπου 10~30%. Επίσης έγιναν επισημάνσεις για το χρονικό διάστημα της εκφόρτισης του υπογείου νερού, το οποίο θεωρήθηκε ότι συνεισφέρει περίπου την περίοδο από το Νοέμβριο μέχρι το Μάιο.

Πέμπτο βήμα ήταν ο μηδενισμός της υπόγειας ροής (base flow) ώστε να φανούν οι πλημμυρικές απορροές. Από αυτή την ενέργεια αποκομίστηκε ένα σημαντικό συμπέρασμα και μία σημαντική παρατήρηση. Το πρώτο είναι η αδυναμία μοντελοποίησης των πλημμυρικών γεγονότων αποκλειστικά μέσω της επιφανειακής απορροής, το οποίο είναι αποτέλεσμα της χρησιμοποίησης ημερησίων δεδομένων βροχόπτωσης, ενώ τα πλημμυρικά φαινόμενα είναι διεργασίες ωριαίας βάσης. Λόγω αυτού, η ένταση της εκάστοτε βροχόπτωσης υπολογίζεται πιθανοκρατικά όπως παρουσιάστηκε στη βιβλιογραφική αναφορά, γεγονός που έχει αντίκτυπο στην μοντελοποίηση της επιφανειακής απορροής. Στην Κρήτη είναι συχνά τα καιρολογικά φαινόμενα, στα οποία μεγάλη ποσότητα νερού κατακρημνίζεται εντός λίγων ωρών, τα οποία οδηγούν σε επιφανειακή απορροή λόγω υπέρβασης της διηθητικής ικανότητας του εδάφους και εν συνεχεία σε πλημμυρικές παροχές αιχμής. Αντιμετωπίζοντας την εμφάνιση τέτοιων φαινομένων πιθανοκρατικά, χάνεται μεγάλο ποσοστό των πλημμυρικών παροχών, γεγονός που παρατηρήθηκε και στην πορεία της μελέτης. Για να λυθεί αυτό το πρόβλημα, το οποίο είναι καθοριστικής σημασίας για την ανάλυση συχνότητας πλημμυρών, αποφασίστηκε η εκφόρτιση του εδαφικού νερού από την ακόρεστη ζώνη να γίνει χρησιμοποιώντας την παράμετρο ταχύτητας εδαφικής εκφόρτισης, (**LAT\_TTIME**) (Lateral travel flow time), η οποία δεν έχει φυσική σημασία και καθορίζει με βάση μια καμπύλη βαθμονόμησης την εκφόρτιση στο ποτάμι, αντί για τον υπολογισμό του χρόνου εκφόρτισης από κάθε HRU με βάση τα υδραυλικά του χαρακτηριστικά. Με αυτόν τον τρόπο δόθηκε η δυνατότητα άμεσης εκφόρτισης από την εδαφική

ζώνη εμφανίζοντας περισσότερες και με μεγαλύτερη ακρίβεια τις πλημμυρικές αιχμές και παράλληλα βελτίωσε το μοντελοποιημένο υδρογράφημα κατά τους θερινούς μήνες, καθώς προηγουμένως η εκφόρτιση του εδαφικού νερού ήταν τόσο αργή που συνεισέφερε αρκετό νερό ακόμα και τους θερινούς μήνες οι οποίο κανονικά είναι άνομβροι. Σε αυτό το στάδιο καθορίστηκε ότι η (LAT\_TTIME) θα κυμαίνεται μεταξύ 0.5 και 8. Το δεύτερο συμπέρασμα ήταν η επιρροή της βασικής, υπόγειας, ροής στο μοντελοποιημένο υδρογράφημα αυτή τη φορά. Τέλος, επιλέχτηκε ο τρόπος με τον οποίο υπολογίζεται η επιφανειακή απορροή, με βάση την εδαφική υγρασία και όχι με βάση την εξατμισοδιαπνοή, και καθορίστηκαν οι τιμές των (CN2) (Curve Number), για κάθε HRU, με βάση την υδρολογική κατηγορία του εδάφους, τον τύπο της καλλιέργειας και την κλίση του εδάφους. Για τη βαθμονόμηση χρησιμοποιήθηκε ο προτεινόμενος πίνακας (CN2) από το εγχειρίδιο του SWAT και αποφασίστηκε να μην χρησιμοποιηθεί ο προτεινόμενος τρόπος μετατροπής των (CN2) για την αποτύπωση της επίδρασης της κλίσης αλλά ένας αυθαίρετος με στόχο να αυξηθεί όσον το δυνατόν περισσότερο η επιφανειακή απορροή ειδικά στις μεγάλες κλίσεις. Οι τιμές που δόθηκαν στις (CN2) κυμαίνονται από 30~70, για τα μη αδιαπέρατα HRU, δηλαδή τα μη αστικά, και παρατίθενται στο αντίστοιχο κεφάλαιο του παραρτήματος.

