

Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο Αθηνών
Τμήμα Γεωγραφίας: ΠΜΣ Εφαρμοσμένης Γεωγραφίας και Διαχείρισης
του Χώρου, Κατεύθυνση Γεωπληροφορικής

***Μοντελοποίηση της Κατανομής Βροχόπτωσης –
Απορροής για την Υδρολογική Λεκάνη του Μόρνου.***

Διπλωματική εργασία της
Γεωργίας Δαλακούρα



Αθήνα, Φεβρουάριος 2016

Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο Αθηνών
Τμήμα Γεωγραφίας: ΠΜΣ Εφαρμοσμένης Γεωγραφίας και
Διαχείρισης του Χώρου, Κατεύθυνση Γεωπληροφορικής

**Μοντελοποίηση της Κατανομής
Βροχόπτωσης – Απορροής για την
Υδρολογική Λεκάνη του Μόρνου.**

Διπλωματική εργασία της
Γεωργίας Δαλακούρα

Επιβλέπων Καθηγητής: Κατσαφάδος Πέτρος

Αθήνα, Φεβρουάριος 2016

Στην ανιψιά μου, Ιωάννα

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας τη διπλωματική μου εργασία θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Πέτρο Κατσαφάδο, για τη συμμετοχή στην ανάθεση του θέματος, καθώς και την καθοδήγηση που μου παρείχε, υποστηρίζοντας όλα τα στάδια της παρούσας εργασίας με ενδιαφέρον και υπομονή. Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους μου τους φίλους για την υποστήριξη και την κατανόησή τους όλο αυτό το διάστημα. Τέλος, δε θα μπορούσα να παραλείψω την οικογένειά μου, για την αμέριστη κατανόηση και ηθική συμπαράσταση που μου παρείχε.

Περίληψη

Η παρούσα μελέτη ασχολείται με την εκτίμηση της απορροής για τη λεκάνη του ποταμού Μόρνου. Ο Μόρνος έχει συνολικό μήκος 70 km και αποστραγγίζει μία λεκάνη απορροής έκτασης περίπου 1000 km². Πηγάζει από τις νότιες πλαγιές της Οίτης και καθώς κατεβαίνει στα νότια αποχετεύει τη λεκάνη. Καθορίζει τα όρια των επαρχιών Δωρίδας και Ναυπακτίας και χύνεται στα όρια Κορινθιακού και Πατραϊκού κόλπου, ανατολικά της Ναυπάκτου. Το κύριο αντικείμενο της εργασίας αυτής, είναι η προσομοίωση της απορροής και η πρόβλεψη για μία χρονική περίοδο. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται με την εφαρμογή του υδρολογικού μοντέλου HMETS στο εμπορικό λογισμικό της Matlab (έκδοση 2013a). Ειδικότερα, εξετάστηκαν όλες οι περιπτώσεις βαθμονόμησης που προκύπτουν με τη χρήση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης DDS, για τις χρονοσειρές 2004-2007 και 2004-2008. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές τιμές παραμέτρων και δύο συναρτήσεων, ώστε να εντοπιστεί το βέλτιστο αποτέλεσμα της βαθμονομημένης καμπύλης απορροής. Από την παραπάνω διαδικασία βρέθηκαν δύο ικανοποιητικά υδρογραφήματα, ένα για κάθε χρονοσειρά, με ποσοστά απόκλισης των βαθμονομημένων τιμών από τις πραγματικές λιγότερο από 20%. Οι τιμές των παραμέτρων που παρήχθησαν από κάθε συνδυαστική περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν στην πρόβλεψη των επόμενων ετών. Τα αποτελέσματα κατέδειξαν μία απόκλιση περίπου 15% στη μία περίπτωση και 20% στην άλλη, εξετάζοντας τα παραγόμενα υδρογραφήματα. Τέλος, έγινε μία προσπάθεια εκτίμησης πλημμυρικού κινδύνου για την περιοχή μελέτης, με βάση τα παραπάνω παράγωγα.

Λέξεις Κλειδιά: *βροχόπτωση, απορροή, προσομοίωση, Μόρνος, HMETS, Matlab.*

Abstract

This study deals with the assessment of runoff in the catchment of Mornos river. Mornos has a total length of 70 km and drains an extended catchment area of about 1000 km². It originates from the southern slopes of Iti and as it descends to the south drains the basin. It is defining the boundaries of provinces Doris Nafpaktos and pouring to the limits of Corinth and Patras Gulf, east of Nafpaktos. The main object of this work is to simulate runoff and the forecast for a period of time. This process is performed by applying the hydrological HMETs model in the commercial software Matlab (2013a edition). Especially, all calibrations which obtained using the DDS optimization algorithm, for the time series of 2004-2007 and 2004-2008, were examined. For this purpose, three different parameters and two functions, in order to identify the optimum effect of the calibrated drainage curve. From the above process arose two well hydrographs, one for each time series, with deviation rates of calibrated values from the observed, less than 20%. Parameter values produced by each combination case used to forecast the next few years. The results releaved a deviation of about 15% in one case and 20% in the other, by examining the produced hydrographs. Finally, a flood risk assessment effort was made for the study area, based on the above derivatives.

Keywords: *rainfall, runoff, simulation, Mornos, HMETs, Matlab.*

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	4
Περίληψη.....	5
Abstract	6
Κεφάλαιο 1.....	9
Εισαγωγή.....	9
Κεφάλαιο 2.....	16
Υδρολογικός Κύκλος.....	16
Αποθήκευση νερού στη θάλασσα.....	17
Εξάτμιση	18
Εξατμοδιαπνοή.....	18
Εξάχνωση.....	18
Νερό στην ατμόσφαιρα.....	18
Συμπύκνωση.....	18
Κατακρημνίσματα	19
Αποθήκευση νερού σε πάγους και χιόνια	19
Απορροή από λιώσιμο του χιονιού	19
Επιφανειακή απορροή	19
Ροή σε υδατορεύματα.....	20
Αποθήκευση γλυκού νερού	21
Διήθηση	21
Αποθήκευση υπόγειου νερού	21
Εκφόρτιση υπόγειου νερού	22
Πηγές	22
Μεθοδολογίες εκτίμησης της απορροής.....	22
Προσομοίωση Υδρολογικών Διεργασιών	28
Το μοντέλο ARNO	30
Το μοντέλο MIKE SHE	31
Το μοντέλο HEC	31
Το μοντέλο HBV.....	32
Γενική Περιγραφή του Υδρολογικού Μοντέλου HMETS.....	32
Κεφάλαιο 3.....	38
Γεωγραφία Μελέτης Περίπτωσης.....	38
Συλλογή και Επεξεργασία δεδομένων	41

Μεθοδολογία: Εφαρμογή του Μοντέλου ΗΜΕΤS	42
Η Διαδικασία της Βαθμονόμησης (Calibration)	47
Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα	57
Πρόβλεψη (Simulation) και Ανάλυση των Αποτελεσμάτων	57
Εκτίμηση Πλημμυρικού Κινδύνου	60
Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα	64
Βιβλιογραφία	66
Παράρτημα.....	72

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Ο σπουδαιότερος παράγοντας διαμόρφωσης του επιφανειακού ανάγλυφου της γης είναι το τρεχούμενο πάνω στην επιφάνειά της νερό. Όταν αυτό οργανώνεται σε μια επιμήκη υδάτινη μάζα μέσα σε ρυάκια, χείμαρρους και ποταμούς δημιουργεί τις κατάλληλες συνθήκες για την διάβρωση, μεταφορά και απόθεση φερτών υλικών που αποσπάστηκαν από τα μητρικά πετρώματα. Η δράση αυτή του νερού αποτελεί την κύρια αιτία για τη δημιουργία των λεκανών απορροής και των κοιλάδων που σαν μορφολογικό σύνολο διαμορφώνουν στη βάση τους δρόμους αποστράγγισης του νερού, δηλαδή το υδρογραφικό δίκτυο.

Από την άλλη, τα πλημμυρικά φαινόμενα είναι από τα πιο καταστροφικά που αντιμετωπίζει η ανθρωπότητα από την απαρχή του πολιτισμού της. Ο άνθρωπος εξαρτημένος από το νερό για την επιβίωσή του συνέστησε τους πρώτους οικισμούς κοντά σε λίμνες και ποτάμια προκειμένου να ικανοποιήσει τις αυξανόμενες ανάγκες των κοινοτήτων του και των δραστηριοτήτων του από μια σταθερή πηγή νερού. Την ίδια στιγμή βέβαια βρίσκεται εκτεθειμένος στη φυσική δύναμη του νερού, καθώς εκείνο μεταβάλλει τη γεωγραφική και λειτουργική του έκταση και ένταση υπακούοντας στους φυσικούς νόμους του υδρολογικού κύκλου. Ο Νείλος θεοποιείται καθώς η δύναμη και η έκταση που διαμορφώνει την επιφάνεια της υδρολογικής του λεκάνης στην Αρχαία Αίγυπτο αντιμετωπίζεται με δέος από τους κατοίκους της πότε για τις ευεργετικές του αποθέσεις με γόνιμη λάσπη και πότε για την καταστροφική του ορμή που εξαφανίζει οικισμούς και καλλιέργειες μέσα σε ελάχιστο χρόνο.

Πιο συγκεκριμένα, πολλές και διαφορετικές μελέτες πραγματοποιούνται για την εκτίμηση της σχέσης βροχόπτωσης – απορροής με την βοήθεια προσαρμοσμένων υδρολογικών μοντέλων. Οι εργασίες αυτές υλοποιούνται για τις διάφορες κλιματολογικές μελέτες καθώς και μελέτες περιβαλλοντικών επιπτώσεων, που πραγματοποιούνται από διάφορους φορείς. Τα μοντέλα αυτά χρησιμοποιούνται και στην εκπαίδευση για την διδασκαλία της υδρολογικής ανάλυσης και της εκτίμησης της απορροής, αλλά και κατά την εκπόνηση πτυχιακών και διπλωματικών εργασιών. Παραδείγματα κάποιων από τις πιο πρόσφατες μελέτες που έχουν εκπονηθεί με την χρήση υδρολογικών μοντέλων εκτίμησης απορροής, τόσο στην Ελλάδα αλλά και στο

εξωτερικό αναφέρονται παρακάτω. Να σημειωθεί πως στο σύνολο τους οι μελέτες που συγκεντρώθηκαν χρησιμοποιούν τα διάφορα υδρολογικά μοντέλα για ένα μέρος της ευρύτερης μελέτης.

Οι Troin et al. (2015) χρησιμοποιούν τα μοντέλα HMETS, MOHYSE και GR4J σε συνδυασμό με μοντέλα χιονιού για την αξιολόγηση των επιδόσεων και της αξιοπιστίας αυτών, στην προσομοίωση της ροής του λιωμένου χιονιού κατά την περίοδο 1961 – 2000. Επίσης μέσα από την χρήση και το συνδυασμό πολλαπλών μοντέλων χιονιού, επιχειρείται η αξιολόγηση των ασαφειών μεταξύ αυτών των συνδυασμών στην πρόβλεψη των ροών των ποταμών στα συγκεκριμένα περιβάλλοντα (Σκανδιναβικά). Τα γενικότερα αποτελέσματα της μελέτης αυτής κατέδειξαν μεγαλύτερη ασάφεια-αβεβαιότητα από τη χρήση υδρολογικών μοντέλων, σε σχέση με τη χρήση μοντέλων χιονιού, όσον αφορά τις μελέτες ροών υδρολογίας – χιονιού.

Στον αντίποδα, οι Essou και Brissette (2013) χρησιμοποιούν το μοντέλο HMETS, σε μια προσπάθεια εκτίμησης των μελλοντικών επιπτώσεων που θα έχουν οι κλιματικές αλλαγές στη ροή του ποταμού Ουέμέ που διασχίζει τις χώρες της Δημοκρατίας του Μπενίν και της Νιγηρίας, στη Δυτική Αφρική. Οι περίοδοι που εξετάστηκαν αφορούν τα χρονικά διαστήματα 2035 - 2064 και 2070 - 2099. Το μοντέλο αυτό σε συνδυασμό με 65 κλιματικές προβολές που προκύπτουν από 24 κλιματικά μοντέλα και τρία σενάρια εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, οδήγησαν στο συμπέρασμα πως οι ημερήσιες θερμοκρασίες στη λεκάνη απορροής του ποταμού, θα αυξηθούν κατά 5 βαθμούς Κελσίου κατά την περίοδο 2070 - 2099. Οι μέσες μηνιαίες ροές προβλέπεται να παρουσιάσουν μία πτώση της τάξης του 30% και 20%, κατά τις βροχερές και ξηρές περιόδους αντίστοιχα. Ενώ οι μέσες εποχιακές και ετήσιες ροές, θα μειωθούν από 8-10% και 3-5%. Τα αποτελέσματα όσον αφορά τις ετήσιες ροές, οδήγησαν σε μια μείωση της τάξης του 3% της ετήσιας μέγιστης ροής για τα χρονικά διαστήματα 2035 - 2064 και 5% για το διάστημα 2070 – 2099. Οι ερευνητές εκτιμούν πως η μείωση των διαθέσιμων υδάτινων πόρων στην υδρολογική λεκάνη του ποταμού Ουέμέ, θα οδηγήσει σε επιβράδυνση της οικονομικής δραστηριότητας στις περιοχές που εξαρτώνται από αυτόν, επεκτείνοντας έτσι την χρησιμότητα αυτού του είδους των αναλύσεων, όχι μόνο σε φυσικογεωγραφικούς τομείς και φαινόμενα, αλλά επίσης και σε τομείς όπως αυτός της οικονομίας μιας περιοχής.

Μια αντίστοιχη προσπάθεια εκτίμησης των επιπτώσεων από την κλιματική αλλαγή επιχείρησαν και οι Leconte et al. (2012), με αντικείμενο μελέτης τις λεκάνες απορροής τεσσάρων Καναδικών ποταμών. Στην έρευνα αυτή εξετάστηκαν επίσης διαρθρωτικές και μη στρατηγικές, που θα μπορούσε να ακολουθήσει ο τομέας της υδροηλεκτρικής βιομηχανίας για την μείωση της τρωτότητας από κλιματικά φαινόμενα. Ακόμα ερευνήθηκαν οι αλλαγές σε κάποιες από τις επιμέρους μεταβλητές που συνθέτουν τα υδρολογικά μοντέλα, όπως η χιονοκάλυψη και η υγρασία του εδάφους. Τέλος, εξετάστηκε η ασάφεια ή αλλιώς η αβεβαιότητα που προκύπτει από τις μελλοντικές προβολές της κλιματικής αλλαγής. Τα υδρολογικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν στο σύνολο τους στη μελέτη αυτή είναι τα HMETS, HSAMI, HYDROTEL, MESH, SWAT, HBV, WATFLOOD και VIC. Τα μοντέλα αυτά εφαρμόστηκαν στις λεκάνες απορροής των ποταμών Manicouagan, Churchill, Gatineau και Peribonka. Πιο συγκεκριμένα, διαφορετικές εκπαιδευτικές – φοιτητικές εργασίες συλλέχθηκαν, σε κάθε μία από τις οποίες υπολογίστηκαν κάποια από τα μοντέλα αυτά. Τα αποτελέσματα αυτών τέθηκαν προς σύγκριση για την διεξαγωγή συμπερασμάτων. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν αρχικά όσον αφορά την αβεβαιότητα των μελλοντικών προβολών που αναφέρθηκαν παραπάνω, έδειξαν πως αυτή είναι μεγαλύτερη κατά τη διάρκεια κάποιων συγκεκριμένων περιόδων του έτους και ανάλογα με το μοντέλο που έχει επιλεγεί προς ανάλυση. Επίσης μεγαλύτερη είναι η αβεβαιότητα που προκύπτει από τη δομή του υδρολογικού μοντέλου που χρησιμοποιείται κάθε φορά, σε σχέση με αυτή των παραμέτρων του μοντέλου. Τα συμπεράσματα και οι απαντήσεις στα αρχικά ζητούμενα της έρευνας έχουν ως εξής. Όσον αφορά την μελλοντική κλιματική αλλαγή αναμένεται μείωση έως και 50% της μέγιστης αλλά και της μέσης ποσότητας νερού που προκύπτει από το λιώσιμο του χιονιού για την περίοδο 2050- 2070. Δηλαδή θα υπάρξει μια ραγδαία μείωση της έκτασης που θα καλύπτεται από χιόνι, καθώς και μείωση της χρονικής διάρκειας που θα παραμένει το χιόνι στις εκτάσεις αυτές χωρίς να λιώσει. Η κατάσταση αυτή θα οδηγήσει μετέπειτα στη μείωση της υγρασίας των εδαφών μέσα στη λεκάνη απορροής, η οποία ωστόσο θα εξαρτάται και από τον τύπο αυτών. Οι προσομοιώσεις των κλιματικών μοντέλων υπέδειξαν αύξηση της εξάτμισης κατά την άνοιξη και το καλοκαίρι, καθώς και στο διάστημα των μηνών Ιανουάριος έως Απρίλιος. Όσον αφορά την ανάπτυξη μεθόδων και εργαλείων (κυρίως λογισμικό) για την εκτίμηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στην παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας, συγκρίθηκαν οι αλγόριθμοι SSDP (stochastic sampling dynamic) και SDP (lag-1 stochastic dynamic programming). Σύμφωνα με τα

αποτελέσματα ο αλγόριθμος SSDP αποδίδει μεγαλύτερα ποσά ενέργειας καθώς διαχειρίζεται καλύτερα τις διαφοροποιήσεις στην ποσότητα του εισρέοντος νερού. Επίσης, εξετάστηκε η προσθήκη επιπλέον τουρμπινών στο υπάρχον σύστημα. Όπως ήταν αναμενόμενο η ενέργεια αυτή αύξησε την παραγωγή της υδροηλεκτρικής ενέργειας, όμως προέκυψε ένα άλλο ερώτημα από την πρακτική αυτή, το οποίο αφορά το οικονομικό κόστος που προκύπτει με την αύξηση των τουρμπινών. Η απάντηση αυτού παραμένει ασαφής.

Στο ίδιο μοτίβο ο Bohrn (2012) εξετάζει τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στη λεκάνη απορροής και πάλι του ποταμού Churchill, με στόχο τις μελλοντικές προβλέψεις των ροών αυτού. Τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν αυτή τη φορά είναι τα HMETs, WATFLOOD, HBV-EC καθώς και ένας συνδυασμός υδρολογικών μοντέλων. Έπειτα πραγματοποιήθηκε η ανάλυση αβεβαιότητας. Τα συμπεράσματα στα οποία κατέληξε ο ερευνητής είναι πως τα επόμενα χρόνια, τόσο έως το 2050 αλλά και για το 2080 θα υπάρχει μια μικρή αύξηση στην ποσότητα της ροής της λεκάνης, η οποία θα οφείλεται στην κλιματική αλλαγή. Επίσης προβλέπεται μια αλλαγή στους χρόνους κάποιων υδρολογικών γεγονότων μελλοντικά, δηλαδή η αλλαγή των χρονοδιαγραμμάτων για τις ανοιξιότικες πλημμύρες του ποταμού και των γεγονότων που συνοδεύονται από την ελάχιστη ροή αυτού. Να σημειωθεί πως τα αποτελέσματα αυτά ήταν άμεσα εξαρτημένα από το υδρολογικό μοντέλο που χρησιμοποιούνταν κάθε φορά. Η ανάλυση αβεβαιότητας υπέδειξε πως το μεγαλύτερο ποσοστό αυτής παρουσιάζεται από την επιλογή του κλιματικού μοντέλου, έπειτα η επιλογή του υδρολογικού μοντέλου και τέλος η επιλογή των σεναρίων εκπομπών.

Ο Δημητρίου (2015) πραγματοποίησε υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης απορροής του ποταμού Κερίτη, ο οποίος βρίσκεται στο νομό Χανίων. Το τροποποιημένο μοντέλο SWAT – KARST χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση του υδατικού ισοζυγίου της λεκάνης, καθώς και για την εξέλιξή του ποιοτικά και ποσοτικά τα επόμενα χρόνια. Τρία περιφερειακά κλιματικά μοντέλα (KnnmiRacmoEcham5, MpiRemoEcham5 και SmhiRcaEcham5), τα οποία επιλέχθηκαν με βάση τον διαχωρισμό που προτείνουν οι Koutroulis et al. (2013), χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της επίδρασης της κλιματικής αλλαγής στην ποσότητα νερού της λεκάνης. Και τα τρία σενάρια προβλέπουν σημαντική μείωση στην διαθεσιμότητα των υδατικών πόρων έως το 2100. Τα γενικότερα αποτελέσματα της έρευνας αυτής οδήγησαν στην

μελλοντική μείωση της βροχόπτωσης, της επιφανειακής απορροής και των καρστικών πηγών κατά ποσοστά 30%, 70% και 30-40% αντίστοιχα.

Ο Ζωγόπουλος (2012) στην εργασία του προσπαθεί να προσομοιώσει την απορροή της υδρολογικής λεκάνης του Ευρώτα στο νομό Λακωνίας. Χρησιμοποιεί το μοντέλο MIKE SHE, το οποίο είναι ένα υδρολογικό μοντέλο που προσομοιώνει τόσο την ροή των επιφανειακών υδάτων, όσο και των υπόγειων. Λαμβάνει υπόψη κατά τους υπολογισμούς του τις χρήσεις γης, τους τύπους των εδαφών καθώς και διάφορα σενάρια διαχείρισης. Για να υπολογιστεί η επιφανειακή απορροή στην μελέτη αυτή συγκεντρώθηκαν μετεωρολογικά δεδομένα, δεδομένα βροχόπτωσης και εξατμισοδιαπνοής, καθώς επίσης γεωλογικά, εδαφολογικά και στοιχεία φυτοκάλυψης της περιοχής. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε σε βάθος χρόνου 40 ετών και πιο συγκεκριμένα για την περίοδο 1956 – 1996. Κάποια γενικά συμπεράσματα που προέκυψαν τουλάχιστον όσον αφορά την απορροή της λεκάνης του Ευρώτα, είναι πως για τη συγκεκριμένη χρονική περίοδο τα μεγαλύτερα ποσοστά ολικής απορροής παρουσιάζονται κατά τους μήνες Ιανουάριο και Δεκέμβριο. Ενώ η υψηλότερη τιμή συνολικά παρουσιάζεται τον Ιανουάριο του 1987 με 778,792 m³/s.

Μία αντίστοιχη μελέτη πραγματοποιήθηκε από τους Μαμάση κ.α. (2004) για τη λεκάνη απορροής του ποταμού Αχελώου. Σκοπός της εργασίας τους είναι η εκτίμηση της απορροής λεκάνης από υδρομετεωρολογικά και γεωγραφικά δεδομένα καθώς και ο επιμερισμός της απορροής σε ανάντη υπολεκάνες. Για το σκοπό αυτό αναπτύχθηκε ένα κατανεμημένο μοντέλο υδρολογικής λεκάνης που προσομοιώνει τις χωρικά μεταβαλλόμενες φυσικές διεργασίες με τη χρήση μικρού αριθμού παραμέτρων, οι οποίες δεν μεταβάλλονται χρονικά και χωρικά και εκτιμώνται με ευκολία από τις παρατηρούμενες απορροές στην έξοδο της λεκάνης. Το μοντέλο υδατικού ισοζυγίου αναπτύχθηκε στο περιβάλλον του ΣΓΠ-ArcView, με τη χρήση της, ενσωματωμένης στο σύστημα, γλώσσας προγραμματισμού Avenue. Στην παρούσα εφαρμογή χρησιμοποιήθηκε ως αρχική βάση ένα συγκεντρωτικό (lumped) μοντέλο υδατικού ισοζυγίου. Το μοντέλο επεκτάθηκε σε κατανεμημένο (distributed) ενιαίων παραμέτρων με τη χρήση των λειτουργιών του ΣΓΠ, ενώ έγιναν και ορισμένες απλοποιήσεις, για την προσομοίωση σε μηνιαία βάση. Ο μετασχηματισμός της βροχής σε απορροή στην έξοδο της εξεταζόμενης λεκάνης, πραγματοποιήθηκε με εφαρμογή διαδοχικών μετασχηματισμών της βροχόπτωσης μέσα σε ένα σύστημα διασυνδεδεμένων δεξαμενών. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο ήταν όσο το δυνατόν

λιγότερες, ώστε να είναι σχετικά εύκολη η βαθμονόμηση και ήταν οι εξής: (α) ποσοστό αδιαπέρατης επιφάνειας, (β) χωρητικότητα δεξαμενής εδαφικής υγρασίας, (γ) συντελεστής στείρευσης εδαφικής υγρασίας, (δ) συντελεστής στείρευσης υπόγειου νερού. Η μελέτη ολοκληρώθηκε με τη βαθμονόμηση (57 μήνες) και επαλήθευση (36 μήνες) του μοντέλου, που βασίστηκαν στη σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις μετρημένες παροχές στην έξοδο της λεκάνης. Η βαθμονόμηση (calibration) του μοντέλου πραγματοποιήθηκε στο συγκεντρωτικό (lumped) μοντέλο του υδατικού ισοζυγίου. Η διαδικασία βασίστηκε στη βελτιστοποίηση της προσαρμογής των υπολογισμένων από το μοντέλο παροχών. Ως μέθοδος βελτιστοποίησης χρησιμοποιήθηκε η μη γραμμική μέθοδος της γενικευμένης ανηγμένης κλίσης (generalized reduced gradient-GRD). Ως αντικειμενική συνάρτηση προς ελαχιστοποίηση χρησιμοποιήθηκε το αθροιστικό τετραγωνικό σφάλμα ανάμεσα στην προσομοιωμένη και την παρατηρούμενη χρονοσειρά. Οι τιμές των παραμέτρων που προέκυψαν από τη βελτιστοποίηση του συγκεντρωτικού μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν έτοιμες στον αλγόριθμο του κατανεμημένου μοντέλου για την κατασκευή των κανάβων των μεταβλητών εξόδου καθώς και των κανάβων συγκεντρωτικής απορροής. Ολοκληρώνοντας τον κανάβο των παροχών ήταν δυνατός ο υπολογισμός του μηνιαίου όγκου απορροής σε κάθε σημείο του υδρογραφικού δικτύου. Και στις δύο περιπτώσεις οι δείκτες επίδοσης είχαν πολύ ικανοποιητικές τιμές με καλύτερες αυτές του κατανεμημένου μοντέλου.

