

ΠΑΡΑΔΟΤΕΟ ΠΕ3
Υπολογισμός του υδρολογικού
ισοζυγίου του ταμιευτήρα
Μόρνου και πρόγνωση ακραίων
επεισοδίων βροχής

ΕΡΓΟ:
«Λεπτομερής αποτύπωση κατακρημνισμάτων,
εκτίμηση του υδρολογικού ισοζυγίου στον
ταμιευτήρα του Μόρνου και πρόγνωση ακραίων
επεισοδίων βροχής»

ΑΝΑΔΟΧΟΣ:
ΕΘΝΙΚΟ ΑΣΤΕΡΟΣΚΟΠΕΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

ΥΠΕΡΓΟΛΑΒΟΙ:
ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΚΕΝΤΡΟ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΕΡΕΥΝΩΝ
ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2013

ΤΙΤΛΟΣ ΕΡΓΟΥ: Λεπτομερής αποτύπωση κατακρημνισμάτων, εκτίμηση του υδρολογικού ισοζυγίου στον ταμιευτήρα του Μόρνου και πρόγνωση ακραίων επεισοδίων βροχής.

Ανάδοχος:

Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών,
Ινστιτούτο Ερευνών Περιβάλλοντος και Βιώσιμης Ανάπτυξης,
Λόφος Κουφού, Π. Πεντέλη, 15236

Διάρκεια έργου: 18 μήνες

ΣΚΟΠΟΣ

Ο σκοπός του προτεινόμενου έργου είναι η καταγραφή και αποτύπωση των μετεωρολογικών παραμέτρων στην περιοχή των ταμιευτήρων της ΕΥΔΑΠ καθώς και η δημιουργία εφαρμογής εκτίμησης του υδρολογικού ισοζυγίου της λεκάνης ανάντη του φράγματος του ταμιευτήρα του Μόρνου. Η ολοκληρωμένη υδρολογική διερεύνηση της περιοχής θα επιτρέψει την εκτίμηση και παρακολούθηση των διαρροών του ταμιευτήρα του Μόρνου.

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Το προτεινόμενο έργο θα αποτελείται από τρία Πακέτα Εργασίας:

- ΠΕ1. Σχεδιασμός και ανάπτυξη δικτύου υδρομετεωρολογικών παρατηρήσεων**
ΠΕ1.1 Σχεδιασμός και ανάπτυξη δικτύου μετεωρολογικών σταθμών (σε συνεργασία με τους ήδη υπάρχοντες)
ΠΕ1.2 Σχεδιασμός και εγκατάσταση υδρομετρικών σταθμών - σταθμημέτρων
- ΠΕ2. Συλλογή, επεξεργασία και ανάλυση μετεωρολογικών και υδρομετρικών παρατηρήσεων**
ΠΕ2.1 Χωροχρονική απεικόνιση πεδίου βροχόπτωσης.
ΠΕ2.2 Σύστημα εκτίμησης ύψους και ισοδύναμου ύψους νερού χιονοκάλυψης
ΠΕ2.3 Χωροχρονική απεικόνιση της στάθμης νερού
- ΠΕ3. Υπολογισμός του υδρολογικού ισοζυγίου του ταμιευτήρα του Μόρνου καθώς και πρόγνωση ακραίων επεισοδίων βροχής**

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή – Συνοπτική Περιγραφή Παραδοτέου ΠΕ3	4
1.1 Εισαγωγή – Περιγραφή Παραδοτέου Π.Ε. 3	4
1.2 Διάρθρωση Ενοτήτων Παραδοτέου Π.Ε. 3.....	6
Κεφάλαιο 2: Περιγραφή Φυσικών Χαρακτηριστικών Υδρολογικής Λεκάνης Ταμιευτήρα Μόρνου και Ανάλυση Πρωτογενών Δεδομένων/Μετρήσεων	7
2.1 Φυσικά χαρακτηριστικά Υδρολογικής Λεκάνης Μόρνου	7
2.2 Ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα	9
2.2.1 Βροχόπτωση –Χωρική Ανάλυση.....	9
2.2.2 Χιόνι – Χιονοκάλυψη εκφρασμένη σε Ισοδύναμο Ύψος Υετού (ΙΥΥΧ).....	12
2.3 Δεδομένα Στάθμης – Μετρήσεις Πεδίου	13
2.3.1 Υπολογισμός καμπυλών Στάθμης – Παροχής	17
Κεφάλαιο 3: Περιγραφή Βιβλιοθήκης Υδρολογικών Μοντέλων – Αποτελέσματα Εφαρμογής	24
Κεφάλαιο 4: Περιγραφή Υδατικού Ισοζυγίου Ταμιευτήρα Μόρνου – Αποτελέσματα Εφαρμογής	26
Κεφάλαιο 5: Πρόγνωση ακραίων επεισοδίων βροχής	31
Κεφάλαιο 6: Σύνοψη – Συμπεράσματα σχετικά με το Υδατικό Ισοζύγιο Ταμιευτήρα Μόρνου	33
Βιβλιογραφία	36
Παράρτημα Α: Αναλυτικά Στοιχεία Υπολεκανών Ταμιευτήρα Μόρνου	40
Παράρτημα Β: Μεθοδολογία Υδρολογικών Μοντέλων.....	41
Παράρτημα Γ: Βιβλιοθήκη Υδρολογικών Μοντέλων	50
Παράρτημα Δ: Σύνοψη περιγραφή των μετεωρολογικών μοντέλων και διαμόρφωση της επιχειρησιακής τους λειτουργίας	54
Δ.1 Το σύστημα πρόγνωσης καιρού του ΕΑΑ	54
Δ.2 Το σύστημα πρόγνωσης καιρού ΠΟΣΕΙΔΩΝ	56
Δ.3 Το σύστημα πρόγνωσης καιρού του ΧΠΑ	58
Παράρτημα Ε: Δείγμα πρόγνωσης από τα τρία συστήματα πρόγνωσης καιρού	62

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή – Συνοπτική Περιγραφή Παραδοτέου ΠΕ3

1.1 Εισαγωγή – Περιγραφή Παραδοτέου Π.Ε. 3

Αντικείμενο του Παραδοτέου 3 (Π.Ε.3) αποτελεί (α) η ανάπτυξη εργαλείων υπολογισμού του Υδατικού Ισοζυγίου (ΥΙ) του Ταμιευτήρα Μόρνου και (β) η πρόγνωση ακραίων επεισοδίων βροχής.

Για την προσομοίωση του Υδατικού Ισοζυγίου του ταμιευτήρα λαμβάνονται υπόψη και υπολογίζονται οι βασικές συνιστώσες (υδρολογικές εισροές, χρήσεις νερού και απώλειες). Η μαθηματική έκφραση του ισοζυγίου δίνεται από την γενική εξίσωση (1):

$$\text{Εισροές} - \text{Εκροές} = \text{Μεταβολή Αποθέματος} \quad (1)$$

Η εξίσωση (1) ανάγεται για την Υδρολογική Λεκάνη του Μόρνου στην εξίσωση (2):

$$\begin{aligned} & \text{Βροχόπτωση Ελεύθερης Επιφάνειας Ταμιευτήρα} + \text{Επιφανειακή Απορροή} \\ & + \text{Εισροή Εύηνου} - \text{Συνολικές Απώλειες} \\ & - \text{Εξατμίσση Ελεύθερης Επιφάνειας Ταμιευτήρα} \\ & - \text{Εκροές προς Αθήνα} = \text{Μεταβολή Αποθέματος} \quad (2) \end{aligned}$$

Μεταβλητές εξόδου είναι οι χρονοσειρές του υδατικού ισοζυγίου (στάθμη, αποθήκευση, απώλειες, υπερχειλίσεις, εκροές). Για τον ορθό προσδιορισμό των υδρολογικών εισροών στα πλαίσια του έργου εγκαταστάθηκαν:

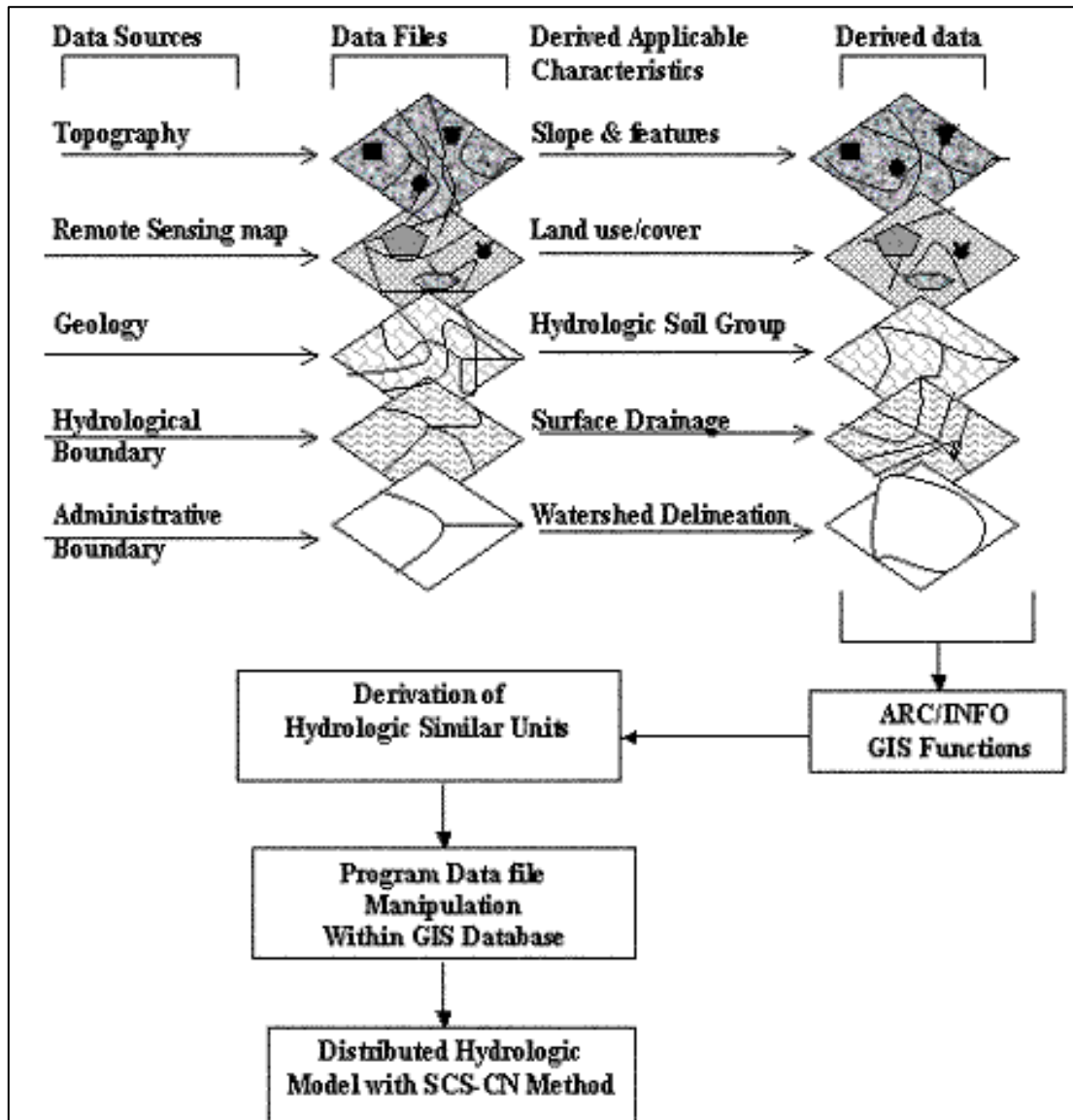
- τέσσερις (4) αυτόματοι μετεωρολογικοί σταθμοί
- δύο (2) αυτόματοι σταθμοί μέτρησης πάχους στρώματος χιονιού
- δυο (2) όργανα μέτρησης στάθμης του νερού των ποταμών της λεκάνης για τον υπολογισμό της αντίστοιχης παροχής.

Συγκεκριμένα στις θέσεις Φράγμα Μόρνου, Διακόπι, Κονιάκο και Πενταγιόι εγκαταστάθηκαν οι 4 μετεωρολογικοί σταθμοί και χρησιμοποιήθηκαν παράλληλα με τους ήδη εγκαταστημένους μετεωρολογικούς σταθμούς του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών στην ευρύτερη περιοχή. Το σύνολο των σταθμών (νέοι και παλιοί) αξιοποιήθηκαν για την σημειακή ολοκλήρωση των μετεωρολογικών δεδομένων με σκοπό την χωρική ανάλυση των μετεωρολογικών μεταβλητών (βλ. Παραδοτέα Π.Ε.1 και Π.Ε.2).

Για την εκτίμηση της **Επιφανειακής Απορροής** εγκαταστάθηκαν δυο (2) όργανα μέτρησης στάθμης στις θέσεις α) γέφυρα Κόκκινος και β) γέφυρα Λευκαδίτης σε συνδυασμό με τον ήδη εγκατεστημένο σταθμό της ΕΥΔΑΠ (βλ. Ενότητα 2.3).

Σημαντική συνεισφορά στην **Επιφανειακή Απορροή** της ΥΛ του Ταμιευτήρα Μόρνου αποτελεί το **Ισοδύναμο Ύψος Υετού Χιονοκάλυψης** (ΙΥΥΧ) κατά τους ανοιξιάτικους μήνες καθώς οι χιονοπτώσεις είναι σύνηθες φαινόμενο στην περιοχή. Για το λόγο αυτό, εγκαταστάθηκαν δυο (2) αυτόματοι σταθμοί μέτρησης πάχους στρώματος χιονιού στις

θέσεις Αθανάσιος Διάκος και Μαυρολιθάρη-Βρύζες (βλ. Παραδοτέο Π.Ε.1 και Π.Ε.2). Τα δεδομένα των σταθμών επεξεργάστηκαν και υπολογίστηκε μέσω μαθηματικού μοντέλου η συνολική συνεισφορά της χιονοκάλυψης στην Επιφανειακή Απορροή.



Εικόνα 1: Το διάγραμμα ροής του μοντέλου βροχής-απορροής.

Τα επεξεργασμένα δεδομένα (Βροχόπτωση, Χιονοκάλυψη, Παροχές) χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία μιας κατάλληλης Βιβλιοθήκης Υδρολογικών Μοντέλων για τον υπολογισμό της συνολικής **Επιφανειακής Απορροής** της εξίσωσης (2). Τα ημικατανεμημένα Υδρολογικά Μοντέλα που επιλέχθηκαν (ομοίωμα βροχής - απορροής) στηρίζονται στην μέθοδο SCS-CN (Soil Conservation Service Curve Number) για τον υπολογισμό του μοναδιαίου υδρογραφήματος (Unit Hydrograph). Ως δεδομένα εισόδου δέχονται τη συνολική συνεισφορά των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων (Βροχόπτωση & Ισοδύναμο Χιονοκάλυψης) και υπολογίζουν την επιφανειακή απορροή σε ημερήσιο βήμα και

χρησιμοποιούν όλα τα ψηφιακά δεδομένα της λεκάνης απορροής. Η γενική δομή των μοντέλων παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.

Για την πρόγνωση ακραίων επεισοδίων βροχής εφαρμόζονται τα δεδομένα εκτίμησης βροχόπτωσης που παρέχονται καθημερινά από τα επιχειρησιακά μοντέλα πρόγνωσης καιρού του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (ΕΑΑ), του Χαροκόπειου Πανεπιστημίου Αθηνών (ΧΠΑ) και του συστήματος POSEIDON από το Ελληνικό Κέντρο Θαλάσσιων Ερευνών (ΕΛΚΕΘΕ). Με βάση τις εκτιμήσεις των τριών προγνωστικών συστημάτων παρέχεται ειδοποίηση για πιθανότητα ισχυρών βροχοπτώσεων τα οποία μπορούν να προκαλέσουν πλημμυρικά επεισόδια στη λεκάνη του Μόρνου.

1.2 Διάρθρωση Ενοτήτων Παραδοτέου Π.Ε. 3

Στο Κεφάλαιο 2: Περιγραφή Φυσικών Χαρακτηριστικών Υδρολογικής Λεκάνης Ταμιευτήρα Μόρνου και Ανάλυση Πρωτογενών Δεδομένων/Μετρήσεων, παρουσιάζονται τα υδρομορφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης και η ανάλυση των δεδομένων βροχόπτωσης, χιονοκάλυψης, στάθμης. Τέλος περιγράφεται η διαδικασία για την κατάρτιση των καμπυλών Στάθμης-Παροχής και η μετατροπή της στάθμης των ποταμών σε παροχή.

Στο Κεφάλαιο 3: Περιγραφή Βιβλιοθήκης Υδρολογικών Μοντέλων – Αποτελέσματα Εφαρμογής, παρουσιάζονται συνοπτικά οι δομές των μοντέλων της Βιβλιοθήκης Υδρολογικών Μοντέλων και τα αποτελέσματα από την εφαρμογή τους στην Υδρολογική Λεκάνη Ταμιευτήρα Μόρνου.

Στο Κεφάλαιο 4: Περιγραφή Υδατικού Ισοζυγίου Ταμιευτήρα Μόρνου – Αποτελέσματα Εφαρμογής, παρουσιάζεται το Υδατικό Ισοζύγιο του Ταμιευτήρα Μόρνου καθώς επίσης και τα αποτελέσματα μετά τον υπολογισμό της Επιφανειακής Απορροής μέσω του Υδρολογικού Μοντέλου.

Στο Κεφάλαιο 6: Πρόγνωση ακραίων επεισοδίων βροχής, παρουσιάζεται η μεθοδολογία για την πρόγνωση ακραίων επεισοδίων βροχής.

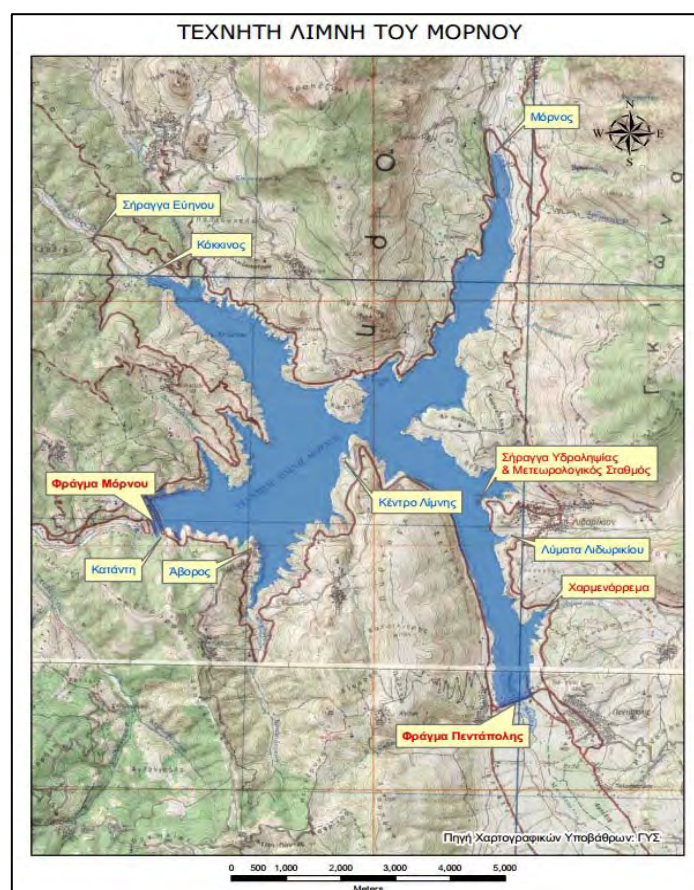
Στο Κεφάλαιο 5: Σύνοψη-Συμπεράσματα σχετικά με το Υδατικό Ισοζύγιο Ταμιευτήρα Μόρνου, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της μελέτης και συνοψίζονται τα προβλήματα που διαπιστώθηκαν και δίνονται προτάσεις για το μέλλον.

Επίσης στο Παραδοτέο περιλαμβάνονται και 5 Παραρτήματα στα οποία παρατίθενται αναλυτικά οι πίνακες με τα μορφολογικά χαρακτηριστικά των υπολεκανών (Παράρτημα Α), οι δομές των μοντέλων της Υδρολογικής Βιβλιοθήκης, οι εξισώσεις που αναπτύχθηκαν και η ανάλυση παραμέτρων μοντέλου (Παράρτημα Β, Γ), λεπτομέρειες σχετικά με τα μετεωρολογικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται στη διαδικασία της πρόγνωσης (Παράρτημα Δ) και παραδείγματα των δεδομένων από τα τρία συστήματα πρόγνωσης καιρού που χρησιμοποιούνται στην εφαρμογή (Παράρτημα Ε).

Κεφάλαιο 2: Περιγραφή Φυσικών Χαρακτηριστικών Υδρολογικής Λεκάνης Ταμιευτήρα Μόρνου και Ανάλυση Πρωτογενών Δεδομένων/Μετρήσεων

2.1 Φυσικά χαρακτηριστικά Υδρολογικής Λεκάνης Μόρνου

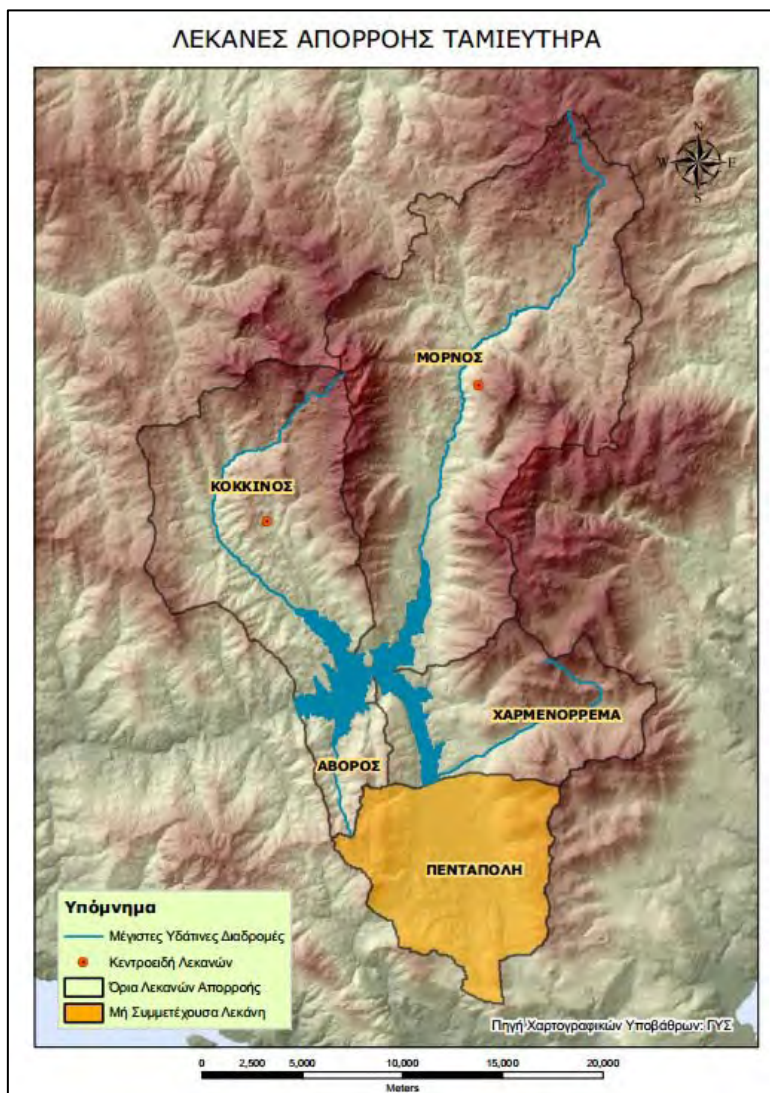
Η λεκάνη απορροής του ταμιευτήρα Μόρνου ανήκει στο Υδατικό Διαμέρισμα της Δυτικής Στερεάς Ελλάδας (04), στο Νομό Φωκίδας μεταξύ Βαρδουσίων, Οίτης, Γκίνας, και αποτελεί μια από τρεις κύριες υδρολογικές λεκάνες του Υδατικού Διαμερίσματος (GR 0421L000000003H - <http://wfd.opengov.gr/> -Εικόνα 2).