Από το σημείο αυτό και μετά η κατηγοριοποίηση σε βήματα είναι αδύνατη καθώς πρέπει να συνεκτιμηθούν εδαφικοί, υπεδάφιοι, αρδευτικοί και γενικοί παράγοντες για την τελική βαθμονόμηση, αφού έχουν γίνει στα προηγούμενα στάδια μερικές εκτιμήσεις, και συνεπώς αντιμετωπίζεται ως ενιαίο τελικό στάδιο.

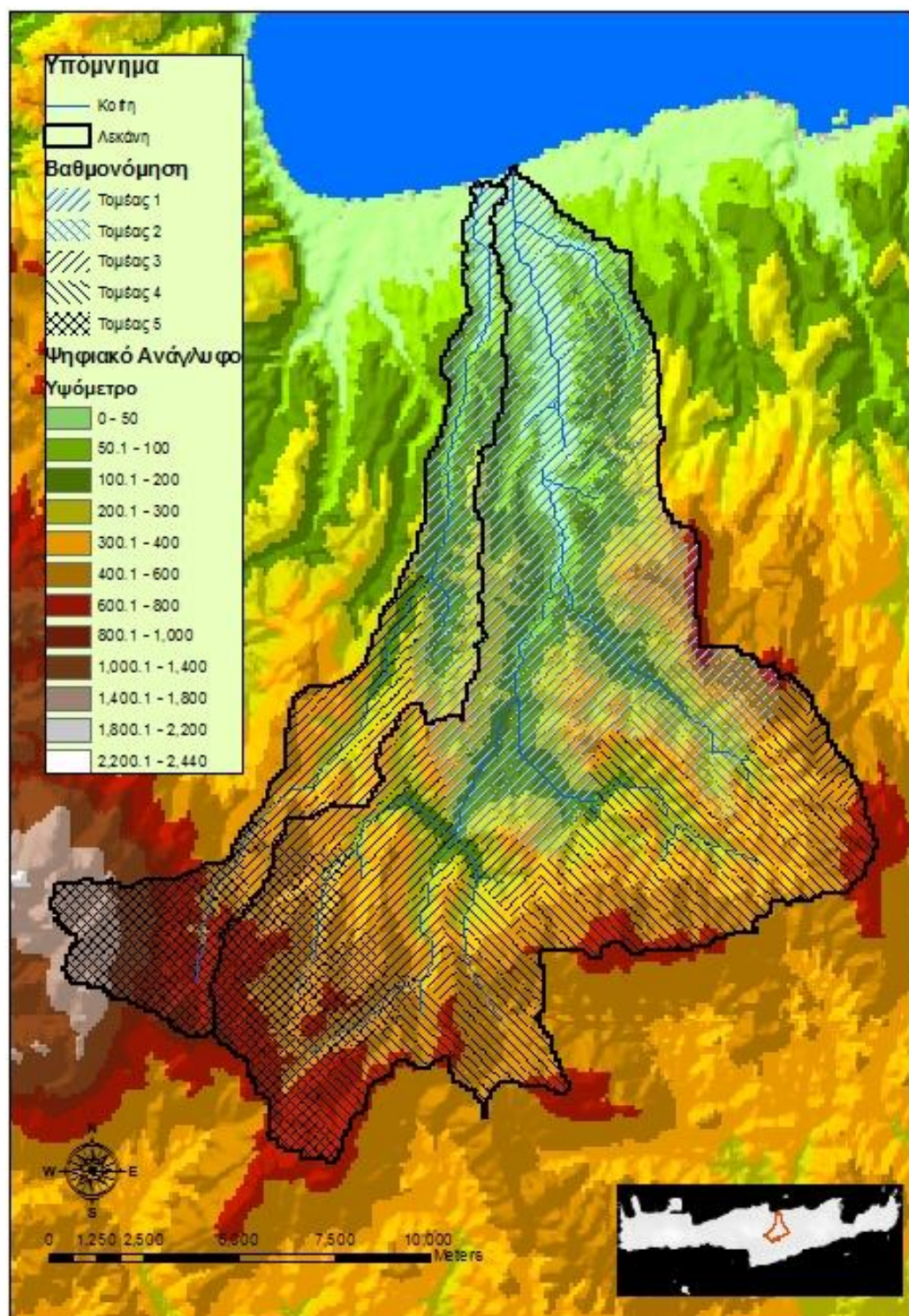
Κατ' αρχάς κατά την τελική βαθμονόμηση άλλαξε ριζικά η προσέγγιση όσον αφορά τη βασική ροή. Η προηγούμενη προσέγγιση ήταν η θεώρηση ολόκληρου του υδροφορέα ως ομοιογενούς με ίδια χαρακτηριστικά σε όλα τα HRU, η οποία κατέληγε σε δύο σοβαρά προβλήματα-σφάλματα. Το πρώτο πρόβλημα-σφάλμα ήταν ότι το μοντέλο παρουσίαζε εκφόρτιση του υπόγειου υδροφορέα σε HRUs τα οποία με βάση εκτιμήσεις από δεδομένα γεωτρήσεων ήταν αδύνατο να παρουσιάζουν. Το δεύτερο πρόβλημα που παρουσιαζόταν στις προηγούμενες βαθμονομήσεις ήταν ότι παρόλο το γεγονός ότι αντικατόπτριζαν αρκετά ικανοποιητικά την περίοδο βαθμονόμησης και ένα κομμάτι της περιόδου επαλήθευσης, τα αποτελέσματα ειδικά για το υδρολογικό έτος 2003 απέκλιναν δραματικά λόγω υψηλής υπόγειας παροχής όπως αποδείχθηκε έπειτα από διερεύνηση. Η περίοδος βαθμονόμησης γενικά είναι υγρή περίοδος και έχει την ιδιομορφία ότι οι βροχοπτώσεις στα ανώτερα υψόμετρα και ειδικά στο σταθμό της Αγίας Βαρβάρας είναι ιδιαίτερα αυξημένες σε αντίθεση με τους σταθμούς Προφήτη Ηλία και Φοινικιάς στους οποίους οι βροχοπτώσεις είναι μειωμένες, από ότι σε άλλες περιόδους. Όπως φαίνεται και στην εικόνα #61, το υδρολογικό έτος 2003 οι βροχοπτώσεις στα χαμηλά υψόμετρα ήταν ιδιαίτερα αυξημένες σε σχέση με αυτές στα υψηλά.