Στην παρούσα εργασία μελετάται η σχέση βροχόπτωσης–απορροής στη λεκάνη απορροής του ποταμού Μόρνου, με τη χρήση του υδρολογικού μοντέλου HMETs στο υπολογιστικό πρόγραμμα Matlab. Στόχοι της εργασίας αποτελούν:

- Η διερεύνηση της κατανομής βροχόπτωσης – απορροής στη λεκάνη του Μόρνου και
- Η μοντελοποίηση/προσομοίωση της σχέσης αυτής.

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία περιλαμβάνει πέντε ενότητες:

Το πρώτο κεφάλαιο είναι το εισαγωγικό. Στο πλαίσιο αυτού του κεφαλαίου τονίζεται η αναγκαιότητα και ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Επίσης, πραγματοποιείται επισκόπηση διαφόρων μελετών που έχουν εκπονηθεί με την χρήση

υδρολογικών μοντέλων για την εκτίμηση της απορροής, τόσο στην Ελλάδα όσο και στο εξωτερικό. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την παρουσίαση της δομής της εργασίας.

Ένα μεγάλο μέρος του δεύτερου κεφαλαίου καταλαμβάνει ο κύκλος του νερού. Εν συνεχεία, παρατίθενται οι μεθοδολογίες εκτίμησης της απορροής καθώς και η ταξινόμηση των υδρολογικών μοντέλων. Ακόμη, αναλύονται ορισμένα μοντέλα αντίστοιχα με αυτό που θα χρησιμοποιηθεί στη μεθοδολογία της εργασίας. Τέλος, δίνεται μία περιγραφή σχετικά με τη λειτουργία του μοντέλου HMETTS.

Το τρίτο κεφάλαιο αποτελεί τη μεθοδολογία της παρούσας μελέτης. Αρχικά, περιγράφεται η περιοχή μελέτης, ο τρόπος που συλλέχθηκαν τα πρωτογενή δεδομένα και η μετατροπή αυτών, με σκοπό την εισαγωγή τους στο περιβάλλον εργασίας. Έπειτα, αναλύεται η εφαρμογή του μοντέλου και παρατίθενται τα διάφορα αποτελέσματα της βαθμονόμησης.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, με βάση τα βέλτιστα αποτελέσματα της βαθμονόμησης, παρουσιάζονται τα υδρογραφήματα της προσομοίωσης/πρόβλεψης για τα ζητούμενα έτη. Επιπρόσθετα, πραγματοποιείται μία προσπάθεια εκτίμησης του πλημμυρικού κινδύνου.

Στο τελευταίο κεφάλαιο διεξάγονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα μελέτη.

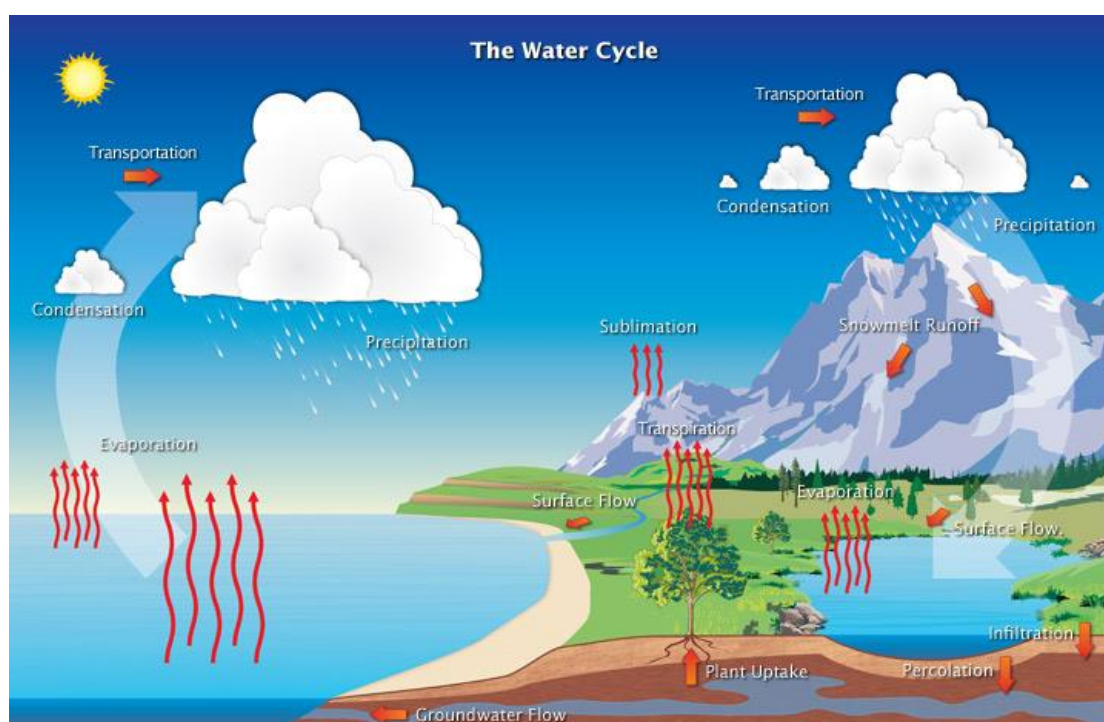
Κεφάλαιο 2

Υδρολογικός Κύκλος

Ο υδρολογικός κύκλος, ή αλλιώς ο κύκλος του νερού, περιγράφει την παρουσία και την κυκλοφορία του νερού στην επιφάνεια της Γης, καθώς και κάτω και πάνω απ' αυτή (Εικόνα 1). Το νερό της Γης είναι πάντα σε κίνηση και πάντα σε αλλαγή, από την υγρή μορφή στην αέρια ή σε πάγο ξανά και αντίστροφα. Ο ήλιος, που κινεί τον κύκλο του νερού, θερμαίνει το νερό στη θάλασσα (στους ωκεανούς) το οποίο εν μέρει εξατμίζεται και ανυψώνεται με τη μορφή ατμού στον αέρα (Κοδοσάκης, 1992). Νερό εξατμίζεται ακόμα από τις λίμνες, τα ποτάμια και το έδαφος. Η διαπνοή των φυτών είναι μια ακόμη λειτουργία που αποδίδει υδρατμούς στην ατμόσφαιρα. Η εξατμηση και διαπνοή από την ξηρά συχνά δεν διακρίνονται και έτσι μιλούμε για εξατμοδιαπνοή. Μια μικρή ποσότητα υδρατμών στην ατμόσφαιρα προέρχεται από την εξάχνωση, μέσω της οποίας μόρια από πάγους και χιόνια μετατρέπονται απευθείας σε υδρατμούς χωρίς να περάσουν από την υγρή μορφή.

Ανοδικά ρεύματα αέρα ανεβάζουν τους υδρατμούς στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, όπου οι μικρότερες πιέσεις που επικρατούν έχουν αποτέλεσμα τη μείωση της θερμοκρασίας. Επειδή όμως σε χαμηλή θερμοκρασία ο αέρας δεν μπορεί πια να συγκρατεί όλη τη μάζα των υδρατμών, ένα μέρος τους συμπυκνώνεται και σχηματίζει τα σύννεφα. Τα σταγονίδια νερού που σχηματίζουν τα σύννεφα συγκρούονται και μεγαλώνουν, και τελικά πέφτουν απ' τον ουρανό ως κατακρημνίσματα, ως βροχή ή χιόνι. Η μεγαλύτερη ποσότητα κατακρημνισμάτων πέφτει απευθείας στους ωκεανούς. Από την ποσότητα που πέφτει στη στεριά, ένα σημαντικό μέρος καταλήγει και πάλι στους ωκεανούς ρέοντας υπό την επίδραση της βαρύτητας, ως επιφανειακή απορροή. Η μεγαλύτερη ποσότητα της επιφανειακής απορροής μεταφέρεται στους ωκεανούς από τα ποτάμια, με τη μορφή ροής σε υδατορεύματα. Η επιφανειακή απορροή μπορεί ακόμη να καταλήξει στις λίμνες, που αποτελούν, μαζί με τους ποταμούς, τις κυριότερες αποθήκες γλυκού νερού. Το νερό των κατακρημνισμάτων δεν ρέει αποκλειστικά μέσα στους ποταμούς. Κάποιες ποσότητες διαπερνούν το έδαφος με τη λειτουργία της διήθησης και σχηματίζουν το υπόγειο νερό. Μέρος του νερού αυτού μπορεί να ξαναβρεί το δρόμο του προς τα επιφανειακά υδάτινα σώματα (και τους ωκεανούς) ως εκφόρτιση υπόγειου νερού. Όταν βρίσκει διόδους προς την επιφάνεια της γης εμφανίζεται με τη μορφή πηγών. Ένα άλλο

μέρος του υπόγειου νερού πηγαίνει βαθύτερα και εμπλουτίζει τους υπόγειους υδροφορείς, οι οποίοι μπορούν να αποθηκεύσουν τεράστιες ποσότητες νερού για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Ωστόσο, ακόμα και αυτό το νερό συνεχίζει να κινείται με την πάροδο του χρόνου, όπου μέρος του ξαναμπαίνει στους ωκεανούς. Αυτή η συνεχιζόμενη διαδικασία αποτελεί τον υδρολογικό κύκλο. Δεν πρόκειται για μία τυποποιημένη διαδικασία, ακόμα και ο χρόνος πραγματοποίησης διαφέρει. Υπάρχει εξάρτηση από διάφορους παράγοντες, όπως είναι το κλίμα της περιοχής, η γεωγραφική θέση και η εποχή του έτους. Επίσης, οι ανθρώπινες παρεμβάσεις προκαλούν σοβαρές αλλαγές στον υδρολογικό κύκλο (Μήτρακας, 2001).



Εικόνα 2.1: Ο υδρολογικός κύκλος. Πηγή: <http://earthobservatory.nasa.gov>.

Η Γεωλογική Υπηρεσία των ΗΠΑ (USGS) έχει διακρίνει 16 μέρη του υδρολογικού κύκλου (Perlman et al., 2005):

Αποθήκευση νερού στη θάλασσα

Αξίζει να σημειωθεί ότι πολύ περισσότερο νερό από αυτό που βρίσκεται σε κίνηση στον υδρολογικό κύκλο είναι αποθηκευμένο στη θάλασσα, κυρίως στους ωκεανούς. Από τα 1.386.000.000 κυβικά χιλιόμετρα του νερού στη Γη, περίπου 1.338.000.000 κυβικά χιλιόμετρα (το 96,5%) είναι αποθηκευμένα στους ωκεανούς. Οι ωκεανοί παρέχουν περίπου το 88% του εξατμιζόμενου νερού που μπαίνει στον υδρολογικό κύκλο (Graham et al., 2010).

Εξάτμιση

Η εξάτμιση από τη θάλασσα είναι ο κύριος τρόπος με τον οποίο το νερό περνά στην ατμόσφαιρα. Η μεγάλη επιφάνεια των ωκεανών (πάνω από το 70% της επιφάνειας της Γης καλύπτεται από ωκεανούς) επιτρέπει μεγάλης κλίμακας εξάτμιση. Σε παγκόσμιο επίπεδο, η ποσότητα νερού που εξατμίζεται είναι ίση με τη ποσότητα του νερού που επιστρέφει στην επιφάνεια της Γης με τη μορφή κατακρημνισμάτων. Η κατανομή των ποσοτήτων που εξατμίζονται και ξαναπέφτουν μεταβάλλεται γεωγραφικά. Έτσι, στη θάλασσα η εξάτμιση υπερτερεί της βροχής ενώ στη στεριά συμβαίνει το αντίθετο.

Εξατμοδιαπνοή

Η εξατμοδιαπνοή ορίζεται ως το νερό που διαφεύγει στην ατμόσφαιρα ως εξάτμιση από την επιφάνεια του εδάφους και ως διαπνοή από τα φύλλα των φυτών. Το νερό αυτό μπορεί να είναι υπόγειο που φτάνει στην επιφάνεια του εδάφους μέσω τριχοειδών εδαφικών σωληνίσκων και στα φύλλα των φυτών μέσω του τριχοειδούς αγγειακού συστήματος των φυτών.

Εξάχνωση

Η εξάχνωση είναι η μετατροπή του νερού από τη στερεά μορφή του χιονιού ή του πάγου σε υδρατμό χωρίς να μεσολαβήσει η υγρή μορφή, χωρίς δηλαδή να λιώσει προηγουμένως.

Νερό στην ατμόσφαιρα

Η ατμόσφαιρα δεν είναι η μεγαλύτερη αποθήκη για το νερό, αλλά είναι η συνθήκη μέσω της οποίας το νερό μετακινείται σε παγκόσμια κλίμακα. Υπάρχει πάντα νερό στην ατμόσφαιρα. Τα σύννεφα είναι η πιο ορατή μορφή ατμοσφαιρικού νερού αλλά ακόμα και ο καθαρός αέρας περιέχει νερό – με τη μορφή υδρατμών που δεν είναι ορατοί.

Συμπύκνωση

Η συμπύκνωση είναι η διεργασία της μετατροπής του νερού από την αέρια στην υγρή μορφή. Είναι σημαντική για τον κύκλο του νερού, διότι επιτρέπει τον σχηματισμό των σύννεφων. Τα σύννεφα, παράγουν κατακρημνίσματα (βροχή, χιόνι, χαλάζι) τα οποία είναι και ο βασικός τρόπος με τον οποίο το νερό ξαναγυρίζει στην επιφάνεια της Γης. Η συμπύκνωση είναι το αντίθετο της εξάτμισης.

Συμπύκνωση στον αέρα

Η περιεκτικότητα της ατμόσφαιρας σε νερό σε αέρια μορφή έχει ένα ανώτατο όριο, το όριο κορεσμού, το οποίο αυξάνεται με τη θερμοκρασία. Έτσι, αν προστεθούν υδρατμοί πάνω από το όριο κορεσμού, αλλά κυρίως αν ψυχθεί μια αέρια μάζα και μειωθεί το όριο κορεσμού (αυτό γίνεται συνήθως με την ανύψωση και εκτόνωση της μάζας σε μεγαλύτερα υψόμετρα όπου επικρατούν μικρότερες πιέσεις), τότε οι πλεονάζοντες υδρατμοί υγροποιούνται σχηματίζοντας σε μικροσκοπικό επίπεδο σταγονίδια ή παγοκρυστάλλους και σε μακροσκοπικό επίπεδο σύννεφα.

Κατακρημνίσματα

Τα κατακρημνίσματα είναι η πτώση του νερού από τα σύννεφα, με τη μορφή βροχής, χιονόνερου, χιονιού ή χαλαζιού. Αποτελεί τον κύριο τρόπο με τον οποίο το νερό της ατμόσφαιρας επιστρέφει στην επιφάνεια της Γης. Η συχνότερη μορφή κατακρημνισμάτων είναι η βροχή. Οι ποσότητες των κατακρημνισμάτων μεταβάλλονται χωρικά και χρονικά.

Αποθήκευση νερού σε πάγους και χιόνια

Το νερό που βρίσκεται αποθηκευμένο για μεγάλες χρονικές περιόδους στον πάγο, το χιόνι και τους παγετώνες, αποτελεί και αυτό μέρος του υδρολογικού κύκλου. Το μεγαλύτερο μέρος της μάζας του πάγου στη Γη, περίπου το 90%, βρίσκεται στην Ανταρκτική, ενώ οι πάγοι της Γροιλανδίας περιέχουν το υπόλοιπο 10% της παγκόσμιας μάζας πάγου. Στη Γροιλανδία το μέσο πάχος πάγου είναι 1.500 μέτρα, αλλά μπορεί να μπορεί να φτάσει και τα 4.300 μέτρα.

Απορροή από λιώσιμο του χιονιού

Παγκοσμίως, η απορροή από το λιώσιμο του χιονιού προς τα υδατορεύματα αποτελεί σημαντική συνιστώσα της κίνησης του νερού. Η απορροή από το λιώσιμο του χιονιού μεταβάλλεται από εποχή σε εποχή αλλά και από χρόνο σε χρόνο. Η έλλειψη νερού αποθηκευμένου με τη μορφή χιονιού το χειμώνα μπορεί να λιγοστέψει το διαθέσιμο νερό για όλο τον υπόλοιπο χρόνο. Αυτό μπορεί να επηρεάσει τη ποσότητα διαθέσιμου νερού στους κατάντη ταμιευτήρες, πράγμα που με τη σειρά του μπορεί να επηρεάσει το διαθέσιμο νερό για άρδευση και ύδρευση.

Επιφανειακή απορροή

Επιφανειακή απορροή είναι η απορροή κατακρημνισμάτων πάνω από το εδαφικό ανάγλυφο. Μέρος των κατακρημνισμάτων που πέφτουν πάνω στο έδαφος, κυλούν επιφανειακά προς τα ποτάμια, σχηματίζοντας την επιφανειακή απορροή.. Στην

πραγματικότητα τα πράγματα είναι πιο περίπλοκα, καθώς τα ποτάμια κερδίζουν και χάνουν νερό μέσω του εδάφους.

Όπως συμβαίνει με όλα τα μέρη του υδρολογικού κύκλου, η σχέση μεταξύ των κατακρημνισμάτων και της επιφανειακής απορροής μεταβάλλεται στο χρόνο και το χώρο. Η απορροή εξαρτάται τόσο από μετεωρολογικούς παράγοντες, όσο και από τη γεωλογία και το ανάγλυφο της περιοχής. Μόνο το ένα τρίτο περίπου του όγκου των κατακρημνισμάτων που πέφτει πάνω στο έδαφος, απορρέει σε υδατορεύματα και γυρίζει στη θάλασσα. Τα υπόλοιπα δύο τρίτα, εξατμίζονται, ή διηθούνται προς τα υπόγεια νερά.

Ροή σε υδατορεύματα

Η κίνηση του νερού μέσα στα ποτάμια. Η Γεωλογική Υπηρεσία των ΗΠΑ (USGS) χρησιμοποιεί τον όρο "ροή σε υδατορεύματα" αναφερόμενη στο νερό που κυλά μέσα σε ποτάμια, ρέματα ή ρυάκια.

Λεκάνες απορροής και ποτάμια

Για την κατανόηση της λειτουργίας του υδρολογικού κύκλου είναι σημαντική η έννοια των λεκανών απορροής των ποταμιών. Η λεκάνη απορροής είναι εδαφική έκταση που φιλοξενεί το ποτάμι και όλους τους παραποτάμους του, ακόμη και τα μικρά ρυάκια που καταλήγουν σε αυτό. Ακριβέστερα,

«λεκάνη απορροής σε μια δεδομένη θέση ενός υδατορεύματος είναι η γεωγραφική περιοχή που τα νερά της συνεισφέρουν στην απορροή που περνά από τη θέση αυτή του υδατορεύματος.»

Η ροή στα υδατορεύματα αλλάζει συνεχώς, από μέρα σε μέρα, ή ακόμα από λεπτό σε λεπτό. Φυσικά, ο βασικός παράγοντας που επηρεάζει την παροχή του νερού είναι η απορροή των κατακρημνισμάτων από τη λεκάνη. Η βροχή αυξάνει τη στάθμη του νερού των ποταμών, ακόμα και αν έχει βρέξει πολύ ψηλά στη λεκάνη απορροής, μακριά από τη θέση που παρατηρείται η ροή. Το μέγεθος ενός ποταμού εξαρτάται από το μέγεθος της λεκάνης απορροής του. Μεγάλο ποτάμι είναι αυτό που έχει μεγάλη λεκάνη απορροής. Ομοίως, ποτάμια διαφορετικών μεγεθών, αντιδρούν διαφορετικά σε καταιγίδες και βροχές. Η στάθμη των μεγάλων ποταμών αλλάζει πιο αργά από τη στάθμη των μικρών. Σε μια μικρή λεκάνη, η στάθμη του ποταμού θα ανυψωθεί και θα πέσει μέσα σε μερικά λεπτά ή ώρες. Στα μεγάλα ποτάμια κάτι τέτοιο μπορεί να πάρει μέρες και οι πλημμύρες μπορεί να διαρκέσουν πολύ.

Αποθήκευση γλυκού νερού

Ένα μέρος του υδρολογικού κύκλου, που είναι προφανώς ζωτικής σημασίας για τη ζωή πάνω στη Γη, είναι το γλυκό νερό που βρίσκεται στην επιφάνεια του εδάφους. Το επιφανειακό νερό περιλαμβάνει υδατορεύματα, λίμνες, ταμιευτήρες (τεχνητές λίμνες) και υγρότοπους γλυκού νερού.

Η ποσότητα του νερού στα ποτάμια και τις λίμνες αλλάζει συνεχώς λόγω της μεταβολής των εισροών (όπως των κατακρημνισμάτων και των παροχών των πηγών) και των εκροών (όπως της εξάτμισης και της διήθησης προς τους υπόγειους υδροφορείς).

Διήθηση

Διήθηση: Η προς τα κάτω κίνηση του νερού από την επιφάνεια προς τα εδαφικά στρώματα και τα πετρώματα

Το υπόγειο νερό ξεκινά ως κατακρήμνισμα

Παντού στον κόσμο, τμήμα του νερού που πέφτει ως βροχή ή χιόνι, διηθείται μέσα στο έδαφος. Η ποσότητα του νερού που διηθείται εξαρτάται από έναν αριθμό παραγόντων. Τμήμα του νερού που διηθείται μένει κοντά στην επιφάνεια του εδάφους και μπορεί να καταλήξει τελικά σε ένα υδατόρευμα. Ένα άλλο τμήμα του νερού, μπορεί να διηθηθεί πιο βαθιά και να τροφοδοτήσει υπόγειους υδροφορείς. Αν οι υδροφορείς είναι κοντά στην επιφάνεια και αρκετά πορώδεις, ώστε να επιτρέπουν τη γρήγορη κίνηση του νερού, μπορεί να φτιαχτούν πηγάδια και να αντληθεί νερό για διάφορες ανάγκες. Το νερό μπορεί να ταξιδέψει μεγάλες αποστάσεις ή να μείνει αποθηκευμένο υπόγεια για μεγάλα χρονικά διαστήματα πριν επανέλθει στην επιφάνεια μπαίνοντας σε ποτάμια ή τη θάλασσα.

Αποθήκευση υπόγειου νερού

Αποτελεί το νερό που βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια της Γης για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Εκτός από τις καθημερινά ορατές ποσότητες νερού, υπάρχουν και τεράστιες μη ορατές ποσότητες νερού – νερού που βρίσκεται και κινείται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους.

Το αποθηκευμένο υπόγειο νερό ως μέρος του υδρολογικού κύκλου

Μεγάλες ποσότητες νερού βρίσκονται αποθηκευμένες κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Το νερό αυτό συνεχίζει να κινείται, αν και συνήθως με πολύ μικρή ταχύτητα, και συνεχίζει να αποτελεί μέρος του υδρολογικού κύκλου.. Ο χώρος αποθήκευσης του υπόγειου νερό αποδίδεται με τον όρο “υδροφορέας”.

Εκφόρτιση υπόγειου νερού

Όπως προαναφέρθηκε, τμήμα των κατακρημνισμάτων διηθείται και μετατρέπεται σε υπόγειο νερό. Από το νερό που εισχωρεί στο έδαφος, ένα μέρος κινείται κοντά στην επιφάνεια και ξαναβγαίνει γρήγορα με τη μορφή απορροής προς τα υδατορεύματα, υπό την επίδραση της βαρύτητας. Όμως ένα άλλο μεγάλο μέρος συνεχίζει τη πορεία του προς βαθύτερα στρώματα. Η υπόγεια κίνηση του νερού εξαρτάται από τη διαπερατότητα (πόσο εύκολο ή δύσκολο είναι στο νερό να κινηθεί) και από το πορώδες (την ποσότητα των κενών μέσα στο υλικό) των στρώσεων. Αν το υπεδάφιο στρώμα επιτρέπει στο νερό να κινείται σχετικά γρήγορα, αυτό μπορεί να διανύσει μεγάλες αποστάσεις στη διάρκεια μερικών ημερών. Μπορεί όμως επίσης να βυθιστεί προς βαθιούς υδροφορείς και να κάνει χιλιάδες χρόνια μέχρι να ξαναβγεί στην επιφάνεια.