Εικόνα 2: Περιοχή Μελέτης- Τεχνική Λίμνη Ταμιευτήρα Μόρνου

Η ευρύτερη περιοχή είναι χωρισμένη σε 30 δημοτικά διαμερίσματα με τον πληθυσμό να κυμαίνεται από 3500 κατοίκους το χειμώνα έως 13500 κατοίκους το καλοκαίρι. Ο ταμιευτήρας του Μόρνου κατασκευάστηκε το 1979 (μέγιστη χωρητικότητα 800 hm³) με σκοπό την εξασφάλιση περίπου 300 hm³ ετησίως για την ύδρευση της Αθήνας. Η έκταση

της λεκάνης καταλαμβάνει 583.5 km² ανάντη του φράγματος και 390.7 km² κατόντη (εκβολές). Στο παρόν πακέτο εργασίας η εκτίμηση του υδρολογικού ισοζυγίου περιλαμβάνει την ανάντη του φράγματος λεκάνη απορροής και αναφέρεται ως εξής, υδρολογική λεκάνη (ΥΛ) Ταμιευτήρα Μόρνου (Εικόνα 2 & Εικόνα 3).



Εικόνα 3: Υπολεκάνες της Υδρολογικής Λεκάνης Ταμιευτήρα Μόρνου

Η ΥΛ Ταμιευτήρα Μόρνου είναι επιμήκης με μέσο υψόμετρο 1082 m (οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 443 και 2489 μέτρων). Το μέσο ετήσιο ύψος υετού για τη λεκάνη ανέρχεται στα 950 mm ενώ κατά την περίοδο προσομοίωσης των υδρολογικών μοντέλων 01/01/2012 έως 31/12/2012, καταγράφηκαν 1182 mm βροχής. (μέσος όρος βροχόμετρων) Η ετήσια βροχόπτωση στο Διακόπι για το 2012 είναι 1221 mm, για τον Κονιάκο 1174 mm, για το Φράγμα 826 mm, για το Μαυρολιθάρι 1316 mm (ο σταθμός στη θέση Πενταγιό εγκαταστάθηκε το Μάρτιο του 2012 και κατέγραψε 946 mm κατά τους 10 μήνες λειτουργίας του).

Τα μεγαλύτερα υψόμετρα της ΥΛ Ταμιευτήρα Μόρνου κατά τους χειμερινούς μήνες δέχονται σημαντικά ποσά χιονιού. Μέχρι πρότινος το ισοδύναμο σε ύψος υετού δεν μπορούσε να υπολογιστεί και να συμπεριληφθεί στις εισροές της ΥΛ Ταμιευτήρα Μόρνου. Με την εγκατάσταση δυο χιονομέτρων (τα στοιχεία για τα δεδομένα που συλλέχθηκαν παρατίθενται αναλυτικά στην Ενότητα 2.2.2) στα πλαίσια του έργου έγινε εκτίμηση της χιονοκάλυψης εκφρασμένης σε ισοδύναμο ύψος υετού μέσω μαθηματικού μοντέλου.

Στην Εικόνα 3 παρουσιάζεται η υποδιαίρεση της Υδρολογικής Λεκάνης Ταμιευτήρα Μόρνου σε τέσσερις υπολεκάνες: του Μόρνου, του Κόκκινου, του Χαρμενορέμματος και του Αβορού.

Η κατανομή των υπολεκανών επί της συνολικής επιφάνειας της ΥΛ του Ταμιευτήρα Μόρνου είναι: 53% υπολεκάνη Μόρνου, 27 % υπολεκάνη Κόκκινου, 16% υπολεκάνη Χαρμενορέμματος, 4% υπολεκάνη Αβορού.

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.

2.2 Ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα

2.2.1 Βροχόπτωση –Χωρική Ανάλυση

Το Δεκέμβριο του 2011, στα πλαίσια της πρώτης φάσης του έργου, όπως περιγράφεται στο Πακέτο Εργασίας 1, το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών εγκατέστησε 4 αυτόματους μετεωρολογικούς σταθμούς: (α) στο φράγμα του Μόρνου, (β) στο Διακόπι, (γ) στον Κονιάκο και (δ) στους Πενταγιούς (Εικόνα 4). Παράλληλα αξιοποιούνται τα δεδομένα από τον σταθμό του Μαυρολιθαρίου που ανήκει στο δίκτυο των σταθμών που διαχειρίζεται το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών (ΕΑΑ) (Πίνακας 1).

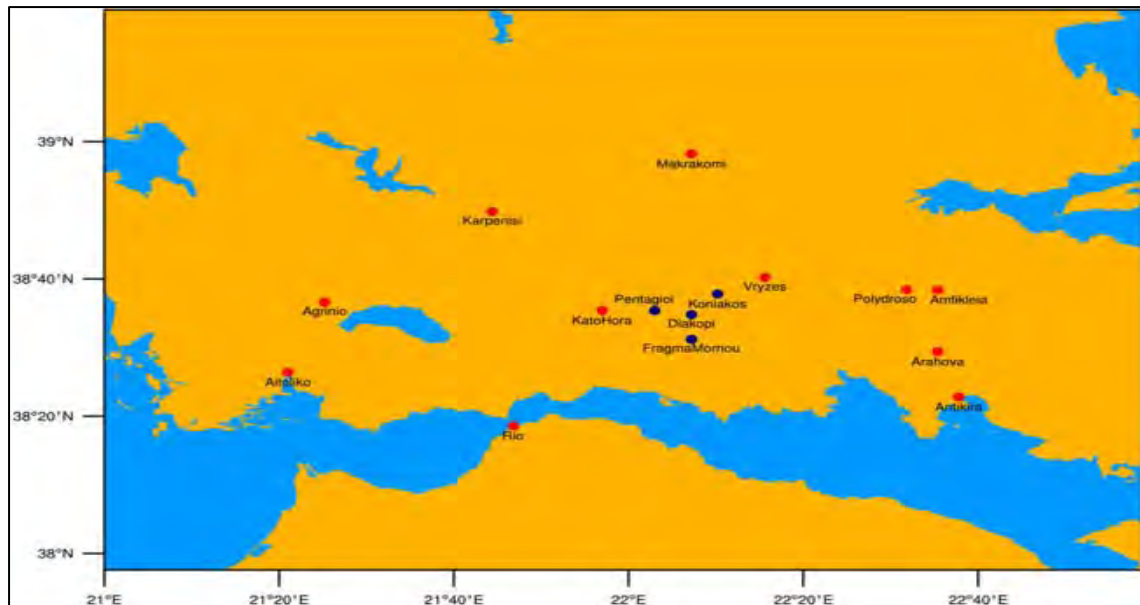
Πίνακας 1: Περιγραφικά στοιχεία μετεωρολογικών σταθμών που εγκαταστάθηκαν κατά τη διάρκεια του έργου

A/A	Θέση	Ημερομηνία Έναρξης Δεδομένων	Ιστοσελίδα Σταθμών
1	Φράγμα Μόρνου	29/11/11	www.meteo.gr/stations/mornos1
2	Διακόπι	30/11/11	www.meteo.gr/stations/mornos2
3	Κονιάκος	01/12/11	www.meteo.gr/stations/mornos3
4	Πενταγιοί	09/03/12	www.meteo.gr/stations/mornos4

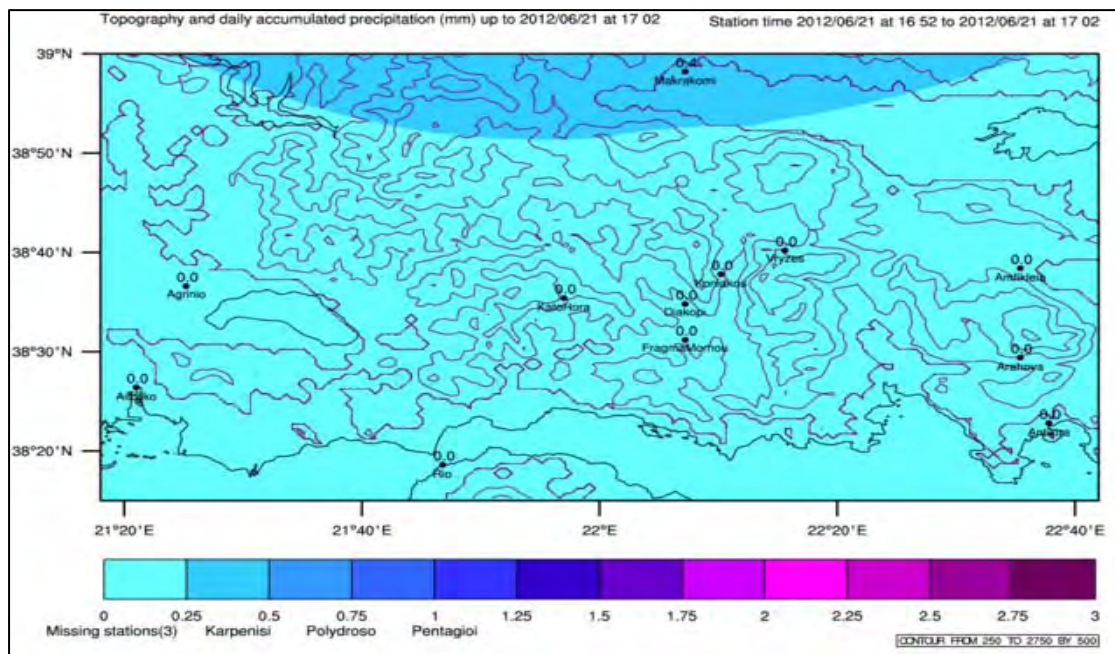


Εικόνα 4: Θέσεις Μετεωρολογικών Σταθμών πλησίον της ΥΛ Ταμιευτήρα Μόρνου (εγκατάσταση κατά την διάρκεια του Παραδοτέου 1 - <http://www.meteo.gr/meteomornos/>)

Στην ευρύτερη περιοχή, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 5, υπάρχουν επιπλέον σταθμοί που διαχειρίζεται το ΕΕΑ γεγονός που επέτρεψε την δημιουργία χαρτών απεικόνισης του πεδίου βροχόπτωσης χρησιμοποιώντας μεθόδους παρεμβολής (Εικόνα 6). Αναλυτική περιγραφή των μεθόδων παρεμβολής που χρησιμοποιήθηκαν αναφέρεται στο Παραδοτέο 2, χάρτες σε πραγματικό χρόνο παρατίθενται στην ιστοσελίδα <http://www.meteo.gr/meteomornos/> και τα παραγόμενα αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκαν στο υπολογισμό τόσο της **Επιφανειακής Απορροής** της λεκάνης όσο και της **Βροχόπτωσης Ελεύθερης Επιφάνειας Ταμιευτήρα**.

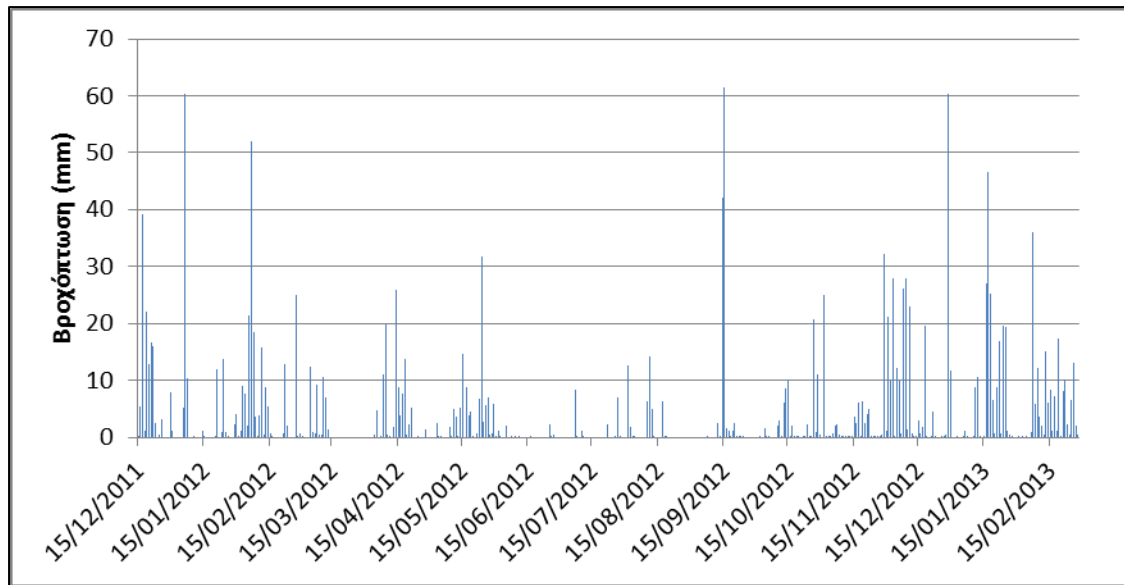


Εικόνα 5: Οι θέσεις των μετεωρολογικών σταθμών που εγκαταστάθηκαν στο πλαίσιο του έργου (μπλε σημεία) καθώς και των γειτονικών σταθμών του δικτύου του ΕΑΑ (κόκκινα σημεία) που αξιοποιήθηκαν στα πλαίσια του έργου.

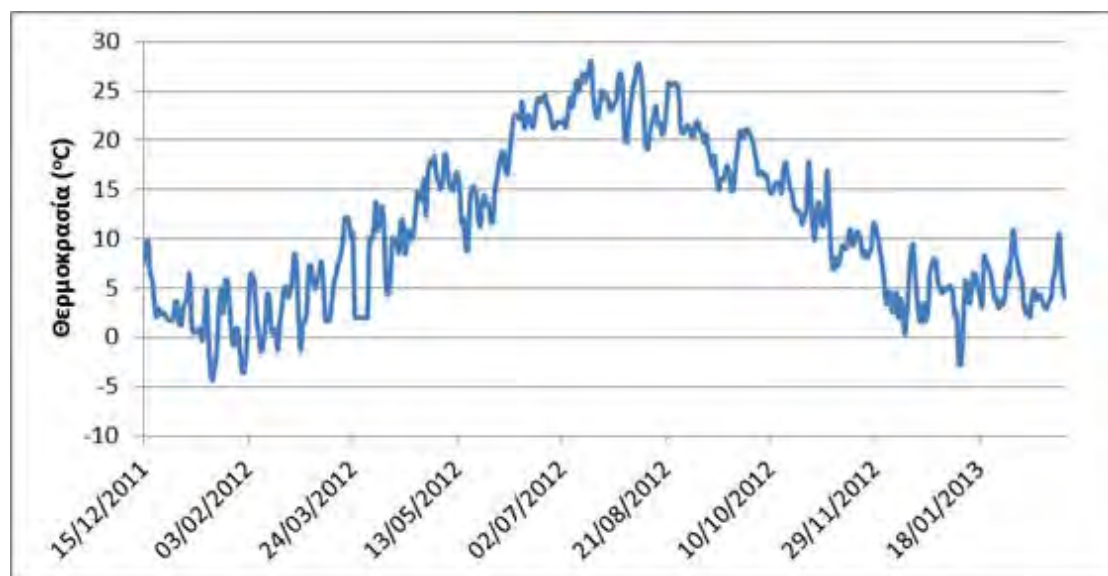


Εικόνα 6: Παράδειγμα χωρικής απεικόνισης της αθροιστικής βροχόπτωσης (mm) με τις ισοϋψείς της τοπογραφίας (m) όπως προκύπτει από τους μετεωρολογικούς σταθμούς που εγκαταστάθηκαν στο πλαίσιο του έργου και του υπάρχοντος δικτύου του ΕΑΑ.

Η χρονοσειρά της βροχόπτωσης και θερμοκρασίας που χρησιμοποιήθηκε για την περίοδο μελέτης του Παραδοτέου παρουσιάζεται στις παρακάτω εικόνες (Εικόνα 7 και Εικόνα 8).



Εικόνα 7: Βροχόπτωση επί του συνόλου της Υδρολογικής Λεκάνης Ταμειυτήρα Μόρνου (Ημερήσιο Βήμα: 15/12/2011 -28/02/2013)



Εικόνα 8: Θερμοκρασία της Υδρολογικής Λεκάνης Ταμειυτήρα Μόρνου (Ημερήσιο Βήμα: 15/12/2011-28/02/2013).

2.2.2 Χιόνι - Χιονοκάλυψη εκφρασμένη σε Ισοδύναμο Ύψος Υετού (ΙΥΥΧ)

Για τον υπολογισμό της χιονοκάλυψης και αναγωγή της σε Ισοδύναμο Ύψος Υετού (mm) εγκαταστάθηκαν δύο αυτόματοι σταθμοί μέτρησης πάχους στρώματος χιονιού στις θέσεις Αθανάσιος Διάκος και Μαυρολιθάρι-Βρύζες με δυνατότητα δεκάλεπτης καταγραφής (Εικόνα 9 - Πίνακας 2). Για την αξιοποίηση των δεδομένων χιονοκάλυψης ως μεταβλητή εισόδου στο Υδρολογικό Μοντέλο, αναπτύχθηκε διαδικασία εκτίμησης ύψους και αναγωγής του σε ισοδύναμο ύψους υετού με μαθηματικό μοντέλο το οποίο λαμβάνει

υπόψη την πραγματική μέτρηση του ύψους του στρώματος χιονιού και την εκτιμώμενη πυκνότητα του στρώματος του χιονιού. Η αναλυτική περιγραφή της μεθοδολογίας αναγωγής χιονοκάλυψης σε Ισοδύναμο Ύψος Υετού παρουσιάζεται στο Παραδοτέο 2, ενότητα ΠΕ2.2.

Πίνακας 2: Περιγραφικά στοιχεία χιονομέτρων που εγκαταστάθηκαν κατά τη διάρκεια του έργου (<http://www.meteo.gr/meteomornos/hydroStations.html>).

A/A	Θέση	Ημερομηνία Έναρξης Δεδομένων
1	Αθανάσιος Διάκος	14/12/2011
2	Μαυρολιθάρι-Βρύζες	14/12/2011 *

*Στην διάρκεια του έργου ο χιονομετρικός σταθμός στη θέση Μαυρολιθάρι εκλάπη και αντικαταστάθηκε από καινούργιο σε χαμηλότερο υψόμετρο δίπλα στον μετεωρολογικό σταθμό Μαυρολιθαρίου.



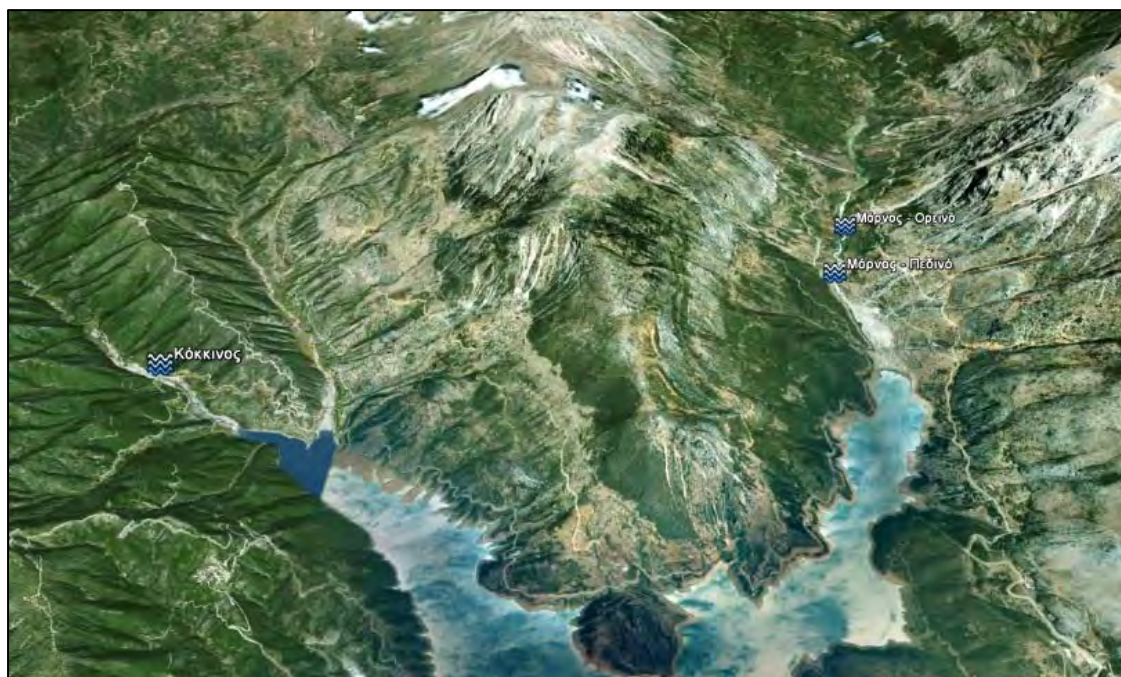
Εικόνα 9: Οι θέσεις των σταθμών μέτρησης πάχους στρώματος χιονιού που εγκαταστάθηκαν στο πλαίσιο του έργου.

2.3 Δεδομένα Στάθμης – Μετρήσεις Πεδίου

Στα πλαίσια του έργου, εγκαταστάθηκαν δύο (2) σταθμήμετρα (αναλυτικά οι προδιαγραφές των οργάνων στην ιστοσελίδα : <http://penteli.meteo.gr/meteomornos/hydroStations.html> και στο παραδοτέο Π.Ε.1). Η επιλογή των θέσεων εγκατάστασης έγινε βάση των

προδιαγραφών των οργάνων, την ευκολία πρόσβασης στο σημείο εγκατάστασης, των μορφολογικών χαρακτηριστικών της Υλ Ταμειυτήρα Μόρνου και της μορφολογίας της κοίτης των κεντρικών κλάδων των ποταμών των δυο κύριων υπολεκανών της Υλ Ταμειυτήρα Μόρνου. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι μετρήσεις στάθμης αντικατοπτρίζουν την πολυπλοκότητα των διαδικασιών ροής που λαμβάνουν χώρα στο σύνολο της λεκάνης ανάντη του σημείου μέτρησης.

Βάση των παραπάνω κριτηρίων, επιλέχθηκαν δυο γέφυρες στους ποταμούς Κόκκινος και Μόρνος κοντά στις εξόδους του υδροκρίτη των αντίστοιχων λεκανών. Στον ποταμό Μόρνο υπήρχε ήδη εγκατεστημένο σταθμήμετρο από την ΕΥΔΑΠ (διαθέσιμα δεδομένα από 12/12/2005 - πλησίον του χωριού Λευκαδίτη). Η θέση που επιλέχθηκε να εγκατασταθεί το δεύτερο σταθμήμετρο στην υπολεκάνη του Μόρνου είναι πλησίον του ταμειυτήρα (κατάντη του ήδη εγκατεστημένου σταθμήμετρου). Ο λόγος που εγκαταστάθηκε και δεύτερο σταθμήμετρο κατά το μήκος του διαρροούς του ποταμού Μόρνου είναι ότι μεταξύ των οργάνων παρατηρείται σημαντική μεταβολή της κοίτης και έντονη εναπόθεση φερτών υλικών δηλαδή το μεν πρώτο βρίσκεται στην έξοδο του ορεινού τμήματος της υπολεκάνης Μόρνος και το μεν δεύτερο στην είσοδο του πεδινού τμήματος της υπολεκάνης Μόρνος. Στο παρόν κείμενο, το προ-εγκατεστημένο σταθμήμετρο εφ' εξής αναφέρεται ως Μόρνος-Ορεινό και ο εγκατεστημένος κατά τη διάρκεια του έργου Μόρνος-Πεδινό (Εικόνα 10-Πίνακας 3).