Εικόνα 61. Ετήσιες βροχομετρικές μετρήσεις, υδρολογικών ετών 1956-2011

Αυτό που συνέβαινε ήταν το εξής, θεωρώντας ότι όλα τα HRUs συνεισφέρουν στη βασική ροή με τον ίδιο τρόπο, κατά τη βαθμονόμηση, λόγω των αυξημένων βροχοπτώσεων στα μεγαλύτερα υψόμετρα, η επίδραση στην βασική ροή των HRUs στα χαμηλότερα υψόμετρα είχε μειωμένο αντίκτυπο. Στην περίπτωση του 2003 που συμβαίνει το αντίθετο αναδεικνύεται η αδυναμία αυτής της προσέγγισης. Παρατηρώντας από τον υδρολιθολογικό χάρτη ότι ο υδροφόρος ορίζοντας είναι αλλουβιακός και γενικά ενιαίος, τη στάθμη των γεωτρήσεων και τη χρονοσειρά των βροχοπτώσεων υποθέτουμε ότι η υπόγεια ροή συνεισφέρει μόνο στο χαμηλό κομμάτι της λεκάνης απορροής, εποχιακά, αλλά επηρεάζεται περισσότερο από τις βροχοπτώσεις στα μεσαία και υψηλά υψόμετρα από ότι στα χαμηλότερα, έστω και με μια χρονική καθυστέρηση. Σε αυτό το σημείο, έρχεται η αδυναμία του SWAT όσον αφορά την προσέγγιση του υπόγειου υδροφορέα, ο υπόγειος υδροφορέας αντιμετωπίζεται σε επίπεδο υπολεκάνης/HRU μεμονωμένα, χωρίς να συνδέει τα διάφορα αυτά τμήματα μεταξύ τους με αποτέλεσμα να μην παρέχεται δυνατότητα μοντελοποίησης της υπόγειας ροής. Συνεπώς δεν μπορεί να εφαρμοστεί η προσέγγιση στην οποία κατέληξε ο μελετητής, και η οποία έχει φυσική σημασία και επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί μια προσέγγιση με παρόμοια αποτελέσματα. Για αυτό το λόγο θεωρήθηκε ότι οι δύο λεκάνες απορροής πρέπει να χωριστούν σε τέσσερα τμήματα με βάση την υπόγεια και εδαφική εκφόρτιση, όπως φαίνεται στην εικόνα #62.





Εικόνα 62. Χάρτης τμηματοποίησης εδαφικών και υπεδάφινων παραμέτρων των λεκανών απορροής Γιόφυρου και Ξηροπόταμου κατά τη βαθμονόμηση στο SWAT

Όπου:

- Τομέας 1 είναι η συνεισφέρουσα σε υπόγεια εκφόρτιση περιοχή, με χαμηλή εδαφική εκφόρτιση

- Τομέας 2 είναι η συνεισφέρουσα σε υπόγεια εκφόρτιση περιοχή, με υψηλή εδαφική εκφόρτιση
- Τομέας 3 είναι η μη συνεισφέρουσα σε υπόγεια εκφόρτιση περιοχή, με χαμηλή εδαφική εκφόρτιση
- Τομέας 4 είναι η μη συνεισφέρουσα σε υπόγεια εκφόρτιση περιοχή, με υψηλή εδαφική εκφόρτιση
- Τομέας 5 είναι η μη συνεισφέρουσα σε υπόγεια εκφόρτιση περιοχή, με πολύ χαμηλή εδαφική εκφόρτιση

Οι πίνακες #19 και #20 δίνουν τις μοντελοποιημένες παραμέτρους εδάφους και υπεδάφους για κάθε τμήμα:

**Πίνακας 19. Βαθμονόμηση εδαφικών παραμέτρων ανά τομέα, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 62**

| Τομέας | Soil Layers | LAT_TTIME (days) | SOL_Z1 (mm) | SOL_AWC1 (mmH <sub>2</sub> O/mm soil) | SOL_K1 (mm/hr) | SOL_Z2 (mm) | SOL_AWC2 (mmH <sub>2</sub> O/mm soil) | SOL_K2 (mm/hr) |
|--------|-------------|------------------|-------------|---------------------------------------|----------------|-------------|---------------------------------------|----------------|
| 1      | 2           | 8                | 400         | 0.232                                 | 12             | 1000        | 0.175                                 | 8              |
| 2      | 2           | 0.5              | 300         | 0.450                                 | 24             | 800         | 0.300                                 | 20             |
| 3      | 2           | 5                | 400         | 0.232                                 | 12             | 1000        | 0.175                                 | 8              |
| 4      | 2           | 0.5              | 300         | 0.450                                 | 24             | 800         | 0.300                                 | 20             |
| 5      | 1           | 0.5              | 300         | 0.110                                 | 15.3           | 0           | 0                                     | 0              |

Όπου:

- **Soil layers** τα διαφορετικά επίπεδα εδάφους
- **LAT\_TTIME** η ταχύτητα εκφόρτισης του εδάφους
- **SOL\_Z1** το βάθος από την επιφάνεια του πρώτου στρώματος εδάφους
- **SOL\_AWC1** η μέγιστη διαθέσιμη υγρασία του πρώτου στρώματος εδάφους
- **SOL\_K1** η υδραυλική αγωγιμότητα του πρώτου στρώματος εδάφους
- **SOL\_Z2** το βάθος από την επιφάνεια του δεύτερου στρώματος εδάφους
- **SOL\_AWC2** η μέγιστη διαθέσιμη υγρασία του δεύτερου στρώματος εδάφους
- **SOL\_K2** η υδραυλική αγωγιμότητα του δεύτερου στρώματος εδάφους

**Πίνακας 20. Βαθμονόμηση υπεδάφιων παραμέτρων ανά τομέα, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 62**

| Τομέας | GW_DELAY (days) | ALPHA_BF (days) | GWQMIN (mm H <sub>2</sub> O) | REVA PMN (mm H <sub>2</sub> O) | GW_REVAP | RCHRG_DP |
|--------|-----------------|-----------------|------------------------------|--------------------------------|----------|----------|
| 1      | 0               | 0.025           | 0                            | 500                            | 0.02     | 0        |
| 2      | 0               | 0.025           | 0                            | 500                            | 0.02     | 0        |
| 3      | 0               | 0.025           | 5000                         | 500                            | 0.02     | 1        |
| 4      | 0               | 0.025           | 5000                         | 500                            | 0.02     | 1        |
| 5      | 0               | 0.025           | 5000                         | 500                            | 0.02     | 1        |

Όπου:

- **GW\_DELAY** η καθυστέρηση της έναρξης εκφόρτισης του υπεδάφους
- **ALPHA\_BF** η ταχύτητα εκφόρτισης του υπεδάφους

- **GWQMIN** το απαιτούμενο ύψος νερού στον υδροφόρο ορίζοντα για την εκφόρτιση στο ποτάμι
- **REVAPMN** το απαιτούμενο ύψος νερού στον υδροφόρο ορίζοντα για την εμφάνιση τριχοειδούς ανύψωσης (revap)
- **GW\_REVAP** ο συντελεστής τριχοειδούς ανύψωσης από τον υπόγειο υδροφορέα στο έδαφος
- **RCHRG\_DP** το ποσοστό νερού που καταλήγει στον βαθύ υδροφορέα μετά τη διήθηση πέρα από το εδαφικό κομμάτι

Το τμήμα των λεκανών απορροής με τη γαλάζια σκιά παρέχει υπόγειο νερό στους ποταμούς, στην πραγματικότητα το τμήμα αυτό πιθανότατα είναι μικρότερο και περιορίζεται στα υψόμετρα χαμηλότερα των 50m. Επιλέχτηκε όμως έτσι λόγω των γενικά μικρών κλίσεων του, του χαμηλού υψομέτρου και της ανάγκης κάλυψης της παροχής συγκεκριμένης ποσότητας υπόγειας ροής. Η υπόθεση είναι ότι οι βροχοπτώσεις σε όλη την λεκάνη απορροής συνεισφέρουν στην ανύψωση του υδροφόρου ορίζοντα και συνεπώς στην εποχιακή βασική ροή, στο μοντέλο όμως συνεισφέρουν μόνο οι περιοχές στις οποίες εμφανίζεται υπόγεια ροή και επομένως έγινε συμβιβασμός, καθώς ο καθορισμός μικρότερης περιοχής από τη συγκεκριμένη δίνει υπερβολικά μικρές ποσότητες βασικής ροής. Το σκούρο σκιαγραφημένο τμήμα μοντελοποιήθηκε έτσι ώστε το νερό που διηθείται μέσω του εδάφους στον υδροφόρο ορίζοντα να μην εκφορτίζεται στον ποταμό και επιπροσθέτως να καταλήγει στον υπόγειο υδροφορέα καθώς παρόλο που η (**GWQMIN**) τέθηκε στο μέγιστο κάποιες χρονιές παρατηρούνταν υπεδάφια ροή λόγω συσσώρευσης του νερού στον ταμειυτήρα και προκαλούσε σφάλμα στο υδρογράφημα. Συνεπώς το σκούρο σκιαγραφημένο τμήμα μοντελοποιήθηκε ως ξεχωριστός υπόγειος υδροφορέας ο οποίος εκφορτίζει εκτός λεκάνης απορροής.