Πηγές

Όταν ένας υδροφορέας γεμίζει τόσο ώστε το νερό να υπερχειλίζει προς την επιφάνεια του εδάφους, δημιουργούνται πηγές. Το μέγεθος τους κυμαίνεται από μικρές πηγές που ενεργοποιούνται μόνο μετά από δυνατές βροχές, μέχρι τεράστιες πηγές που λειτουργούν σε μόνιμη βάση και βγάζουν χιλιάδες κυβικά μέτρα νερού ανά ημέρα. Πηγές μπορούν να δημιουργηθούν σε κάθε τύπου πέτρωμα, αλλά είναι συνηθέστερες σε ασβεστόλιθο και δολομίτη οι οποίοι διαλύονται από το νερό, ιδιαίτερα όταν έχουν ρωγμές. Αυτά τα πετρώματα έχουν μεγάλη διαπερατότητα και απορροφούν μεγάλες ποσότητες κατακρημνισμάτων, οπότε αυξάνεται η πιθανότητα εμφάνισης πηγών, μέσω των οποίων εξέρχεται στην επιφάνεια το νερό που είχε εισχωρήσει στα πετρώματα.

Μεθοδολογίες εκτίμησης της απορροής

Η διαδικασία μετατροπής της βροχής σε απορροή είναι ένα σύνθετο φαινόμενο. Η αναλυτική προσέγγιση του φαινομένου οδηγεί σε ένα πολύπλοκο σύστημα, διαφορικών εξισώσεων κυρίως, που είναι γενικά δύσκολο να επιλυθούν. Το σύνολο των διαδικασιών για την επίλυση του φαινομένου αποτελεί το υδρολογικό μοντέλο. Τα βασικά μέρη του μοντέλου είναι η *είσοδος*, όπου περιγράφονται οι αρχικές συνθήκες που είναι μετεωρολογικές μεταβλητές, όπως βροχόπτωση, θερμοκρασία κ.λπ., το *σύμπλεγμα των εξισώσεων*, που περιγράφουν τις φυσικές διαδικασίες και τέλος την

Είσοδος → Εξισώσεις συστήματος → Έξοδος (Υδρογράφημα Απορροής)

έξοδο, όπου προκύπτουν τα αποτελέσματα, που είναι συνήθως ένα υδατογράφημα απορροής όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα:

Η σωστή εκτίμηση του όγκου απορροής μιας λεκάνης συνιστά ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα για την υδρολογία, ιδιαίτερα σε συνθήκες έντονης βροχόπτωσης, μακράς διάρκειας χαμηλής έντασης βροχόπτωσης, λιώσιμο χιονιού, αποτυχία συστημάτων φραγμάτων ή συνδυασμούς των παραπάνω. Η απορροή αποτελεί συχνά τη βάση για τον προγραμματισμό, το σχεδιασμό και τη διαχείριση των λεκανών καθώς και των αντιπλημμυρικών έργων. Η επιλογή της εκάστοτε μεθόδου που χρησιμοποιείται για την ανάλυση του πλημμυρικού κινδύνου είναι το πρώτο βήμα για τη σωστή διαχείριση αυτής (Abu El-Nasr et al., 1999).

Μέθοδοι και τεχνικές όπως η ορθολογική μέθοδος, έχουν εφαρμοστεί ήδη με σκοπό την υδρολογική μοντελοποίηση αλλά σε κλίμακα λεκανών μικρής έκτασης. Μια άλλη προσέγγιση για την εκτίμηση της πλημμυρικής απορροής βασίζεται στις συνθήκες υγρασίας του εδάφους και τα γεωφυσικά χαρακτηριστικά, όπως π.χ. η μέθοδος των Dickinson et al. (1993).

Πιο συγκεκριμένα, οι μέθοδοι εκτίμησης είναι οι παρακάτω:

- Ορθολογική μέθοδος εκτίμησης πλημμυρικών αιχμών

Η ορθολογική μέθοδος (rational method) εφαρμόζεται συχνά στις υδρολογικές μελέτες, για την εκτίμηση της πλημμυρικής αιχμής, σε μικρές σχετικά υδρολογικές λεκάνες. Σε πρώτο στάδιο, βασίζεται στο γεγονός ότι για βροχές με ομοιόμορφη ένταση και κατανομή επί της λεκάνης, η μέγιστη απορροή σημειώνεται όταν το νερό από όλα τα σημεία της λεκάνης καταφθάσει στην έξοδό της. Η σχέση με την οποία εκφράζεται είναι η εξής (Μαμάσης, 2011):

$$Q = 0,278 * C * i * A, \text{ όπου}$$

Q: η αιχμή της απορροής (m^3/sec)

C: μια αδιάστατη παράμετρος γνωστή ως συντελεστής απορροής

i: η ένταση της βροχόπτωσης για το χρόνο συγκέντρωσης (mm/hr)

A: η έκταση της λεκάνης απορροής (km^2)

Παρά το γεγονός ότι η μέθοδος αυτή έχει αποδειχθεί ιδιαίτερος χρήσιμη στην εκτίμηση πλημμυρικών αιχμών μικρών λεκανών, η ορθή χρήση της προϋποθέτει τον ορισμό των ορίων εφαρμογής της, τα οποία είναι:

- Η ένταση της βροχόπτωσης καθ' όλη τη διάρκεια της είναι ομοιόμορφη.
- Η κατανομή της βροχόπτωσης πάνω στην υδρολογική λεκάνη, είναι επίσης ομοιόμορφη.
- Η εκτιμώμενη απορροή, είναι ευθέως ανάλογη της έντασης της βροχόπτωσης.
- Ο μόνος τρόπος για τη μέγιστη αιχμή είναι αφενός το νερό να φθάσει στην έξοδο της λεκάνης από όλα τα σημεία της και αφετέρου ο χρόνος βροχόπτωσης να είναι ίσος με τον χρόνο συγκέντρωσης της λεκάνης έτσι, ώστε μα συνεισφέρουν όλα τα σημεία της λεκάνης στην απορροή ταυτόχρονα (Λουκάς και Βασιλειάδης, 2004).

Τέλος, όσον αφορά τον συντελεστή απορροής, δεδομένου ότι εξαρτάται από την εδαφική υγρασία κατά την έναρξη της βροχής και την ένταση της βροχόπτωσης, διαπιστώνεται ότι δεν παραμένει σταθερός για την ίδια υδρολογική λεκάνη. Ο συντελεστής απορροής εξαρτάται επίσης, από το ανάγλυφο της επιφάνειας της λεκάνης, την διηθητικότητα του εδάφους, την έκταση και την πυκνότητα της φυτοκάλυψης, καθώς και την κλίση των πρανών και την αποθηκευτική ικανότητα σε χαμηλά σημεία της επιφάνειας της λεκάνης (Μαμάσης 2011).

- Μοναδιαίο Υδρογράφημα

Το Μοναδιαίο Υδρογράφημα (UH), αποτελεί μία εκ των βασικότερων μεθόδων για φαινόμενα σχετικά με τον υπολογισμό και την απόδοση του υδρογραφήματος ενός πλημμυρικού επεισοδίου όσο και για την εκτίμηση της γενικότερης κατανομής της απορροής που προξενεί η βροχόπτωση. Ο Sherman (1942) πρότεινε για πρώτη φορά την έννοια του μοναδιαίου υδρογραφήματος. Σύμφωνα με αυτόν, το Μοναδιαίο Υδρογράφημα ορίζεται ως το υδρογράφημα της άμεσης απορροής που προξενείται από την ενεργό βροχόπτωση¹, μοναδιαίου ύψους (στο μετρικό σύστημα ίσης με 1 cm, $hR=1$ cm) και συγκεκριμένης διάρκειας tR , η οποία κατανέμεται ομοιόμορφα σ' όλη την έκταση της λεκάνης απορροής και έχει σταθερή ένταση. Ο όρος «μοναδιαίο» πηγάζει από το γεγονός, ότι η χρονική διάρκεια της καθαρής βροχόπτωσης λογίζεται ως

¹ Το τμήμα της έντασης βροχόπτωσης που μετατρέπεται σε επιφανειακή απορροή χαρακτηρίζεται ως ενεργός βροχόπτωση (effective rainfall) ή πλεόνασμα βροχόπτωσης (rainfall excess) (Vallet et al., 2013).

χρονική μονάδα κατά την περαιτέρω χρήση του ΜΥΓ (Μιμίκου και Μπαλτάς, 2006; Κούσης, 2015).

Το μοναδιαίο υδρογράφημα αποτελεί τον καθρέφτη της υδρολογικής λεκάνης και φανερώνει χαρακτηριστικά όπως το σχήμα της, το μέγεθός της, τις κλίσεις και το ανάγλυφό της, το έδαφος κ.λπ. καθώς και εκείνα που σχετίζονται με το φαινόμενο (βροχόπτωση) που το προκάλεσε όπως ο τύπος, η διάρκεια και η ένταση. Επίσης, παρατηρείται πως για ίδιας διάρκειας και τύπου βροχοπτώσεις σε λεκάνες απορροής με σταθερά χαρακτηριστικά, τα εξαγόμενα υδρογραφήματα διαθέτουν όμοιο σχήμα και χρονική βάση (Μιμίκου και Μπαλτάς, 2006).

Οι βασικές παραδοχές που υπαισέρχονται στην προσέγγιση του μοναδιαίου υδρογραφήματος είναι οι ακόλουθες:

1. Η ενεργός βροχόπτωση, διακρίνεται για την σταθερή της ένταση, καθ' όλη τη διάρκεια ισχύος της.
2. Η ενεργός βροχόπτωση κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλη την έκταση της λεκάνης απορροής.
3. Σε μια δεδομένη υδρολογική λεκάνη, η ενεργός βροχή που προκαλεί την απορροή, αποδίδει υδρογραφήματα άμεσης απορροής ίδιας περίπου χρονικής βάσης, ανεξάρτητα από την ένταση της βροχής.
4. Ο χρόνος βάσης του υδρογραφήματος (διάρκεια της άμεσης απορροής), απόρροια της ενεργού βροχόπτωσης δεδομένης διάρκειας, είναι σταθερός.
5. Η άμεση απορροή που προξενείται από μια συγκεκριμένη βροχή, σε μια δεδομένη λεκάνη, είναι ανεξάρτητη από τις προηγούμενες ή επόμενες κατακρημνίσεις.
6. Οι τεταγμένες όλων των υδρογραφημάτων άμεσης απορροής, κοινού χρόνου βάσης, είναι ανάλογές της συνολικής ποσότητας της άμεσης απορροής του κάθε υδρογραφήματος.
7. Για μια δεδομένη υδρολογική λεκάνη, τα υδρογραφήματα που προέρχονται από μια συγκεκριμένη ενεργό βροχόπτωση, αντανακλούν τα χαρακτηριστικά της, ενώ παράλληλα προκύπτει ότι η κατάσταση της λεκάνης απορροής, διατηρείται αμετάβλητη και αναλλοίωτη ως προς τον χρόνο.

8. Δύο επεισόδια βροχόπτωσης, ίδιας διάρκειας ύψους και ίδιας ενεργού βροχόπτωσης, τα οποία λαμβάνουν χώρα σε διαφορετικούς χρόνους, θα έχουν σαν αποτέλεσμα εντελώς όμοια μοναδιαία υδρογραφήματα (Συνθήκη στασιμότητας).
9. Η εκδήλωση δύο επεισοδίων βροχόπτωσης, αλλά ίδιας διάρκειας διαφορετικού ύψους ενεργού βροχόπτωσης, επιφέρουν ΥΓ άμεσης απορροής με τεταγμένες (Q) ανάλογες των (Συνθήκη γραμμικότητας) (Chow et al. 1988; Μιμίκου και Μπαλτάς, 2006; Μαμάσης, 2009).

Η γραμμικότητα του συστήματος συνεπάγεται ότι η αρχή της αναλογίας (ενεργές βροχές ίδιας διάρκειας με διαφορετικές εντάσεις δημιουργούν υδρογραφήματα ίδιας χρονικής βάσης με τεταγμένες που έχουν λόγο αυτόν των εντάσεων σε κάθε χρονική στιγμή) και η αρχή της επαλληλίας (το συνολικό υδρογράφημα που προκύπτει από επιμέρους βροχοπτώσεις είναι το υδρογράφημα με τεταγμένες το άθροισμα των τεταγμένων των επιμέρους υδρογραφημάτων) μπορεί να εφαρμοστούν και το υδρογράφημα απορροής μιας λεκάνης για διάφορες βροχές με βάση τα αντίστοιχα μοναδιαία υδρογραφήματα. Ακόμη, ισχύει η αρχή της ανεξαρτησίας (η άμεση απορροή από συγκεκριμένη βροχή είναι ανεξάρτητη από τις προηγούμενες ή επόμενες) (Μαμάσης, 2009).

Για την εκτίμηση της ενεργού βροχόπτωσης και των απωλειών λόγω διήθησης του νερού της βροχής στο έδαφος έχουν προταθεί διάφορες προσεγγίσεις. Ενδεικτικά αναφέρεται η ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος της Soil Conservation Service (SCS). Το ενεργό ύψος βροχής, η ποσότητα βροχής που απορρέει επιφανειακά, υπολογίζεται με βάση τον αριθμό καμπύλης CN (με τιμή από 0 έως 100) που προσδιορίζεται από πίνακες ανάλογα με τον τύπο του εδάφους, την υγρασιακή του κατάσταση κατά τον χρόνο της βροχόπτωσης και την χρήση γης.

Στις θέσεις όπου δεν υπάρχουν μετρήσεις χρησιμοποιούνται τα συνθετικά μοναδιαία υδρογραφήματα που προέρχονται από την ρύθμιση μέσω εξισώσεων μιας ή περισσότερων παραμέτρων. Οι τελευταίοι αφορούν συνήθως την παροχή αιχμής, το χρόνο συγκέντρωσης, το χρόνο υστέρησης και ορίζονται με βάση τα χαρακτηριστικά της λεκάνης. Διάφορες προσεγγίσεις για τη δημιουργία συνθετικών μοναδιαίων υδρογραφημάτων έχουν αναπτυχθεί όπως του Snyder (1938), του Nash (1958, 1959), το αδιάστατο υδρογράφημα (SCS, 1972) κ.α. (Chow et al. 1988).

- Μέθοδος χρόνου-επιφάνειας

Μία από τις μεθόδους που χρησιμοποιείται συχνά από τους υδρολόγους για την προσομοίωση της βροχής-απορροής, είναι αυτή του χρόνου-επιφάνειας (Time-Area method). Σύμφωνα με τον McCuen (1989), η θεμελιώδης αρχή, πάνω στην οποία βασίζεται η μέθοδος χρόνου-επιφάνειας, είναι η σύνταξη του ιστογράμματος χρόνου-επιφάνειας, το οποίο αναπαριστά τη σχέση ανάμεσα στον χρόνο διαδρομής (time travel) της απορροής και της επιφάνειας της υδρολογικής λεκάνης που συμβάλλει στην απορροή, κατά τη διάρκεια συγκεκριμένης χρονικής περιόδου. Ουσιαστικά, το ιστόγραμμα επιφάνειας-χρόνου, αναπαριστά τη χωρική και χρονική κατανομή της επιφανειακής απορροής εντός της λεκάνης του υδατορρεύματος (McCuen, 1989).

Η λεκάνη χωρίζεται σε υποπεριοχές με καμπύλες που ονομάζονται ισόχρονες. Πιο συγκεκριμένα, ως ισόχρονη καμπύλη ορίζεται ο γεωμετρικός τόπος των σημείων όπου οι σταγόνες της βροχής ισαπέχουν χρονικά από την έξοδο μιας λεκάνης ή υπολεκάνης (Bourletsikas et. al., 2006, Κατσαφάδος κ.α., 2014). Οι ισόχρονες καμπύλες, έχουν διακριτά όρια μεταξύ τους και περιορίζονται μόνο στα πλαίσια της λεκάνης (Dooge, 1959). Το ιστόγραμμα επιφάνειας-χρόνου μπορεί να μετουσιωθεί σε μοναδιαίο υδρογράφημα, απεικονίζοντας την κατανομή της απορροής από τις επιμέρους περιοχές της λεκάνης απορροής, ως συνάρτηση του χρόνου (Χριστοφίδης κ.α., 2008).

Πολλοί ερευνητές (Saghafian and Julien, 1995; Wang and Hjelmfelt, 1998; Ajward and Muzik, 2000; Wong et al., 2003) εκτίμησαν τον χρόνο συρροής, υπολογίζοντας τη ταχύτητα ροής με την θεωρία του κινηματικού κύματος. Στον αντίποδα, άλλοι ερευνητές, όπως ο Maidment (1993), οι Maidment et al. (1996), ο Ashour (2000) κ.α, υποστήριξαν ότι η μέση (σταθερή) ταχύτητα ροής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση του χρόνου συρροής της επιφανειακής απορροής και ως εκ τούτου, για τον προσδιορισμό του υδρογραφήματος πλημμύρας. Στην περίπτωση αυτή, τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του συστήματος ροής δεν λαμβάνονται υπόψη. Στην πραγματικότητα, υπολογίζονται δύο διαφορετικές μέσες ταχύτητες ροής, όπου η πρώτη αφορά στην ταχύτητα εντός του υδατορεύματος (ταχύτητα υδρογραφικού δικτύου) και η δεύτερη στην ταχύτητα της στρωματοροής (Saghafian et al., 2002; Bourletsikas et al. 2006).

Η εφαρμογή της μεθόδου που εξετάζεται, δεν λαμβάνει υπόψη την αποθηκευτικότητα της λεκάνης και κατά συνέπεια μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε μικρές ή μεσαίου μεγέθους λεκάνες. Επίσης, ισχύουν οι δύο αρχές του μοναδιαίου υδρογραφήματος, η αρχή της αναλογίας και η αρχή της επαλληλίας. Συνεπώς, προκύπτει το συμπέρασμα ότι για τον υπολογισμό της πλημμυρικής απορροής εφαρμόζεται μία και μοναδική συνάρτηση ανεξάρτητα από τις μεταβολές της έντασης της ενεργού βροχοπτώσης

(Saghafian et al., 2002). Το 1945, ο Clark, διαμόρφωσε μια μεθοδολογία για την σχεδίαση του μοναδιαίου υδρογραφήματος, βασιζόμενος στην σχέση χρόνου-επιφάνειας. Επίσης, υπολόγισε την αποθηκευτικότητα του συστήματος μέσω της εν συνεχεία διόδευσης της απορροής σε μια γραμμική δεξαμενή (Saghafian et al. 2002; Χριστοφίδης, 2008).

Προσομοίωση Υδρολογικών Διεργασιών

Η εκτίμηση της υδρολογικής συμπεριφοράς απασχολεί συστηματικά τις εφαρμοσμένες επιστήμες των μηχανικών και γεωεπιστημών ήδη από τον 19^ο αιώνα. Πιο συγκεκριμένα, η βιβλιογραφία περιέχει πολλές έρευνες που συμβάλλουν στην κατανόηση των διεργασιών μετατροπής της βροχόπτωσης σε απορροή (Dunne, 1978; Freeze, 1980). Στο πλαίσιο αναπαράστασης της όλης διαδικασίας έχουν προταθεί κατά καιρούς και έχουν εξελιχθεί διάφορα μαθηματικά μοντέλα (Dooge, 1957, 1973; Amoroch and Hart, 1964; Freeze and Harlan, 1969; Todini, 1989).

Τα υδρολογικά αυτά μοντέλα ταξινομούνται ανάλογα με τη μαθηματική τους δομή σε τέσσερις κατηγορίες:

- Μοντέλα φυσικής βάσης (physically-based): Είναι εξ' ορισμού κατανεμημένα, καθώς αναπαριστούν τις υδρολογικές διεργασίες μικρής κλίμακας, βασιζόμενα στους φυσικούς νόμους που σχετίζονται με την κίνηση του νερού (δηλαδή της ακόρεστης και κορεσμένης ροής), καθώς και σε ημιεμπειρικές σχέσεις που έχουν προκύψει από έρευνες σε πειραματικές λεκάνες. Η χωρική ανάλυση των μοντέλων αυτών είναι πυκνή, με το πλήθος των χαρακτηριστικών τους μεγεθών να είναι πολύ μεγάλο. Γενικά, επειδή πρόκειται για μοντέλα που δεν στηρίζονται σε μετρήσεις από παρατηρούμενες αποκρίσεις, θεωρούνται καταλληλότερα, για εκτίμηση υδρολογικών μεγεθών σε λεκάνες που στερούνται μετρητικών σταθμών.
- Εννοιολογικά μοντέλα: Στα εννοιολογικά μοντέλα, η προσομοίωση των υδρολογικών διεργασιών που διαδραματίζονται στις χωρικές ενότητες (λεκάνες, υπολεκάνες), βασίζονται σε απλουστευμένες παραμετρικές σχέσεις. Η φυσική συνέπειά τους, είναι σχετική εάν και εφόσον οι παράμετροι θεωρηθούν αντιπροσωπευτικές των «μακροσκοπικών» χαρακτηριστικών της λεκάνης. Το βασικό πλεονέκτημα των μοντέλων αυτών, αποτελεί η απλότητα

τους, η οποία διευκολύνει την προσομοίωση πολύπλοκων φυσικών διεργασιών, διαμέσου ενός μικρού αριθμού παραμέτρων.

- Στατιστικά και στοχαστικά μοντέλα: Στην κατηγορία των στατιστικών και στοχαστικών μοντέλων, χρησιμοποιείται η πιθανοτική προσέγγιση στην προσομοίωση των υδρολογικών διεργασιών, τις οποίες μεταχειρίζονται είτε ως τυχαίες μεταβλητές, ή μεμονωμένες, ή από κοινού. Η φυσική συνέπεια τους είναι στοιχειώδης, ελεγχόμενη, ενώ υφίσταται και στατιστική συνέπεια. Η ειδοποιός διαφορά μεταξύ των δύο υποκατηγοριών αφορά στην αξιοποίηση διαφορετικών μεθόδων για την προσομοίωση. Η υποκατηγορία που περιγράφει τα στατιστικά μοντέλα, αξιοποιεί μεθόδους επαγωγικής στατιστικής παρουσιάζει μεγαλύτερη καταλληλότητα και ευελιξία σε περιπτώσεις όπου η πραγμάτωση ενός υδρολογικού φαινομένου δύναται να θεωρηθεί ανεξάρτητη, σε σχέση με κάθε άλλη εκδήλωση του ίδιου φαινομένου. Η μεθοδολογία των στοχαστικών μοντέλων, εκφράζεται από τη θεωρία των στοχαστικών ανελίξεων. Τα μοντέλα αυτά, θεωρούνται καταλληλότερα και πληρέστερα, καθώς σε αυτά υπεισέρχεται και η χρονική αλληλεπίδραση (στοχαστική δομή των φαινομένων), με αποτέλεσμα να μπορούν να εφαρμοστούν στην προσομοίωση. Οι παράμετροι, εξαρτώνται από τα στατιστικά στοιχεία των παρατηρούμενων δειγμάτων. Τέλος, στα προσδιοριστικά μοντέλα, δεν υφίσταται στοχαστική δομή των δεδομένων σε καμία μεταβλητή, ενώ τα αποτελέσματα που εξάγονται είναι σαφή και μονοσήμαντα. Η αδυναμία τους να προσδώσουν πιθανοτική διάσταση στα αποτελέσματα, αποτελεί ένα εκ των βασικότερων μειονεκτημάτων τους.
- Μοντέλα «μαύρου κουτιού»: Στα μοντέλα μαύρου κουτιού («Black-box»), σε αντίθεση με τα εννοιολογικά και τα μοντέλα φυσικής βάσης, οι εξισώσεις δεν αναπαριστούν τις ενδιάμεσες διεργασίες του υδρολογικού κύκλου. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα τους, είναι η δυναμική τους να περιγράφουν πολύπλοκα συστήματα, με πολύ μικρότερο αριθμό (έως αμελητέο) υπολογισμών, σε σύγκριση πάντα με τα αναλυτικότερα μοντέλα προσομοίωσης. Τέτοιου είδους μοντέλα, είναι τα νευρωνικά δίκτυα, τα οποία αποδίδουν μη γραμμικούς μετασχηματισμούς των μεταβλητών εισόδου σε εξόδους (Ευστρατιάδης 2008).

Στο επόμενο κεφάλαιο αναφέρονται και αναλύονται ορισμένα από τα παραπάνω μοντέλα, καθώς και η επιλογή του μοντέλου που γίνεται για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας.

Το μοντέλο ARNO

Πρόκειται για ένα ημικατανεμημένο εννοιολογικό μοντέλο βροχής–απορροής, το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως τόσο σε έρευνες που αφορούν τις επιφανειακές – εδαφικές – ατμοσφαιρικές διαδικασίες όσο και ως ένα επιχειρησιακό εργαλείο πρόγνωσης πλημμυρών σε λεκάνες απορροής σε διάφορα μέρη του κόσμου (Todini, 1988b). Το μοντέλο ARNO, το όνομα του οποίου προέρχεται από την πρώτη του εφαρμογή στον ομώνυμο ποταμό, χαρακτηρίζεται από δύο κύρια στοιχεία: το πρώτο και πιο σημαντικό αφορά την ισορροπία της υγρασίας του εδάφους, ενώ το δεύτερο περιγράφει τη μεταφορά των απορροών στην έξοδο της λεκάνης.