Εικόνα 10: Θέσεις σταθμημέτρων Υδρολογικής Λεκάνης Ταμειυτήρα Μόρνου

Πίνακας 3: Περιγραφικά στοιχεία Σταθμημέτρων

A/A	Θέση	Ημερομηνία Έναρξης Καταγραφής Δεδομένων
1	Κόκκινος	15/12/2011
2	Μόρνος – Ορεινό (ΕΥΔΑΠ)	12/12/2005
3	Μόρνος- Πεδινό	15/12/2011

Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας των οργάνων προέκυψαν σημαντικά προβλήματα.

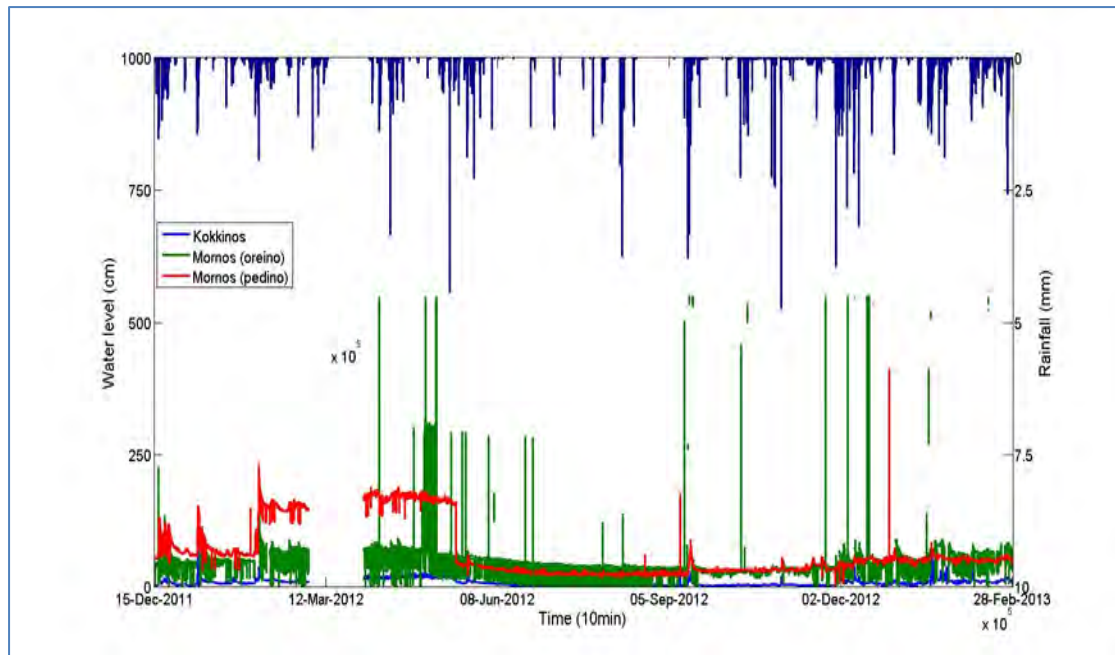
Συγκεκριμένα:

1. Η χρονοσειρά των δεδομένων του σταθμημέτρου Μόρνος-Ορεινό παρουσιάζει τιμές άνω των 2.5 μέτρων και ιδίως σε χρονικές περιόδους που δεν έχουν καταγραφεί σημαντικά γεγονότα βροχής.
2. Η χρονοσειρά των δεδομένων του σταθμημέτρου Μόρνος-Πεδινό παρουσιάζει σημαντικά προβλήματα μετά τις 6 Φεβρουαρίου 2012 με στάθμη περίπου στο 1.5 μέτρο, ενώ δεν υπάρχει απόκριση του σήματος στάθμης στο γεγονός βροχής της 16 Απριλίου 2012.
3. Οι χρονοσειρές των δεδομένων των σταθμημέτρων Μόρνος-Ορεινό και Μόρνος-Πεδινό παρουσιάζουν απότομες πτώσεις της τάξεως των 50 cm σε περίοδο 1-3 χρονικών βημάτων (10'-30').

Τα παραπάνω προβλήματα παρουσιάστηκαν τόσο στην επιτροπή παρακολούθησης του έργου της ΕΥΔΑΠ όσο και στην εταιρία που εγκατέστησε τα όργανα. Έγιναν ενέργειες για την ανάλυση των δεδομένων και την αξιοποίηση της πληροφορίας που εμπεριέχεται στα δεδομένα που έχουν καταγραφεί.

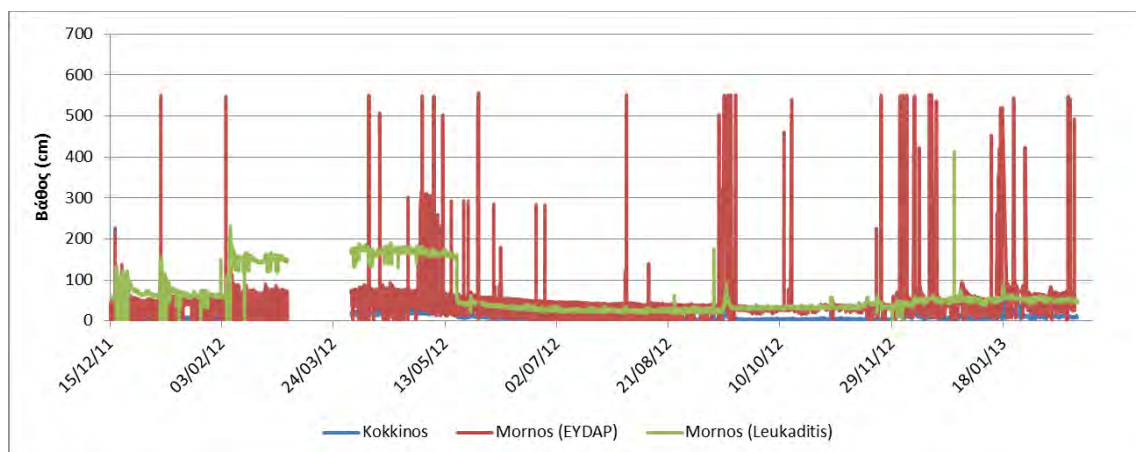
Η χρονοσειρά του σταθμημέτρου Κόκκινος παρουσιάζει πιο ρεαλιστική εικόνα (δεδομένου του ότι το σήμα ανταποκρίνεται στα γεγονότα βροχής) και με λιγότερο θόρυβο/σφάλμα. Βέβαια είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η κοίτη στην γέφυρα του Κόκκινου είναι **διαμορφωμένη**, ενώ σφάλμα μπορεί να υπάρχει στα δεδομένα που αφορούν τα άλλα δυο σημεία όπου η κοίτη δεν είναι διαμορφωμένη.

Στην Εικόνα 11 παρουσιάζονται τα δεδομένα στάθμης των τριών σταθμών (Κόκκινος, Μόρνος-Ορεινό, Μόρνος-Πεδινό) κατόπιν ποιοτικού ελέγχου και σχετικών διορθώσεων βάση της θερμοκρασίας όπως περιγράφεται στις προδιαγραφές του συγκεκριμένου τύπου οργάνων (<http://www.meteo.gr/metemornos/hydroStations.html>).

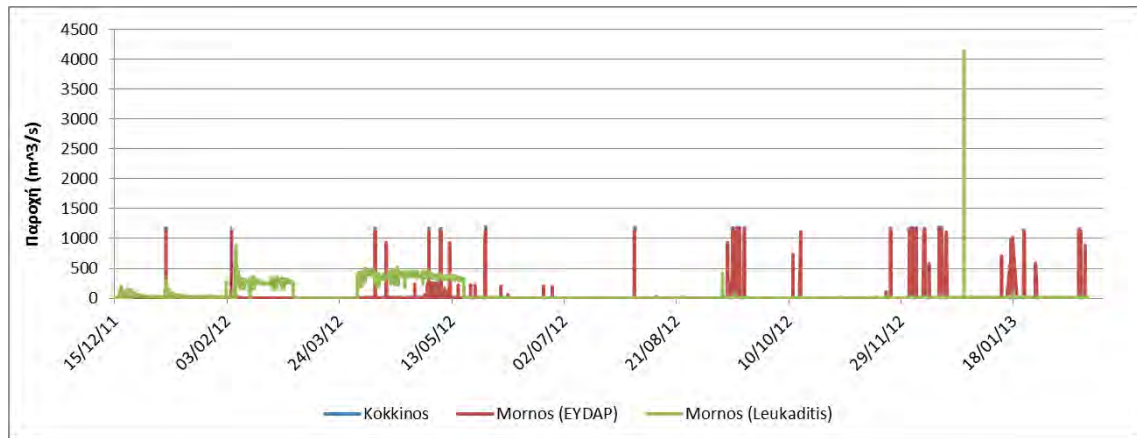


Εικόνα 11: Χρονοσειρές στάθμης νερού στους ποταμούς Κόκκινος και Μόρνος και η αντίστοιχη χρονοσειρά βροχόπτωσης από το σταθμό του Μόρνου για την περίοδο 14/12/2011 -28/02/2013

Στις εικόνες 12 & 13 παρουσιάζονται τα βάθη και οι παροχές υπολογισμένα από τις στάθμες των τριών σταθμών και από την διαστασιολόγηση της κοίτης στις θέσεις των σταθμημέτρων.



Εικόνα 12: Χρονοσειρές βάθους στους ποταμούς Κόκκινος και Μόρνος για την περίοδο 15/12/2011 -28/02/2013



Εικόνα 13: Χρονοσειρές Παροχής στους ποταμούς Κόκκινος και Μόρνος για την περίοδο 15/12/2011 -28/02/2013

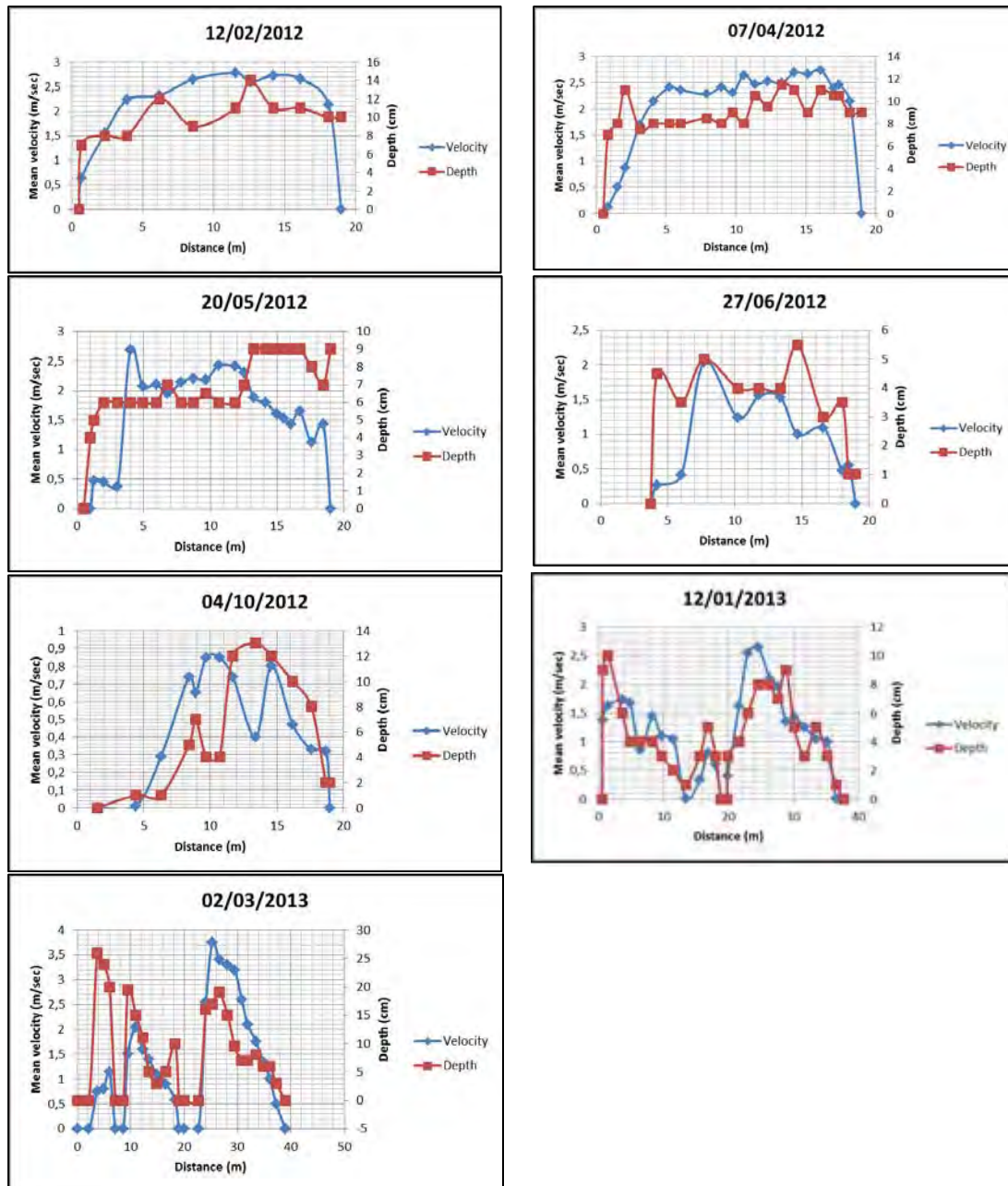
2.3.1 Υπολογισμός καμπυλών Στάθμης – Παροχής

Στη διάρκεια του έργου πραγματοποιήθηκαν συνολικά 7 επισκέψεις στο διάστημα μεταξύ 2/12/2012 με 02/03/2013 (Πίνακας 4) με στόχο την κατάρτιση των χαρακτηριστικών καμπυλών στάθμης-παροχής στα τρία σημεία όπου καταγράφεται η στάθμη (Κόκκινος, Μόρνος-Ορεινό και Μόρνος-Πεδινό). Στις θέσεις που έχουν εγκατασταθεί τα όργανα μέτρησης στάθμης πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ταχύτητας και βάθους των ποταμών κατά μήκος της κοίτης. Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούνται για την κατάρτιση της καμπύλης στάθμης-παροχής (**Rating Curve**). Η καμπύλη στάθμης-παροχής είναι χαρακτηριστική για το κάθε σημείο και επιτρέπει τη μετατροπή της χρονοσειράς των δεδομένων στάθμης σε παροχή.

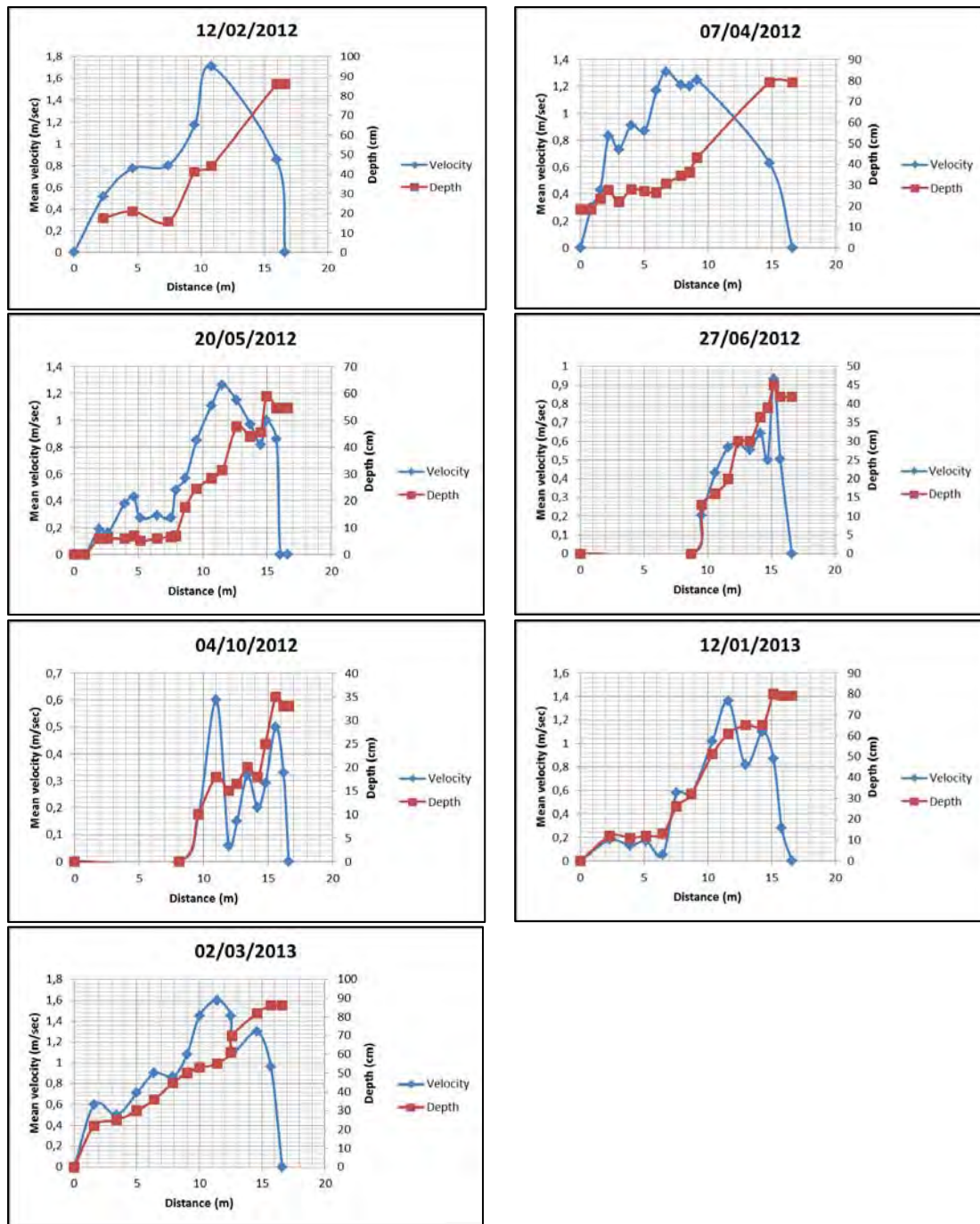
Στα γραφήματα 1 έως 3 δίνονται οι μετρήσεις της ταχύτητας και βάθους από τις εργασίες πεδίου που έγιναν στις αντίστοιχες επισκέψεις στις θέσεις των σταθμημέτρων Κόκκινος, Μόρνος-Ορεινό, Μόρνος-Πεδινό.

Πίνακας 4: Συνοπτικά χαρακτηριστικά των μετρήσεων στάθμης νερού και παροχής κατά τις επισκέψεις στους ποταμούς Κόκκινος και Μόρνος (Μόρνος-Ορεινό και Μόρνος-Πεδινό)

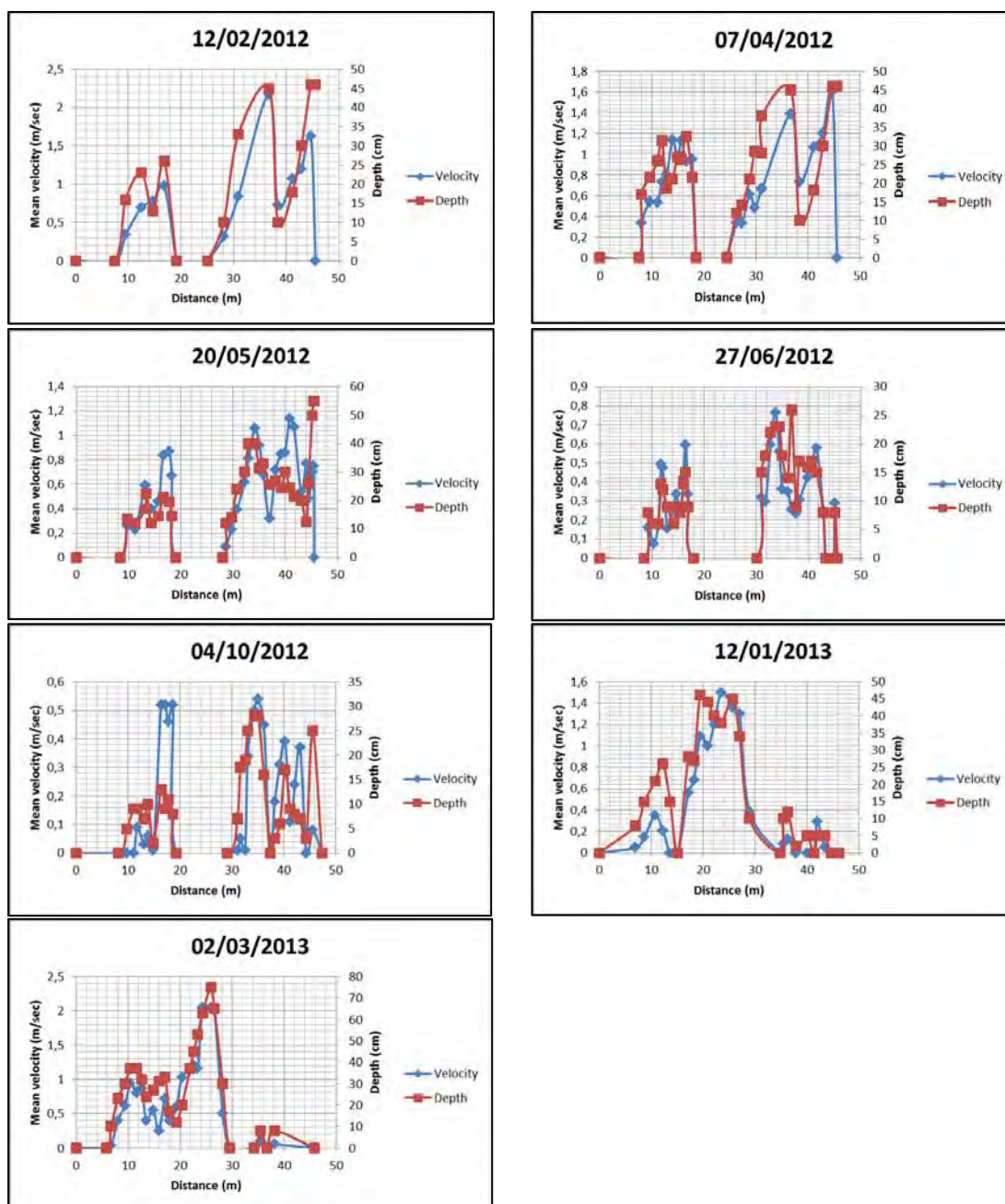
	Ημερομηνία		HH:MM	12/2/2012	7/4/2012	20/5/2012	27/6/2012	4/10/2012	12/1/2013	2/3/2013
	Διάρκεια	Αρχή Τέλος								
ΚΟΚΚΙΝΟΣ	Μέσο Βάθος	(cm)		9,85	8,80	6,65	3,16	5,35	4,33	8,42
	Παροχή	(m ³ /s)		4,37	3,63	2,16	0,69	0,58	1,79	4,22
	Μέτρηση Σταθμήμετρου	(cm)		14,00	23,25	10,00	4,00	5,00	4,00	6,00
	Μέση Ταχύτητα	(m/s)		2,23	2,12	1,65	1,02	0,54	1,25	1,51
	Βάθος στην Θέση Οργάνου	(cm)		13,00	11,00	9,00	4,00	13,00	5,00	8,00
ΜΟΡΝΟΣ - ΠΕΔΙΝΟ										
	Ημερομηνία		HH:MM	12/2/2012	7/4/2012	20/5/2012	27/6/2012	4/10/2012	12/1/2013	2/3/2013
	Διάρκεια	Αρχή Τέλος								
ΜΟΡΝΟΣ - ΠΕΔΙΝΟ	Μέσο Βάθος	(cm)		38,61	44,50	22,07	13,00	9,24	36,47	47,13
	Παροχή	(m ³ /s)		6,69	6,06	2,95	1,11	0,45	4,48	8,07
	Μέτρηση Σταθμήμετρου	(cm)		62,91	75,80	43,00	26,00	35,00	43,00	43,00
	Μέση Ταχύτητα	(m/s)		0,97	0,90	0,65	0,55	0,29	0,59	1,04
	Βάθος στην Θέση Οργάνου	(cm)		80,00	79,00	56,00	42,00	30,00	80,00	82,00
ΜΟΡΝΟΣ - ΟΡΕΙΝΟ										
	Ημερομηνία		HH:MM	12/2/2012	7/4/2012	20/5/2012	27/6/2012	4/10/2012	12/1/2013	2/3/2013
	Διάρκεια	Αρχή Τέλος								
ΜΟΡΝΟΣ - ΟΡΕΙΝΟ	Μέσο Βάθος	(cm)		15,88	18,16	13,43	6,44	6,33	15,03	18,07
	Παροχή	(m ³ /s)		7,72	7,43	4,01	1,13	0,73	5,33	8,53
	Μέτρηση Σταθμήμετρου	(cm)		148,00	182,20	56,00	43,00	26,00	-	64,00
	Μέση Ταχύτητα	(m/s)		0,92	0,82	0,61	0,34	0,22	0,37	0,43
	Βάθος στην Θέση Οργάνου	(cm)		41,00	40,00	30,00	25,00	16,00	12,00	8,00