Η περαιτέρω τμηματοποίηση εξαρτάται από το εκάστοτε έδαφος και το υψόμετρο. Στον τομέα 5 το έδαφος αποτελείται από το S9322 και το S9323. Υποτέθηκε ότι το έδαφος S9323 είναι ρηχό σε σχέση με τα υπόλοιπα και σε συνάρτηση με τις αυξημένες κλίσεις που παρουσιάζονται λόγω υψομετρικής αύξησης και τη μεγάλη απόσταση από τον υδροφόρο ορίζοντα οι εδαφικές παράμετροι βαθμονομήθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να ευνοούν την επιφανειακή απορροή και τη διήθηση στο βαθύ υπόγειο υδροφορέα, ο οποίος δεν εκφορτίζει στο ποτάμι, μειώνοντας έτσι την εδαφική απορροή με κύριο στόχο την επίτευξη υψηλής επιφανειακής απορροής. Σημειώνεται ότι το έδαφος S9322 δεν φαίνεται στα HRUs καθώς δεν ξεπερνούσε το απαραίτητο ποσοστιαίο κατώφλι και έχει μοντελοποιηθεί ως S9323. Ο τομέας 1 έχει ως έδαφος το S9319, το οποίο μοντελοποιήθηκε να έχει μεγάλη διαθέσιμη υγρασία για να επιτευχθεί η ζητούμενη εξατμισοδιαπνοή και μικρή υδραυλική αγωγιμότητα ώστε το νερό να κατευθύνεται προς τον υδροφόρο ορίζοντα περισσότερο, παρά να εκφορτίζεται εδαφικά για να επιτευχθεί η απαραίτητη υπόγεια εκφόρτιση. Ο τομέας 4 έχει ως έδαφος το S9320 και ο τομέας 3 το S9319, το ζητούμενο σε αυτό το σημείο ήταν να επιτευχθεί η ζητούμενη εδαφική απορροή που εμφανίζεται για λίγες μέρες μετά τις αιχμές στο υδρογράφημα, συνεπώς ο τομέας 4 που έχει για έδαφος το S9320 μοντελοποιήθηκε να έχει μεγάλη διαθέσιμη υγρασία στο έδαφος, μεγάλη υδραυλική αγωγιμότητα και μικρό (**LAT\_TTIME**) ώστε το νερό να εκφορτίζεται εδαφικά και άμεσα. Ο τομέας 3, έχοντας ως έδαφος το S9319, ακολούθησε ως προς τις εδαφικές παραμέτρους τον



τομέα 1, συμβάλλοντας στην αύξηση της εξατμισοδιαπνοής και τέλος ο τομέας 2, έχοντας ως έδαφος το S9320, ακολούθησε τη βαθμονόμηση του τομέα 4.

Η ανθρώπινη δραστηριότητα και στη συγκεκριμένη περίπτωση η γεωργική, καθώς οι ανάγκες ύδρευσης και αποχέτευσης του Ηρακλείου γίνονται εκτός των δύο λεκανών απορροής ενδιαφέροντος, έχει σημαντικό αντίκτυπο στην υδρολογία της περιοχής. Ο καθορισμός των αγροτικών εργασιών και η πλήρης εφαρμογή της άρδευσης με βάση τη θερμιδική μέθοδο (Heat Units), συνολικά για όλους τους τύπους καλλιέργειας. Ο προγραμματισμός των εργασιών έγινε ως εξής ακολουθώντας τις προτεινόμενες τιμές του SWAT:

- έναρξη περιόδου βλάστησης-ανάπτυξης στα 0.15 Heat Units
- έναρξη περιόδου άρδευσης στα 0.16 Heat Units
- τέλος καλλιεργητικής περιόδου και συλλογή στο 1.2 Heat Units για το SWHT, λοιπές καλλιέργειες, RGNB, RGNE και στο 1 Heat Units για το OLIV και GRAP

Το αποτέλεσμα ήταν η αρδευτική περίοδος να είναι πολύ περιορισμένη, μεταξύ μέσα Ιουνίου και μέσα Αυγούστου, χωρίς αυτό βέβαια να επηρεάζει την υδρολογία της περιοχής καθώς ως πηγή άντλησης επιλέχτηκε ο βαθύς υδροφορέας, την περίοδο αυτή δεν υπάρχουν βροχοπτώσεις και συνολικά η επιθυμητή εξατμισοδιαπνοή επιτεύχθηκε.