Η εφαρμογή του βασίζεται στο γεγονός ότι η υδρολογική λεκάνη αποτελείται από μια σειρά υπολεκανών σε καθεμιά από τις οποίες εφαρμόζεται το μοντέλο βροχόπτωσης-απορροής. Η παραπάνω διαίρεση πραγματοποιείται σύμφωνα με τα φυσικά όρια των υπολεκανών έτσι, ώστε τα τμήματα κλεισίματος των υπολεκανών να συμπίπτουν με τις διατομές ενδιαφέροντος κατά μήκος του ποταμού και των παραποτάμων του. Τα τμήματα αυτά επιλέγονται σύμφωνα με τη θέση των υδρομετρικών σταθμών, είτε επειδή παρουσιάζουν ενδιαφέρον πλημμυρικής πρόγνωσης ή για λόγους που σχετίζονται με τη μορφολογία της λεκάνης. Οι υπολεκάνες μπορούν να απεικονιστούν ως ένα δέντρο βάσει του οποίου ορίζεται η σειρά των υπολογισμών που πραγματοποιούνται. Οι λειτουργίες που εκτελούνται σε κάθε υπολεκάνη για κάθε χρονικό διάστημα είναι οι εξής: υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής και της διαδικασίας της απορροής, μεταφορά της απορροής, μέσω ενός απλοποιημένου υδραυλικού μοντέλου δρομολόγησης κατά μήκος των πλαγιών και του εσωτερικού των καναλιών κάθε υπολεκάνης στο αντίστοιχο σημείο εξόδου, η μεταφορά του εισαγόμενου υδρογραφήματος από το ανάντη τμήμα κλεισίματος της υπολεκάνης σε εκείνο που καλύπτεται από χιόνι (όταν υπάρχει) ως συνάρτηση της ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας και των δεδομένων, η αναπαράσταση ροής υπογείων υδάτων από ένα πολλαπλώς γραμμικό μοντέλο τύπου δεξαμενής καθώς και η δρομολόγηση σε χερσαία εδάφη και κανάλια αναπαρίσταται από γραμμικά παραβολικά μοντέλα.

Το μοντέλο ARNO όχι μόνο καθιστά δυνατή την εφαρμογή του τόσο σε μεσαίες όσο και σε μεγάλου μεγέθους λεκάνες, αλλά είναι και ένα λειτουργικό επιχειρησιακό

εργαλείο, καθώς αποτελεί μια αρκετά εύχρηστη φόρμα, με απλοποιημένες λειτουργίες βαθμονόμησης, σημειώνοντας σταθερά αποτελέσματα αναφορικά με τη διαδικασία βροχόπτωσης-απορροής για κάθε υδρολογική λεκάνη (Todini, 1996).

Το μοντέλο MIKE SHE

Το μοντέλο SHE (European Hydrological System) (Refsgaard & Storm, 1995) είναι ένα ντετερμινιστικό, πλήρως καταναμεμημένο μοντέλο υδρολογικής προσομοίωσης με δυνατότητα επεξεργασίας μεγάλου όγκου δεδομένων εισόδου. Είναι σε θέση να προσομοιώσει το σύνολο της ροής των υδατορεμάτων που περιλαμβάνει τόσο άμεσες όσο και βασικές ροές. Αναπτύχθηκε για να διαμορφώσει τη χωρική κατανομή των παραμέτρων της λεκάνης, υδρομετεωρολογικά δεδομένα και υδρολογική απόκριση σε φόρμα τριών διαστάσεων. Αυτό σημαίνει ότι αντιπροσωπεύει τη λεκάνη οριζοντίως από ένα ορθογώνιο πλέγμα και χρησιμοποιεί μια κάθετη στήλη σε κάθε οριζόντιο τετράγωνο πλέγμα. Στην πραγματικότητα, οι μερικές διαφορικές εξισώσεις για τη διατήρηση της μάζας, της ορμής και της ενέργειας επιλύονται με τη χρήση της τεχνικής πεπερασμένων στοιχείων, καθένα από τα οποία χαρακτηρίζεται από διάφορες παραμέτρους και μεταβλητές, πέρα από ορισμένες εμπειρικές εξισώσεις (Refsgaard, 1997).

Το μοντέλο SHE έχει πολλές συνιστώσες (DHI, 2004), καθεμία από τις οποίες περιγράφει μια συγκεκριμένη φυσική διαδικασία. Αυτές περιλαμβάνουν την εξατμισοδιαπνοή, την επιφανειακή ροή κανάλι (OC), την ακόρεστη ζώνη (UZ), την κορεσμένη ζώνη (SZ), τα χιόνια που λιώνουν και την ανταλλαγή μεταξύ υδροφόρου ορίζοντα και ποταμών.

Οι υδρολογικές διεργασίες περιγράφονται επί το πλείστον από φυσικούς νόμους (διατήρησης μάζας, ορμής και ενέργειας). Οι εξισώσεις 1-D και 2-D καθώς και η Saint Venant περιγράφουν τη ροή στο κανάλι και την επιφανειακή ροή, αντίστοιχα. Η μέθοδος Kristensen και Jensen χρησιμοποιούνται για την εξατμισοδιαπνοή, η εξίσωση 1-D Richards για ακόρεστη ροή ζώνη και η 3-D Boussinesq εξίσωση για τη ροή στην κορεσμένη ζώνη (DHI, 2004).

Το μοντέλο HEC

Το HEC-HMS είναι ένα εννοιολογικά ημικαταναμεμημένο μοντέλο, το οποίο σχεδιάστηκε για την προσομοίωση των διαδικασιών βροχόπτωσης-απορροής σε ένα ευρύ φάσμα γεωγραφικών περιοχών, όπως μεγάλες λεκάνες ποταμών και υδρολογικές πλημμύρες σε μικρές αστικές και φυσικές λεκάνες απορροής. Το σύστημα

περιλαμβάνει απώλειες, με σχηματισμό απορροής (ή όπως ορίζεται παραπάνω ενεργός βροχόπτωση), δρομολόγηση ελεύθερης επιλογής καναλιού, ανάλυση μετεωρολογικών δεδομένων, προσομοίωση βροχής-απορροής και εκτίμηση παραμέτρων. Στηρίζεται σε ξεχωριστά μοντέλα, καθένα από τα οποία αντιπροσωπεύει κάθε συνιστώσα της διαδικασίας απορροής, περιλαμβανομένων των μοντέλων που υπολογίζουν τον όγκο απορροής, μοντέλων άμεσης απορροής, καθώς και μοντέλα βασικής ροής. Καθένα από αυτά «τρέχει» συνδυάζοντας ένα μοντέλο λεκάνης, ένα μετεωρολογικό μοντέλο και τον έλεγχο επιλεγμένων προδιαγραφών για την εξαγωγή του αποτελέσματος.

Το μοντέλο HBV

Το HBV μπορεί να χαρακτηριστεί ως ένα ημικατανεμημένο, εννοιολογικό μοντέλο (semi-distributed, conceptual model). Ως κύριες υδρολογικές μονάδες είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν υπολεκάνες, στις οποίες γίνεται κατανομή του υψομέτρου της περιοχής και μία βασική ταξινόμηση των χρήσεων γης. Η επιλογή της χρήσης υπολεκανών εφαρμόζεται σε γεωγραφικά ή κλιματολογικά ετερογενείς λεκάνες απορροής ή όταν υπάρχει παρουσία μεγάλων λιμνών. Το μοντέλο αποτελείται από υπορουτίνες για τη συσσώρευση και το λιώσιμο του χιονιού, για τον υπολογισμό της εδαφικής υγρασίας και για την τελική προσομοίωση της απορροής του ποταμού. Επιδίωξη των δημιουργών του μοντέλου είναι η διατήρηση απλής δομής και η χρήση λίγων παραμέτρων για τη βαθμονόμησή του. Στο μοντέλο χρησιμοποιούνται δεδομένα βροχόπτωσης, δυνητικής εξατμισοδιαπνοής και ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας (εφόσον υπάρχουν περιοχές καλυμμένες από χιόνι). Τα δεδομένα είναι συνήθως ημερήσια, αλλά μπορεί να εφαρμοστεί και μικρότερο χρονικό βήμα. Το μοντέλο αναπτύχθηκε στις χώρες της Σκανδιναβίας, αλλά έχει χρησιμοποιηθεί σε αρκετά πεδία εφαρμογών σε πολλές χώρες ανά τον κόσμο.

Γενική Περιγραφή του Υδρολογικού Μοντέλου HMETs

Το HMETs είναι ένα πολύ απλό στη χρήση εννοιολογικό υδρολογικό μοντέλο. Ωστόσο, χαρακτηρίζεται από τα πιο αποτελεσματικά και συγκεντρωτικά μοντέλα υδρολογικής σύνθεσης και προσομοίωσης. Ακολουθεί τις βασικές υδρολογικές διεργασίες (εξατμισοδιαπνοή, διήθηση κ.λπ.) με τη χρήση των διαθέσιμων υδρομετεωρολογικών δεδομένων, για την προσομοίωση απορροής στην έξοδο της εκάστοτε λεκάνης. Υπάρχουν 21 παράμετροι για τη βελτιστοποίηση κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης, οι οποίοι είναι τροποποιήσιμοι τόσο ως προς τα

κατώτερα και ανώτερα όριά τους όσο και ως προς τις αρχικές τιμές αυτών. Ωστόσο, η ρύθμισή τους συνίσταται μόνο στην περίπτωση καλής γνώσης των τιμών τους. Εναλλακτικά, διατηρούνται οι τιμές αρχικοποίησης των παραμέτρων, οι οποίες θα πρέπει να παρέχουν καλά αποτελέσματα κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης. Σύμφωνα με τον κώδικα του μοντέλου στο περιβάλλον της Matlab (<http://www.mathworks.com>):

- Οι 4 πρώτες παράμετροι (alpha1, beta1, alpha2, beta2) αφορούν την επιφάνεια του υδρογραφήματος.
- Οι παράμετροι ddf min και ddf plus σχετίζονται με την πτώση του χιονιού.
- Οι παράμετροι Tbm και Kcum υπολογίζουν τη θερμοκρασία τήξης σε βαθμούς Κελσίου (C°).
- Οι fcmin, fcmin_plus και Ccum αφορούν την κατακράτηση του νερού.
- Οι Tbf, Kf, fe τη θερμοκρασία επανάνυξης μεταξύ ελάχιστης και μέγιστης θερμοκρασίας αέρα.
- Η ET eff τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή.
- Η Coef runoff την επιφανειακή και επερχόμενη (καθυστερημένη) απορροή.
- Η Coef v2p την αναπλήρωση των υπόγειων υδάτων.
- Η Coef vadose την υποδερμική ροή.
- Η Coef phreatic τη ροή υπόγειων υδάτων.
- Η Vadose max το μέγιστο επίπεδο ζώνης υδάτων διηθήσεως και
- Η Phreatic max το μέγιστο επίπεδο ζώνης υπόγειων υδάτων.

Το μοντέλο περιλαμβάνει μια σειρά από τυποποιημένες αλγοριθμικές παραμέτρους όπως αυτή της SCE-UA (Shuffled Complex Evolution – University of Arizona) και της DDS (Dynamically Dimensioned Search algorithm) που βελτιστοποιούν τις ρυθμίσεις του μοντέλου HMETS.

Ο αλγόριθμος SCE-UA αναπτύχθηκε από τους Duan et al. (1992) και είναι μία μέθοδος βελτιστοποίησης της προσαρμογής των υπολογισμένων από το μοντέλο υδρογραφημάτων με τα παρατηρούμενα. Για την εξασφάλιση μιας καλής απόδοσης της βαθμονόμησης με τη χρήση του SCE-UA απαιτούνται πάνω από 25000 αξιολογήσεις (Number of Model Evaluations).

Όσον αφορά τον αλγόριθμο DDS, ο οποίος θεσπίστηκε από τους Tolson και Shoemaker (2007), αποτελεί ένα απλό και ισχυρό εργαλείο αυτόματης βαθμονόμησης των

μοντέλων προσομοίωσης σε λεκάνες απορροής. Σχεδιάστηκε διότι ο συνολικός αριθμός των αξιολογήσεων για τη βαθμονόμηση των υδρολογικών μοντέλων είναι πάντα περιορισμένος, ενώ στην περίπτωση του DDS η βαθμονόμηση αποδίδει με μέγιστο αριθμό αξιολογήσεων 5000 (Number of Model Evaluations). Αξίζει να σημειωθεί ότι για τη χρήση του συγκεκριμένου αλγορίθμου απαιτείται η ενσωμάτωση της αντίστοιχης βιβλιοθήκης που διατίθεται στο διαδίκτυο. Με λίγα λόγια, η δομή του αλγορίθμου DDS είναι τέτοια, ώστε να προσφέρει πρακτικές και υψηλής ποιότητας λύσεις στα προβλήματα βαθμονόμησης. Συνολικά, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ο DDS είναι πιο αποδοτικός και αποτελεσματικός από τον SCE-UA και όλους τους άλλους αλγόριθμους που έχουν αναπτυχθεί (Tolson et al., 2006).

Όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 2.2), το μοντέλο διαθέτει ένα μενού με τις εξής επιλογές: Βαθμονόμηση, Προσομοίωση, Κλιματική Αλλαγή, Δημιουργία Βάσης και Εγκατάσταση. Κάθε μια από αυτές τις διαδικασίες απαιτεί συγκεκριμένες ρυθμίσεις και επιλογές ανάλογα με τη μελέτη περίπτωσης και τα ζητούμενα.

Η τελευταία επιλογή περιλαμβάνει την εγκατάσταση και τη ρύθμιση των παραγόντων που αναλύθηκαν παραπάνω (DDS, SCE-UA, HMETs).



Εικόνα 2.2: Το κύριο μενού επιλογών του HMETS. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.

Για τη δημιουργία βάσης (Create Database), απαραίτητη προϋπόθεση αποτελεί η οργάνωση των δεδομένων σε έναν πίνακα Excel, με συγκεκριμένη σειρά καταγραφής και μονάδες μέτρησης.

- Τα έτη θα πρέπει να είναι πλήρη: από 1 Ιανουαρίου έως 31 Δεκεμβρίου, συμπεριλαμβανομένης της 29^{ης} Φεβρουαρίου.
- Τα μετεωρολογικά δεδομένα (ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία, βροχόπτωση, χιονόπτωση) δεν μπορούν να είναι ελλιπή.
- Σε περίπτωση ελλিপών στοιχείων για την παρατηρούμενη παροχή, οι αντίστοιχες εγγραφές μπορούν να αντικατασταθούν με NaN, πέρα από την πρώτη και την τελευταία.

Επιπρόσθετα, για την ολοκλήρωση της βάσης θα πρέπει να είναι γνωστές οι συντεταγμένες του κεντροειδούς (centroid) της λεκάνης, καθώς και το εμβαδόν αυτής.

Κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης (Calibration) του HMETS βελτιστοποιούνται οι παράμετροι με τη χρήση των αντίστοιχων επιλεγμένων μεθόδων, όπως αυτές

αναλύονται παραπάνω. Να σημειωθεί ότι στις ρυθμίσεις της βαθμονόμησης, μεταξύ των οποίων και η μέθοδος βελτιστοποίησης, είναι απαραίτητη η επιλογή της συνάρτησης (Objective Function), της αναφορικής περιόδου (Calibration Period) καθώς και της περιόδου επικύρωσης (Validation Period), εφόσον αυτή είναι επιθυμητή.

Όσον αφορά τις συναρτήσεις, να σημειωθεί ότι υπάρχουν πέντε διαθέσιμες: η συνάρτηση αποδοτικότητας (Nash-Sutcliffe, Εξίσωση 1), ο φυσικός λογάριθμος της Nash (lnNash, Εξίσωση 2), η ελαχιστοποίηση της τετραγωνικής ρίζας του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE, Εξίσωση 3), ο φυσικός λογάριθμος της RMSE (lnRMSE, Εξίσωση 4) και η συνάρτηση του τυπικού σφάλματος (Bias, Εξίσωση 5).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - Q_s^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - \bar{Q}_o)^2} \quad (1)$$

$$\ln NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (\ln Q_o^t - \ln Q_s^t)^2}{\sum_{t=1}^T (\ln Q_o^t - \ln \bar{Q}_o)^2} \quad (2)$$

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^T (Q_s^t - Q_o^t)^2}}{(Q_{o,max} - Q_{o,min})} \quad (3)$$

$$\ln NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^T (\ln Q_s^t - \ln Q_o^t)^2}}{(\ln Q_{o,max} - \ln Q_{o,min})} \quad (4)$$

$$BIAS = \frac{\sum_{t=1}^T (Q_s^t - Q_o^t)}{\sum_{t=1}^T Q_o^t} \quad (5)$$

Όπου T είναι το σύνολο των ετών, Q_o^t η παρατηρούμενη απορροή σε χρόνο t και Q_s^t η προσομοιωμένη απορροή σε χρόνο t ($m^3 s^{-1}$).

Έπειτα, ακολουθεί η διαδικασία της προσομοίωσης (Simulation). Δύο τρόποι προσομοίωσης είναι διαθέσιμοι από το μοντέλο HMETs: ο πρώτος χρησιμοποιεί μία ήδη βαθμονομημένη λεκάνη και ο δεύτερος χρησιμοποιεί παραμέτρους που επιλέγονται από τον χρήστη. Αντιθέτως, οι τιμές των παραμέτρων της βαθμονομημένης λεκάνης επιλέγονται αυτόματα. Ωστόσο, ο χρήστης μπορεί να αλλάξει τις παραμέτρους ακόμη κι αν πρόκειται για μια ήδη βαθμονομημένη λεκάνη. Από την άλλη μεριά,

μπορεί να χρησιμοποιηθεί η βάση δεδομένων της λεκάνης και να πραγματοποιηθεί προσομοίωση σε αυτή με οποιεσδήποτε τιμές παραμέτρων.

Όπως και στη βαθμονόμηση, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τις πέντε συναρτήσεις και τα γραφήματα αξιολογούν τη διαδικασία της προσομοίωσης. Σε αυτή την περίπτωση, τα αποτελέσματα αφορούν ολόκληρη την περίοδο αναφοράς.

Κεφάλαιο 3

Η σύνθεση και η προσομοίωση είναι τα μέσα με τα οποία οι υδρολόγοι μπορούν να αντιμετωπίσουν το πρόβλημα της ανεπάρκειας υδρολογικών δεδομένων και τη δοκιμή αρκετών εναλλακτικών λύσεων στις μελέτες υδατικών πόρων (Βαφειάδης, 2000).

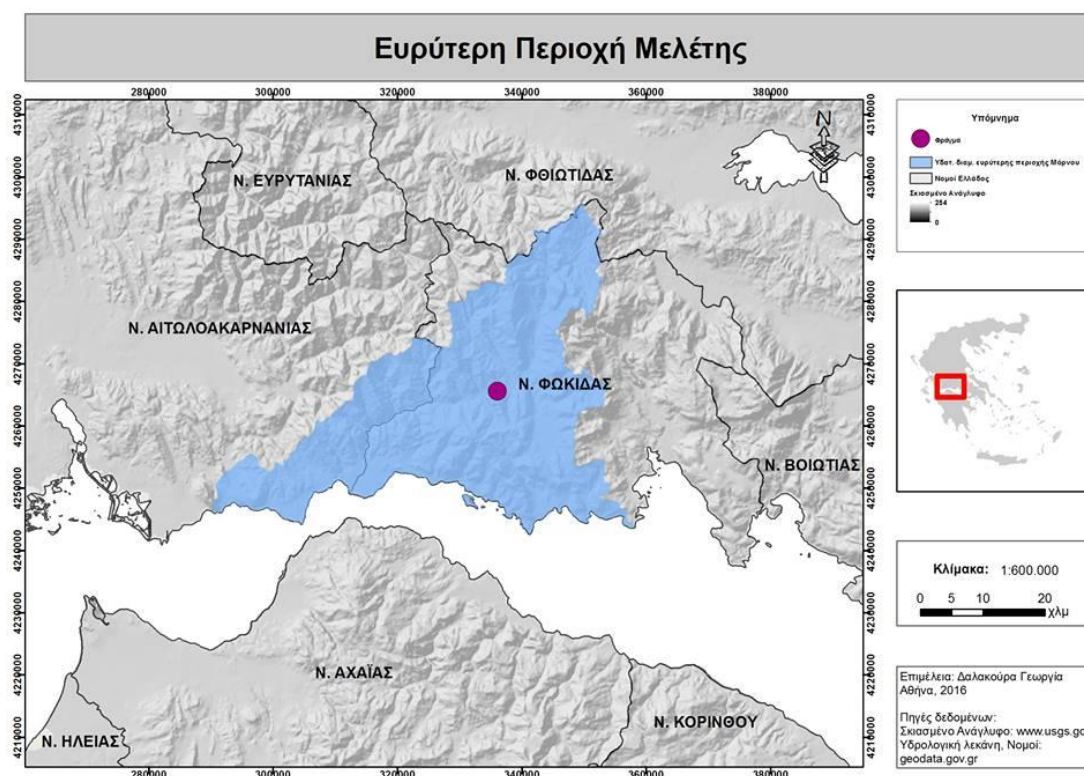
Η σύνθεση στηρίζεται στις στατιστικές ιδιότητες υφιστάμενων υδρολογικών δεδομένων και τα νέα δεδομένα που παράγονται να έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά με τα πραγματικά που χρησιμοποιήθηκαν σαν αφετηρία, με στόχο την επέκταση των σειρών, ή και διαφορετικά αν τροποποιηθούν σκόπιμα με στόχο τη δοκιμή διαφόρων σεναρίων (Βαφειάδης, 2000).

Η προσομοίωση είναι μια μαθηματική περιγραφή της συμπεριφοράς ενός συστήματος υδατικών πόρων και η αντίδρασή του σε υδρολογικά γεγονότα, για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο (Βαφειάδης, 2000).

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, η προσομοίωση της σχέσης βροχόπτωσης – απορροής για τη λεκάνη απορροής του Μόρνου πραγματοποιήθηκε στο υπολογιστικό περιβάλλον Matlab 2013a. Το Matlab έχει ονομαστεί από τις λέξεις MATrix LABoratory, και αποτελεί ένα λογισμικό περιβάλλον προγραμματισμού αριθμητικών μεθόδων, προσομοίωσης και γραφικής οπτικοποίησης. Επίσης, προσφέρει ευκολία και ταχύτητα υλοποίησης αλγορίθμων και διαθέτει πολλές έτοιμες συναρτήσεις (Θεοδώρου και Θεοδώρου, 2007).

Γεωγραφία Μελέτης Περίπτωσης

Ο Μόρνος είναι ποταμός της Κεντρικής Στερεάς Ελλάδας. Πηγάζει από τις νότιες πλαγιές της Οίτης και καθώς κατεβαίνει στα νότια αποχετεύει τη λεκάνη, μια από τρεις κύριες υδρολογικές λεκάνες του Υδατικού Διαμερίσματος, που βρίσκεται στο Νομό Φωκίδας μεταξύ Βαρδουσίων, Οίτης, Γκιώνας και Λιδωρικίου. Καθορίζει τα όρια των επαρχιών Δωρίδας και Ναυπακτίας και χύνεται στα όρια Κορινθιακού και Πατραϊκού κόλπου, ανατολικά της Ναυπάκτου. Στο μέρος που εκβάλλει σχηματίζει μικρή πεδινή περιοχή με τις συνεχείς προσχώσεις του. Ο Μόρνος έχει συνολικό μήκος 70 km περίπου και η λεκάνη απορροής του έχει επιφάνεια 1180 km² (Prowat, 2007).



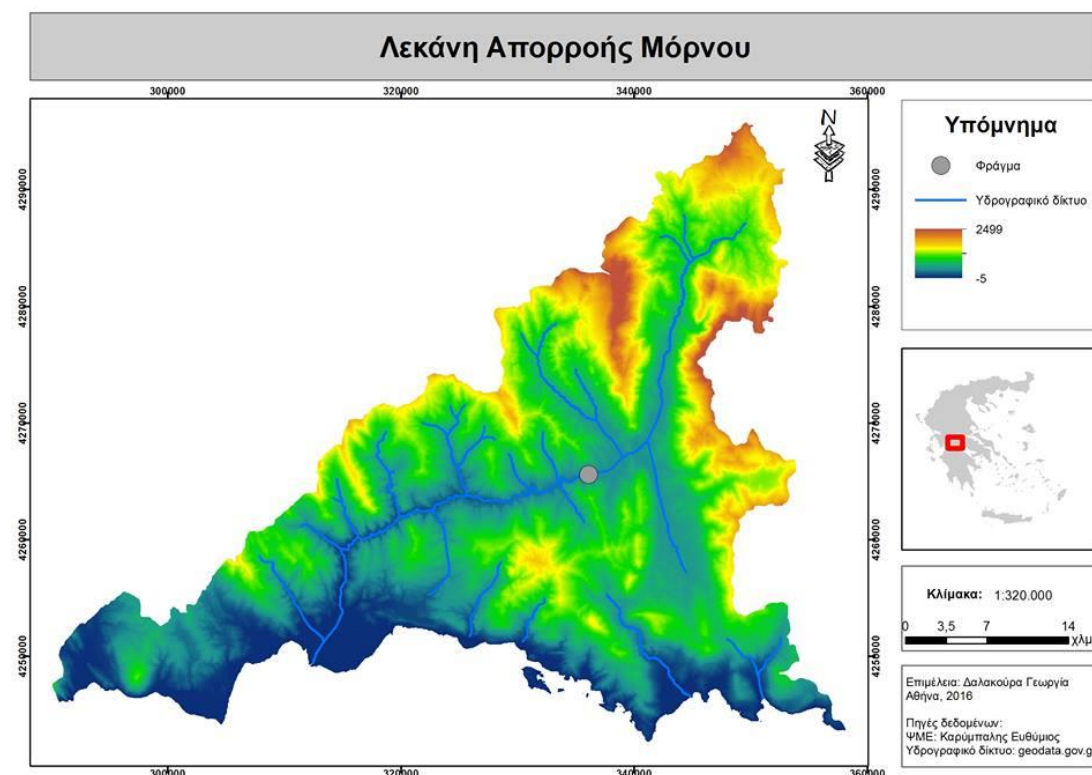
Χάρτης 3.1: Η ευρύτερη περιοχή του Ν. Φωκίδας στον οποίο βρίσκεται η λεκάνη μελέτης. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.