Γράφημα 1: Γραφήματα ταχυτήτων - βάθους στη θέση Κόκκινος



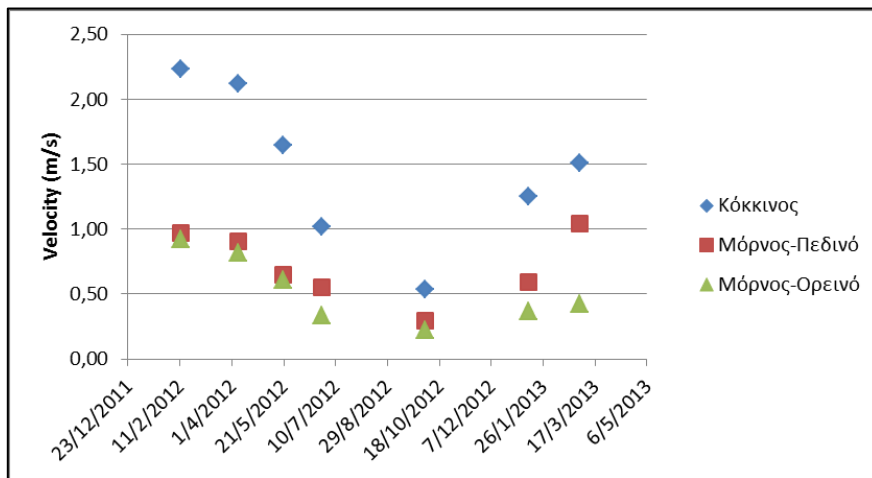
Γράφημα 2: Γραφήματα ταχυτήτων - βάθους στη θέση Μόρνος-Ορεινό



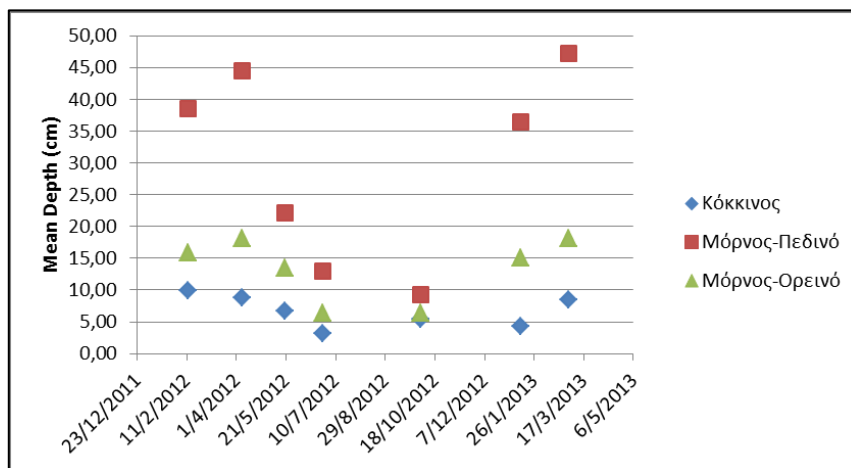
Γράφημα 3: Γραφήματα ταχυτήτων - βάθους στη θέση Μόρνος-Πεδινό

Από τις μετρήσεις ταχύτητας που παρουσιάζονται στα γραφήματα εκτιμήθηκαν οι παροχές που παρατίθενται στον Πίνακα 4. Στα γραφήματα 4, 5, 6 μπορεί αντίστοιχα να παρατηρηθεί ότι το βάθος νερού που μετρήθηκε τις συγκεκριμένες ημερομηνίες που έγιναν οι επισκέψεις στο πεδίο για τον Κόκκινο ποταμό κυμαίνεται μεταξύ 3 και 10 cm και η παροχή μεταξύ 0.6 και 4.4 m³/sec. Αντίστοιχα το βάθος του νερού στον ποταμό Μόρνο στη θέση Μόρνος-Ορεινό κυμαίνεται μεταξύ 9 – 48 cm, ενώ στη θέση Μόρνος-Πεδινό μεταξύ 6-18 cm και οι αντίστοιχες παροχές από 0.5-8 m³/sec και 0.7 – 9 m³/sec αντίστοιχα. Τα δεδομένα παροχών χρησιμοποιήθηκαν για την κατάρτιση της καμπύλης στάθμης νερού –

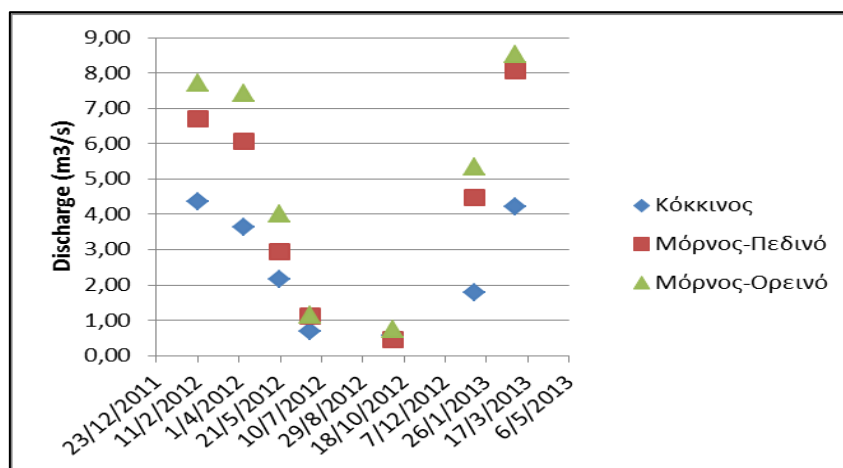
απορροής στα συγκεκριμένα σημεία των ποταμών. Τα αποτελέσματα των σχέσεων δίνονται στο Γράφημα 7.



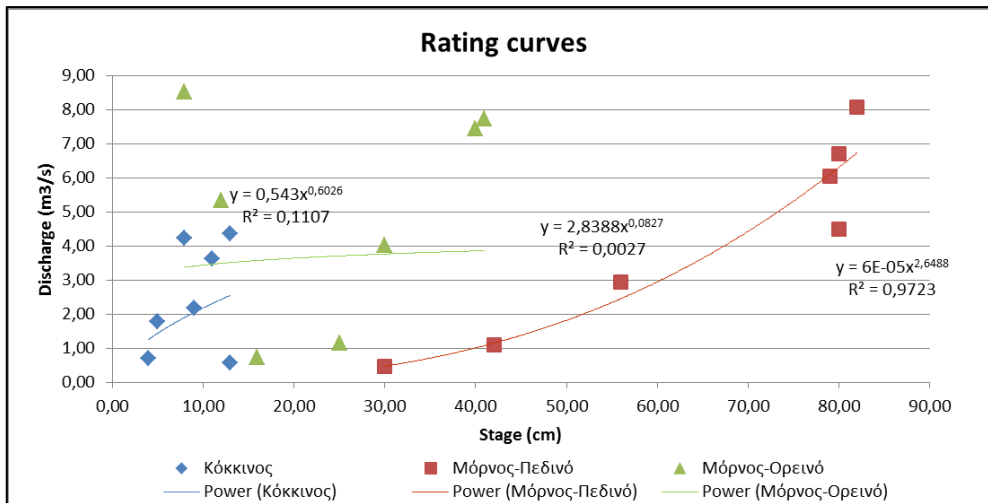
Γράφημα 4: Ταχύτητα των ποταμών Κόκκινου και Μόρνου κατά τις επισκέψεις στις θέσεις Κόκκινος, Μόρνος-Ορεινό, Μόρνος-Πεδινό



Γράφημα 5: Μέσο Βάθος των ποταμών Κόκκινου και Μόρνου κατά τις επισκέψεις στις θέσεις Κόκκινος, Μόρνος-Ορεινό, Μόρνος-Πεδινό



Γράφημα 6: Παροχή των ποταμών Κόκκινου και Μόρνου κατά τις επισκέψεις στις θέσεις Κόκκινος, Μόρνος-Ορεινό, Μόρνος-Πεδινό



Γράφημα 7: Σχέσεις βάθος νερού – παροχής των ποταμών Κόκκινου και Μόρνου κατά τις επισκέψεις στις θέσεις Κόκκινος, Μόρνος-Ορεινό, Μόρνος-Πεδινό (**Rating Curves**).

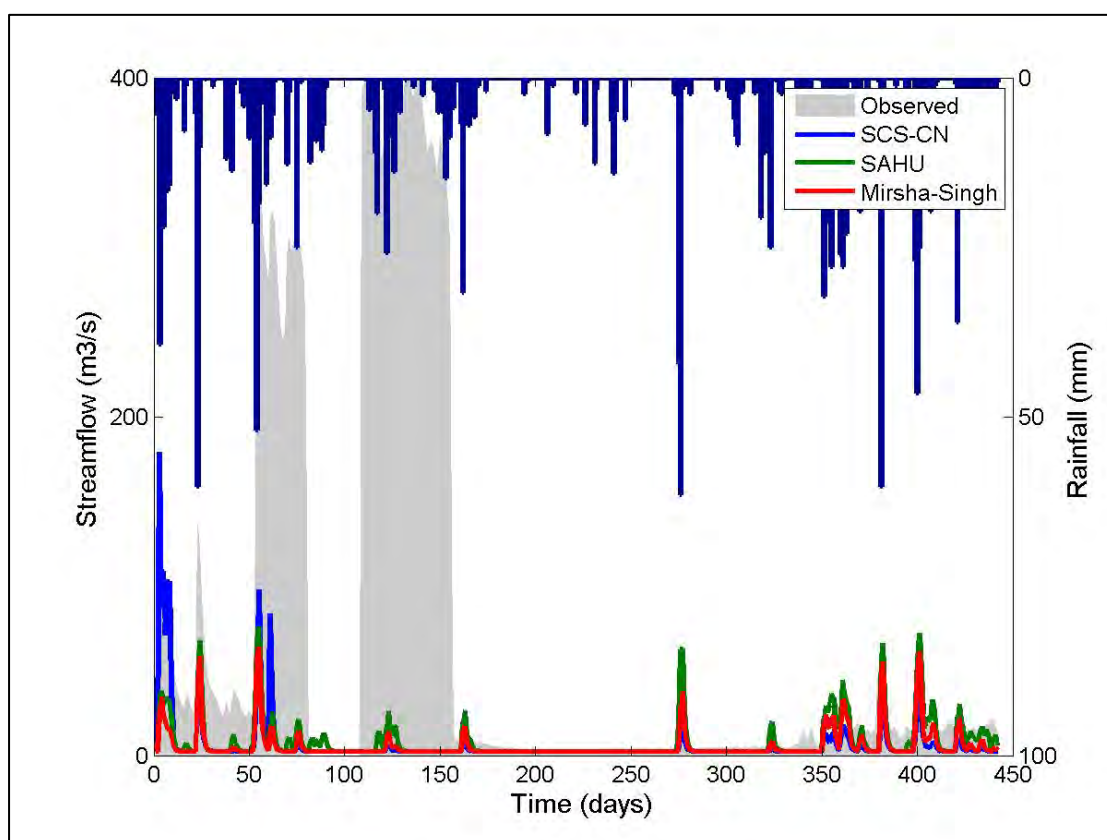
Οι καμπύλες στάθμης – παροχής για το κάθε σημείο που μετράται η στάθμη έχουν την παρακάτω μορφή:

$$Q = \alpha \cdot (\text{Stage} + \beta)^\gamma \quad (3)$$

όπου α και β είναι παράμετροι, Stage είναι το βάθος του νερού (cm) και Q (Discharge) είναι η παροχή (m³/sec). Οι παράμετροι α , β και γ θα πρέπει να εκτιμηθούν μέσα από την βελτιστοποίηση της εξίσωσης της καμπύλης στάθμης - παροχής. Όσο περισσότερα σημεία υπάρχουν για τον υπολογισμό της σχέσης, τόσο μικρότερο θα είναι το σφάλμα στη διαδικασία μετατροπής της στάθμης σε παροχή. Ο περιορισμός $\beta > -\text{Stage}$ επιβάλλεται για τις παραμέτρους αξιολόγησης της καμπύλης. Ωστόσο είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι επιπρόσθετες μετρήσεις της παροχής των ποταμών είναι αναγκαίες, κυρίως μετρήσεις σε μεγάλα ή και ακραία γεγονότα απορροής. Βέβαια θα πρέπει να σημειωθεί ότι από τεχνικής απόψεως μετρήσεις σε ακραία γεγονότα απορροής είναι πολύ δύσκολο και ίσως επικίνδυνο να πραγματοποιηθούν.

Κεφάλαιο 3: Περιγραφή Βιβλιοθήκης Υδρολογικών Μοντέλων – Αποτελέσματα Εφαρμογής

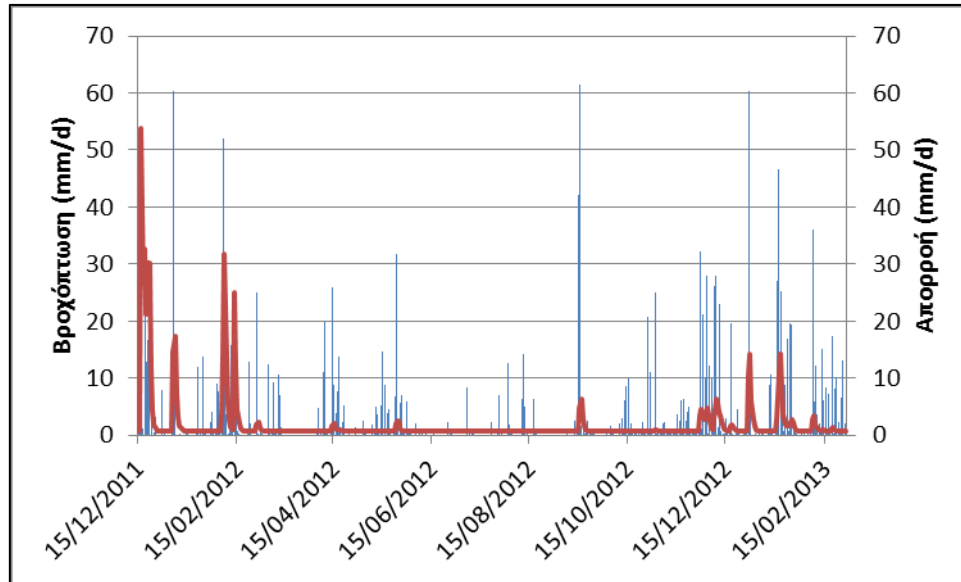
Για τον υπολογισμό της **Επιφανειακής Απορροής** όπως παρουσιάζεται στην εξίσωση **Υδατικού Ισοζυγίου Ταμιευτήρα Μόρνου** δημιουργήθηκε μια Βιβλιοθήκη Υδρολογικών Μοντέλων που περιλαμβάνει 3 ημικαταναμημένα μοντέλα βροχής-απορροής. Τα ημικαταναμημένα Υδρολογικά Μοντέλα (ομοίωμα βροχής - απορροής) βασίζονται στη μέθοδο SCS-CN (Soil Conservation Service Curve Number) για τον υπολογισμό του μοναδιαίου υδρογραφήματος (Unit Hydrograph) το οποίο ως δεδομένα εισόδου δέχεται τη συνολική συνεισφορά των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων (Βροχόπτωση + Ισοδύναμο Χιονοκάλυψης) και υπολογίζει την επιφανειακή απορροή σε ημερήσιο βήμα. Οι υδρολογικές παράμετροι C και CN, και ο χρόνος συγκέντρωσης έχουν υπολογιστεί για κάθε μονάδα του μοντέλου και είναι κρίσιμες για τον υπολογισμό της επιφανειακής απορροής όπως παρουσιάζεται στα Παραρτήματα Β και Γ.



Γράφημα 8: Εκτιμώμενη Απορροή στην υπολεκάνη του Μόρνου με χρήση των διαφορετικών δομών από την Βιβλιοθήκη Υδρολογικών Μοντέλων (SCS-CN, -SAHU και Mirsha-Singh) για την περίοδο 14/12/2011 -30/12/2012 (αντιπροσέγγιση της αντίστοιχης βροχόπτωσης).

Η Βιβλιοθήκη Υδρολογικών Μοντέλων αναπτύχθηκε με χρήση της γλώσσας προγραμματισμού Matlab 2010. Για την περίοδο μελέτης τα αποτελέσματα των μοντέλων

παρουσιάζονται στα Γραφήματα 8 και 9. Να σημειωθεί ότι χρησιμοποιούνται τρεις διαφορετικές δομές πολυπλοκότητας και συγκρίνονται μεταξύ τους. Αυτές είναι η παραδοσιακή SCS-CN μέθοδος, η απλουστευμένη SAHU μέθοδος και τέλος το Mirsha-Singh μοντέλο (Παράρτημα Β).



Γράφημα 9: Συνολική Απορροή (Q_{total}) και αντίστοιχη βροχόπτωση για την περίοδο 15/12/2011 - 28/02/2013

Κεφάλαιο 4: Περιγραφή Υδατικού Ισοζυγίου Ταμιευτήρα Μόρνου – Αποτελέσματα Εφαρμογής

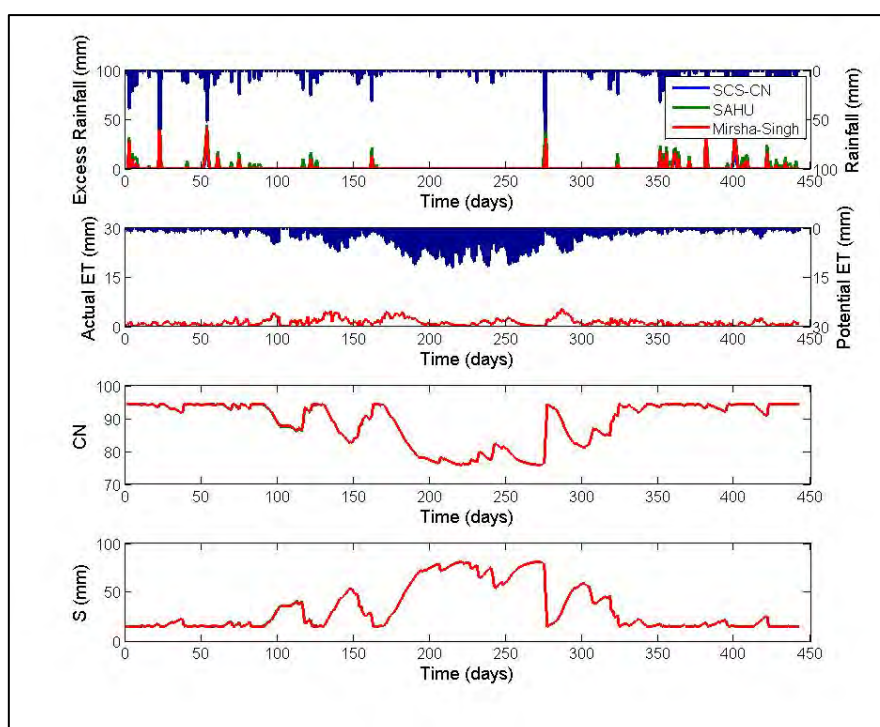
Για την προσομοίωση του Υδατικού Ισοζυγίου ταμιευτήρα λαμβάνονται υπόψη οι βασικές συνιστώσες (υδρολογικές εισροές, χρήσεις νερού και απώλειες). Η γενική μαθηματική έκφραση του ισοζυγίου δίνεται από την εξίσωση (1):

$$\text{Εισροές} - \text{Εκροές} = \text{Μεταβολή Αποθέματος} \quad (1)$$

Η εξίσωση (1) ανάγεται για την Υδρολογική Λεκάνη του Μόρνου στην εξίσωση (2):

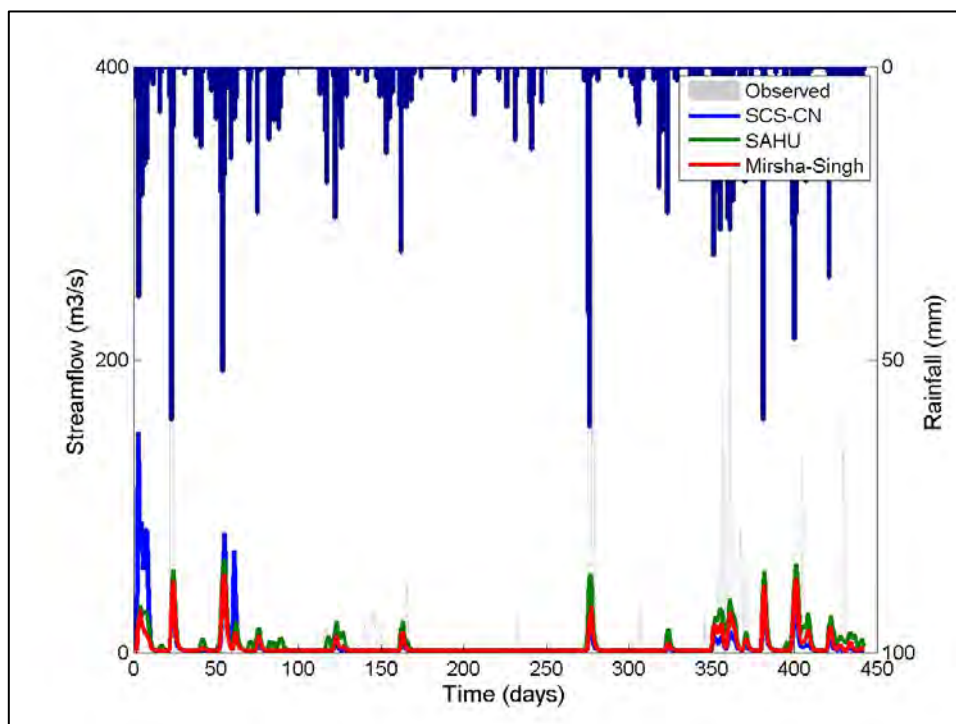
$$\begin{aligned} & \text{Βροχόπτωση Ελεύθερης Επιφάνειας Ταμιευτήρα} + \text{Επιφανειακή Απορροή} \\ & + \text{Εισροή Εύηνου} - \text{Συνολικές Απώλειες} \\ & - \text{Εξατμίσση Ελεύθερης Επιφάνειας Ταμιευτήρα} \\ & - \text{Εκροές προς Αθήνα} = \text{Μεταβολή Αποθέματος} \quad (2) \end{aligned}$$

Η Επιφανειακή Απορροή εκτιμάται σε ημερήσιο βήμα από τη βιβλιοθήκη Υδρολογικών Μοντέλων όπως παρουσιάστηκε περιληπτικά στο Κεφάλαιο 3 (και παρατίθεται αναλυτικά στο Παράρτημα Β).