Για τη βαθμονόμηση των παραμέτρων όσον αφορά την πρώτη και τελευταία εργασία χρησιμοποιήθηκε η προκαθορισμένη φόρμα του SWAT για κάθε είδος με μόνες αλλαγές τον καθορισμό του (CUPYR\_MAT), αρχική ηλικία του φυτού, σε 5yr για τα αμπέλια και 15yr για τις ελιές. Η άρδευση καθορίστηκε μόνο για τους ελαιώνες, τα αμπέλια και τις λοιπές καλλιέργειες, με βάση την ανάγκη των φυτών, (WSTRS\_ID), plant water demand, το κατώφλι έναρξης κύκλου άρδευσης (AUTO\_WSTRS) ορίστηκε στο 0.95, η απόδοση της άρδευσης (IRR\_EFF) ορίστηκε στο 0.55 σύμφωνα με τα στοιχεία των Chantzoulakis et al, (2001). Ο ταμιευτήρας ο οποίος επιλέχτηκε για την άντληση της άρδευσης, (Irrigation Source), είναι ο βαθύς υπόγειος υδροφορέας καθώς κατά την περίοδο της άρδευσης ο υπόγειος υδροφορέας δεν επικοινωνεί με το ποτάμι. Ενώ αρχικά είχε επιλεχτεί ο αβαθής υδροφορέας, με την τμηματοποίηση και τη βαθμονόμηση του (GWQMN) στο 0 για το συνεισφέρον στη βασική ροή κομμάτι, ο αβαθής υδροφορέας άδειαζε γρήγορα και αδυνατούσε να παρέχει νερό για άρδευση. Τέλος η μέγιστη ποσότητα νερού στην εφαρμογή κάθε κύκλου (IRR\_MX) ορίστηκε στα 5mm επειδή το SWAT παρουσιάζει εδαφική εκφόρτιση μετά την εφαρμογή της άρδευσης και με αυτό τον τρόπο μειώθηκε η ένταση αυτού του φαινομένου το οποίο δεν συμβαδίζει με το υδρογράφημα καθώς κατά την καλοκαιρινή περίοδο που λαμβάνει χώρα η άρδευση το ποτάμι δεν παρουσιάζει ροή.

Αυτό το φαινόμενο μειώθηκε φανερά μετά τον καθορισμό των απωλειών μετάδοσης, (TRNSRCH), στο 0.25 για την κύρια κοίτη του ποταμού οι οποίες μείωσαν ομοιόμορφα και συνολικά το μοντελοποιημένο υδρογράφημα ώστε να ταιριάζει στο μετρημένο και σχεδόν μηδένισαν την καλοκαιρινή ροή ώστε να πλησιάζει την πραγματική. Όσον αφορά πλέον την κοίτη του ποταμού η οδήγηση του νερού, (Channel Routing), έγινε με βάση τη μέθοδο μεταβλητής αποθήκευσης (Variable Storage), η υδραυλική αγωγιμότητά της, (CH\_K2), καθορίστηκε στα 40mm/hr, η οποία σύμφωνα με το εγχειρίδιο του SWAT αντιστοιχεί σε κοίτες οι οποίες έχουν άμμο και χαλίκι με χαμηλό ποσοστό ιλύος, ενώ ο συντελεστής

εκφόρτισης του παρόχθιου ταμιευτήρα (ALPHA\_BNK), καθορίστηκε στο 1. Η παράμετρος (CH\_K2) επηρεάζει την ποσότητα νερού που χάνεται λόγω μετάδοσης ενώ σε συνδυασμό με την (ALPHA\_BNK) εξομαλύνει σε πολύ μικρό βαθμό τις αιχμές παροχής.

Όσον αφορά την εδαφική εκφόρτιση μέσω της παραμέτρου (LAT\_TTIME) και την υπόγεια εκφόρτιση μέσω της (ALPHA\_BF), αυτές οι δύο παράμετροι καθορίζουν το ρυθμό εκφόρτισης του νερού, η πρώτη κατά την πρώτη περίπου εβδομάδα μετά από κάθε έντονο ή μη φαινόμενο βροχόπτωσης και η δεύτερη κατά την περίοδο μερικών μηνών από τα μέσα Δεκεμβρίου μέχρι και τον Ιούνιο, το αποτέλεσμα της οποίας είναι εμφανές κατά τις περιόδους στις οποίες δεν υπάρχει βροχόπτωση. Τέλος η υποδοχή η αναχαίτιση νερού από το φυλλικό σύστημα των φυτών, (CANMX), ορίστηκε στα 15mm, επηρεάζοντας τις πρώτες παροχές του βροχολογικού έτους, κατά τον Νοέμβριο, μειώνοντας τις αιχμές και αυξάνοντας λίγο την εξατμισοδιαπνοή.