Η λίμνη του Μόρνου είναι μια τεχνητή λίμνη, η κατασκευή της οποίας (1979) πραγματοποιήθηκε με σκοπό την ύδρευση της Αθήνας. Για το λόγο αυτό κατασκευάστηκε φράγμα και δημιουργήθηκε ο νέος ταμιευτήρας – τεχνητή λίμνη, ο οποίος τέθηκε πρώτη φορά σε λειτουργία το 1981 και έχει μέγιστη χωρητικότητα 763.71 εκατομμύρια m^3 νερού (ΕΥΔΑΠ, 2015). Η λίμνη, πέρα από την ύδρευση της Αθήνας (περίπου 300 εκατομμύρια m^3), εξυπηρετεί και την άρδευση αγροτικών καλλιεργειών της Φωκίδας και της Αιτωλοακαρνανίας.

Η έκταση της λεκάνης καταλαμβάνει 583.5 km^2 ανάντη του φράγματος και 390.7 km^2 κατάντη. Η Υδρολογική Λεκάνη του Ταμιευτήρα Μόρνου είναι επιμήκης με μέσο υψόμετρο 1082 m (οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 443 και 2489 m). Η μέση ετήσια βροχόπτωση και απορροή ανέρχονται στα 950 mm και 235 εκατομμύρια m^3 αντίστοιχα. Τα μεγαλύτερα υψόμετρα της ΥΛ του ταμιευτήρα, κατά τους χειμερινούς μήνες, δέχονται σημαντικά ποσά χιονιού (συσσώρευση χιονιού) και διαθέτουν αυτή την ποσότητα νερού στις αρχές της άνοιξης.

Τον Δεκέμβριο του 2011, το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών εγκατέστησε 4 βροχόμετρα (στους σταθμούς Διακόπι, Κονιακός, Φράγμα και Μαυρολιθάρι), 2 χιονόμετρα (στους σταθμούς Άγιο Αθανάσιο και Βρύζες) και 2 μετρητές στάθμης

υδάτων (στους σταθμούς Κόκκινος και Λευκαδίτης) σε διάφορα μέρη της λεκάνης απορροής. Επίσης, τα δεδομένα από έναν τρίτο μετρητή στάθμης νερού, σε ένα ανάντη σημείο του ρεύματος Λευκαδίτης, που λειτουργούν από την ΕΥΔΑΠ, συλλέγονται και έχουν ενσωματωθεί στο σύνολο των δεδομένων. Τα βροχόμετρα (Χάρτης 3.2) βρίσκονται χωρικά κατανεμημένα σε όλη τη λεκάνη απορροής, προκειμένου να είναι σε θέση να λαμβάνουν τη χωρική μεταβλητότητα των βροχοπτώσεων και την κατ' επέκτασιν επίδραση ανύψωσης όσον αφορά τον όγκο καθίζησης.



Χάρτης 3.2: Η λεκάνη απορροής και το φράγμα του Μόρνου. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.

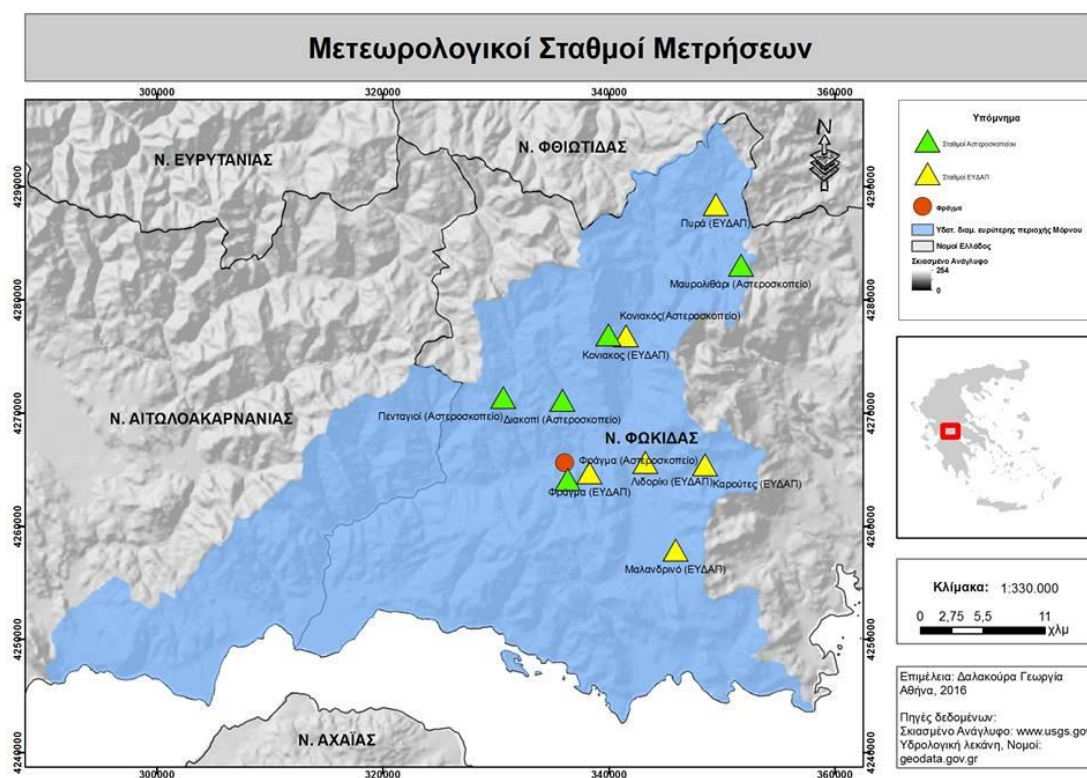
Αξίζει να σημειωθεί ότι το μεγαλύτερο ποσοστό της λεκάνης καλύπτεται από δάσος ελάτης, βελανιδιάς και κέδρων (αρκεύθων) ενώ στα εκτεταμένα υψίπεδα που σχηματίζονται από τις κορυφές του υδροκρίτη βόσκουν μεγάλα κοπάδια προβάτων και αιγών. Η γεωλογική κατανομή της λεκάνης είναι αρκετά πολύπλοκη, αλλά δύο κύριοι σχηματισμοί συνθέτουν τη δομή της: ασβεστόλιθοι και φλύσχης. Οι σχηματισμοί αυτοί καλύπτουν πολλές περιοχές από νεότερες τεταρτογενείς αποθέσεις. Επίσης, η ευρύτερη περιοχή είναι χωρισμένη σε 30 δημοτικά διαμερίσματα με τον πληθυσμό να κυμαίνεται από 3500 κατοίκους το χειμώνα έως 13500 κατοίκους το καλοκαίρι.

Είναι σημαντική λοιπόν η υδρολογική μελέτη της λεκάνης του Μόρνου μιας και αυτός αποτελεί τον βασικό ταμιευτήρα ύδρευσης της Αθήνας και έχει γι' αυτόν τον λόγο υποστεί μια σειρά από ανθρωπογενείς παρεμβάσεις (Pechlivanidis, 2012).

Συλλογή και Επεξεργασία δεδομένων

Βασική αρχή της εργασίας αποτέλεσε η συλλογή των πρωτογενών δεδομένων και η μετέπειτα επεξεργασία αυτών με τέτοιο τρόπο, ώστε να δημιουργηθεί σε παρακάτω στάδιο η απαιτούμενη βάση για την εφαρμογή του υδρολογικού μοντέλου. Τα δεδομένα αυτά αφορούσαν τη βροχόπτωση, την απορροή, τη χιονόπτωση καθώς και τη μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία για τη χρονοσειρά 2004-2009. Η συγκεκριμένη χρονοσειρά επιλέχθηκε διότι ήταν η μοναδική για την οποία υπήρχαν διαθέσιμες μετρήσεις από σταθμούς της λεκάνης για όλες τις παραπάνω παραμέτρους. Οι σταθμοί αυτοί, μεταξύ των οποίων ορισμένοι διέθεταν βροχομετρητές/χιονομετρητές και οι υπόλοιποι μετρητές θερμοκρασίας, παρουσιάζονται στον χάρτη 3.3, μεταξύ των οποίων και αυτοί του Αστεροσκοπείου, και είναι οι εξής:

- Το Φράγμα Μόρνου (Κ.Α. 25)
- Οι Καρούτες (Κ.Α. 27)
- Ο Κονιάκος (Κ.Α. 28)
- Το Λιδορίκι (Κ.Α. 29)
- Το Μαλανδρίνο (Κ.Α. 31) και
- Τα Πυρά (Κ.Α. 33)

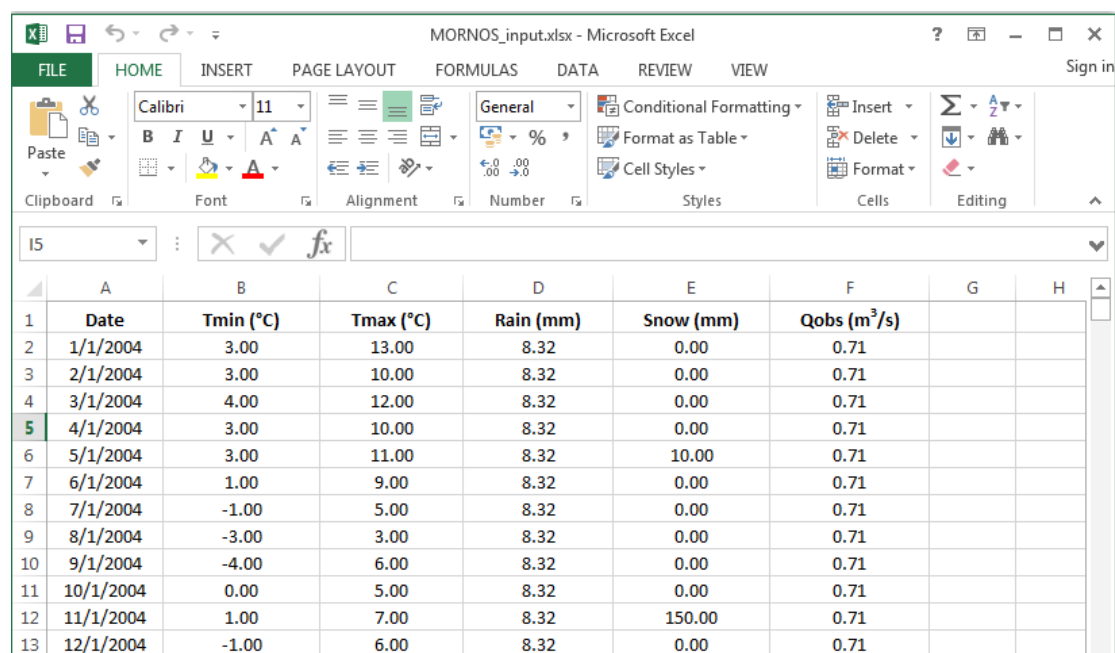


Χάρτης 3.3: Οι μετεωρολογικοί σταθμοί που χρησιμοποιήθηκαν από την ΕΥΔΑΠ για τη χρονοσειρά μελέτης και του Αστεροσκοπείου. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.

Οι μετρήσεις της βροχόπτωσης και της απορροής δόθηκαν σε ηλεκτρονική, ενώ οι υπόλοιπες σε έντυπη μορφή από την Ειδική Γραμματεία Υδάτων (ΥΠΕΚΑ). Η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν η χειροκίνητη εισαγωγή των μετρήσεων σε αρχείο Excel, η μετατροπή τους σε συγκεκριμένες μονάδες μέτρησης και η οργάνωσή τους σε πίνακα.

Μεθοδολογία: Εφαρμογή του Μοντέλου HMETS

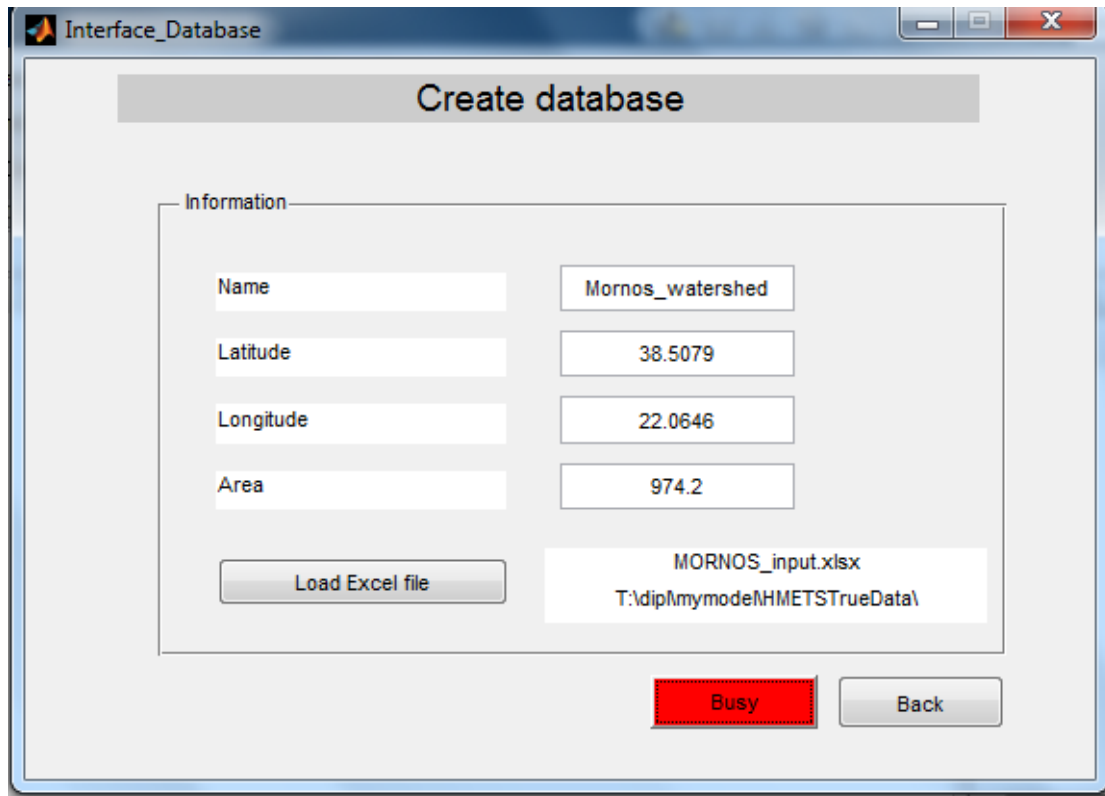
Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, το HMETS είναι ένα υδρολογικό μοντέλο προσομοίωσης που περιλαμβάνει όλους τους παραπάνω παράγοντες για τους οποίους συλλέχθηκαν μετρήσεις. Σε πρώτο στάδιο, ήταν απαραίτητη η δημιουργία της βάσης των δεδομένων σε πίνακα Excel (Mornos_input), η οποία κατόπιν προστέθηκε στο περιβάλλον της Matlab για την εφαρμογή του μοντέλου μελέτης (Εικόνα 3.1).



	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Date	Tmin (°C)	Tmax (°C)	Rain (mm)	Snow (mm)	Qobs (m³/s)		
2	1/1/2004	3.00	13.00	8.32	0.00	0.71		
3	2/1/2004	3.00	10.00	8.32	0.00	0.71		
4	3/1/2004	4.00	12.00	8.32	0.00	0.71		
5	4/1/2004	3.00	10.00	8.32	0.00	0.71		
6	5/1/2004	3.00	11.00	8.32	10.00	0.71		
7	6/1/2004	1.00	9.00	8.32	0.00	0.71		
8	7/1/2004	-1.00	5.00	8.32	0.00	0.71		
9	8/1/2004	-3.00	3.00	8.32	0.00	0.71		
10	9/1/2004	-4.00	6.00	8.32	0.00	0.71		
11	10/1/2004	0.00	5.00	8.32	0.00	0.71		
12	11/1/2004	1.00	7.00	8.32	150.00	0.71		
13	12/1/2004	-1.00	6.00	8.32	0.00	0.71		

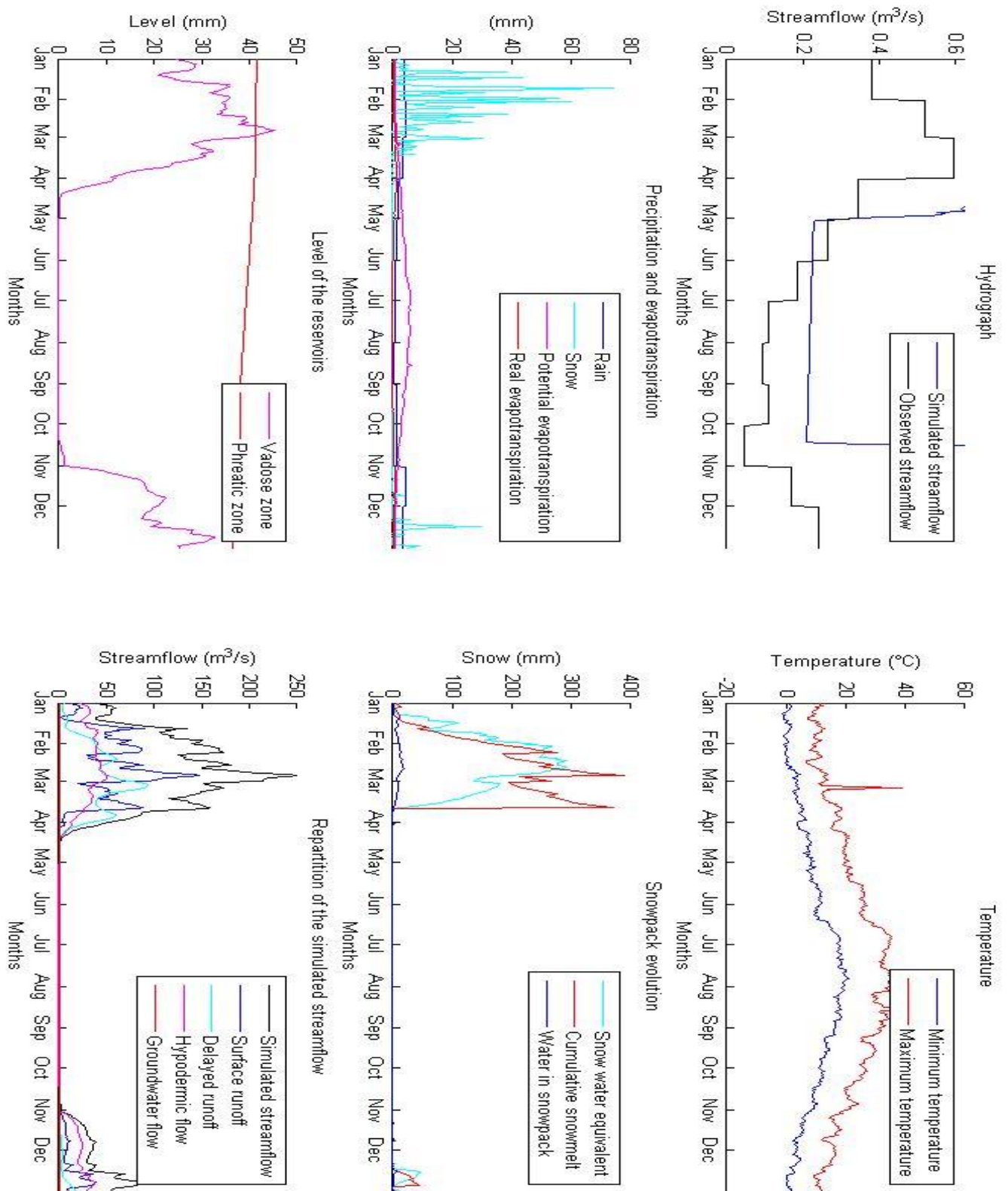
Εικόνα 3.1: Μορφή Πίνακα Δεδομένων. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.

Για τη μετατροπή του πίνακα των δεδομένων (excel) σε αρχείο με τη μορφή .mat, δηλαδή τη δημιουργία της βάσης (Create Database), ήταν απαραίτητη η συμπλήρωση του γεωγραφικού μήκους και πλάτους του κεντροειδούς της λεκάνης απορροής, καθώς και το εμβαδόν της. Ο υπολογισμός των X και Y συντεταγμένων πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του προγράμματος ArcGIS. Αρχικά, εισήχθει το πολύγωνο της λεκάνης (geodata.gov.gr) και στον πίνακα περιγραφικών πληροφοριών (Attribute Table) προστέθηκαν δύο πεδία, ένα για το X (longitude) και ένα για το Y (latitude) του κεντροειδούς. Με την εντολή “Calculate Geometry” για κάθε πεδίο ξεχωριστά έγινε ο υπολογισμός των συντεταγμένων σε δεκαδικές μοίρες (decimal degrees) για το σύστημα αναφοράς WGS 1984. Κατόπιν, οι παραπάνω τιμές (X και Y), καθώς και το εμβαδόν της λεκάνης, το οποίο δόθηκε από το ΥΠΕΚΑ (2015) σε τετραγωνικά χιλιόμετρα (km²), συμπληρώθηκαν στα ζητούμενα του υδρολογικού μοντέλου HMETS, όπως φαίνεται παρακάτω (Εικόνα 3.2).



Εικόνα 3.2: Δημιουργία βάσης δεδομένων για το υδρολογικό μοντέλο HMETs. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.

Μία γενικότερη εικόνα για τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν και αποτέλεσαν εν συνεχεία τη βάση εργασίας, δίνεται στη συνέχεια. Οι παρακάτω εικόνες αφορούν μεμονωμένα τα αρχικά δεδομένα εισόδου, χωρίς τη χρήση κάποιας μεθόδου βελτιστοποίησης και συνάρτησης, σε αντίθεση με τα υδρογραφήματα που παρατίθενται στη συνέχεια, τα οποία αναφέρονται στο αποτέλεσμα της απορροής από το συνδυασμό όλων των παραπάνω. Οι εικόνες αυτές περιλαμβάνουν τις μέσες τιμές όλων των δεδομένων για την περίοδο περίπτωσης μελέτης καθώς και τις επιμέρους παραμέτρους που τις αφορούν.



Εικόνα 3.3: Οι μέσες τιμές των αρχικών δεδομένων και οι σχετικοί παράμετροι που αναφέρονται σε αυτά, πριν τη διαδικασία της βαθμονόμησης. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.

Αναλυτικότερα, στο πρώτο γράφημα (Hydrograph, Εικόνα 3.3), παρουσιάζεται η καμπύλη της απορροής επηρεαζόμενη από τους αντίστοιχους παράγοντες σε σχέση με την καμπύλη των πραγματικών τιμών, πριν τη βαθμονόμηση. Είναι εμφανές ότι η απόκλιση που σημειώνεται αγγίζει περίπου το 20%. Ωστόσο, η πρώτη καμπύλη δεν ακολουθεί σε μεγάλο βαθμό τη δεύτερη. Στα υπόλοιπα γραφήματα παρουσιάζονται οι τιμές των δεδομένων εισόδου (βροχόπτωση, χιονόπτωση, μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία) καθώς και οι επιμέρους παράμετροι που συμβάλλουν στη δημιουργία του μοντέλου, πριν τη διαδικασία της βαθμονόμησης, η οποία αναλύεται παρακάτω.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος DDS. Ο λόγος που επιλέχθηκε ο συγκεκριμένος αλγόριθμος είναι η μεγαλύτερη ταχύτητα και ακρίβεια που παρουσιάζει στα αποτελέσματά του σε σχέση με τον SCE-UA. Επιπρόσθετα, επιλύει τα προβλήματα βαθμονόμησης για πολλές παραμέτρους, χωρίς να απαιτεί απαραίτητη ρύθμιση αυτών.