Εικόνα 14: Αποτελέσματα από την Εφαρμογή της Βιβλιοθήκης Υδρολογικών Μοντέλων σε ημερήσιο βήμα για την περίοδο 15/12/2011 -28/02/2013. Από πάνω προς τα κάτω: Ενεργός Βροχή (Excess rainfall), Πραγματική Εξατμισοδιαπνοή (actual evapotranspiration), Συντελεστής Απορροής (CN), Αποθηκευτική Εδαφική Ικανότητα (S).

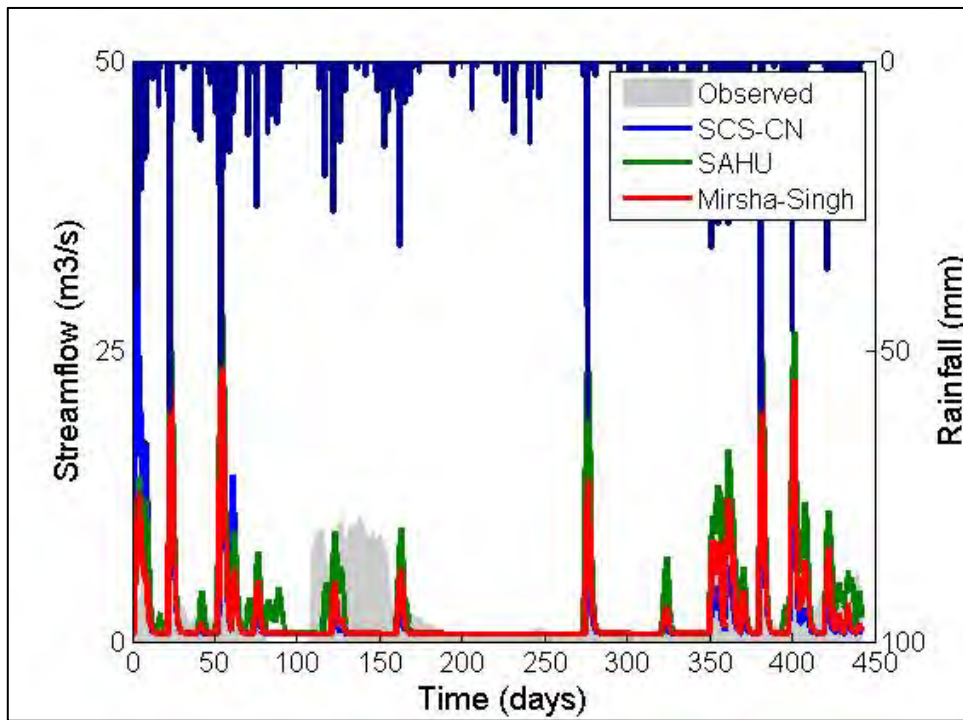
Τα δεδομένα Εισροή Εύηνου και Εκροές προς Αθήνα παρέχονται από την ΕΥΔΑΠ, η Εξάτμιση Ελεύθερης Επιφάνειας Ταμιευτήρα εκτιμάται από τις μετρήσεις του μετεωρολογικού σταθμού που έχει εγκατασταθεί στο φράγμα. Οι Υπόγειες Διαφυγές για τον ταμιευτήρα είναι δύσκολο να εκτιμηθούν και υπολογίζονται μαζί με τις συνολικές κατεισδύσεις της λεκάνης.



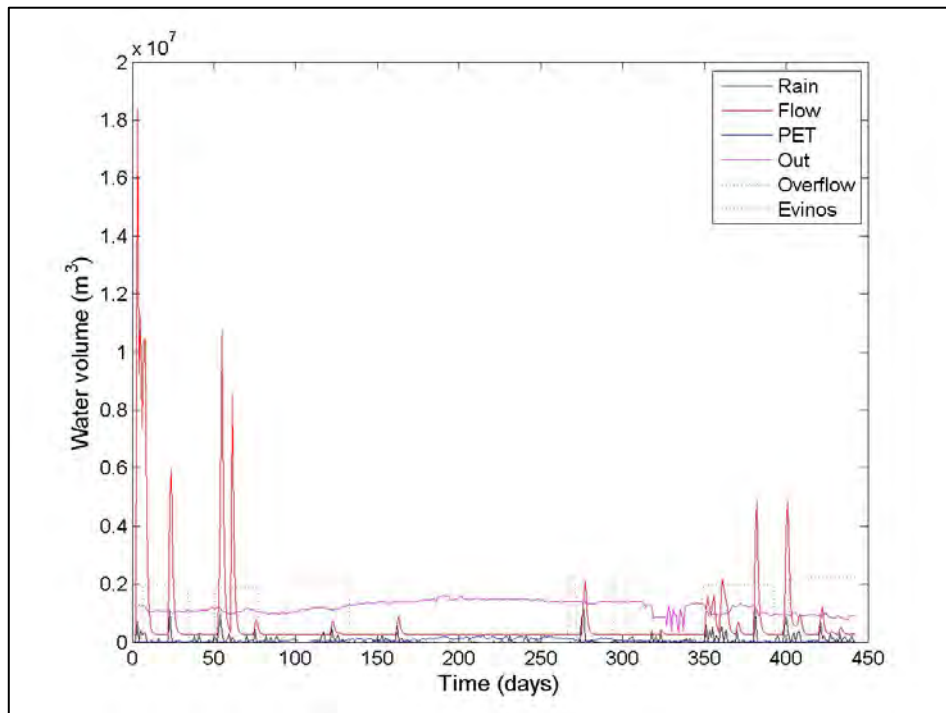
Εικόνα 15: Παρατηρούμενη απορροή (γκρι γραμμή) σε αντιπαράθεση με εκτιμώμενες απορροές από τις διαφορετικές δομές της Βιβλιοθήκης Υδρολογικών Μοντέλων σε ημερήσιο βήμα για την περίοδο 15/12/2011 -28/02/2013 για την υπολεκάνη του Μόρνου (σταθμός Μόρνος -Ορεινό).

Οι εικόνες 15 και 16 παρουσιάζουν τις χρονοσειρές της επιφανειακής απορροής σε σύγκριση με την μετρούμενη για την υπολεκάνη του Μόρνος – Ορεινό (Εικόνα 15) και Κόκκινου (Εικόνα 16) για τα 3 υδρολογικά μοντέλα. Να επισημανθεί ότι λανθασμένες μετρούμενες τιμές στη χρονοσειρά (γκρι χρώμα) είναι εμφανείς κυρίως στην Εικόνα 15.

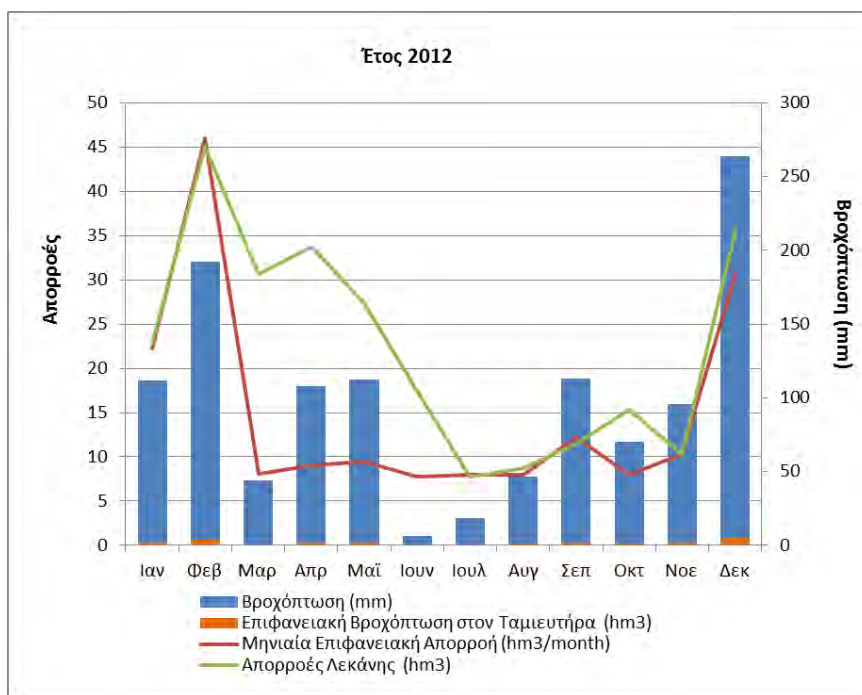
Η εικόνα 17 δίνει τη χρονική κατανομή των υδρολογικών παραμέτρων είτε εκτιμώμενων από το υδρολογικό μοντέλο είτε από τα δεδομένα της ΕΥΔΑΠ, τα οποία χρησιμοποιούνται στο μοντέλο υδατικού ισοζυγίου στον ταμιευτήρα.



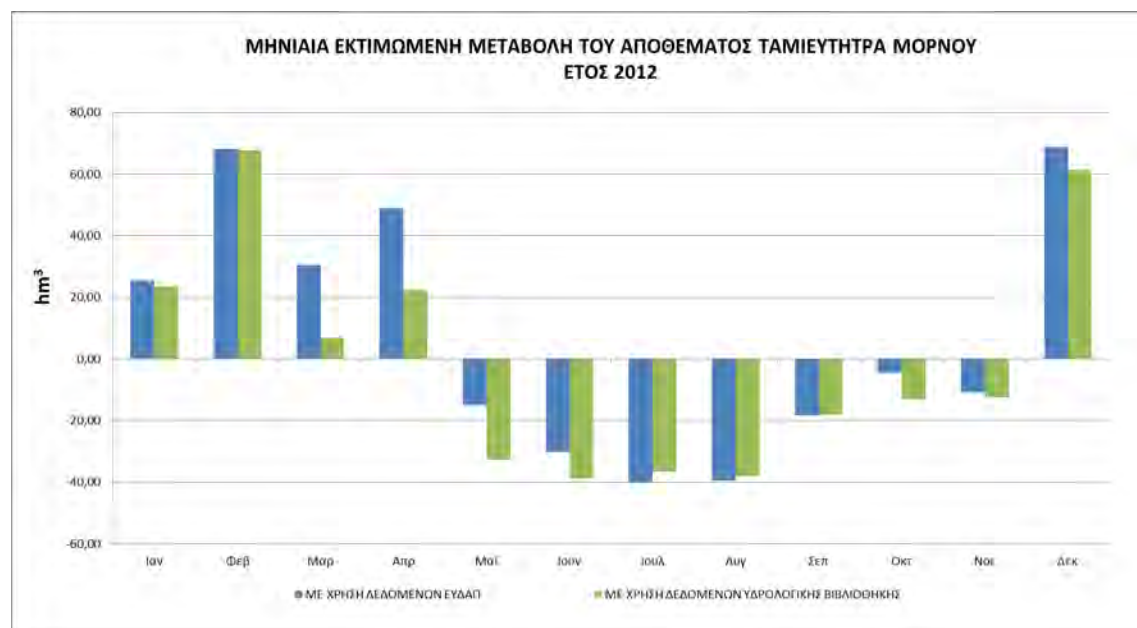
Εικόνα 16: Παρατηρούμενη απορροή (γκρι γραμμή) σε αντιπαράθεση με εκτιμώμενες απορροές από τις διαφορετικές δομές της Βιβλιοθήκης Υδρολογικών Μοντέλων σε ημερήσιο βήμα για το έτος 2012 για την υπολεκάνη του Κόκκινου.



Εικόνα 17: Χρονοσειρές υδρολογικών παραμέτρων που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση του ισοζυγίου νερού στον ταμιευτήρα.



Εικόνα 18: Συνολική Μηνιαία εκτιμώμενη απορροή (hm³) από τη βιβλιοθήκη Υδρολογικών Μοντέλων (κόκκινη γραμμή) σε αντιπαράθεση με τις Απορροές Λεκάνης (hm³) από παρεχόμενα δεδομένα της ΕΥΔΑΠ (πράσινη γραμμή) για το 2012.



Εικόνα 19: Εκτιμώμενη Μεταβολή Αποθέματος Ταμιευτήρα Μόρνου: Μπλε γραμμή, εκτίμηση παραμέτρων Υδατικού Ισοζυγίου Ταμιευτήρα Μόρνου με χρήση παρεχωμένων δεδομένων ΕΥΔΑΠ – Πράσινο χρώμα, με εκτίμηση παραμέτρων Υδατικού Ισοζυγίου μέσω Υδρολογικής Βιβλιοθήκης.

Από τα παραπάνω υπολογίστηκε για το 2012 το Μηνιαίο Υδατικό Ισοζύγιο Ταμιευτήρα Μόρνου και παρουσιάζεται στην εικόνα Εικόνα18 και στο Πίνακα 5.

Τέλος, σε συνδυασμό των αποτελεσμάτων των Υδρολογικών Μοντέλων και των δεδομένων της ΕΥΔΑΠ υπολογίστηκε η Μηνιαία Μεταβολή του Αποθέματος Ταμιευτήρα Μόρνου για το έτος 2012 και παρουσιάζεται στην Εικόνα 19.

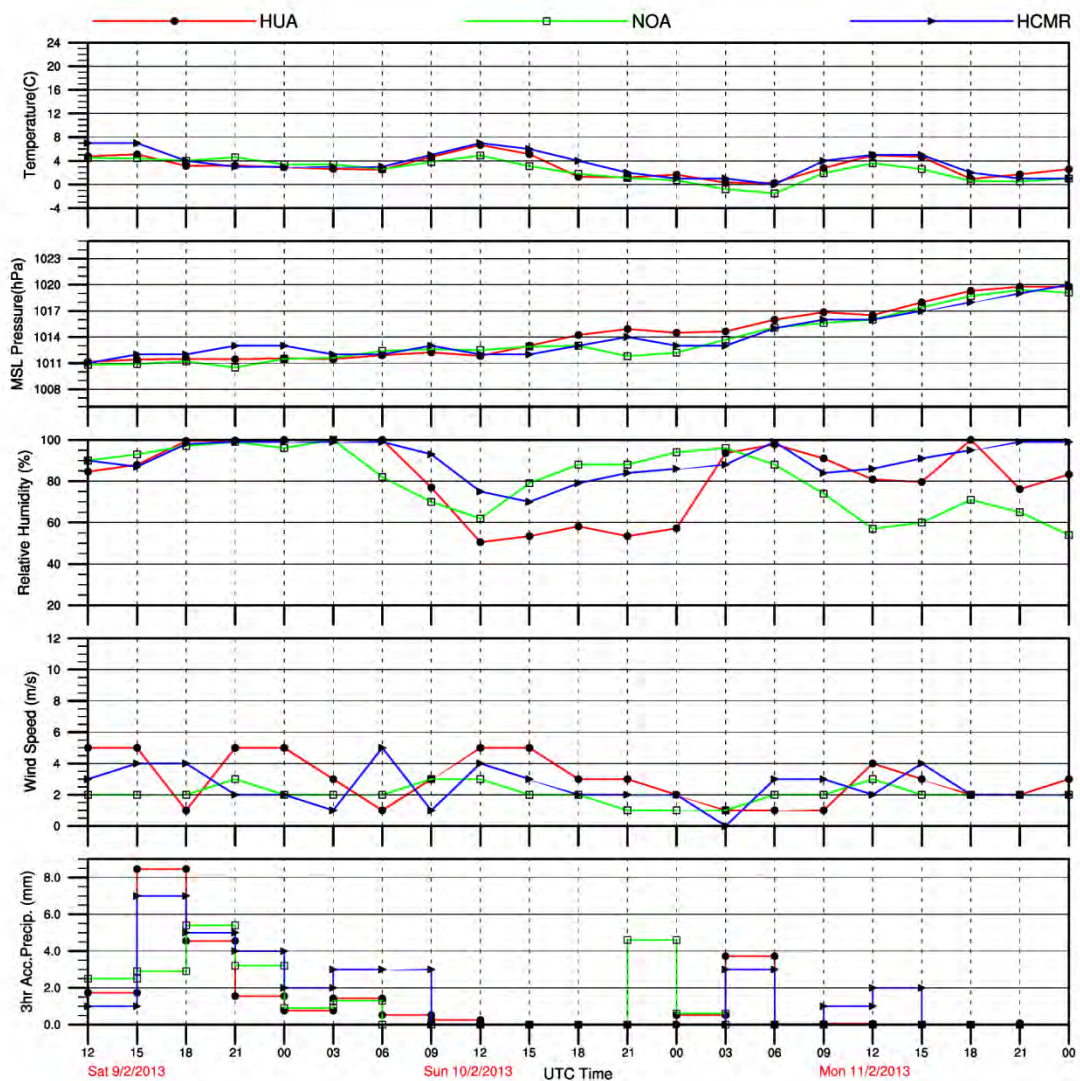
Πίνακας 5: Μηνιαίο Υδατικό Ισοζύγιο Ταμιευτήρα Μόρνου για το 2012

Hm ³	ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ Σύνολο λεκάνης	ΠΑΡΟΧΗ	ΕΙΣΡΟΗ ΑΠΟ ΕΥΗΝΟ	ΣΥΝΟΛΙΚΕΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ	ΥΠΟΓΕΙΕΣ ΔΙΑΦΥΓΕΣ	ΕΞΑΤ/ ΔΙΑΠΝΟΗ	ΥΔΡΟΛΗΨΙΑ ΠΡΟΣ ΥΔΡΑΓΩΓΕΙΟ ΜΟΡΝΟΥ	ΕΚΤΙΜΩΜΕΝΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΑΠΟΘΕΜΑΤΟΣ
Δεδομένα / πηγή	Μετρήσεις	Μοντέλο	ΕΥΔΑΠ	Μοντέλο	ΕΥΔΑΠ	Μοντέλο	ΕΥΔΑΠ	Εξίσωση (2)
Ιαν	2.01	22.24	33.78	0.69	0.87	0.48	33.36	23,5
Φεβ	3.56	45.98	51.32	1.09	0.91	0.46	31.42	67,89
Μαρ	0.8	8.12	32.49	1.37	1	0.78	32.01	7,25
Απρ	1.99	9.00	49.77	1.30	1.04	1.21	35.84	22,41
Μαΐ	2.01	9.48	0	1.29	1.1	0.98	42.09	-32,87
Ιουν	0.12	7.73	0	1.22	1.08	1.44	44.13	-38,94
Ιουλ	0.35	7.98	0	1.26	1.04	0.40	43.32	-36,65
Αυγ	0.86	7.98	0	1.27	0.98	0.86	44.78	-38,07
Σεπ	2.09	12.22	11.23	1.26	0.92	1.03	41.38	-18,13
Οκτ	1.3	7.98	19.87	1.30	0.89	0.76	40.12	-13,03
Νοε	1.77	10.33	7.95	1.27	0.88	0.66	30.65	-12,53
Δεκ	4.88	30.80	61.6	1.30	0.9	0.39	34.3	61,29

Πρέπει να σημειωθεί ότι η εκτιμώμενη μεταβολή του αποθέματος όπως έχει υπολογιστεί με τη χρήση υδρολογικών μοντέλων διαφέρει από την εκτίμηση της που δίνεται από τα δεδομένα της ΕΥΔΑΠ. Όπως αναφέρεται στην εξίσωση του Υδατικού Ισοζυγίου του Ταμιευτήρα του Μόρνου στις συνολικές απώλειες συμπεριλαμβάνονται η κατείσδυση του συνόλου της λεκάνης του ταμιευτήρα καθώς και οι υπόγειες διαφυγές από τον ταμιευτήρα.

Κεφάλαιο 5: Πρόγνωση ακραίων επεισοδίων βροχής

Για την πρόγνωση ακραίων επεισοδίων βροχής εφαρμόζονται τα δεδομένα εκτίμησης βροχόπτωσης που παρέχονται καθημερινά από τα επιχειρησιακά μοντέλα πρόγνωσης καιρού του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (ΕΑΑ), του Χαροκόπειου Πανεπιστημίου Αθηνών (ΧΠΑ) και του συστήματος POSEIDON από το Ελληνικό Κέντρο Θαλάσσιων Ερευνών (ΕΛΚΕΘΕ). Στο Παράρτημα Δ γίνεται εκτενής περιγραφή των αριθμητικών μοντέλων που χρησιμοποιούνται στην εφαρμογή καθώς και της επιχειρησιακής τους λειτουργίας. Με βάση τις εκτιμήσεις των τριών προγνωστικών συστημάτων παρέχεται ειδοποίηση για πιθανότητα ισχυρών βροχοπτώσεων τα οποία μπορούν να προκαλέσουν πλημμυρικά επεισόδια στη λεκάνη του Μόρνου.



Εικόνα 20: Μετεώγραμμα των προγνωστικών συστημάτων του ΧΠΑ (κόκκινη γραμμή), του ΕΑΑ (πράσινη γραμμή) και του ΕΛΚΕΘΕ (μπλε γραμμή) για τη θέση Φράγμα Μόρνου.

Η συγκεκριμένη διαδικασία περιλαμβάνει την μετεπεξεργασία των πρωτογενών προγνωστικών δεδομένων μετά το πέρας των ολοκληρώσεων με σκοπό την εξόρυξη προγνωστικών χρονοσειρών για τη θέση Φράγμα Μόρνου (Γεωγρ. Πλάτος: 38.50⁰, Γεωγρ. Μήκος: 22.15⁰). Οι χρονοσειρές αφορούν την στιγμιαία θερμοκρασία (°C) και υγρασία (%) στα 2 μέτρα, την διεύθυνση (°) και ταχύτητα ανέμου (m s⁻¹) στα 10 μέτρα, την ατμοσφαιρική πίεση (hPa) στην μέση στάθμη θάλασσας και την αθροιστική βροχόπτωση (mm) 3-ωρου παρέχονται υπό μορφή δεδομένων τύπου ASCII (Παράρτημα Ε) καθώς και σε διαγράμματα χρόνου-έντασης (Εικόνα 20). Στην ιστοσελίδα του προγράμματος (<http://www.meteo.gr/meteomornos/forecasts.html>) παρέχονται τα διαγράμματα εκτίμησης των παραπάνω παραμέτρων για προγνωστικό ορίζοντα 72 ωρών (3 ημερών) με ημερήσια ανανέωση. Η πιθανότητα ισχυρών βροχοπτώσεων στην περιοχή προκύπτει από την εκτίμηση των τριών προγνωστικών συστημάτων ποσού 24ωρης αθροιστικής βροχόπτωσης που υπερβαίνει τα 25 mm. Στην περίπτωση που ένα από τα 3 συστήματα εκτιμά 24ωρη αθροιστική βροχόπτωση πάνω από 25 mm τότε η προκύπτουσα πιθανότητα εκδήλωσης ισχυρών βροχοπτώσεων στην περιοχή είναι 33.33% ενώ στην περίπτωση που δύο από τα 3 συστήματα εκτιμούν 24ωρη αθροιστική βροχόπτωση πάνω από 25 mm τότε η προκύπτουσα πιθανότητα λαμβάνει τιμή 66.67%. Οι ειδοποιήσεις παρέχονται από την ιστοσελίδα <http://www.meteo.gr/meteomornos/>.

Κεφάλαιο 6: Σύνοψη – Συμπεράσματα σχετικά με το Υδατικό Ισοζύγιο Ταμιευτήρα Μόρνου

Με τη χρήση της Βιβλιοθήκης Υδρολογικών Μοντέλων εκτιμήθηκαν οι υδρολογικές μεταβλητές του συστήματος και εκτιμήθηκε το Υδατικό Ισοζύγιο Ταμιευτήρα Μόρνου όπως περιγράφεται από την εξίσωση (2) για την περίοδο 01/2012 έως 12/2012 (εφεξής αναφέρεται ως Περίοδος Μελέτης Υδατικού Ισοζυγίου, ΠΜΥΙ). Τα αποτελέσματα παρατίθενται μαζί με τα δεδομένα που δόθηκαν από την ΕΥΔΑΠ με στόχο τη διερεύνηση σημαντικών διαφορών καθώς και τον προσδιορισμό των απωλειών του ταμιευτήρα που και στις δυο περιπτώσεις εκτιμάται.