Οι υπόλοιπες παράμετροι αφέθηκαν στις προεπιλεγμένες τιμές του SWAT.

## B. Τιμές Curve Number ανά HRU

Πίνακας 21. Τιμές του **CN\_2** ανά HRU όπως απεικονίζονται στο output.std

| HRU | SUB | CPMN-SOIL | CN_2 | HRU | SUB | CPMN-SOIL | CN_2 |
|-----|-----|-----------|------|-----|-----|-----------|------|
| 1   | 1   | BERMS9319 | 74   | 43  | 9   | GRAPS9319 | 52   |
| 2   | 2   | BERMS9319 | 74   | 44  | 9   | GRAPS9319 | 46   |
| 3   | 2   | OLIVS9319 | 42   | 45  | 9   | OLIVS9319 | 42   |
| 4   | 2   | OLIVS9319 | 46   | 46  | 9   | OLIVS9319 | 50   |
| 5   | 2   | OLIVS9319 | 38   | 47  | 9   | OLIVS9319 | 46   |
| 6   | 2   | OLIVS9319 | 50   | 48  | 10  | GRAPS9319 | 52   |
| 7   | 2   | SWHTS9319 | 37   | 49  | 10  | GRAPS9319 | 49   |
| 8   | 2   | SWHTS9319 | 35   | 50  | 10  | GRAPS9319 | 55   |
| 9   | 2   | SWHTS9319 | 35   | 51  | 10  | OLIVS9319 | 42   |
| 10  | 2   | SWHTS9319 | 40   | 52  | 10  | OLIVS9319 | 50   |
| 11  | 3   | OLIVS9319 | 46   | 53  | 10  | OLIVS9319 | 46   |
| 12  | 3   | OLIVS9319 | 42   | 54  | 10  | SWHTS9319 | 37   |
| 13  | 3   | SWHTS9319 | 37   | 55  | 10  | SWHTS9319 | 40   |
| 14  | 3   | SWHTS9319 | 35   | 56  | 11  | GRAPS9319 | 52   |
| 15  | 3   | SWHTS9319 | 35   | 57  | 11  | GRAPS9319 | 49   |
| 16  | 4   | GRAPS9319 | 46   | 58  | 11  | GRAPS9320 | 49   |
| 17  | 4   | OLIVS9319 | 50   | 59  | 11  | GRAPS9320 | 52   |
| 18  | 4   | SWHTS9319 | 40   | 60  | 11  | GRAPS9320 | 46   |
| 19  | 5   | SWHTS9319 | 35   | 61  | 11  | OLIVS9319 | 46   |
| 20  | 5   | SWHTS9319 | 37   | 62  | 11  | OLIVS9319 | 50   |
| 21  | 6   | GRAPS9319 | 55   | 63  | 11  | OLIVS9319 | 42   |
| 22  | 6   | GRAPS9319 | 49   | 64  | 11  | SWHTS9320 | 37   |
| 23  | 6   | GRAPS9319 | 52   | 65  | 11  | SWHTS9320 | 40   |
| 24  | 6   | OLIVS9319 | 42   | 66  | 11  | RNGBS9319 | 35   |
| 25  | 6   | OLIVS9319 | 50   | 67  | 12  | GRAPS9319 | 52   |
| 26  | 6   | OLIVS9319 | 46   | 68  | 12  | OLIVS9320 | 46   |
| 27  | 6   | SWHTS9319 | 37   | 69  | 12  | OLIVS9320 | 42   |
| 28  | 6   | SWHTS9319 | 40   | 70  | 12  | SWHTS9320 | 37   |
| 29  | 7   | OLIVS9319 | 46   | 71  | 13  | GRAPS9320 | 49   |
| 30  | 7   | OLIVS9319 | 50   | 72  | 13  | OLIVS9320 | 42   |
| 31  | 7   | SWHTS9319 | 35   | 73  | 13  | SWHTS9320 | 40   |
| 32  | 7   | SWHTS9319 | 35   | 74  | 14  | GRAPS9319 | 52   |
| 33  | 8   | GRAPS9319 | 52   | 75  | 14  | GRAPS9319 | 49   |
| 34  | 8   | GRAPS9319 | 46   | 76  | 14  | OLIVS9319 | 46   |
| 35  | 8   | GRAPS9319 | 49   | 77  | 14  | OLIVS9319 | 42   |
| 36  | 8   | OLIVS9319 | 38   | 78  | 15  | GRAPS9320 | 49   |
| 37  | 8   | OLIVS9319 | 50   | 79  | 15  | OLIVS9320 | 42   |
| 38  | 8   | OLIVS9319 | 42   | 80  | 15  | OLIVS9320 | 46   |
| 39  | 8   | OLIVS9319 | 46   | 81  | 15  | SWHTS9320 | 37   |
| 40  | 8   | SWHTS9319 | 35   | 82  | 16  | GRAPS9320 | 49   |
| 41  | 8   | SWHTS9319 | 35   | 83  | 16  | GRAPS9320 | 52   |
| 42  | 9   | GRAPS9319 | 49   | 84  | 16  | OLIVS9320 | 46   |