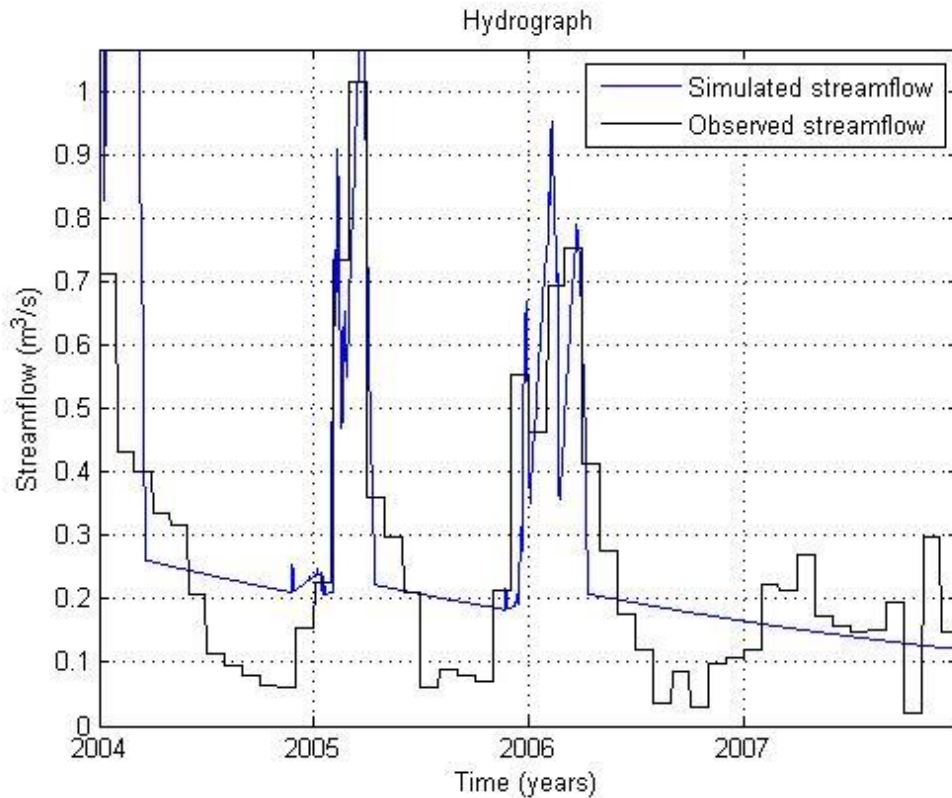
Για τον εντοπισμό της αποδοτικότητας του αλγορίθμου DDS στην λεκάνη απορροής του ποταμού Μόρνου επιλέχθηκαν τρεις περιπτώσεις τιμών για τις παραμέτρους (number of model evaluations - MaxFunEvals): 5000, 7500 και 10000 και χρησιμοποιήθηκαν δύο συναρτήσεις (Objective Functions): Nash και RMSE. Η τεχνική που ακολουθήθηκε για τον εντοπισμό της βέλτιστης λύσης λειτουργίας του μοντέλου είναι η “Trials and Errors”. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν διάφοροι συνδυασμοί τιμών παραμέτρων του αλγορίθμου DDS και συναρτήσεων για τη βαθμονόμηση του μοντέλου, ορισμένοι από τους οποίους παρουσιάζονται παρακάτω, με τη μορφή υδρογραφημάτων. Οι συνδυασμοί αυτοί αφορούν τις χρονοσειρές 2004-2007 και 2004-2008, ώστε για τα έτη 2008 και 2009 και 2009 αντίστοιχα να πραγματοποιηθεί η προσομοίωση/πρόβλεψη (Simulation/Forecast).

Εν συνεχεία, στην επιλογή διαμόρφωσης του HMETS διατηρήθηκαν τα προεπιλεγμένα όρια και οι τιμές αρχικοποίησης των παραμέτρων του μοντέλου (α_1 , β_1 , ddf min κ.λπ.).

Η Διαδικασία της Βαθμονόμησης (Calibration)

1^η Συνδυαστική Περίπτωση

Calibration and Validation Processes (2004-2007), DDS Optimization Algorithm, Number of Parameters: 5000, Objective Function: Nash.

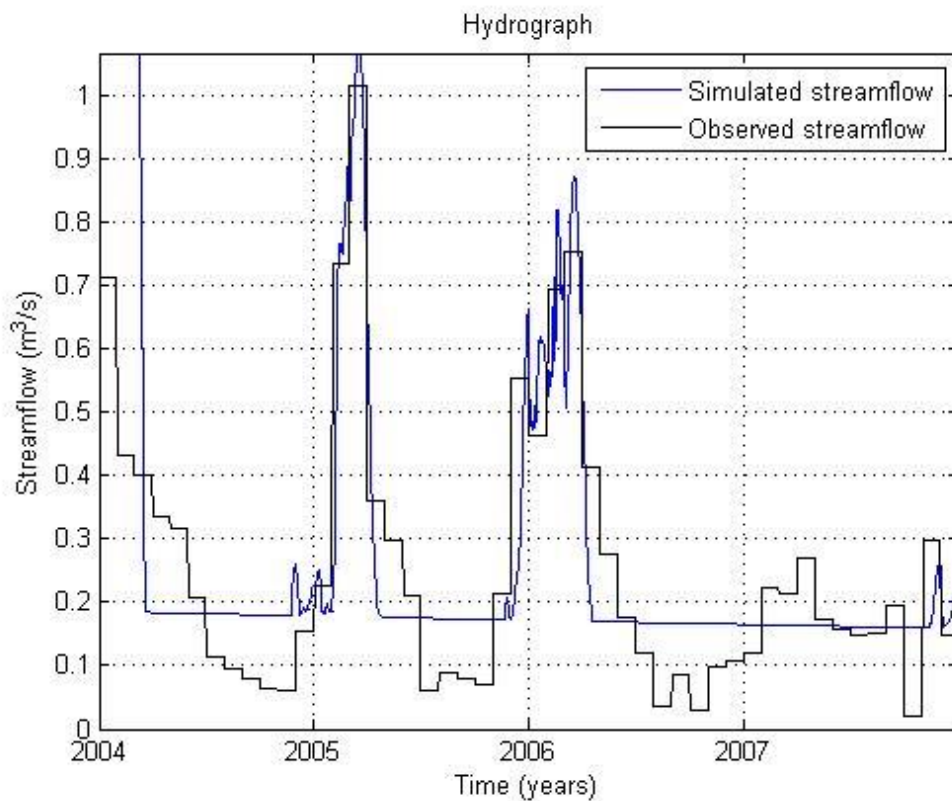


Διάγραμμα 3.1: Βαθμονόμηση και Επαλήθευση για τη χρονοσειρά 2004-2007 με τη χρήση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης DDS, για 5000 παραμέτρους και τη συνάρτηση Nash.

Η πρώτη συνδυαστική περίπτωση βαθμονόμησης και επαλήθευσης για τα έτη 2004-2007, πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του αλγορίθμου DDS, για 5000 παραμέτρους και τη συνάρτηση Nash. Στην περίπτωση αυτή σημειώνεται απόκλιση σε μεγάλο εύρος των ελαχίστων τιμών καθώς και στις “κορυφές” μεταξύ της καμπύλης των βαθμονομημένων και των παρατηρούμενων τιμών. Παρόλο που η συνολική απόκλιση είναι περίπου 20%, σημειώνεται σε αρκετά σημεία και για το λόγο αυτό το πρώτο υδρογράφημα δεν επιλέχθηκε ως ένα από τα βέλτιστα.

2η Συνδυαστική Περίπτωση

Calibration and Validation Processes (2004-2007), DDS Optimization Algorithm, Number of Parameters: 5000, Objective Function: RMSE.

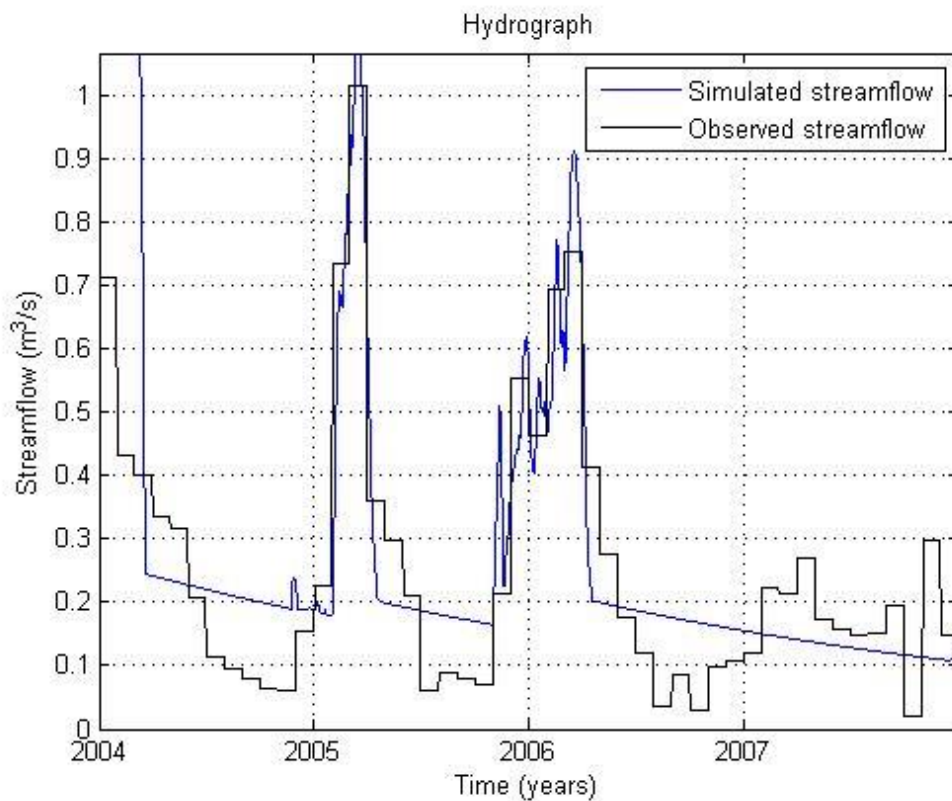


Διάγραμμα 3.2: Βαθμονόμηση και Επαλήθευση για τη χρονοσειρά 2004-2007 με τη χρήση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης DDS, για 5000 παραμέτρους και τη συνάρτηση RMSE.

Στη δεύτερη συνδυαστική περίπτωση η βαθμονόμηση, με παράλληλη επαλήθευση αυτής, αφορά τα δεδομένα που συμβάλλουν στη δημιουργία του μοντέλου για τη χρονοσειρά 2004-2007, με χρήση του αλγορίθμου DDS, 5000 παραμέτρους και τη συνάρτηση RMSE. Και σε αυτή την περίπτωση η απόκλιση που σημειώνεται είναι περίπου 20%. Ωστόσο, η βαθμονομημένη καμπύλη δεν απέχει εξίσου για όλες τις ελάχιστες τιμές. Στις υψηλές τιμές η διαφορά είναι παρόμοια με αυτή της πρώτης περίπτωσης. Με λίγα λόγια, μεταξύ των δύο περιπτώσεων, η συνάρτηση RMSE αποδίδει ελάχιστα καλύτερα από τη Nash.

3η Συνδυαστική Περίπτωση

Calibration and Validation Processes (2004-2007), DDS Optimization Algorithm, Number of Parameters: 7500, Objective Function: Nash.

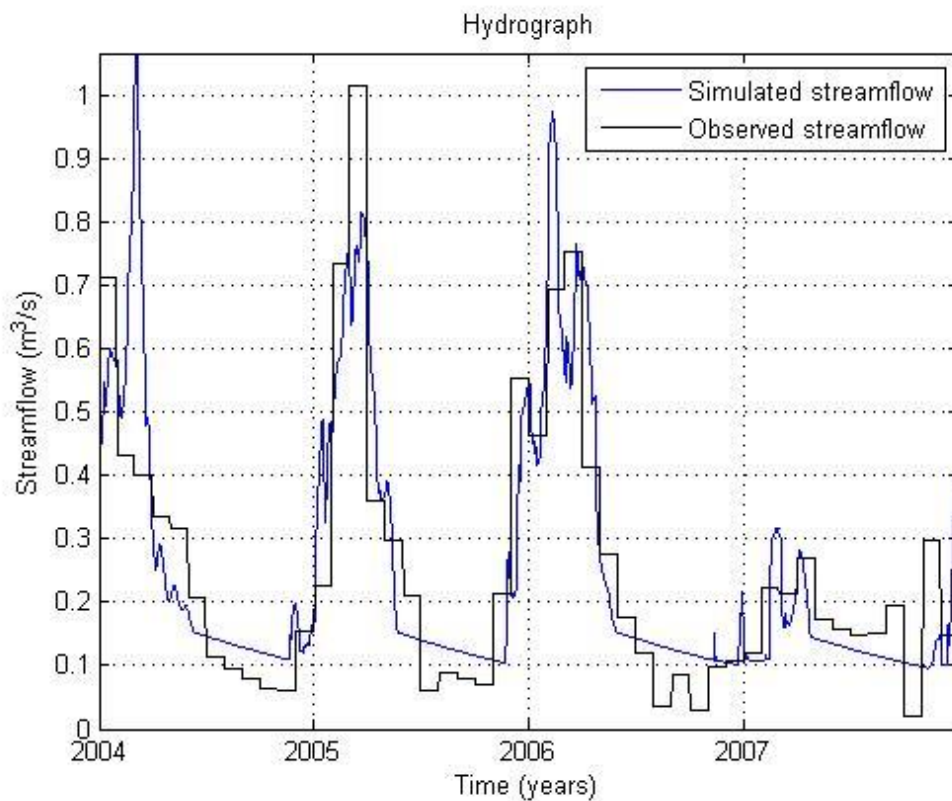


Διάγραμμα 3.3: Βαθμονόμηση και Επαλήθευση για τη χρονοσειρά 2004-2007 με τη χρήση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης DDS, για 7500 παραμέτρους και τη συνάρτηση Nash.

Η καμπύλη που δημιουργείται μέσω της βαθμονόμησης για τα έτη 2004-2007, με τη χρήση του αλγορίθμου DDS, για 7500 παραμέτρους και την επιλογή της συνάρτησης Nash, φέρει σχεδόν τα ίδια αποτελέσματα με τις παραπάνω. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι στην προκειμένη, η βαθμονομημένη καμπύλη αποδίδει στις μέγιστες τιμές, διότι σε ορισμένες “κορυφές” συγκλίνει περισσότερο στις πραγματικές τιμές καλύτερα από τις προηγούμενες περιπτώσεις.

4η Συνδυαστική Περίπτωση

Calibration and Validation Processes (2004-2007), DDS Optimization Algorithm, Number of Parameters: 7500, Objective Function: RMSE.

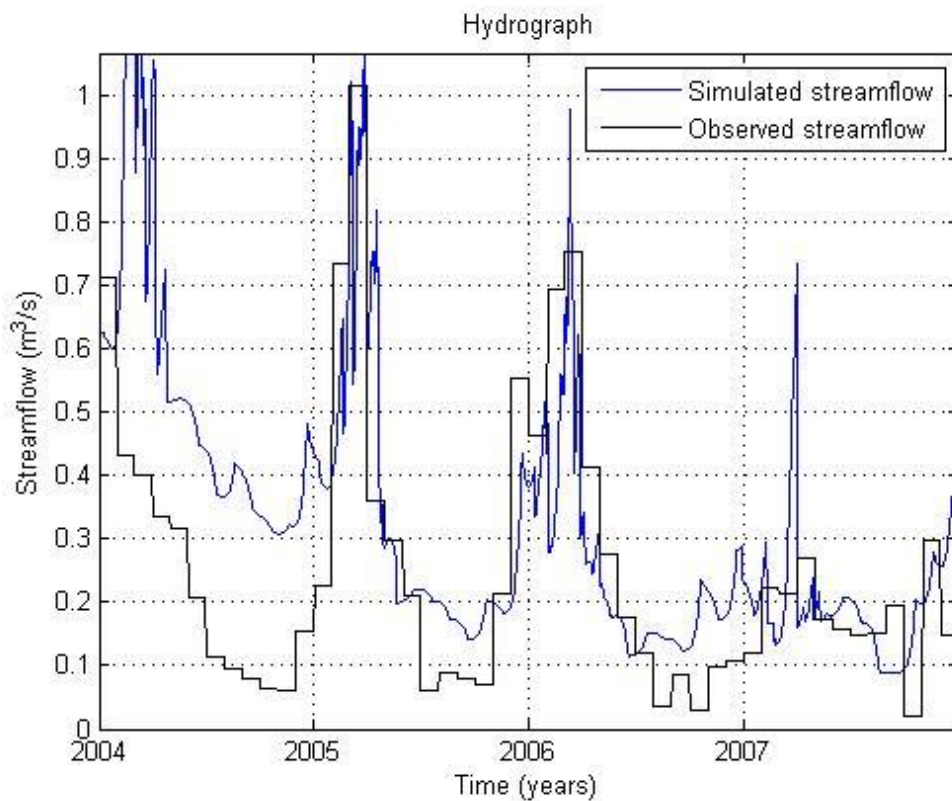


Διάγραμμα 3.4: Βαθμονόμηση και Επαλήθευση για τη χρονοσειρά 2004-2007 με τη χρήση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης DDS, για 7500 παραμέτρους και τη συνάρτηση RMSE.

Για τη χρονική περίοδο 2004-2007, με τη χρήση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης DDS, για 7500 παραμέτρους και τη συνάρτηση RMSE, η βαθμονομημένη καμπύλη λειτουργεί αρκετά διαφορετικά αναφορικά με πριν. Η εικόνα αυτής είναι πολύ κοντά με την πραγματική, με εξαίρεση ορισμένες “κορυφές”. Το συνολικό ποσοστό απόκλισης είναι μικρότερο από 20%. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε και ως η βέλτιστη περίπτωση βαθμονόμησης για την περίοδο 2004-2007.

5η Συνδυαστική Περίπτωση

Calibration and Validation Processes (2004-2007), DDS Optimization Algorithm, Number of Parameters: 10000, Objective Function: Nash.

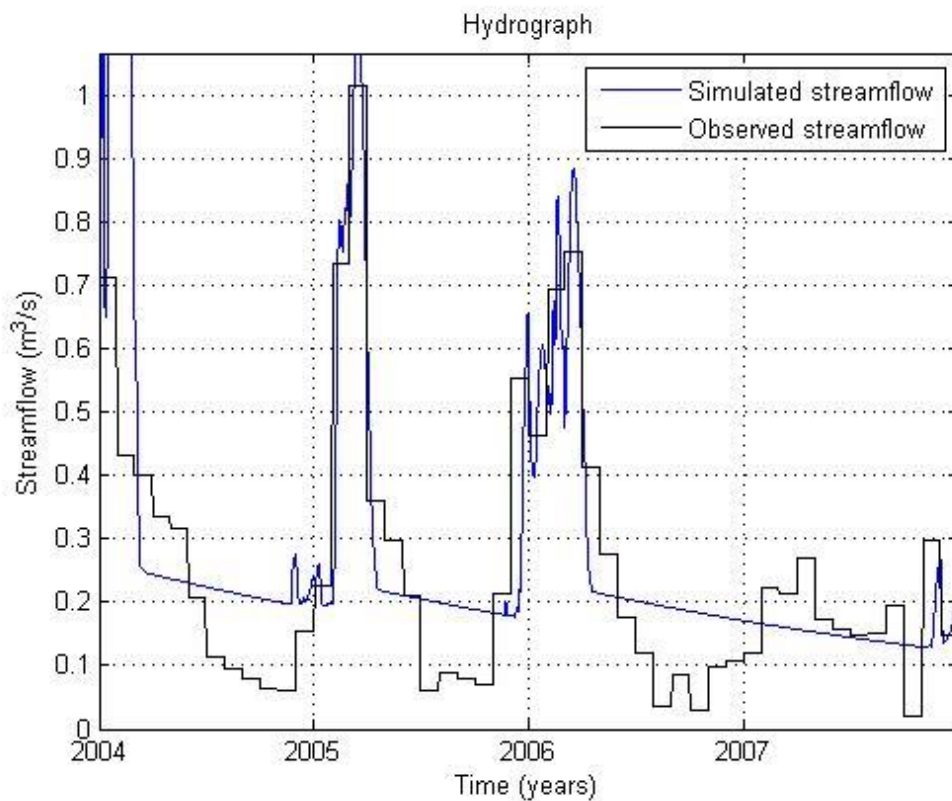


Διάγραμμα 3.5: Βαθμονόμηση και Επαλήθευση για τη χρονοσειρά 2004-2007 με τη χρήση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης DDS, για 10000 παραμέτρους και τη συνάρτηση Nash.

Η πέμπτη περίπτωση αφορά την ίδια περίοδο και αλγόριθμο με τις προηγούμενες περιπτώσεις. Ωστόσο, σε αυτόν τον συνδυασμό επιλέγονται 10000 παράμετροι και η συνάρτηση Nash. Ενώ η καμπύλη ακολουθεί σε ικανοποιητικό βαθμό τις παρατηρούμενες ελάχιστες τιμές, δεν συμβαίνει το ίδιο και με τις μέγιστες. Στις περισσότερες κορυφές η καμπύλη εκτονώνεται πολύ έντονα σε σχέση με την πραγματική.

6η Συνδυαστική Περίπτωση

Calibration and Validation Processes (2004-2007), DDS Optimization Algorithm, Number of Parameters: 10000, Objective Function: RMSE.

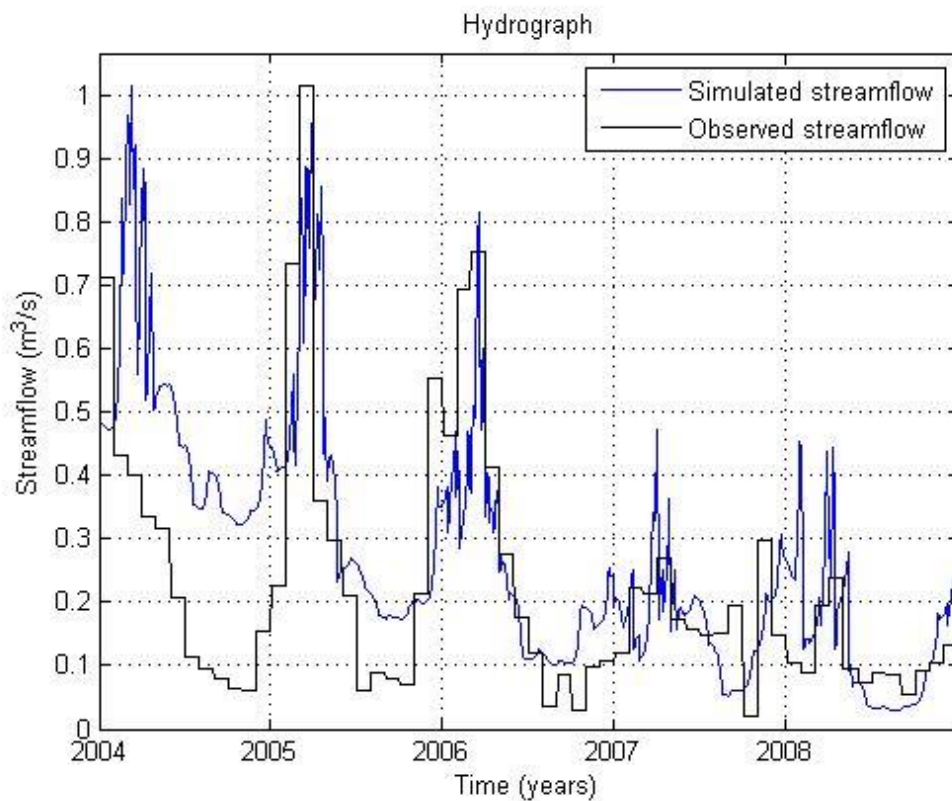


Διάγραμμα 3.6: Βαθμονόμηση και Επαλήθευση για τη χρονοσειρά 2004-2007 με τη χρήση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης DDS, για 10000 παραμέτρους και τη συνάρτηση RMSE.

Αναφορικά με τη συνδυαστική περίπτωση 6 για τα έτη 2004-2007, χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος DDS, 10000 παράμετροι και η συνάρτηση RMSE. Το υδρογράφημα αυτό μοιάζει αρκετά με το πρώτο. Παρουσιάζει δηλαδή ένα σχετικά καλό ποσοστό απόκλισης, αλλά η καμπύλη του δεν κινείται καθόλου ομαλά σε σχέση με την πραγματική στις χαμηλές τιμές.

7η Συνδυαστική Περίπτωση

Calibration and Validation Processes (2004-2008), DDS Optimization Algorithm, Number of Parameters: 7500, Objective Function: Nash.

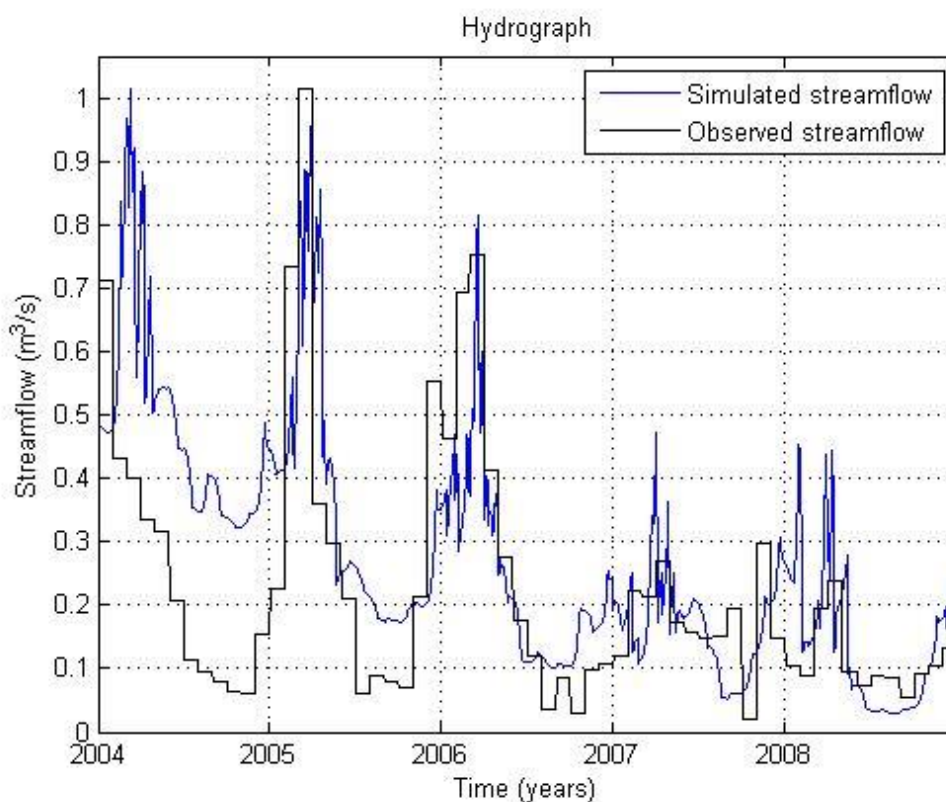


Διάγραμμα 3.7: Βαθμονόμηση και Επαλήθευση για τη χρονοσειρά 2004-2008 με τη χρήση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης DDS, για 7500 παραμέτρους και τη συνάρτηση Nash.