Όπως προκύπτει από τα μηνιαία αποτελέσματα η συνολική ατμοσφαιρική κατακρήμνιση στη λεκάνης για την ΠΜΥΙ υπολογίστηκε σε 21.74 hm^3 και η συνολική επιφανειακή απορροή υπολογίστηκε σε 179.84 hm^3 με μέγιστη τιμή το Φεβρουάριο του 2012 (45.98 hm^3) και μικρότερη τον Ιούνιο του 2012 (7.73 hm^3). Αντίστοιχα η εξάτμιση από τον ταμιευτήρα την ίδια περίοδο ήταν 26.49 hm^3 με μέγιστη τιμή τον Ιούνιο του 2012 (1.08 hm^3) και ελάχιστη Ιανουάριο του 2012 (0.87 hm^3).

Στην Εικόνα 18 (Κεφ. 4) παρουσιάστηκε διαγραμματικά η σύγκριση της εκτιμώμενης απορροής (hm^3) από τη βιβλιοθήκη Υδρολογικών Μοντέλων (Απορ.Λε-ΥδροΜοντέλα) σε αντιπαράθεση με τις Απορροές Λεκάνης (hm^3) από παρεχόμενα δεδομένα της ΕΥΔΑΠ (Απορ.Λε-ΕΥΔΑΠ). Παρατηρούμε ότι υπάρχει διαφορά στην εκτίμηση μεταξύ των δύο απορροών (Απορ.Λε-ΥδροΜοντέλα και Απορ.Λε-ΕΥΔΑΠ). Αυτό ενδεχομένως οφείλεται στη δομή των μοντέλων και στον ημικατανεμημένο χαρακτήρα στην προσέγγιση της διαδικασίας δημιουργίας επιφανειακής απορροής στα μοντέλα που χρησιμοποιούνται στη Βιβλιοθήκη Υδρολογικών Μοντέλων. Επίσης, κατά τους καλοκαιρινούς μήνες η βασική απορροή είναι υπολογισμένη από τις μετρήσεις πεδίου για την εκτίμηση της βασικής ροής. Η μεγάλη διαφορά κατά τον μήνα Μάρτιο οφείλεται στο μοντέλο υπολογισμού του ποσοστού απορροής από τη διεργασία συνεισφοράς στην απορροή από την τήξη του χιονιού στο σύνολο της λεκάνης και χωρικής κατανομής των μετεωρολογικών παραμέτρων (κυρίως της θερμοκρασίας) λαμβάνοντας υπόψιν ότι οι τιμές αλλάζουν ως συνάρτηση του υψομέτρου. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι παρότι εγκαταστάθηκαν δύο αυτόματοι σταθμοί μέτρησης πάχους στρώματος χιονιού στο πλαίσιο του έργου και αναπτύχθηκε διαδικασία εκτίμησης ύψους και αναγωγής του σε ισοδύναμο ύψους υετού με μαθηματικό μοντέλο το οποίο λαμβάνει υπόψη την πραγματική μέτρηση του ύψους του στρώματος χιονιού και την εκτιμώμενη πυκνότητα του στρώματος του χιονιού, εντούτοις η εκτίμηση της συνεισφοράς στην απορροή από την τήξη του χιονιού ενέχει μεγάλη αβεβαιότητα.

Τέλος, στην Εικόνα 19 όπου παρουσιάζεται η εκτιμώμενη μεταβολή του αποθέματος του ταμιευτήρα Μόρνου, παρατηρείται διαφορά στα αποτελέσματα από την εμπειρική (δεδομένα ΕΥΔΑΠ) και υπολογιστική (δεδομένα μοντέλου) εκτίμηση για την ανοιξιάτικη περίοδο, κυρίως τον μήνα Μάρτιο. Αυτό οφείλεται στη σημαντικά μη-γραμμική συμπεριφορά λόγω της τήξης του χιονιού όπως αναφέρθηκε προηγουμένως (παρόλο που παρατηρούνται μικρά ύψη βροχής το μήνα Μάρτιο, έχει δημιουργηθεί σημαντική απορροή).

Συνοψίζοντας, ο υπολογισμός του ισοζυγίου που παρουσιάζεται στο παρόν κείμενο αποτυπώνει τις σημαντικές μεταβολές τόσο των εισροών όσο και τις συνολικές απώλειες του συστήματος. Ο όρος συνολικές απώλειες συμπεριλαμβάνει την κατείσδυση ποσοστού της βροχόπτωσης και του χιονιού στο σύνολο της λεκάνης αλλά και τις απώλειες / υπόγειες διαφυγές του ταμειυτήρα που δεν μπορούν όμως να μετρηθούν – οπότε εκτιμώνται. Το γεγονός ότι τα υδρολογικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν από τη Βιβλιοθήκη Υδρολογικών Μοντέλων βαθμονομήθηκαν επαρκώς σύμφωνα με τις υπάρχουσες μετρήσεις της στάθμης τόσο των ποταμών αλλά και της στάθμης του ταμειυτήρα, επιτρέπει την κατανόηση της λειτουργίας της υδρολογικής λεκάνης και την εκτίμηση των συνολικών απωλειών. Το σύστημα λεκάνη – ταμειυτήρας που μελετήθηκε είναι ένα σύνθετο, μη γραμμικό σύστημα. Παρ' όλα τα θέματα που περιόρισαν την ανάλυση και τα προβλήματα που προέκυψαν - και παρουσιάζονται συνολικά στον παρακάτω πίνακα - το τελικό αποτέλεσμα επιτρέπει την εκτίμηση των συνολικών απωλειών.

Οι συνολικές απώλειες (**κατείσδυση και υπόγειες διαφυγές**) για την περίοδο ανάλυσης (Ιαν. έως Δεκ. 2012) ανέρχονται στο 8% των εισροών της λεκάνης (χωρίς να συμπεριλαμβάνεται η εισροή από τον Εύηνο). Εν κατακλείδι, ο Πίνακας 6 συνοψίζει τα προβλήματα που αντιμετωπίστηκαν και τις αντίστοιχες ενέργειες που έγιναν για την εκτίμηση των υδρολογικών παραμέτρων στην περιοχή μελέτης. Επίσης παρουσιάζονται προτάσεις που θα αναβαθμίσουν την ολοκληρωμένη διαχείριση και πρόβλεψη του υδατικού δυναμικού στη περιοχή του Μόρνου.

Πίνακας 6: Προβλήματα - Ενέργειες – Προτάσεις

A/A	Περιορισμοί & Προβλήματα	Ενέργειες - Σχόλια	Προτάσεις
1	Έλλειψη συστηματικής και αξιόπιστης καταγραφής και αξιολόγησης μετρήσεων υδρολογικών και υδρογεωλογικών παραμέτρων	Στα πλαίσια του έργου εγκαταστάθηκαν: – 4 μετεωρολογικοί σταθμοί, – 2 σταθμήμετρα, – 2 χιονόμετρα	<ul style="list-style-type: none"> – Διατήρηση των οργάνων – Τοποθέτηση 2 επιπλέον σταθμημέτρων στις γέφυρες του Κόκκινου και του Λευκαδίτη – Τοποθέτηση 2 webcams για παρακολούθηση της ροής
2	Χωροχρονικός υπολογισμός χιονοκάλυψης εκφρασμένης σε ποσότητα νερού	Μαθηματικό Μοντέλο	Διατήρηση της διεργασίας συλλογής και δημιουργίας δεδομένων χιονιού
3	Υπολογισμός Παροχής στους ποταμούς Κόκκινο και Μόρνο ΜΗ – ΔΙΑΜΟΡΦΩΜΕΝΕΣ ΚΟΙΤΕΣ	<ul style="list-style-type: none"> – Κατάρτιση καμπυλών Στάθμης νερού – Παροχής – Έλεγχος στην ποιότητα των δεδομένων στάθμης - εντοπισμός σφαλμάτων 	<ul style="list-style-type: none"> – Συνέχιση των επισκέψεων για την ολοκλήρωση των καμπυλών Στάθμης – παροχής. – Διευθέτηση της κοίτης στο Λευκαδίτη (Μόρνος-πεδινό ή ορεινό). – Επίβλεψη για πιθανή αλλαγή στις υπάρχουσες εκτιμώμενες καμπύλες
4	Υδρολογική Προσομοίωση Λεκάνης	Δημιουργία Βιβλιοθήκης Υδρολογικών Μοντέλων (ημερήσιο βήμα) σε γλώσσα προγραμματισμού Matlab	<ul style="list-style-type: none"> – Επαναλαμβανόμενη βαθμονόμηση των υδρολογικών μοντέλων κάθε 4 – 6 μήνες. – Εξέλιξη της Βιβλιοθήκης Υδρολογικών Μοντέλων για τον υπολογισμό μεταξύ άλλων: <ul style="list-style-type: none"> α. της επίδρασης της κατανομής της βροχόπτωσης και του χιονιού στην απόκριση της λεκάνης β. των απωλειών του ταμιευτήρα

Βιβλιογραφία

- Albers SC, 1995: The LAPS wind analysis. *Weather and Forecasting*, 10, 342–352.
- Bacchi, B., and R. Ranzi Eds., 2000: RAPHAEL – Runoff and Atmospheric Processes for Flood Hazard Forecasting and Control. Final Report. EC, Directorate General XII, Programme Env. and Climate 1994-1998, Bruxelles.
- Baltas, E.A., Dervos, N.A., and Mimikou, M.A., 2007. Technical Note: Determination of the SCS initial abstraction ratio in an experimental watershed in Greece, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11: 1825-1829.
- Beljaars, A. C. M., 1994: The parameterization of surface fluxes in large-scale models under free convection, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 121, 255-270.
- Bulygina, N., McIntyre, N., and Wheeler, H., 2011. Bayesian conditioning of a rainfall-runoff model for predicting flows in ungauged catchments and under land use changes, *Water Resources Research*, 47, W02503.
- Buzzi A., N. Tartaglione, P. Malguzzi, 1998: Numerical simulations of the 1994 Piedmont flood: role of orography and moist processes. *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 2369-2383.
- Buzzi, A., and L. Foschini, 2000: Mesoscale meteorological features associated with heavy precipitation in the southern Alpine region. *Meteorol. Atmos. Phys.*, **72**, 131-146.
- Buzzi, A., M. Fantini, P. Malguzzi and F. Nerozzi, 1994: Validation of a limited area model in cases of Mediterranean cyclogenesis: surface fields and precipitation scores. *Meteorol. Atmos. Phys.*, **53**, 137-153.
- Buzzi, A., R. Cadelli, P. Malguzzi, 1997: Low level jet simulation over the Antarctic ocean. *Tellus*, **49 A**, 263-276.
- Chen, F., and J. Dudhia, 2001, Coupling an advanced land surface–hydrology model with the Penn State–NCAR MM5 Modeling system. Part II: Preliminary model validation, *Monthly Weather Review*, 129, 587–604.
- Chow, V.T, Maidment, D.R. and Mays, L.W., 1988. Applied Hydrology. McGraw-Hill, Inc.
- Clark, C.D., 1945. Storage and the Unit Hydrograph. *ASCE Transactions*, 110: 1419-1446.
- Duan Q., Schaake J., Andreassian V., Franks S., Goteti G., Gupta H.V., Gusev Y. M., Habets F., Hall A. and Hay L., 2006. Model Parameter Estimation Experiment (MOPEX): An overview of science strategy and major results from the second and third workshops. *Journal of Hydrology*, 320(1-2): 3-17.
- Dudhia, J., 2009: WRF physics options, 10th Annual meeting of WRF users, National Center for Atmospheric Research, June 23 - 26, 2009, USA.
- Ferrier, B.S., Y. Jin, Y. Lin, T. Black, E. Rogers, and G. DiMego, 2002: Implementation of a new grid-scale cloud and precipitation scheme in the NCEP Eta model, Preprints, 15th Conf. on Numerical Weather Prediction, San Antonio, TX, Amer. Meteor. Soc., 280-283.
- Gupta, H.V., Kling, H., Yilmaz, K.K. and Martinez, G.F., 2009. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1-2): 80-91.
- Haith, D.A., and Shoemaker, L.L., 1987. Generalized Watershed Loading Functions for stream flow nutrients, *Water Resources Bulletin*, 23(3).
- Hamon, W.R., 1961. Estimating Potential Evapotranspiration, *Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Journal of the Hydraulics Division*, 87(HY3): 107-120.
- Hiemstra CA, Liston GE, Pielke RA, Birkenheuer DL, Albers SC, 2006: Comparing Local Analysis and Prediction System (LAPS) Assimilations with Independent Observations. *Weather and Forecasting*, 21, 1024–1040.
- Jain, M. K., Mishra, S. K., and Singh, V. P., 2006. Evaluation of AMC Dependent SCS-CN-Based Models Using Watershed Characteristics, *Water Res. Manag.*, 20: 531–552.

- Janjic ZI, 1994: The step-mountain Eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer and turbulence closure schemes. *Monthly Weather Review*, 122, 927-945.
- Janjic, Z.I., 1996: The Mellor-Yamada level 2.5 scheme in the NCEP Eta model, 11th Conf. on Numerical Weather Prediction, Norfolk, VA, 19–23 August 1996; Amer. Meteor. Soc., Boston, MA, 333–334.
- Janjic, Z.I., 2003: A nonhydrostatic model based on a new approach, *Meteorology and Atmospheric Physics*, 82, 271–285, DOI 10.1007/s00703-001-0587-6.
- Janjic, Z.I., Gerrity J.P. Jr, and S. Nickovic, 2001: An alternative approach to nonhydrostatic modelling, *Monthly Weather Review*, 129, 1164–1178.
- Kain, J.S, and J. M. Fritsch, 1990: A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization. *J. Atmos. Sci.*, **47**, 2784-2802.
- Kain, J.S., and J.M. Fritsch, 1993: Convective parameterization for mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme. *The Representation of Cumulus in numerical models, Meteor. Monogr.*, No **46**, Amer. Met., Soc., 165-177.
- Kallos G, Papadopoulos A, Nickovic S, and Katsafados P, 2006: Trans-Atlantic North African dust transport: Model simulation. *Journal of Geophysical Research*, 111, D09204, doi:10.1029/2005JD006207.
- Katsafados P, Papadopoulos A and Kallos G, 2005: Regional atmospheric response to tropical pacific SST perturbations. *Geophysical Research Letters*, 32, L04806, doi:10.1029/2004GL021828.
- Katsafados P., A. Papadopoulos, E. Mavromatidis and N. Gkikas, 2011: “Quantitative verification statistics of WRF predictions over the Mediterranean region”. 12th Annual WRF Users’ Event, 20-24 June 2011, Boulder CO, USA.
- Kull, D.W., and Feldman, A.D., 1998. Evolution of Clark’s Unit Graph Method to Spatially Distributed Runoff, *Journal of Hydrologic Engineering*, 31(9): 9-19.
- Lagouvardos K. and V. Kotroni, 2005: Improvement of high resolution weather forecasts through humidity adjustment, based on satellite data. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, **131**, 2695-2712.
- Lagouvardos K., V. Kotroni, A. Koussis, C. Feidas, A. Buzzi, P. Malguzzi, 2003: The meteorological model BOLAM at the National Observatory of Athens: assessment of two-year operational use. *J. Appl. Meteor.*, **42**, 1667-1678.
- Lehmann, R., 1992: On the choice of relaxation coefficients for Davies lateral boundary scheme for regional weather prediction models. *Meteorol. Atmos. Phys.*, **52**, 1-14.
- Mahfouf, J. F., and J. Noilhan, 1991: Comparative study of various formulations from bare soil using in situ data, *Journal of Applied Meteorology*, 30, 1354–1365.
- Maidment, D. 2002. ArcHydro-Gis for Water Resources, ESRI Press, Redlands California.
- Malguzzi, P. and N. Tartaglione, 1999: An economical second order advection scheme for numerical weather prediction. *Q. J. Roy. Met. Soc.*, **125**, 2291-2304.
- Melenti, I.L., Keri, A.A., and Rusu, T., 2011. Soil conservation service curve number method for surface runoff estimation using GIS techniques, in RosiaPoieni mining area (Romania). *ProEnvironment*, 4: 158-164.
- Mellor, G. L., and T. Yamada, 1982: Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems, *Rev. Geophys.*, 20(4), 851–875, doi:10.1029/RG020i004p00851.
- Mesinger F, Janjic ZI, Nickovic S, Gavrillov D and Deaven DG, 1988: The steep-mountain coordinate: Model description and performance for cases of Alpine lee cyclogenesis and for a case of an Appalachian redevelopment. *Monthly Weather Review*, 116, 1493-1518.
- Michel C., Vazken A., and Perrin C., 2005. Soil conservation service curve number method: how to mend a wrong soil moisture accounting procedure. *WaterResources Research* 41, W02011.

- Mirshahi, B., 2010. *Hydrological modelling in data-sparse snow-affected semiarid areas*. PhDthesis, ImperialCollegeLondon.
- Mishra, S. K., and Singh, V. P., 2004. Long-term hydrological simulation based on the Soil Conservation Service curve number, *J. Hydrol. Process.*, 18: 1291–1313.
- Mishra, S.K., and Singh, V.P., 2002. SCS-CN-based hydrologic simulation package. In: Singh, V.P., Frevert, D.K. (Eds.), *Mathematical Models in Small Watershed Hydrology and Applications*. Water Resources Publications, Littleton, Colorado, pp. 391–464.
- Nash, J.E., and Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models, *Journal of Hydrology*, 10: 282-290.
- Nickovic S, Kallos G, Papadopoulos A and Kakaliagou O, 2001: A model for prediction of desert dust cycle in the atmosphere. *Journal of Geophysical Research*, 106, 18113-18129.
- Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andreassian, V., Anctil, F., and Loumagne, C., 2005. Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model? Part 2—Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modeling. *Journal of Hydrology*, 303(1-4): 290–306.
- Papadopoulos A and Katsafados P, 2009: Verification of operational weather forecasts from the POSEIDON system across the Eastern Mediterranean. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9, 1299-1306.
- Papadopoulos A, Chronis Th and Anagnostou E, 2005: Improving Convective Precipitation Forecasting Through Assimilation of Regional Lightning Measurements in a Mesoscale Model. *Monthly Weather Review*, 133, No. 7, 1961–1977.
- Papadopoulos A, Kallos G, Katsafados P and Nickovic S, 2002: The Poseidon weather forecasting system: An overview. *The Global Atmosphere and Ocean Systems*, 8, No. 2-3, 219-237 (*retitled Journal of Atmospheric and Ocean Science*).
- Pechlivanidis I.G., Jackson B., McIntyre N., and Wheeler, H.S., 2011. Catchment scale hydrological modelling: A review of model types, calibration approaches and uncertainty analysis methods in the context of recent developments in technology and applications, *Global NEST Journal*, 13(3): 193-214
- Pechlivanidis, I.G., McIntyre, N.R., and Wheeler, H.S., 2010. Calibration of the semi-distributed PDM rainfall-runoff model in the Upper Lee catchment, UK. *Journal of Hydrology*, 386(1-4): 198-209.
- Ponce, V.M., and Hawkins, R.H., 1996. Runoff curve number: has it reached maturity? *Journal of Hydrologic Engineering*, 1(1): 11–19.
- Ritter, B. and J.F. Geleyn, 1992: A comprehensive radiation scheme for numerical weather prediction models with potential applications in climate simulations. *Mon. Wea. Rev.*, **120**, 303-325.
- Sahu, R.K., Mishra, S.K., and Eldho, T.I., 2010. An improved AMC-coupled runoff curve number model. *Hydrological Processes*, 24: 2834-2839.
- Sahu, R.K., Mishra, S.K., Eldho, T.I., and Jain, M.K., 2007. An advanced soil moisture accounting procedure for SCS curve number method. *Hydrological Processes*, 21(21): 2872–2881.
- Schultz, P., 1995: An explicit cloud physics parameterization for operational numerical weather prediction. *Mon. Wea. Rev.*, **123**, 3331-3343.
- Schwarzkopf, M D., and S Fels, 1991: The simplified exchange method revisited: An accurate, rapid method for computation of infrared cooling rates and fluxes. *Journal of Geophysical Research*, **96(D5)**, 9075-9096.
- Sivapalan M., 2003. Prediction in ungauged basins: a grand challenge for theoretical hydrology. *Hydrological Processes*, 17(15): 3163-3170.
- Spencer, P. L. and D. J. Stensrud, 1998: Flash flood events: importance of the subgrid representation of convection. *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 2884-2912.

- Teegavarapu, R.S.V., and Chandramouli, V., 2005. Improved weighting methods, deterministic and stochastic data-driven models for estimation of missing precipitation records. *Journal of Hydrology*, 312(1-4): 191-206.
- US Department of Agriculture Soil Conservation Service, 1972. National Engineering Handbook, Section 4, Hydrology. USGovernment Printing Office, Washington, DC, 544.
- Vieux, B.E., 2001. Distributed Hydrologic Modeling using GIS.
- Wagener, T., and Wheeler, H.S., 2006. Parameter estimation and regionalization for continuous rainfall-runoff models including uncertainty. *Journal of Hydrology*, 320(1-2): 132-154.
- Zhan, X., and Huang, M-L., 2004. ArcCN-Runoff: an ArcG.I.S tool for generating curve number and runoff maps. *EnvironmentalModelling& Software*, 19: 875–879.
- Zilitinkevich, S., 1995: Non-local turbulent transport: Pollution dispersion aspects of coherent structure of convective flows, *Air Pollution Theory and Simulation, Air Pollution III*, H. Power, N. Moussiopoulos, and C. A. Brebbia, Eds., Vol. I, Computational Mechanics Publications, 53–60.

Παράρτημα Α: Αναλυτικά Στοιχεία Υπολεκανών Ταμιευτήρα Μόρνου

Πίνακας 7: Φυσικά Χαρακτηριστικά Υπολεκανών

OBJECTID	Area (km ²)	Mean gradient	River length (m)
1	10.5	0.31	720
2	16.7	0.31	4680
3	6.0	0.32	2520
4	16.7	0.32	3090
5	9.9	0.48	2310
6	7.3	0.47	870
7	1.7	0.29	1350
8	21.4	0.40	4710
9	25.0	0.36	5880
10	15.6	0.42	4200
11	7.6	0.40	3870
12	0.3	0.55	480
13	7.9	0.48	1410
14	3.5	0.50	1350
15	7.2	0.45	1290
16	9.7	0.50	3660
17	0.1	0.41	90
18	12.1	0.66	3480
19	8.0	0.44	1170
20	24.4	0.41	4620
21	11.7	0.44	2040
22	5.5	0.51	1950
23	10.4	0.49	3690
24	3.6	0.49	1410
25	10.1	0.40	2070
26	7.5	0.49	2850
27	10.1	0.38	2400
28	10.5	0.39	1350
29	15.2	0.43	3960
30	7.0	0.45	390
31	25.7	0.48	4500
32	7.9	0.48	2460
33	16.8	0.43	5550
34	10.4	0.43	3390
35	23.1	0.37	5430
36	11.6	0.31	4170
37	5.4	0.26	2970
38	4.7	0.31	570
39	13.1	0.30	2310
40	14.8	0.39	4680
41	16.8	0.44	5850
42	10.8	0.29	2820
43	14.9	0.44	3240
44	10.5	0.40	3540
45	0.1	0.33	240
46	27.2	0.38	4920
47	3.7	0.29	1830
48	37.3	0.41	10230
49	0.1	0.13	450
50	9.1	0.33	720
51	10.8	0.22	2310
52	0.0	0.03	360
53	8.1	0.42	2100
54	14.9	0.34	3420
55	6.4	0.19	1950
56	6.9	0.38	480
57	0.1	0.05	270
58	1.4	0.13	1260
59	12.3	0.34	3030
60	7.1	0.29	210
61	7.7	0.28	1020

Παράρτημα Β: Μεθοδολογία Υδρολογικών Μοντέλων

METHODOLOGY

Rainfall-runoff modelling using synthetic hydrographs according to the SCS-CN method (US SCS, 1972) will be conducted. Our aim is to use SCS-CN in a GIS environment to provide insights on the spatial variability of the hydrological response. The method will be applied in each subunit and hydrographs at the subunit outlet will be routed (channel routing) to the (sub) catchment outlet. SCS-CN has the potential to simulate hydrographs from empirical equations (and hence no calibration is required) relating parameters for time of concentration, time lag, abstractions, runoff coefficient, and curve number, which further depend on surface slope, soil and land use. Prior to simulation, the method requires estimation of two parameters that characterize the soil permeability and land use: the runoff coefficient and curve number. Ponce and Hawkins (1996) stated the advantages of the SCS-CN method: i) its simplicity, ii) its predictability, iii) its stability, iv) its reliance on only one parameter, and v) its responsiveness to major runoff-producing watershed properties (soil type, land use, surface condition, and antecedent conditions). In addition, the perceived disadvantages are: i) its marked sensitivity to CN, ii) the absence of clear guidance on how to vary antecedent conditions, iii) the method's varying accuracy for different biomes, iv) the absence of explicit provision for spatial scale effects, and v) the fixing of the initial abstraction at 0.2, pre-empting a regionalization based on geologic and climatic setting. Figure 3 presents the flowchart of the rainfall-runoff methodology that will be followed.