Πίνακας 22. Τιμές του **CN\_2** ανά HRU όπως απεικονίζονται στο output.std (συνέχεια)

| HRU | SUB | CPMN-SOIL | CN_2 | HRU | SUB | CPMN-SOIL | CN_2 |
|-----|-----|-----------|------|-----|-----|-----------|------|
| 85  | 16  | OLIVS9320 | 42   | 126 | 25  | OLIVS9319 | 48   |
| 86  | 17  | GRAPS9319 | 49   | 127 | 25  | OLIVS9319 | 56   |
| 87  | 17  | GRAPS9319 | 46   | 128 | 25  | OLIVS9319 | 60   |
| 88  | 17  | GRAPS9319 | 55   | 129 | 25  | SWHTS9319 | 47   |
| 89  | 17  | GRAPS9319 | 52   | 130 | 25  | SWHTS9319 | 50   |
| 90  | 17  | OLIVS9319 | 46   | 131 | 25  | RNGES9323 | 39   |
| 91  | 17  | OLIVS9319 | 50   | 132 | 25  | RNGES9323 | 43   |
| 92  | 17  | OLIVS9319 | 42   | 133 | 25  | RNGBS9323 | 40.1 |
| 93  | 17  | SWHTS9319 | 40   | 134 | 25  | RNGBS9323 | 43   |
| 94  | 18  | GRAPS9319 | 46   | 135 | 26  | GRAPS9319 | 72   |
| 95  | 19  | GRAPS9319 | 49   | 136 | 26  | GRAPS9319 | 69   |
| 96  | 19  | GRAPS9319 | 52   | 137 | 26  | OLIVS9319 | 66   |
| 97  | 19  | GRAPS9319 | 46   | 138 | 26  | OLIVS9319 | 70   |
| 98  | 19  | OLIVS9319 | 42   | 139 | 26  | OLIVS9319 | 62   |
| 99  | 19  | OLIVS9319 | 50   | 140 | 26  | RNGES9319 | 53   |
| 100 | 19  | OLIVS9319 | 46   | 141 | 27  | GRAPS9323 | 72   |
| 101 | 20  | SWHTS9320 | 40   | 142 | 27  | GRAPS9323 | 69   |
| 102 | 20  | SWHTS9320 | 37   | 143 | 27  | OLIVS9323 | 62   |
| 103 | 20  | SWHTS9320 | 35   | 144 | 27  | OLIVS9323 | 66   |
| 104 | 20  | RNGES9320 | 35   | 145 | 27  | SWHTS9323 | 54   |
| 105 | 21  | GRAPS9320 | 52   | 146 | 27  | SWHTS9323 | 57   |
| 106 | 21  | GRAPS9320 | 49   | 147 | 27  | SWHTS9323 | 60   |
| 107 | 21  | OLIVS9320 | 46   | 148 | 27  | RNGES9323 | 53   |
| 108 | 21  | OLIVS9320 | 42   | 149 | 27  | RNGES9323 | 49   |
| 109 | 21  | SWHTS9320 | 35   | 150 | 27  | RNGES9323 | 45   |
| 110 | 21  | SWHTS9320 | 37   | 151 | 28  | SWHTS9320 | 51   |
| 111 | 21  | RNGES9320 | 35   | 152 | 28  | SWHTS9320 | 54   |
| 112 | 21  | RNGES9320 | 35   | 153 | 29  | GRAPS9320 | 66   |
| 113 | 22  | GRAPS9319 | 49   | 154 | 29  | OLIVS9320 | 58   |
| 114 | 23  | GRAPS9319 | 49   | 155 | 29  | OLIVS9320 | 62   |
| 115 | 23  | OLIVS9323 | 42   | 156 | 29  | OLIVS9320 | 66   |
| 116 | 23  | OLIVS9323 | 46   | 157 | 29  | SWHTS9320 | 57   |
| 117 | 24  | GRAPS9319 | 52   | 158 | 29  | SWHTS9320 | 60   |
| 118 | 24  | OLIVS9319 | 46   | 159 | 29  | SWHTS9320 | 54   |
| 119 | 24  | SWHTS9320 | 37   | 160 | 29  | RNGES9320 | 53   |
| 120 | 24  | SWHTS9320 | 35   | 161 | 29  | RNGES9320 | 49   |
| 121 | 25  | GRAPS9319 | 59   | 162 | 30  | GRAPS9320 | 66   |
| 122 | 25  | GRAPS9319 | 62   | 163 | 30  | SWHTS9323 | 57   |
| 123 | 25  | GRAPS9319 | 65   | 164 | 30  | SWHTS9323 | 51   |
| 124 | 25  | GRAPS9319 | 56   | 165 | 30  | SWHTS9323 | 54   |
| 125 | 25  | OLIVS9319 | 52   |     |     |           |      |