Η 7^η περίπτωση αφορά τη μία από τις δύο που παρουσιάζονται στην εργασία για τη χρονοσειρά 2004-2008. Περιλαμβάνει 7500 παραμέτρους, τον αλγόριθμο DDS και τη συνάρτηση Nash. Η «συμπεριφορά» της καμπύλης αυτής, με ορισμένες εξαιρέσεις, μοιάζει πολύ με την αντίστοιχη των πραγματικών τιμών.

8η Συνδυαστική Περίπτωση

Calibration and Validation Processes (2004-2008), DDS Optimization Algorithm, Number of Parameters: 7500, Objective Function: RMSE.



Διάγραμμα 3.8: Βαθμονόμηση και Επαλήθευση για τη χρονοσειρά 2004-2008 με τη χρήση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης DDS, για 7500 παραμέτρους και τη συνάρτηση RMSE.

Για την περίπτωση 8 ισχύουν οι ίδιες παρατηρήσεις με αυτές που σημειώθηκαν στην 7, παρά το γεγονός ότι άλλαξε η επιλογή της συνάρτησης.

Γενικότερα, να σημειωθεί ότι όλα τα παραπάνω υδρογραφήματα είναι αποτέλεσμα συνδυασμού όχι μόνο χρονοσειράς, αλγορίθμου βελτιστοποίησης, αριθμού παραμέτρων και συνάρτησης αλλά και διαφόρων παραγόντων που επηρεάζουν την απορροή, όπως περιγράφεται παραπάνω. Οι διάφορες καμπύλες που παρατηρούνται, αν και έχουν απόκλιση από αυτές των πραγματικών τιμών, τις ακολουθούν με πολύ μεγαλύτερη λεπτομέρεια αναφορικά με αυτή που προέκυψε από τα πρωτογενή δεδομένα, πριν τη διαδικασία της βαθμονόμησης, όπως παρουσιάστηκε στην εικόνα 5.

Σύμφωνα λοιπόν με τα παραπάνω υδρογραφήματα, προκύπτει ότι για τη χρονοσειρά 2004-2007 και τις συνδυαστικές περιπτώσεις 1, 2 και 6 διατηρείται μία σχετικά μεγάλη απόκλιση κυρίως μεταξύ των χαμηλών τιμών και ελάχιστα μικρότερη μεταξύ των υψηλών. Στην 4^η περίπτωση σημειώνεται μικρή απόκλιση σε ορισμένα σημεία, ενώ

γενικά οι τιμές της βαθμονόμησης είναι πολύ κοντά στα παρατηρούμενα μεγέθη παροχής. Στην 5^η συνδυαστική περίπτωση η καμπύλη της βαθμονόμησης αποκλίνει αρκετά από αυτή της παρατήρησης στις υψηλές τιμές.

Η βαθμονόμηση για την περίοδο 2004-2008 με τον αλγόριθμο DDS για τις συναρτήσεις Nash και RMSE με 7500 παραμέτρους παρουσιάζοταν με τον ίδιο τρόπο, όπως είναι εμφανές στις δύο τελευταίες περιπτώσεις (7^η και 8^η). Όσον αφορά τα αποτελέσματα για 5000 και 10000 παραμέτρους, δεν ήταν τα αποδεκτά και γι' αυτό το λόγο αποκλείστηκαν. Με βάση τα δύο τελευταία υδρογραφήματα, προκύπτει ότι οι βαθμονομήσεις ακολουθούν πολύ κοντινές πορείες με τις κατανομές των παρατηρούμενων/πραγματικών τιμών.

Επιπρόσθετα, να σημειωθεί ότι μέσω της διαδικασίας της βαθμονόμησης προέκυψαν, για κάθε συνδυαστική περίπτωση και χρονοσειρά, οι αντίστοιχοι πίνακες με τις τιμές των 21 παραμέτρων. Παρακάτω παρατίθενται οι τιμές των παραμέτρων για τις συνδυαστικές περιπτώσεις 4 και 8.

Πίνακας 3.1: Οι τιμές των 21 παραμέτρων για τις συνδυαστικές περιπτώσεις 4 και 7. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.

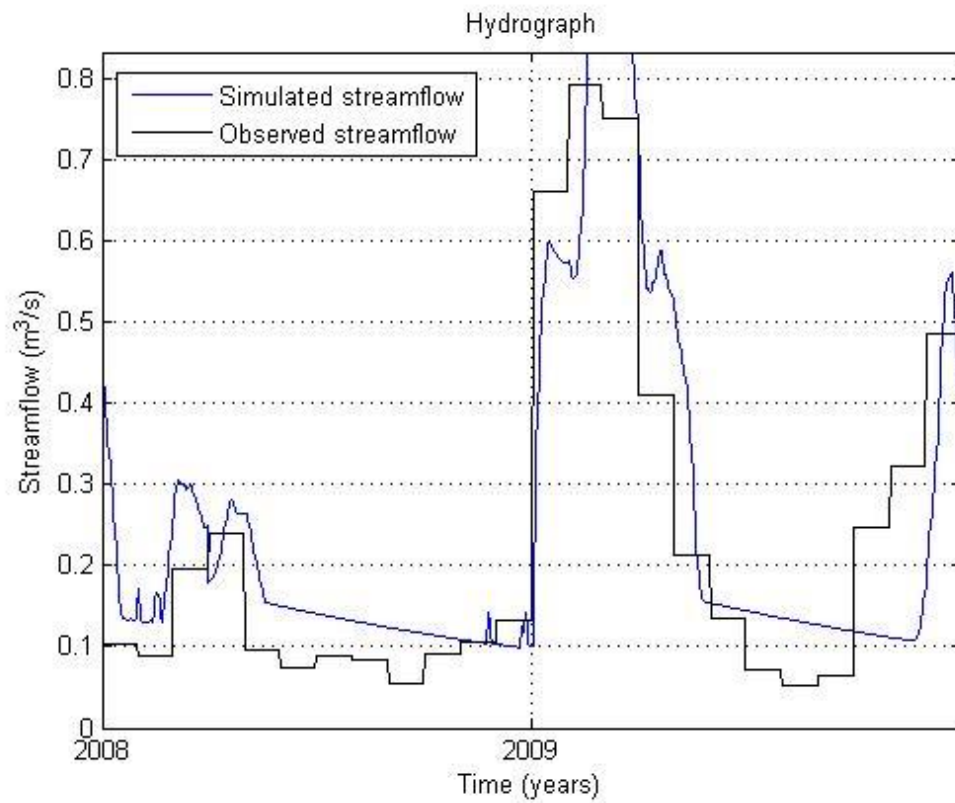
Περιπτώσεις		4 ^η	8 ^η
Οι 21 Παράμετροι	alpha1	18,3064	7,2478
	beta1	0,0153953	0,0277
	alpha2	12,9928	12,9665
	beta2	0,1521	0,1513
	ddf min	0,7525	1,9141
	ddf plus	0,2417	19,9572
	Tbm	2,5354	-1,9732
	Kcum	0,0578	0,0445
	fcmín	2,3668e-06	2,0498e-04
	fcmín_plus	0,1237	0,0975
	Ccum	0,0283	0,0362
	Tbf	-4,9543	-4,4891
	Kf	2,5742	0,9914
	fe	0,7005	0,0161
	ET eff	2,2820	0,0454
	Coef runoff	1,0000	0,9931
	Coef v2p	0,0092	1,7544e-05
	Coef vadose	0,0010	3,5512e-04
	Coef phreatic	0,0021	0,0016
	Vadose max	60,9184	3,6736
	Phreatic max	7,2384	51,2200

Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα

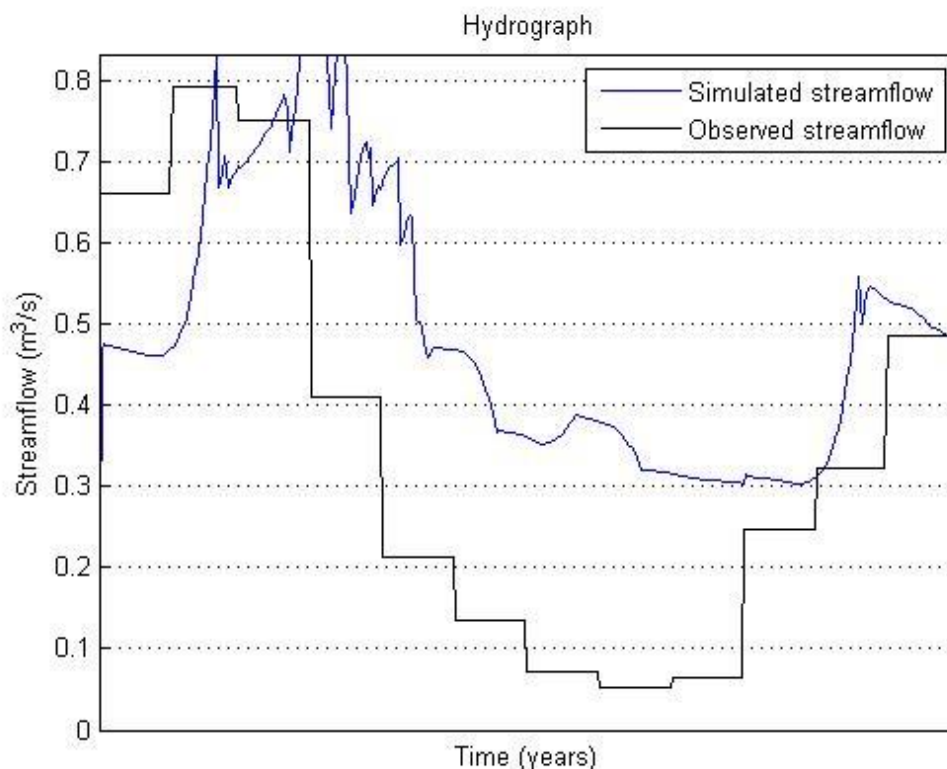
Πρόβλεψη (Simulation) και Ανάλυση των Αποτελεσμάτων

Όπως έχει αναλυθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο, δύο τρόποι προσομοίωσης είναι διαθέσιμοι από το μοντέλο HMETs: ο πρώτος χρησιμοποιεί μία ήδη βαθμονομημένη λεκάνη και ο δεύτερος χρησιμοποιεί παραμέτρους που επιλέγονται από τον χρήστη. Ωστόσο, οι τιμές των παραμέτρων της βαθμονομημένης λεκάνης επιλέγονται αυτόματα. Αξίζει να τονιστεί ότι ο χρήστης μπορεί να αλλάξει τις παραμέτρους ακόμη κι αν πρόκειται για μια ήδη βαθμονομημένη λεκάνη. Από την άλλη μεριά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η βάση δεδομένων της λεκάνης και να πραγματοποιηθεί προσομοίωση σε αυτή με οποιεσδήποτε τιμές παραμέτρων.

Με βάση τα παραπάνω υδρογραφήματα βαθμονόμησης των δεδομένων για τις χρονοσειρές 2004-2007 και 2004-2008 επιλέχθηκαν ως προς μελέτη προσομοίωσης τα βέλτιστα, δηλαδή οι συνδυαστικές περιπτώσεις 4 και 8. Χρησιμοποιώντας λοιπόν τις 21 παραμέτρους, που προέκυψαν σε πίνακες από τις επιλεγμένες βαθμονομήσεις (οι τιμές των παραμέτρων συγκεντρώνονται στον Πίνακα 3.1), πραγματοποιήθηκε, όπως παρουσιάζεται στα παρακάτω γραφήματα (Διαγράμματα 4.1 και 4.2), προσομοίωση ή αλλιώς πρόβλεψη (Forecasting) για τα έτη 2008-2009 και 2009 αντίστοιχα.



Διάγραμμα 4.1: Προσομοίωση της Απορροής για την περίοδο 2008-2009 και Απόκλιση από την Πραγματική.
Πηγή: Ιδία επεξεργασία.



Διάγραμμα 4.2: Προσομοίωση της Απορροής για το έτος 2009 και Απόκλιση από την Πραγματική. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.

Να σημειωθεί ότι λόγω της γνώσης των πραγματικών δεδομένων (Observed streamflow) για τα έτη προσομοίωσης/πρόβλεψης (2008-2009 και 2009), πραγματοποιήθηκε επαλήθευση των αποτελεσμάτων. Με λίγα λόγια εκτιμήθηκε το ποσοστό απόκλισης των προβλεπόμενων τιμών (Simulated streamflow) από τις πραγματικές. Το ποσοστό αυτό διαφέρει στις δύο περιπτώσεις. Πιο συγκεκριμένα, είναι αρκετά μικρότερο για τη χρονοσειρά 2008-2009 σε σχέση με το έτος 2009. Όσον αφορά το έτος 2009 για την διετή περίοδο πρόβλεψης σε σχέση με την μονοετή, σημειώνεται ότι το ποσοστό απόκλισης είναι αρκετά μικρότερο στο Διάγραμμα 4.1 απ' ό τι στο Διάγραμμα 4.2. Παρόλα αυτά η καμπύλη για το κοινό έτος πρόβλεψης (2009) ακολουθεί σχεδόν την ίδια πορεία. Η απόκλιση αυτή πιθανότατα οφείλεται στο γεγονός ότι το μοντέλο δεν μπορεί να αποδώσει άμεσα προγνωστικά για ένα μόνο έτος και ειδικά όταν οι πραγματικές τιμές αυτού του έτους απέχουν τόσο από τις προηγούμενες χρονιές. Παρόλα αυτά η πρόβλεψη που γίνεται περιλαμβάνει τις πραγματικές μέγιστες τιμές απορροής, δηλαδή η απόκλιση λειτουργεί θετικά σε περίπτωση εκδήλωσης κάποιας αιχμής πλημμύρας.

Ακόμη, αξίζει να σημειωθεί ότι η επίδοση ενός μοντέλου θα πρέπει να συγκριθεί με την αβεβαιότητα των παρατηρήσεων που διατίθενται (Kozanis et al., 2005). Σε αυτό το γεγονός μπορεί να βασίζεται επίσης και η διαφορά της εκτιμώμενης καμπύλης για το 2009 μεταξύ των δύο υδρογραφημάτων.

Εκτίμηση Πλημμυρικού Κινδύνου

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, αρκετές έρευνες και μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί για τον καθορισμό του φαινομένου της πλημμύρας, τις αιτίες δημιουργίας του, αλλά και των πιθανών τρόπων πρόληψης και αντιμετώπισής του. Παρόλο που πρόκειται για μία φυσική διεργασία, οι παράμετροι που είναι υπαίτιες ποικίλουν. Ωστόσο, ο συνηθέστερος λόγος εμφάνισης ενός φυσικού πλημμυρικού φαινομένου είναι η μεγάλη σε ένταση και ξαφνική παρουσία ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων με αποτέλεσμα την υπερχείλιση του επιφανειακού υδροκρίτη, την αδυναμία απορρόφησης και συγκράτησης των νερών από το έδαφος και την υπέρβαση της φέρουσας ικανότητας παροχέτευσης του ποτάμιου συστήματος των επιφανειακών υδάτων στον τελικό αποδέκτη (Μαμάσης, 2009).

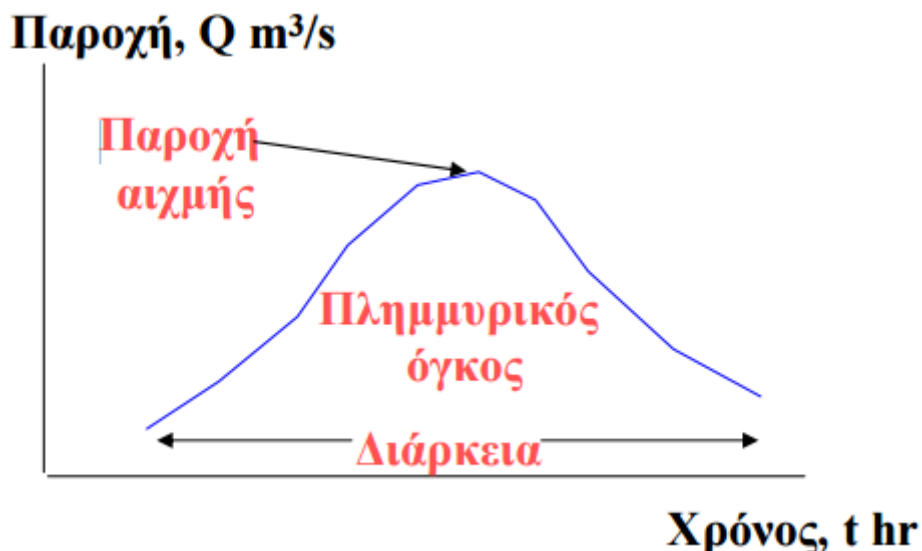
Σύμφωνα με τον Eagleson (1992):

“ Η πλημμύρα αποτελεί μία κατάσταση, κατά τη διάρκεια της οποίας μία περιοχή που είναι συνήθως στεγνή κατακλύζεται από ποσότητες νερού για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα”.

Συνήθως αφορά την υπέρβαση των φυσικών ορίων που σχηματίζει η συνήθης ροή των επιφανειακών υδάτων μέχρι τον τελικό τους αποδέκτη (θάλασσα, λίμνη κ.λπ.).

Μερικές από τις αιτίες που συμβάλουν στην εμφάνιση των πλημμυρικών φαινομένων μεταξύ άλλων, είναι και η έντονη παρέμβαση της ανθρώπινης δραστηριότητας στην επιφάνεια της γης που μπορεί να μεταβάλει σημαντικά το ανάγλυφο, τις κλήσεις, την ποιότητα και το είδος των εδαφών την μορφολογία της κοίτης και του υδροκρίτη, με προσχώσεις, δόμηση, αποψίλωση, καλλιέργειες κλπ.

Τα τρία κύρια μεγέθη της πλημμύρας είναι (Εικόνα 4.1): (α) η παροχή αιχμής και η αντίστοιχη στάθμη στο υδατόρευμα, (β) ο πλημμυρικός όγκος και (γ) η χρονική διάρκεια.



Εικόνα 4.1: Τα τρία μεγέθη της πλημμύρας. Πηγή: Μαμάσης, 2007.

Τα μεγέθη των πλημμυρών συνδέονται με τα χαρακτηριστικά της βροχόπτωσης (συνολικό ύψος, ένταση, διάρκεια), της λεκάνης απορροής (έκταση, συντελεστής απορροής, χρόνος συρροής) και των υδατορευμάτων (διατομή, κλίση, τραχύτητα, κατάντη στάθμες) (Μαμάσης, 2007).

Σαν φυσικό φαινόμενο η πλημμύρα είναι δυναμική και εξαιρετικά επικίνδυνη με καταστρεπτικές συνέπειες για τον άνθρωπο και το περιβάλλον, αφού εκδηλώνεται απρόβλεπτα και τα χρονικά περιθώρια αντίδρασης για την αντιμετώπισή της είναι περιορισμένα. Για το λόγο αυτό, τα τελευταία χρόνια γίνεται μία προσπάθεια διαχείρισης του πλημμυρικού κινδύνου εστιάζοντας στην εκτίμηση αυτού.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, με βάση τα αποτελέσματα της σχέσης βροχόπτωσης-απορροής για τη λεκάνη μελέτης, καθώς και την πρόβλεψη της παροχής για τα δύο επόμενα έτη, συμπεριλαμβανομένου της απόκλισης από τα πραγματικά μεγέθη, έγινε μία προσπάθεια αξιολόγησης της πλημμυρικής επικινδυνότητας.

Πίνακας 4.1: Συνολική Παροχή της Λεκάνης του Μόρνου για τη χρονοσειρά 2004-2009. Πηγή: Ειδική Γραμματεία Υδάτων.

Έτη	Παροχή (hm ³)
2004	239.35
2005	309.57
2006	255.99
2007	167.67
2008	109.48
2009	332.75

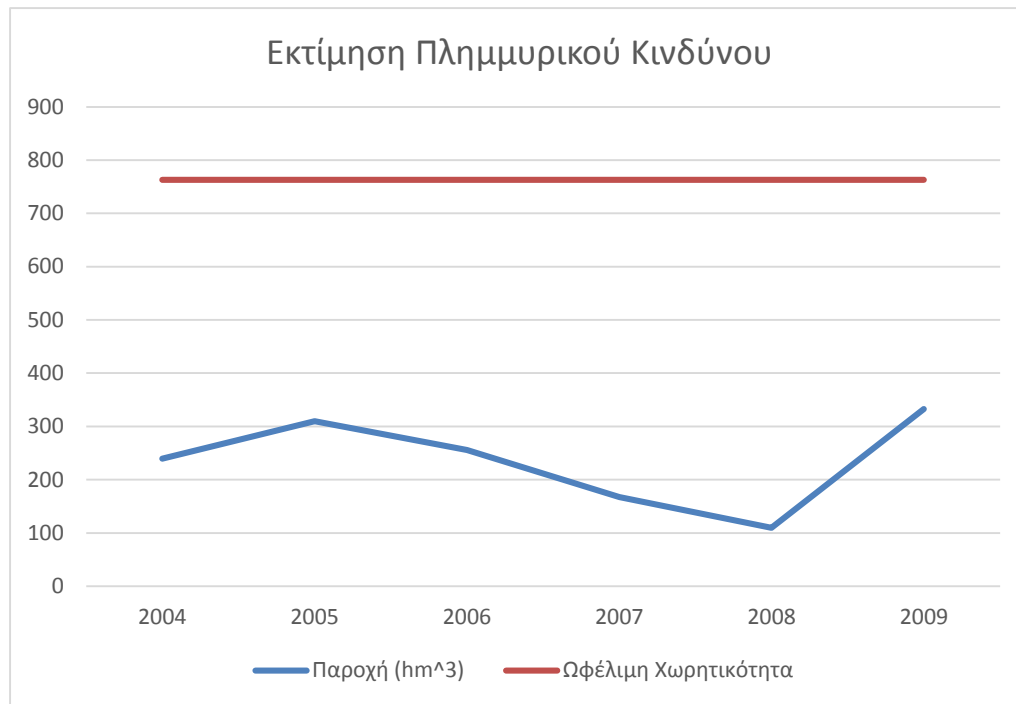
Πίνακας 4.2: Χαρακτηριστικά ασφαλείας σχετικά με το ύψος και τον όγκο νερού για τη λεκάνη του Μόρνου. Πηγή: Ειδική Γραμματεία Υδάτων.

Χαρακτηριστικά Ασφαλείας για τον Ταμιευτήρα του Μόρνου

Στάθμη υπερχείλισης: 435,00 (m)
Ολική χωρητικότητα: 763.71 (hm ³)
Ωφέλιμη χωρητικότητα χωρίς άντληση : 630.21 (hm ³)
Ωφέλιμη χωρητικότητα με άντληση (με χρήση πλωτών αντλιοστασίων): 723.71 (hm ³)
Νεκρός Όγκος: 40.00 (hm ³)

Σύμφωνα με τα παραπάνω και τους Πίνακες 4.1 και 4.2, προέκυψε το Διάγραμμα 4.3. Το διάγραμμα υποδηλώνει ότι τόσο με βάση τις πραγματικές όσο και τις προσομοιωμένες τιμές δεν προβλέπεται το φαινόμενο της πλημμύρας. Η ολική χωρητικότητα της λεκάνης, που περιλαμβάνει τη μη άντληση, είναι διπλάσια σχεδόν

από όλες τις τιμές παροχής που παρατηρούνται ή/και προβλέπονται για τη χρονοσειρά μελέτης (2004-2009), οπότε δεν εκτιμάται κάποιο πλημμυρικό επεισόδιο.



Διάγραμμα 4.3: Εκτίμηση Πλημμυρικού Κινδύνου για τη λεκάνη του Μόρνου για τα έτη 2004-2009. Πηγή: Ιδία Επεξεργασία.

Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία καταδεικνύει ότι η εφαρμογή του μοντέλου HMETS στη λεκάνη απορροής του Μόρνου μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για τη διερεύνηση της σχέσης μεταξύ βροχόπτωσης-απορροής όσο και για την πρόβλεψη απορροής. Ωστόσο, κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης και της πρόβλεψης προέκυψαν και ορισμένες αδυναμίες οι οποίες χρήζουν βαθύτερης έρευνας, με κυριότερη την αδυναμία να υπολογιστούν ικανοποιητικά οι “κορυφές” της απορροής και οι τιμές πρόβλεψης να ακολουθήσουν τις πολύ ακραίες τιμές εξίσου καλά όσο τις υπόλοιπες.