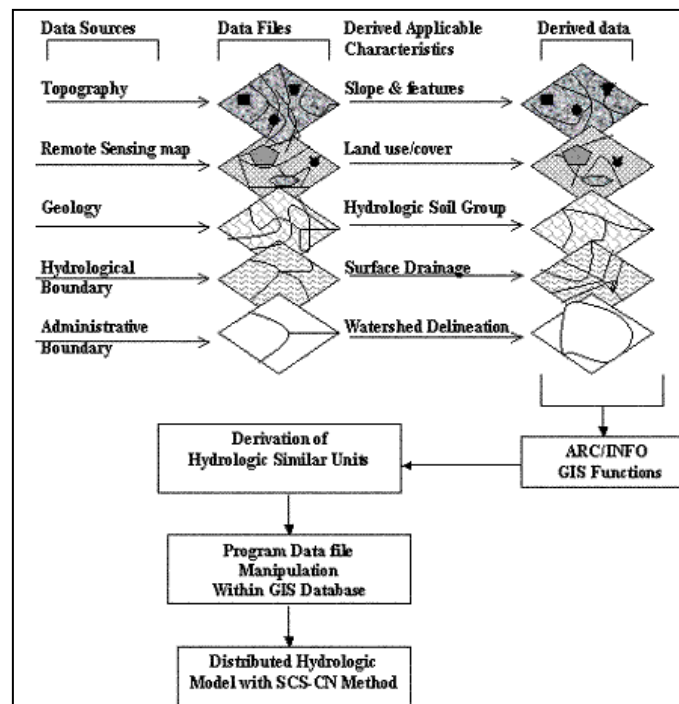


Figure 3. The flowchart of the rainfall-runoff methodology.

Determining runoff coefficient (C)

The runoff coefficient (C) is estimated for each subunit and is that part of the rainwater which becomes surface runoff. C ranges between 0 (no rainfall becomes surface runoff) and 1 (all rainfall

becomes surface runoff) and depends on the type of terrain, and its slope, which can be derived from the DEMs. The values from Table 2 will be used as a database for the estimation of C.

Table 2. Runoff coefficients of different types of terrain.

Terrain type	Runoff coefficient	
	Gradient < 0.05 (flat terrain)	Gradient > 0.05 (steep terrain)
Forest and pastures	0.4	0.6
Cultivated land	0.6	0.8
Residential areas and light industry	0.7	0.8
Dense construction and heavy industry	1	1

Determination of Curve Number (CN)

The curve number (CN) is used to determine how much rainfall infiltrates into soil or aquifer and how rainfall becomes surface runoff. Curve numbers depend on land-use, soil characteristics and antecedent moisture conditions. CN values vary from 0 to 100; a high CN means high runoff and low infiltration (usually observed in urban areas), whereas a low CN means low runoff and high infiltration (dry soil). Information from land use and hydrologic soil group are needed to estimate CNs. CN values depend also on antecedent soil moisture conditions (AMC), that can be dry conditions (AMC I), normal (AMC II) or wet (AMC III); AMC is the index, which yield different runoff conditions if the same rainfall condition (It considers five days earlier cumulative rainfall conditions according to Table 3). Table 4 presents the database for the estimation of CN.

Table 3. Antecedent soil Moisture Conditions (AMC) conditions.

AMC Class	AMC (mm)	Condition
AMC I	<35	Dry soil but not the wilting point
AMC II	35-52.5	Average condition
AMC III	>52.5	Saturated soil; heavy rainfall of lighter rain

The hydrological soil groups refer to the infiltration potential of the soil after prolonged wetting and are presented below:

Group A soils: High infiltration (low runoff). Sand, loamy sand or sandy loam. Infiltration rate > 7.62 mm/hr when wet.

Group B soils: Moderate infiltration (moderate runoff). Silt loam or loam. Infiltration rate between 3.81 and 7.62 mm/hr when wet.

Group C soils: Low infiltration (moderate to high runoff). Sandy clay loam. Infiltration rate between 1.27 and 3.81 mm/hr when wet.

Group D soils: Very low infiltration (high runoff). Clay loam, silty clay loam, sandy clay, silty clay, or clay. Infiltration rate between 0 and 1.27 mm/hr when wet.

To automate the estimation of CN values, the ArcCN-Runoff software (Zhan and Huang, 2004) will be used. According to the ArcCN-Runoff manual, the land use and soil input files have to match the cover name of land use to the land use of index table in the CN database. Finally, output is stored in newly generated layer. Figure 4 shows the flowchart of this software.

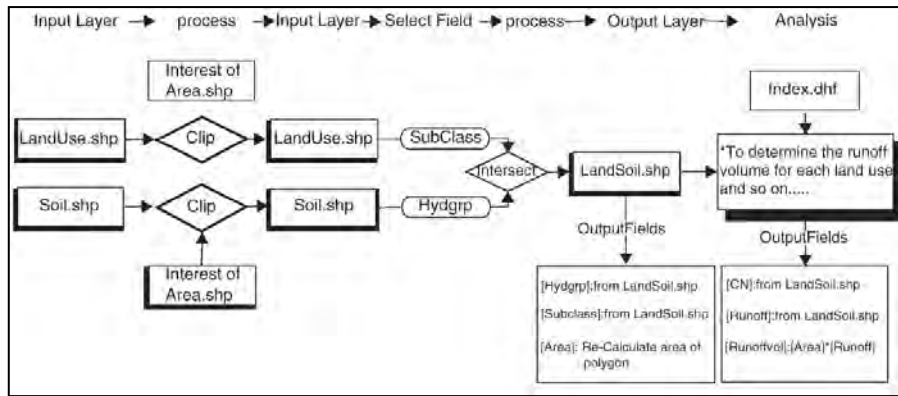


Figure 4. Flow chart of ArcCN-Runoff (as derived from Zhan and Huang, 2004).

Table 4. CN values used for rainfall-runoff modelling (as derived from Chow et al., 1988).

Description of Land Use	Hydrologic Soil Group			
	A	B	C	D
Paved parking lots, roofs, driveways	98	98	98	98
Streets and Roads:				
Paved with curbs and storm sewers	98	98	98	98
Gravel	76	85	89	91
Dirt	72	82	87	89
Cultivated (Agricultural Crop) Land*:				
Without conservation treatment (no terraces)	72	81	88	91
With conservation treatment (terraces, contours)	62	71	78	81
Pasture or Range Land:				
Poor (<50% ground cover or heavily grazed)	68	79	86	89
Good (50-75% ground cover; not heavily grazed)	39	61	74	80
Meadow (grass, no grazing, mowed for hay)	30	58	71	78
Brush (good, >75% ground cover)	30	48	65	73
Woods and Forests:				
Poor (small trees/brush destroyed by over-grazing or burning)	45	66	77	83
Fair (grazing but not burned; some brush)	36	60	73	79
Good (no grazing; brush covers ground)	30	55	70	77
Open Spaces (lawns, parks, golf courses, cemeteries, etc.):				
Fair (grass covers 50-75% of area)	49	69	79	84
Good (grass covers >75% of area)	39	61	74	80
Commercial and Business Districts (85% impervious)	89	92	94	95
Industrial Districts (72% impervious)	81	88	91	93
Residential Areas:				
1/8 Acre lots, about 65% impervious	77	85	90	92
1/4 Acre lots, about 38% impervious	61	75	83	87
1/2 Acre lots, about 25% impervious	54	70	80	85
1 Acre lots, about 20% impervious	51	68	79	84

Continuous estimation of CN

A methodology has been developed for application in continuous hydrological modelling allowing the temporal variation of the CN values. A Curve Number value for 'normal' soil moisture conditions is termed CN_2 and is either calculated from land use and soil information based on Table 4 or could be adjusted in the calibration process. Since runoff and infiltration characteristics on a soil plot depend on antecedent moisture conditions, the curve number is adjusted to a lower value CN_1 under dry conditions and a higher value CN_3 under wet conditions.

Haithet. al (1996) provide the following relationships for curve numbers corresponding to different antecedent moisture conditions:

$$CN_1 = \frac{CN_2}{(2.334 - 0.01334 \cdot CN_2)}$$

$$CN_3 = \frac{CN_2}{(0.4036 + 0.0059 \cdot CN_2)}$$

The curve number is then interpolated between CN_1 and CN_3 using:

$$CN_t = (CN_3 - CN_1) \cdot \frac{S_{t-1}}{S_{max}} + CN_1$$

where S is a state variable representing unsaturated zone soil storage (cm) at time t and S_{max} is the maximum allowable unsaturated soil storage which is computed from the watershed storage capacity equation using $S_{max} = (1000/CN_1 - 10) \times 25.4$. The term S_t/S_{max} is the unsaturated zone soil moisture content at time t .

Time of concentration

To determine how runoff is distributed over time, a time-dependent factor, the time of concentration (T_c), is introduced. T_c is the time required for a particle of water to travel from the most hydrologically remote point in the catchment to the outlet. At the end of T_c , rainfall from the entire basin will have contributed to the flow at the outlet. In literature, several equations are available for calculation of time of concentration (ASCE, 1996). After considering the availability of parameters, the time lag method has been chosen and is given by:

$$T_c = \frac{L^{0.8} \times \left(\frac{1000}{CN} - 9\right)^{0.7}}{190 \times Slp^{0.5}}$$

where T_c is the time of concentration (minutes), L is the longest flow path of the subunit (feet), CN is the average Curve Number value of the subunit (-), and Slp is the average subunit slope (m/m). The DEM of the catchment area was introduced into ArcGIS to derive the Flow Direction and Flow Length grids raster.

The SCS-CN –based models

We introduce three SCS-CN based models of various sophistication and complexity. Hence we have: the traditional SCS-CN method (US SCS, 1972), the simplified SAHU model (Sahu et al., 2007; 2010), and the Mishra-Singh model (Mishra and Singh, 2002; 2004).

Traditional SCS-CN model

Runoff time series for each subunit is computed by the formula:

$$ER_t = (P_t - I_a)^2 / (P_t + S - I_a) \quad \text{for } P_t > \lambda \cdot S$$

$$ER_t = 0 \quad \text{for } P_t \leq \lambda \cdot S$$

where: S is the potential maximum retention, I_a is the initial abstraction before ponding taken as a function of S ($I_a = \lambda \cdot S$, commonly λ is set equal to 0.2; see Table 5), ER is the depth of runoff or excess rainfall in mm at time step t and P the rainfall height in mm at time step t , S in mm is given by the formula: $S = (1000/CN - 10) \times 25.4$.

These values can be used to estimate the cumulative infiltration (F) as below:

$$F_t = (P_t - I_a) \cdot S / (P_t + S - I_a)$$

When snow accumulation and snowmelt are important processes, we replace P with the term effective precipitation P_e described below. Hence, we have:

$$ER_t = (P_{e_t} - I_a)^2 / (P_{e_t} + S - I_a) \quad \text{for } P_{e_t} > \lambda \cdot S$$

$$ER_t = 0 \quad \text{for } P_{e_t} \leq \lambda \cdot S$$

and

$$P_{e_t} = \begin{cases} P_t + P_{s_t} & \text{for } T_t > 0^\circ C \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

where P_s is snowmelt, and T is average daily temperature in $^\circ C$.

Table 5. Variation of initial abstraction and potential maximum retention against soil and cover conditions.

Soil and cover condition	Relation to S
Black soil region for AMC2 and AMC3	$I_a = 0.1 S$
Black soil region for AMC1	$I_a = 0.2 S$
All other region	$I_a = 0.3 S$

Simplified SAHU model

Sahu et al. (2007; 2010) modified the original Michel et al. (2005) model and suggested an expression for V_0 (the soil moisture store level at the beginning of the time series in mm) primarily based on the assumption that V_0 depends not only on the antecedent 5 days precipitation (P_5), which is the basis for three AMCs in the SCS-CN method, but also on S. The dependency on S is based on the fact that the watershed with larger retention capacity S would retain more precipitation than in the otherwise situation for a given P_5 .

Further based on exhaustive studies, the model is simplified; model parameters were simplified and set to a fixed value. The model is described by the following set of equations:

$$V_0 = S \cdot (0.44 \cdot P_5 - 0.004 \cdot S) / (P_5 + 0.9 \cdot S) \quad \text{for } P_5 > \lambda \cdot S$$

$$V_0 = 0.4 \cdot P_5 \quad \text{for } P_5 \leq \lambda \cdot S$$

From known V_0 , ER can be computed as follows:

$$ER = 0 \quad \text{if } V_0 + P \leq \lambda \cdot S$$

$$ER = (P + V_0 - \lambda \cdot S)^2 / (P + V_0 + (1 - \lambda) \cdot S) \quad \text{if } \lambda \cdot S < V_0 + P < \lambda \cdot S + P$$

$$ER = P \cdot (1 - (1.1 \cdot S - V_0)^2 / (S^2 + (1.1 \cdot S - V_0) \cdot P)) \quad \text{if } \lambda \cdot S + P < V_0 + P < 1.1S + P$$

Mirsha and Singh model

Mishra and Singh (2002; 2004) introduced variable M (antecedent moisture in mm) in the traditional SCS-CN equations. According to this structure, the equations are given by:

$$M = 0.5 \cdot (-(1 + \lambda) \cdot S + \text{sqrt}((1 - \lambda)^2 \cdot S^2 + 4 \cdot P_5 \cdot S)) \quad \text{for } P_5 > \lambda \cdot S$$

$$M = 0 \quad \text{for } P_5 \leq \lambda \cdot S$$

From known M, ER can be computed as follows:

$$ER = (P - I_a) \cdot (P - I_a + M) / (P + S - I_a + M) \quad \text{for } P_t > \lambda \cdot S$$

$$ER = 0 \quad \text{for } P_t \leq \lambda \cdot S$$

Snow

Snow accumulation and melt is based entirely on average daily temperature. When average daily temperature T_t is below 0°C , any precipitation falling on that day is added to the snow pack, rather than routed through the rainfall-runoff portion of the model.

$$Snow_t = \begin{cases} Snow_{t-1} + P_t & \text{if } T_t \leq 0^\circ\text{C} \\ Snow_{t-1} - P_{S_t} & \text{otherwise} \end{cases}$$

and

$$P_{S_t} = M_{snow} \cdot T_t$$

with the condition that *Snow* is non-negative and where P_s represents water melted from the snow pack (cm), T is mean daily temperature ($^\circ\text{C}$), and M_{snow} is a calibrated model parameter ($\text{mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$).

Routing of surface runoff

After computing surface runoff using one of the SCS-CN methods, which represents the rainfall excess amount corresponding to effective precipitation, routing takes place to transform surface runoff to direct runoff that is produced at the outlet of the catchment. This is carried out using a single linear reservoir method, given by:

$$q_t = C_0 ER_t + C_1 ER_{t-1} + C_2 q_{t-1}$$

$$C_0 = C_1 = (1/K) / (2 + 1/K)$$

$$C_2 = (2 - 1/K) / (2 + 1/K)$$

where K represents the single linear reservoir storage coefficient (day^{-1}) and assumed a function of time of concentration (T_c ; $K = K_{tc} \cdot 1/T_c$). It is worth noting that in this model formulation, the mass remains conserved during the routing process.

Groundwater component

Including percolation

Infiltration is the vertical transfer of water into the soil moisture compartment of the model. The model does not include surface depression storage, hence infiltration $I(t)$ is simply the difference between effective precipitation $Pe(t)$ and direct runoff $R(t)$, expressed in millimetres per day:

$$I_t = P_t - ER_t \quad \text{if } P_t > ER_t$$

Percolation, the transport of water from the soil moisture compartment to groundwater, is computed by first introducing a soil surplus variable $SS(t) = S(t-1) + I(t)$. Then percolation, $Perc(t)$ is computed from

$$Perc_t = \begin{cases} SS_t - S_{max} & \text{if } SS_t > S_{max} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Again, the continuity equation is used to obtain the saturated groundwater storage $G(t)$ as previous saturated groundwater storage plus percolation $Perc(t)$ from above, less groundwater outflow $kb G(t)$ to the stream channel.

$$q_{b_t} = q_{b_{t-1}} + Perc_t - k_b q_{b_{t-1}}$$

Without percolation

Alternatively, the derived model provides a 2nd routing to estimate the baseflow contribution.

The baseflow (q_b) is assumed to be a fraction, b_f , of F as below:

$$q_{b_{t-NLAG}} = b_f \cdot F_t$$

where F is the cumulative infiltration ($F = P - Ia - RO$), and $NLAG$ is the baseflow lag time (days). The total daily flow (Q) is the sum of ER and q_b .

Computation of streamflow

The streamflow on a day t , Q_t , is computed by summing direct runoff (q_t) and baseflow (q_b). Thus,

$$Q_t = q_t + q_{b,t}$$

Evapotranspiration

Potential Evapotranspiration

The Romanenko's empirical equation (Oudin et al., 2005), a temperature-based method, was used to estimate potential evapotranspiration.

$$PET_{Rom} = 4.5 \cdot [1 + (T_{mean}/25)]^2 \cdot (1 - e_a/e_s)$$

$$e_o = 0.6108 \cdot \exp [(17.27 \cdot T)/(T + 237.3)]$$

$$e_s = (e_{T_{max}} + e_{T_{min}})/2$$

$$e_o = 0.6108 \cdot \exp [(17.27 \cdot T_{dew})/(T_{dew} + 237.3)]$$

where T_{mean} , T_{min} and T_{max} are the mean, minimum and maximum air temperature ($^{\circ}\text{C}$) respectively. e_o is the generalised equation of saturation vapour pressure (kPa), e_s is the mean saturation vapour pressure (kPa), e_a is the actual vapour pressure (kPa), and T_{dew} is the dew point temperature ($^{\circ}\text{C}$).

Actual Evapotranspiration

Actual evapotranspiration, ET(mm) can be estimated using measured potential evapotranspiration (PET) data and is calculated by:

$$ET_t = \frac{SS_{t-1}}{S_{\text{max}}} \cdot PET_t$$

where SS_t/S_{max} is a soil moisture term which reduces ET based on soil dryness and mitigates the tendency for the subsurface to dry completely during long periods without precipitation (Hamon, 1968). This could be conceptualized as a process such as plants wilting, thus reducing transpiration during an extended dry period.

Performance criteria

The model will be evaluated and maybe parameters will be adjusted using observed streamflow data at the catchment outlets using two objective functions: the Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE; Nash and Sutcliffe, 1970), the Root Mean Square Error (RMSE), the absolute bias (Abias), the Kling-Gupta Efficiency (Gupta et al., 2009), and the NSE using logarithmic transformed values. The objective functions are defined as:

$$NSE^* = 1 - NSE = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{\text{obs}_i} - Q_{\text{sim}_i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{\text{obs}_i} - \overline{Q_{\text{obs}}})^2}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{\text{obs}_i} - Q_{\text{sim}_i})^2}{n}}$$

$$Abias = abs[\sum_{i=1}^N (Q_{\text{sim}_i} - Q_{\text{obs}_i})]$$

$$KGE = 1 - \sqrt{(cc - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2}$$

where Q_{sim} is the calculated flow, Q_{obs} is the observed flow, n is the length of the time series, cc is the linear cross-correlation coefficient between observed and simulated records, α is a measure of variability in the data values (equal to the standard deviation of simulated over the standard deviation of observed), and β is equal to the mean of simulated over the mean of observed (see Gupta et al. (2009) for further details of the KGE and its components). In optimisation NSE^* is subject to minimisation with an ideal value at zero (perfect fit). NSE^* equal to one implies that the model predicts no better than the average of the observed data. NSE^* can be greater than unity, which indicated that the model prediction is worse than the average observation. Higher the Abias, poorer is the model performance and vice versa. A value of Abias equal to zero exhibits a perfect fit. Abias has the advantages of having the same units as the variable. In optimisation KGE is subject to maximisation with an ideal value at unity. Another reason for our choice of KGE is that this measure sees the calibration problem from a multi-objective perspective, by focusing on the correlation, variability error and bias error as separate criteria to be optimised.

Parameter optimisation

When adequate observed streamflow data are available, model parameters, which were a priori set fixed based on the literature, are calibrated. In total, 20,000 Monte Carlo simulations are generated to investigate the parameter space. The initial estimate of parameter λ was taken as 0.2 and was assumed to vary in the range (0, 1). In the baseflow component, k_b (the baseflow recession constant; day^{-1}) is varies between 0.1 and 1. In addition, bf (-) and NLAG were set equal to 0.1 and 1 days respectively. NLAG can be a priori determined from the observed rainfall-runoff records of calibration periods as follows. A continuous dry period with no or little runoff is selected and the difference in time of the first rise in runoff and rainfall is taken as the first guess on NLAG (in our case, NLAG was set to 1 day). In the calibration these parameter varies in the range (0, 1) and (0, 10) days respectively. The initial soil moisture conditions will not be calibrated, since the simulations start in December and the catchment is assumed to be saturated; hence $S_0 = S_{\text{max}}$. The streamflow routing parameter (K ; single linear reservoir storage coefficient (day^{-1})) depends on the time of concentration and its multiplier (K_{tc}) varies between 0.5 and 1. Finally the multiplier (M_{snow}) in the snow melting/accumulation component requires calibration (a priori M_{snow} was set equal to $1.7 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$). In the calibration M_{snow} varies in the range (0.7, 9) (see Mirshahi, 2010).

Παράρτημα Γ: Βιβλιοθήκη Υδρολογικών Μοντέλων

Mornos Water Balance Model Toolbox

This Appendix is written for users of the Mornos Water Balance Model Toolbox. Its emphasis lies on application of the toolbox, therefore only that part of the toolbox visible to the user is described. No detailed information about the programming code is given.

The toolbox simulates rainfall-runoff relationships in the natural catchments of Mornos. It also offers scripts for data analysis and manipulation, and parameter sensitivity analysis.

The toolbox has been developed in order to produce parsimonious, semi-distributed hydrological model based on the SCS-CN method, with aim to be applied in ungauged / poorly gauged catchments.

The architecture of the toolbox is show in Figure A1.