Στον αντίποδα, κύριο πλεονέκτημα αποτελεί η δυνατότητα επεξεργασίας μεγάλου όγκου δεδομένων σε σύντομο χρονικό διάστημα, γεγονός που το κάνει να ξεχωρίζει από αντίστοιχα υδρολογικά μοντέλα. Επίσης, διαπιστώθηκε ότι η επιλογή του αλγορίθμου DDS σε σχέση με τον SCE-UA έχει καίρια σημασία για τη συμπεριφορά την λεκάνης μελέτης, μιας και ο αριθμός των δεδομένων, αν και μεγάλος, δεν επαρκούσε για τις απαιτήσεις του δεύτερου αλγορίθμου. Παρόλα αυτά, αξίζει να σημειωθεί ότι ακόμη και για τον DDS η διερεύνηση της σχέσης βροχόπτωσης-απορροής και η μετέπειτα πρόβλεψη που πραγματοποιήθηκε πιθανόν να διεξήγαγαν πιο βέλτιστα αποτελέσματα με δεδομένα για μία χρονοσειρά παραπάνω ετών. Ωστόσο, ένα ποσοστό μεγέθους 20% θεωρείται αποδεκτό για ένα μοντέλο που έχει αναπτυχθεί για λεκάνες του Καναδά, με πολύ διαφορετικά μεγέθη (ύψος λεκάνης, ολική χωρητικότητα κ.λπ.) και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά (ανάγλυφο εδάφους, εδαφική υγρασία κ.λπ.) και εφαρμόστηκε σε μία μικρότερη λεκάνη για τον Ελλαδικό χώρο.

Η σχέση μεταξύ βροχόπτωσης και απορροής είναι ένα από τα περισσότερο πολύπλοκα υδρολογικά φαινόμενα και η πρόβλεψη της απορροής εξαρτάται από ένα μεγάλο αριθμό παραμέτρων. Η δημιουργία της μέγιστης απορροής εξαρτάται πρωταρχικά από τη βροχόπτωση. Ωστόσο, η τελική απορροή που προκύπτει σε μία λεκάνη, εκτός από τη βροχόπτωση, είναι συνάρτηση διαφόρων παραγόντων, όπως η χιονόπτωση, η μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία, μεγέθη που χρησιμοποιήθηκαν για την πρόβλεψη της απορροής καθώς και άλλα που δεν συμπεριελήφθησαν (δασοκάλυψη, γεωλογικό υπόβαθρο), μιας και το μοντέλο ακολουθεί τις κύριες φάσεις του υδρολογικού κύκλου.

Από την παρούσα εφαρμογή προκύπτει ότι η απόδοση της απορροής βελτιώθηκε αισθητά όταν υπολογίστηκαν και τα υπόλοιπα μεγέθη, μεταξύ των οποίων και η βροχόπτωση, (Συνδυαστικές περιπτώσεις 4 και 8) σε σχέση με το αποτέλεσμα της απορροής όταν αυτή εξαρτιόνταν μόνο από τη βροχόπτωση (Υδρογράφημα, Εικόνα 5).

Γενικά προκύπτει ότι με τη χρήση του μοντέλου HMETs μπορεί να γίνει τόσο διερεύνηση της σχέσης βροχόπτωσης-απορροής όσο και πρόβλεψη της δεύτερης. Ωστόσο, υπάρχουν ορισμένες δυσκολίες, όπως είναι η γενίκευση σε περισσότερες και με διαφορετικά χαρακτηριστικά λεκάνες απορροής.

Συμπληρωματικά με τα παραπάνω αποτελέσματα, έγινε και μία προσπάθεια εκτίμησης του πλημμυρικού κινδύνου της περιοχής μελέτης, μιας και αποτελεί μία έκφανση της απορροής. Διαπιστώθηκε λοιπόν ότι ένα τέτοιο φαινόμενο δεν θα μπορούσε να συμβεί με βάση τα δεδομένα επεξεργασίας για τη χρονοσειρά μελέτης. Το συμπέρασμα αυτό επαληθεύεται και από ιστορικά γεγονότα στη μελετώμενη περιοχή που δεν φανερώνουν κανένα συμβάν πλημμύρας, εξαιτίας απρόσμενης αλλαγής των παραγόντων που επηρεάζουν την απορροή. Έτσι γενικότερα η παρούσα μεθοδολογία θα μπορούσε να αποτελέσει ένα χρήσιμο εργαλείο υποβοήθησης λήψεων αποφάσεων για περιοχές με λεκάνες απορροής, ώστε να πραγματοποιείται οριοθέτηση των περιοχών αυτών, προκειμένου να αποφεύγονται πιθανές καταστροφές αλλά συνάμα να επιτρέπεται η φυσική εκτόνωση κάποιας πιθανής πλημμύρας, ενώ σε βάθος χρόνου να αναμένεται και η δυνατότητα έγκαιρης προειδοποίησης του πληθυσμού.

Εν κατακλείδι, να αναφερθεί ότι κάθε εννοιολογικό μοντέλο είναι γνωστό ότι είναι λάθος και κάθε μοντέλο μπορεί να διαψευστεί εάν διερευνηθεί με λεπτομέρεια και οριστούν πολύ υψηλά κριτήρια επίδοσης.

Βιβλιογραφία

ΞΕΝΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Abu El-Nasr, A., Willems, P., Timbe, L., Christiaens, K., Feyen, J. (1999). Comparative analysis of the runoff-generation using lumped and distributed approaches. Leuven: Symposium on “Modelling of transport processes in soils at various scales in time and space”.
- Ajward, A.H, Muzik, I. (2000). A Spatially Varied Unit Hydrograph Model. Journal of Environmental Hydrology, Vol.8, Paper 7, 1-8.
- Amorocho, J. and Hart, W.E. (1964). A critique of current methods in hydrology systems investigation. EOS Tr. Am. Geophys. Un., 45,pp. 307-321.
- Bohrn, S. (2012). Climate Change Impact Assessment and Uncertainty Analysis of the Hydrology of a Northern, Data-Sparse Catchment Using Multiple Hydrological Models. Διαθέσιμο σε: <http://mspace.lib.umanitoba.ca/handle/1993/13692> (Ανακτήθηκε 02 Δεκεμβρίου, 2015).
- Bourletsikas, A., Baltas, E., Mimikou, M., (2006). Rainfall-Runoff Modeling for an Experimental Watershed of Western Greece Using Extended Time-Area Method and GIS. Journal of Spatial Hydrology, Vol.6, No.1 Spring, pp. 93-104.
- Chatzisavva, E., Arampatzis, S. (2007). PROWAT: Planning and Implementing a Non-Revenue Water Reduction Strategy Improves the Performance of Water Supply and Distribution Systems. Leonardo da Vinci project.
- Chow, V.T, Maidment, D.R, Mays, L.W (1988). Applied Hydrology, McGraw-Hill International Editions. Civil Engineering series, New York.
- Dooge, J.C.I. (1959). A General Theory of the Unit Hydrograph. Journal of Geophysical Research, 64(2), 241-256.
- Dooge, J.C.I. (1973). Linear theory of hydrologic systems. Tech. Bull. no. 1468. US Agricultural Research Service Washington.
- Duan, Q., Sorooshian, S. and Gupta, V. (1993). Effective and Efficient Global Optimization for Conceptual Rainfall-Runoff Models. Water Resources Research, 28(4), 1015-1031.
- Eagleson, P.S. (1992). Opportunities in the Hydrological Sciences, in: U.S. Committee. Washington: National Academy Press.

- Essou, G., Brissette, F. (2013). Climate Change Impacts on the Ouémé River, Benin, West Africa. Διαθέσιμο σε: <http://www.omicsonline.org/climate-change-impacts-on-the-queme-river-benin-west-africa-2157-7617.1000161.php?aid=18831> (Ανακτήθηκε 02 Δεκεμβρίου, 2015).
- Graham, S., Parkinson, C, and Chahine, M. (2010). The Water Cycle. NASA: Earth Observatory. Διαθέσιμο σε: http://earthobservatory.nasa.gov/Features/Water/water_cycle_2000.pdf (Ανακτήθηκε 03 Νοεμβρίου, 2015).
- Kozanis, S., A. Christofides, N. Mamassis, A. Efstratiadis, and D. Koutsoyiannis (2005). Hydrognomon - A hydrological data management and processing software tool, 2nd General Assembly of the European Geosciences Union, Geophysical Research Abstracts, Vol. 7, Vienna, 04644, European Geosciences Union.
- Koutroulis, A.G. et al., 2013. Impact of climate change on water resources status: A case study for Crete Island, Greece. Journal of Hydrology, 479, pp.146–158. Διαθέσιμο σε: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.11.055> (Ανακτήθηκε 2015).
- Leconte, R., Rasmussen, P., Brissette, F. (2012). Impact of climate change in Canadian river basins and adaptation strategies for the hydropower industry. Διαθέσιμο σε: http://www.ouranos.ca/media/publication/80_RapportLeconte-2012.pdf (Ανακτήθηκε 02 Δεκεμβρίου, 2015).
- Maidment, D.R (1993). Developing a spatially distributed unit hydrograph by using GIS, HydroGIS 93: Application of Geographic Information Systems in hydrology and water resources. Proceeding of the Vienna Conference: IAHS Publ. no 211, pp. 181-192.
- Maidment, D.R, Olivera, F., Calver, A., Eatherall and Fraczek, W. (1996). A Unit Hydrograph derived from a spatially distributed velocity field. Hydrological Processes, Vol 10, pp 831-844.
- McCuen, R. H.. (1989). Hydrologic Analysis and Design. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, NJ.
- MIKE SHE (2004). DHI.

- National Geographic (2015). Water Cycle, Hydrologic Cycle. Διατίθεται σε: http://education.nationalgeographic.com/education/encyclopedia/water-cycle/?ar_a=1 (Ανακτήθηκε 05 Νοεμβρίου, 2015).
- Pechlivanidis, I.G. (2012). Development of a GIS-based rainfall-runoff model to predict the runoff response in the ungauged catchment of Mornos, Greece. Athens.
- Refsgaard, J.C. and B. Storm (1995). MIKESHE. In: V.J. Singh (ed.), Computer Models in Watershed Hydrology, Water Resources Publication, 809-846.
- Refsgaard, J.C. (1997). Parameterisation, calibration and validation of distributed hydrological models. Journal of Hydrology 198, 69-97.
- Saghafian, B. and Julien, P.Y. (1995). Time to equilibrium for spatially variable watersheds. Journal of Hydrology, 172, 231-245.
- Saghafian, B., Julien, P.Y, Rajaie, H. (2002). Runoff hydrograph simulation based on time variable isochrones technique. Journal of Hydrology 261, pp. 193-203.
- Sherman, L.K. (1932). Streamflow from Rainfall by the Unit Graph Method. Eng. News Rec., 108, 501-505.
- Taylor, A. and Wong, T.H.F. (2003). Non-structural stormwater quality best management practices: guidelines for monitoring and evaluation. CRC for Catchment Hydrology.
- Todini, E. (1988b). Rainfall runoff modelling: past, present and future. J. Hydrol., 100: 341-352.
- Todini, E. (1989). Floods forecasting models. Excerpta 4, 117-162.
- Todini, E. (1995). The ARNO rainfall-runoff model. Institute for Hydraulic Construction, University of Bologna, Italy.
- Tolson, B.A. and Shoemaker, C.A. (2006). The Dynamically Dimensioned Search (DDS) Algorithm as a Robust Optimization Tool in Hydrologic Modeling. American Geophysical Union, Fall Meeting.
- Tolson, B.A. and Shoemaker, C.A. (2007). Dynamically dimensioned search algorithm for computationally efficient watershed model calibration. Water Resources Research, 43, W01413.

- Troin, M., Arsenault, R., Brissette, F. (2015). Performance and Uncertainty Evaluation of Snow Models on Snowmelt Flow Simulations over a Nordic Catchment (Mistassibi, Canada). Διαθέσιμο σε: <http://www.mdpi.com/2306-5338/2/4/289> (Ανακτήθηκε 02 Δεκεμβρίου, 2015).
- Vallet, A., Bertrand, C., Mudry, J. (2013). Effective rainfall: a significant parameter to improve understanding of deep-seated rainfall triggering landslide – a simple computation temperature based method applied to Séchilienne unstable slope (French Alps). Διαθέσιμο σε: <http://www.hydrol-earth-syst-sci-discuss.net/hess-2013-226/> (Ανακτήθηκε 05, Φεβρουαρίου, 2016).
- Wang, M. and Hjelmfelt, A.T. (1998). DEM Based Overland Flow Routing Model. Journal of Hydrologic Engineering, 3(1).

ΕΛΛΗΝΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Βαφειάδης, Μ. (2000). Εισαγωγή στην επιφανειακή υδρολογία (Πανεπιστημιακές Σημειώσεις). Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης: Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών.
- Δημητρίου, Α. (2015). Υδρολογική και γεωχημική προσομοίωση της λεκάνης απορροής του ποταμού Κερίτη. Διαθέσιμο σε: <http://dias.library.tuc.gr/view/36892> (Ανακτήθηκε 02 Δεκεμβρίου, 2015).
- Ευστρατιάδης, Α. (2008). Μη γραμμικές μέθοδοι σε πολυκριτηριακά προβλήματα βελτιστοποίησης υδατικών πόρων, με έμφαση στη βαθμονόμηση υδρολογικών μοντέλων. Αθήνα: Διδακτορική διατριβή, Τομέας Υδατικών Πόρων, ΕΜΠ.
- Ζωγόπουλος, Ε. (2012). Υδρολογική μελέτη της λεκάνης απορροής του Ευρώτα ποταμού, με τη χρήση του μοντέλου MIKE SHE. Διαθέσιμο σε: <http://dione.lib.unipi.gr/xmlui/handle/unipi/5612> (Ανακτήθηκε 02 Δεκεμβρίου, 2015).
- Θεοδώρου, Γ., Θεοδώρου, Ν. (2007). Πρακτικός Οδηγός στο Matlab. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης. Διαθέσιμο σε: http://users.auth.gr/~theodoru/CompuStat/MATLAB_AUTH.pdf (Ανακτήθηκε 03, Δεκεμβρίου, 2015).
- Καρύμπαλης, Ε., Κατσαφάδος, Π., Καλογερόπουλος, Κ., Καραλής, Σ., Χαλκιάς, Χ., (2014). Εκτίμηση πλημμυρικού κινδύνου σε μικρές χειμαρρικές λεκάνες

στο Καρύμπαλης Ε, Παπαδόπουλος Α., Χαλκιάς Χ., (επιμ.) Η Γεωγραφία του Παράκτιου και Νησιωτικού Χώρου. Αθήνα: Εκδόσεις Σταμούλη.

- Κοδοσάκη, Δ. (1992). Διαχείριση φυσικών πόρων και ενέργειας. Πειραιάς: Εκδόσεις Σταμούλη.
- Κούσης, Α. Δ. (2015). Διδακτικές Σημειώσεις Υδρολογίας. Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου: Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Γεωπληροφορικής.
- Κουτσογιάννης, Δ. Α., Ανδρεαδάκης, Ρ., Μαυροδήμου, Α., Χριστοφίδης, Ν., Μαμάσης, Α., Ευστρατιάδης, Α., Κουκουβίνος, Γ., Καραβοκυρός, Σ., Κοζάνης, Δ., Μαμάης και Νουτσόπουλος, Κ. (2008). Εθνικό Πρόγραμμα Διαχείρισης και Προστασίας των Υδατικών Πόρων, Υποστήριξη της κατάρτισης Εθνικού Προγράμματος Διαχείρισης και Προστασίας των Υδατικών Πόρων. Αθήνα: Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Λουκάς, Α. και Βασιλειάδης, Λ. (2004). Υπόδειγμα Διαστασολόγησης Ταμιευτήρα, Υδρολογική Μελέτη: Κατασκευή Φράγματος Βασιλειάδας-Μελισσοτόπου.
- Μαμάσης, Ν., Μαντούδη, Κ., Κουτσογιάννης, Δ. (2004). Μοντέλο Ισοζυγίου Υδρολογικής Λεκάνης με Χρήση Συστήματος Γεωγραφικής Πληροφορίας. Τεχν. Χρον. Επιστ. Έκδ. ΤΕΕ, Ι, τεύχος 1. Διαθέσιμο σε: <http://www.srcosmos.gr/srcosmos/showpub.aspx?aa=6855> (Ανακτήθηκε 06, Φεβρουαρίου, 2016).
- Μαμάσης, Ν. (2007). Πλημμύρες και αντιπλημμυρικά έργα, Διαχείριση πλημμυρικού κινδύνου. Αθήνα: Πανεπιστημιακές σημειώσεις, Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, ΕΜΠ.
- Μαμάσης, Ν. (2009). Πλημμύρες και εκτίμηση πλημμυρικών παροχών. Υδρομετεωρολογία. Αθήνα: Πανεπιστημιακές σημειώσεις, Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, ΕΜΠ.
- Μαμάσης, Ν. (2009). Υδρογραφήματα-Διόδευση. Υδρομετεωρολογία. Αθήνα: Πανεπιστημιακές σημειώσεις, Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, ΕΜΠ.
- Μαμάσης Ν., (2011). Εκτίμηση πλημμυρικών παροχών. Τυπικά Συστήματα Υδατικών Πόρων. Αθήνα: Πανεπιστημιακές σημειώσεις, Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, ΕΜΠ.

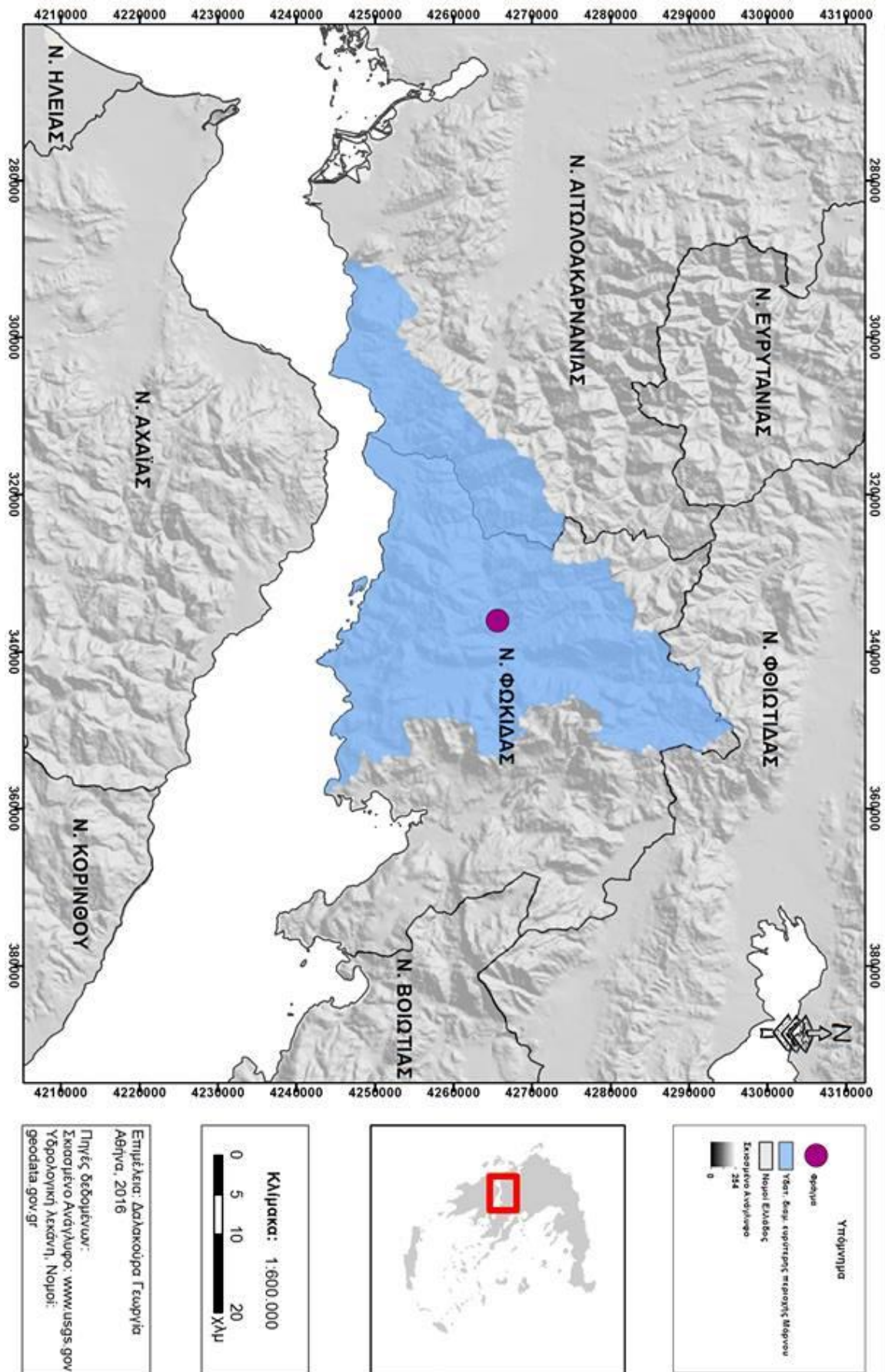
- Μαμάσης Ν., (2011). Εισαγωγή στην Υδρολογία. Αθήνα: Πανεπιστημιακές σημειώσεις, ΕΜΠ.
- Μήτρακας, Μ. (2001). Ποιοτικά χαρακτηριστικά και επεξεργασία νερού. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα.
- Μιμίκου, Μ. Α. και Μπαλάς, Ε. Α. (2006). Τεχνική Υδρολογία. Αθήνα: Εκδόσεις Παπασωτηρίου.
- Perlman, H., Μακρόπουλος, Χ., Κουτσογιάννης, Δ. (2005). Ο υδρολογικός κύκλος. Γεωλογική Υπηρεσία ΗΠΑ (United States Geological Survey).

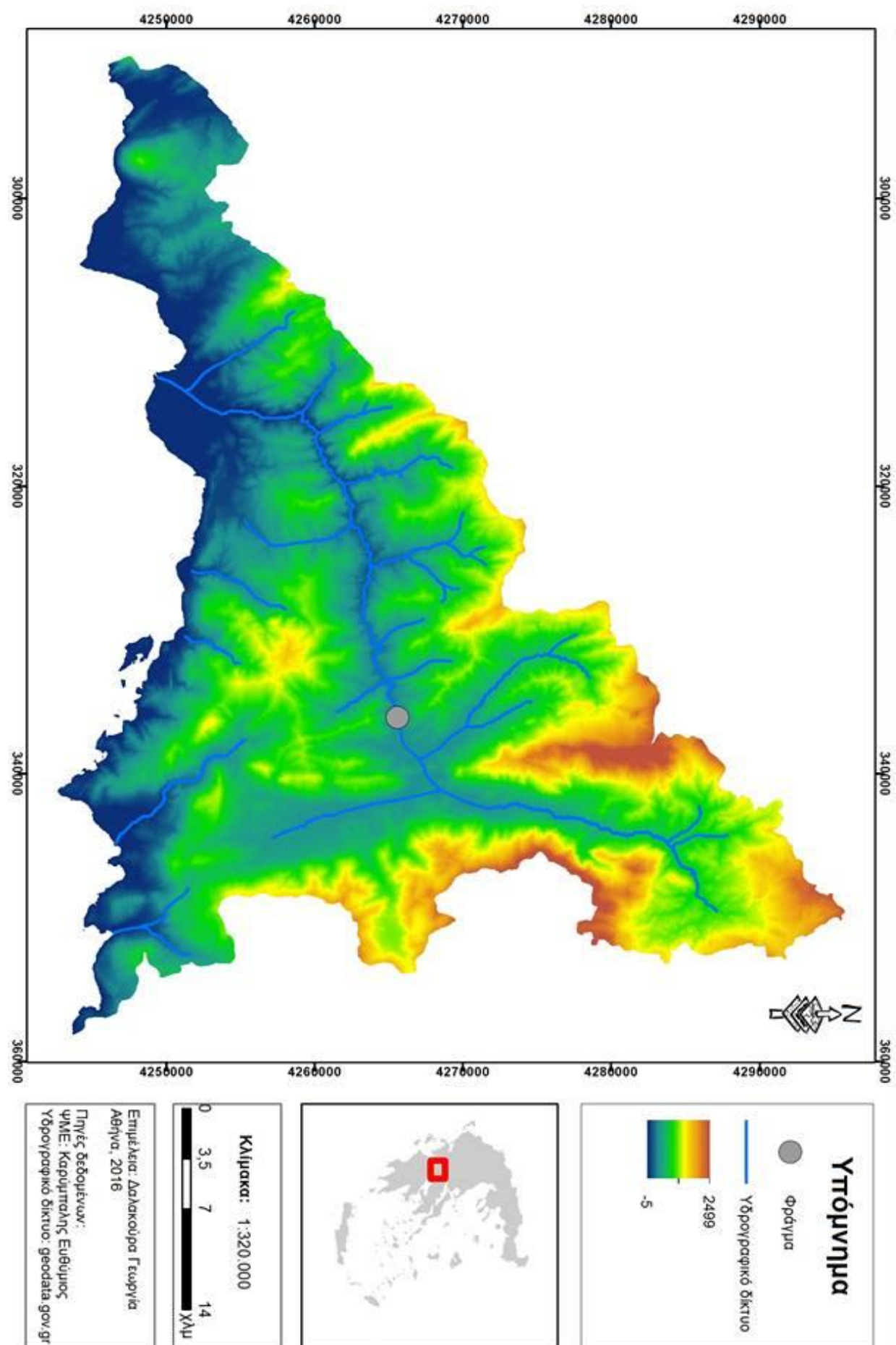
ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ

- <http://www.mathworks.com>
- geodata.gov.gr

Παράρτημα

Ευρύτερη Περιοχή Μελέτης





Μετεωρολογικοί Σταθμοί Μετρήσεων