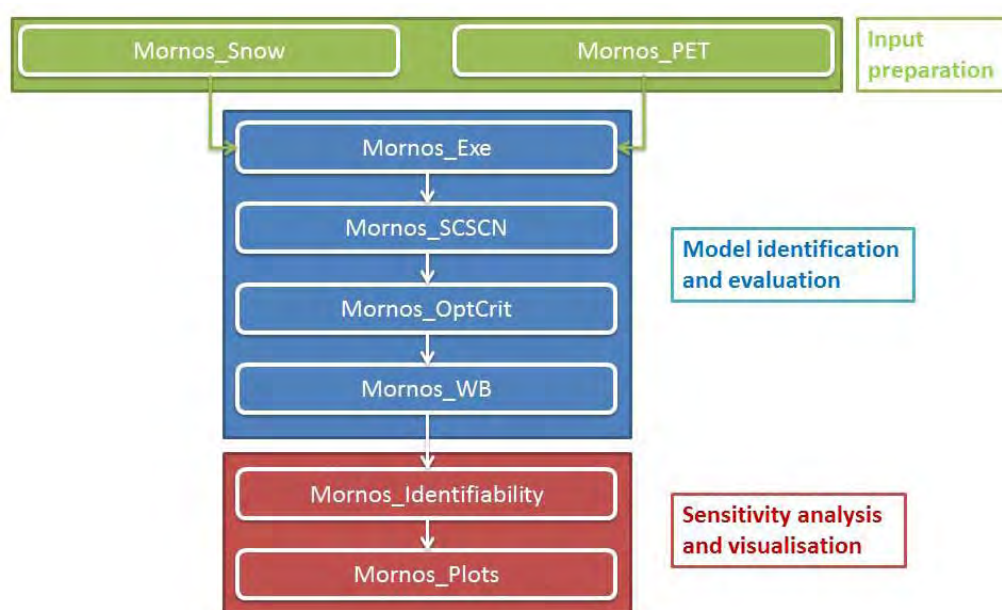


Figure A1. General structure of the toolbox.

The Matlab files created are separated into 3 classes based on their application: Input preparation, model identification and evaluation, and sensitivity analysis and visualisation.

The scripts are described in Table A1.

Table A1. Description of the Matlab scripts for the Mornos Water Balance Model Toolbox.

Class	Matlabfiles	Description
<i>Inputpreparation</i>	Mornos_PET	Estimation of the potential evapotranspiration based on temperature
	Mornos_Snow	Snow modelling using temperature dependant snow melting method
<i>Modelidentification and evaluation</i>	Mornos_Exe	Script controlling the SCS-CN and water balance script in a semi-distributed manner. The parameters and input data are introduced for each subbasin
	Mornos_SCSCN	Rainfall-runoff modelling using the SCS CN-based methods (i.e. SCS-CN, SAHU and Mirsha-Singh). The temporal variability of CN varies between

		CNI (dry antecedent moisture conditions) and CNIII (wet antecedent moisture conditions), and continuously changes in every time step based on the degree of saturation of the catchment
	Mornos_OptCrit	The criteria to evaluate the performance of the Mornos_SCSCN model. The criteria are: Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE), Root Mean Square Error (RMSE), Absolute Bias (ABias), Kling-Gupta Efficiency (KGE), log transformed NSE (LNSE)
	Mornos_WB	Estimation of the water balance in the reservoir of Mornos based on: $P + Q_{in} + Q_{evinos} + GW - ET - Q_{out} = D_{Storage}$
<i>Sensitivity analysis and evaluation</i>	Mornos_Identifiability	Run parameter sensitivity analysis and identify the optimum parameter set for an objective function (NSE, RMSE, ABias, KGE, LogNSE)
	Mornos_Plots	Visualisation of the simulated variables of the SCS-CN code

The requirements to execute the toolbox are shown below:

Table A2. Requirements to execute the Mornos Water Balance Model Toolbox.

Hardware	Any computer able to run Matlab 2010 or higher
Software	Any platform supporting Matlab 2010
Data	Topographic - land use – soil maps, precipitation, temperature and/or potential evapotranspiration, and streamflow

All necessary information and data are stored in a structure array. One can imagine a structure array as a combination of post boxes. Each individual box can be addressed by its name.

The structure array is basically split into two parts: the first part containing all input data and information (Table A3), and the second containing the output of the calculations (Table A4). The first and second part can be viewed by typing *structure.input* and *structure.output* in the Matlab command window respectively.

Table A3. Input fields of the structure array.

Fieldname	Type	Unit	Content
Area	[]	km ²	Catchmentarea
Cum_Area	[]	km ²	Cumulativecatchmentarea
Slope	[]	%	Catchmentaverageslope
Rlength	[]	m	Riverlength
ROrder	[]	-	Riverorder
Tc	[]	d	Time of concentration
FDir	[]	-	ID numbers of upstream areas
Cal_Val	''	-	Calibration - simulationmodel
MCsample	[]	-	Number of samples for Monte Carlo
Flow_ID	[]	-	ID numbers of gauged catchments
Flow_ID_Names	''	-	Names of gaugedcatchmentts
Rain	[]	mm/d	Rainfall
Month	[]	-	Month of each time step
PET	[]	mm/d	Potentialevapotranspiration
Temp	[]	°C	Temperature
SWE	[]	mm/d	Snowwaterequivalent
Runoff_Obs	[]	m ³ /s	Streamflow series for gauged catchments
BFlow	[]	m ³ /s	Baseflow
WL_reservoir	[]	M	Water level in the reservoir
Qout	[]	m ³ /d	Wateroutflowing the reservoir
Qoverflow	[]	m ³ /d	Water overflowing from the reservoir
Qevinos	[]	m ³ /d	Water contribution per day from Evinos river
Model	[]	-	Rainfall-runoff SCS-CN model type
Model_names	''	-	Names of SCS-CN model types
Pars	[]	-	Modelparametervalues
Snow_mode	[]	-	Snowaccumulation-meltingmode
OF_names	''	-	Names of objectivefunctions

[] is numerical input, '' is character input.

Table A4. Output fields of the structure array.

Fieldname	Type	Unit	Content
Runoff_Sim	[]	m ³ /s	Simulatedstreamflow
Q_Sim	[]	mm/d	Simulatedstreamflow
ER	[]	mm/d	Effectiverainfall
ET	[]	mm/d	Actualevapotranspiration
CN	[]	-	Curvenumber
S	[]	mm	Soilmoisture
C	[]	-	Runoffcoefficient
ModelEvaluation	[]	-	Parameters + objectivefunctionvalues
Prec	[]	mm/d	Precipitation (rainfall + snow)
Dstorage	[]	m	Daily deviation in water storage
GW	[]	m ³	Contribution / losses due to ground water
WL_reservoir_sim	[]	m	Water level in reservoir without GW effects

[] is numerical input, ' ' is character input.

During the model calibration, the parameters can range as below:

Table A5. Model parameters and their range.

Parameters	Min	Max
CNII	60	95
K _{tc}	0.5	1
Bf	0.01	0.99
NLAG	0	5
lamda	0.01	0.99
Msnow	0.7	9
Kb	0.01	0.99

Παράρτημα Δ: Σύντομη περιγραφή των μετεωρολογικών μοντέλων και διαμόρφωση της επιχειρησιακής τους λειτουργίας

Δ.1 Το σύστημα πρόγνωσης καιρού του ΕΑΑ

Το Ινστιτούτο Ερευνών Περιβάλλοντος του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (ΙΕΠΒΑ/ΕΑΑ) λειτουργεί επιχειρησιακά από το 2000 το μετεωρολογικό μοντέλο BOLAM για την πραγματοποίηση μετεωρολογικών προγνώσεων για την περιοχή της Μεσογείου και της Ελλάδας.

Το μετεωρολογικό μοντέλο BOLAM αναπτύχθηκε στο Ινστιτούτο Ατμοσφαιρικών και Ωκεανογραφικών Μελετών της Ιταλίας. (Institute of Atmospheric and Oceanic Studies- CNR- Bologna). Τα κύρια χαρακτηριστικά της δυναμικής και της φυσικής του μοντέλου (Buzzi et al., 1994, 1997, 1998) είναι:

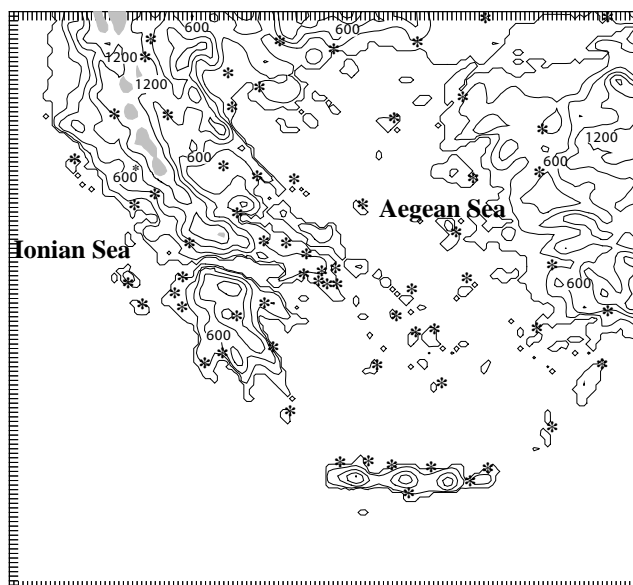
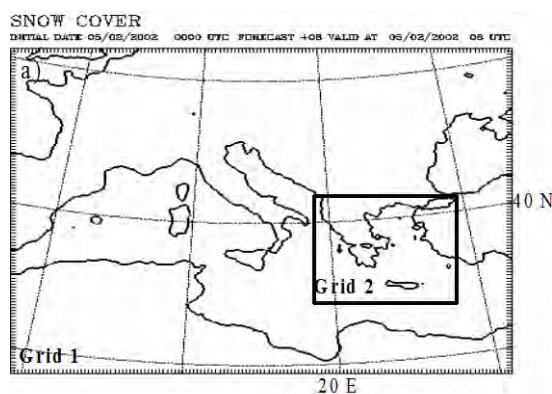
- υδροστατική προσέγγιση,
- $\sigma = P/P_s$ κατακόρυφη συντεταγμένη,
- οριζόντια διακριτοποίηση σε πλέγμα τύπου Arakawa C;
- εξαρτημένες μεταβλητές u , v , δυνητική θερμοκρασία, σχετική υγρασία και 5 μικροφυσικές μεταβλητές,
- τρισδιάστατο σχήμα μεταφοράς τύπου forward-backward (FB, Malguzzi and Tartaglione, 1999) συνδυαζόμενο με ημι-λαγκρανζιανό σχήμα μεταφοράς των υδρομετεώρων,
- χρονικό σχήμα τύπου split-explicit (FB για τα κύματα βαρύτητας),
- σχήμα οριζόντιας διάχυσης 4^{ης} τάξεως,
- σχήμα (relaxation) για τις πλευρικές οριακές συνθήκες κατά Davies-Kallberg-Lehmann (Lehmann, 1992),
- σχήμα ακτινοβολίας που αλληλεπιδρά με τα νέφη (Ritter and Geleyn, 1992)
- κατακόρυφη διάχυση (παραμετροποίηση του επιφανειακού και του οριακού στρώματος) εξαρτώμενη από τον αριθμό Richardson,
- μικροφυσικό σχήμα (Schultz, 1995) που περιλαμβάνει 5 τύπους υδρομετεώρων (νεφοσταγονίδια σε υγρή και στερεά κατάσταση, βροχή, χιόνι, χαλάζι),
- σχήμα παραμετροποίησης των έντονων ανοδικών κινήσεων (convection) κατά Kain-Fritsch (Kain and Fritsch, 1990, 1993) με βελτιώσεις που προτάθηκαν από τους Spencer and Stensrud (1998).

Η εγκυρότητα του μοντέλου έχει πιστοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές και συγκριτικές μελέτες και έχει δώσει πολύ καλά αποτελέσματα σε περιπτώσεις εντόνων βροχοπτώσεων (Bacchi and Ranzi, 2000, Lagouvardos et al, 2003, Lagouvardos and Kotroni, 2005).

Το μοντέλο δίνει την δυνατότητα πραγματοποίησης προσομοιώσεων σε διαδοχικά πλέγματα μίας κατεύθυνσης (one-way nesting). Για την επιχειρησιακή του λειτουργία στο ΕΑΑ έχουν οριστεί δύο πλέγματα προσομοίωσης:

- το εξωτερικό με 135x110 σημεία και 0.21 deg (~23 km) οριζόντια ανάλυση με κέντρο 41°N, 15°E.
- το εσωτερικό με 160x148 σημεία και 0.06 deg (~6.5 km) οριζόντια ανάλυση με κέντρο 38°N, 24°E.

Κατά την κατακόρυφη κατεύθυνση χρησιμοποιούνται 30 επίπεδα στο εξωτερικό και 36 επίπεδα στο εσωτερικό πλέγμα, από την επιφάνεια ως το επίπεδο των 10 hPa. Χάρτης των δύο πλεγμάτων προσομοίωσης δίνονται στο Σχήμα Δ.1.



Σχήμα Δ.1: Τα δύο πλέγματα του μετεωρολογικού μοντέλου BOLAM στο ΕΑΑ.

Για τον καθορισμό των οριακών συνθηκών χρησιμοποιούνται τα προγνωστικά πεδία του παγκόσμιου μοντέλου Global Forecast System (GFS) που αντλούνται καθημερινά από το National Centers for Environmental Prediction (NCEP). Οι αρχικές συνθήκες χρησιμοποιούνται για την καθημερινή εκτέλεση δύο κύκλων προγνώσεων, με αρχή στις 00 και 12 UTC και διάρκεια 6 ημερών (144 ώρες). Τα αποτελέσματα του μοντέλου δημοσιεύονται καθημερινά στην ιστοσελίδα του ΙΕΠΒΑ/ΕΑΑ <http://www.noa.gr/forecast>.

Δ.2 Το σύστημα πρόγνωσης καιρού ΠΟΣΕΙΔΩΝ

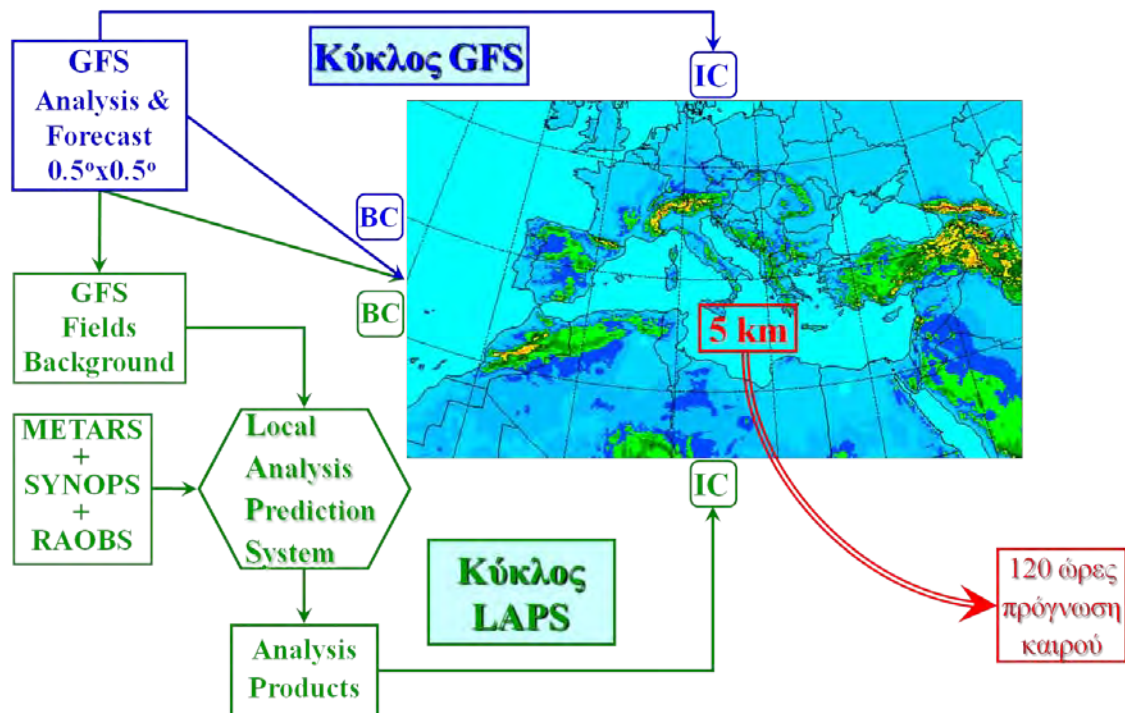
Το Ελληνικό Κέντρο Θαλασσιών Ερευνών (ΕΛΚΕΘΕ) λειτουργεί επιχειρησιακά το σύστημα ΠΟΣΕΙΔΩΝ για την παροχή εξειδικευμένων μετρήσεων και προγνώσεων για τις περιβαλλοντικές συνθήκες των Ελληνικών Θαλασσών.

Κύρια συνιστώσα του συστήματος ΠΟΣΕΙΔΩΝ είναι το σύστημα πρόγνωσης καιρού (Papadopoulos et al., 2002) το οποίο παρέχει προγνωστικά στοιχεία για την ατμοσφαιρική κατάσταση στην ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου, της Μαύρης Θάλασσας και μεγάλου μέρους της Βόρειας Αφρικής και της Ασίας. Υποστηρίζει επίσης την εφαρμογή των μοντέλων κυματισμού, θαλάσσιας κυκλοφορίας και οικοσυστήματος και υδρολογίας. Λειτουργεί επιχειρησιακά από το 1999 και μέχρι τώρα έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές, μέσω των οποίων σχεδιάστηκαν και επιτεύχθηκαν αρκετές βελτιώσεις τόσο στην επιχειρησιακή του εφαρμογή όσο και στη βελτίωση των αποτελεσμάτων του (π.χ., Katsafados et al., 2005; Papadopoulos et al., 2005). Η σημαντικότερη και εκτενέστερη αναβάθμιση του πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του προγράμματος «Ένα σύστημα δεύτερης γενιάς για τη συνεχή παρακολούθηση και πρόγνωση των περιβαλλοντικών συνθηκών στην Ανατολική Μεσόγειο – ΠΟΣΕΙΔΩΝ-2» (2005-2008). Με τη λεπτομερή περιγραφή και αξιολόγηση των συστημάτων πρόγνωσης καιρού του συστήματος ΠΟΣΕΙΔΩΝ ασχολείται η εργασία των Papadopoulos and Katsafados (2009).

Το σύστημα πρόγνωσης καιρού ΠΟΣΕΙΔΩΝ απαρτίζεται από πολλά υποσύνολα-πακέτα τα οποία και διακρίνονται σε πέντε κύριες συνιστώσες: (1) τη φάση της λήψης και προεπεξεργασίας των απαραίτητων μετεωρολογικών δεδομένων, (2) την εφαρμογή του τρισδιάστατου πακέτου αφομοίωσης δεδομένων, Local Analysis Prediction System (LAPS), για την δημιουργία πεδίων ανάλυσης υψηλής διακριτικοποίησης, (3) το μετεωρολογικό μοντέλο μέσης κλίμακας, που βασίζεται στη μη υδροστατική έκδοση του μοντέλου ETA/NCEP, (4) το μοντέλο πρόγνωσης του κύκλου της εδαφικής σκόνης και (5) τη φάση της μετεπεξεργασίας. Τα βασικά χαρακτηριστικά του συστήματος και του ατμοσφαιρικού μοντέλου περιγράφονται λεπτομερώς σε πλήθος δημοσιεύσεων (π.χ., Mesinger et al., 1988; Janjic, 1994, 2001; Nickovic et al., 2001; Papadopoulos et al., 2002; Kallos et al., 2006).

Στην τελευταία του έκδοση το σύστημα πρόγνωσης καιρού ΠΟΣΕΙΔΩΝ λειτουργεί επιχειρησιακά από το Νοέμβριο 2007 και εφαρμόζεται με οριζόντια ανάλυση $1/20^{\circ} \times 1/20^{\circ}$ (~5 km) σε μια εκτεταμένη περιοχή που καλύπτει την ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου, της Μαύρης Θάλασσας και μεγάλο μέρος της Βόρειας Αφρικής και της Ασίας (Σχήμα Δ.2). Η κατακόρυφη διακριτικοποίηση του ατμοσφαιρικού μοντέλου αποτελείται από 50 επίπεδα

που επεκτείνονται μέχρι το ύψος των 25 hPa (~25 km). Ο προγνωστικός ορίζοντας είναι 120 ώρες (5 ημέρες).



Σχήμα Δ.2: Οι επιχειρησιακοί κύκλοι πρόγνωσης καιρού του συστήματος ΠΟΣΕΙΔΩΝ.

Στην επιχειρησιακή λειτουργία του χρησιμοποιούνται δύο κύκλοι πρόγνωσης καιρού. Οι δύο κύκλοι βασίζονται στο ίδιο ατμοσφαιρικό μοντέλο που ολοκληρώνεται στην ίδια περιοχή, με τις ίδιες προκαθορισμένες σταθερές (π.χ., γεωμετρία πλέγματος, τοπογραφία, τύποι βλάστησης κλπ). Για τον καθορισμό των οριακών συνθηκών χρησιμοποιούνται τα προγνωστικά πεδία του παγκόσμιου μοντέλου Global Forecast System (GFS) που αντλούνται καθημερινά από το National Centers for Environmental Prediction (NCEP). Ο καθορισμός των αρχικών συνθηκών διαφοροποιεί τους δύο κύκλους. Στον κύκλο GFS η αρχικοποίηση της πρόγνωσης βασίζεται στα πεδία ανάλυσης του GFS της 12 UTC, που είναι διαθέσιμα με ευκρίνεια περίπου 50 km, ενώ στον κύκλο LAPS εφαρμόζονται τα πεδία ανάλυσης υψηλής διακριτικοποίησης του LAPS της 18 UTC με ευκρίνεια 15 km.

Το σύστημα LAPS είναι ένα μέσης κλίμακας σύστημα αφομοίωσης δεδομένων, που μπορεί να διαχειριστεί πλήθος μετεωρολογικών παρατηρήσεων επιφανείας, ανώτερης ατμόσφαιρας και τηλεπισκόπησης, για την παραγωγή τρισδιάστατων ατμοσφαιρικών πεδίων ανάλυσης (Albers 1995). Όταν η χωροχρονική διαθεσιμότητα των παρατηρήσεων που αφομοιώνονται από το LAPS είναι ικανοποιητική, τότε τα πεδία ανάλυσης που παράγονται μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον καθορισμό των αρχικών συνθηκών ατμοσφαιρικών μοντέλων περιορισμένης περιοχής (Hiemstra et al., 2006). Στην περίπτωση του συστήματος ΠΟΣΕΙΔΩΝ-2, το LAPS εφαρμόζεται σε περιοχή που υπερκαλύπτει αυτήν που ολοκληρώνεται το ατμοσφαιρικό μοντέλο.

Ως πεδία υποβάθρου τα ατμοσφαιρικά πεδία του μοντέλου GFS και αφομοιώνει σε πραγματικό χρόνο περίπου 20 ραδιοβολίσες δύο φορές την ημέρα (στις 00 και 12 UTC), περίπου 40 παρατηρήσεις από συνοπτικούς σταθμούς επιφανείας κάθε τρεις ώρες (από τις 00 μέχρι 21 UTC) και περίπου 650 ωριαία δελτία καιρού (METAR). Με τη συστηματική εφαρμογή του LAPS παράγονται για κάθε ώρα μετεωρολογικά πεδία ανάλυσης με χωρική ευκρίνεια 15 km.

Λόγω της υψηλότερης ευκρίνειας των πεδίων LAPS οι ατμοσφαιρικές διεργασίες μέσης κλίμακας αναπαριστώνται με πιο ρεαλιστικό τρόπο και προσφέρουν καλύτερο σημείο εκκίνησης για την ολοκλήρωση του ατμοσφαιρικού μοντέλου. Έτσι και οι βασικοί χάρτες καιρού που σχεδιάζονται από τα αποτελέσματα του κύκλου LAPS δημοσιεύονται καθημερινά στην ιστοσελίδα www.poseidon.hcmr.gr. Για τις ανάγκες του συγκεκριμένου έργου χρησιμοποιούνται τα προϊόντα από αυτό τον κύκλο πρόγνωσης.

Δ.3 Το σύστημα πρόγνωσης καιρού του ΧΠΑ

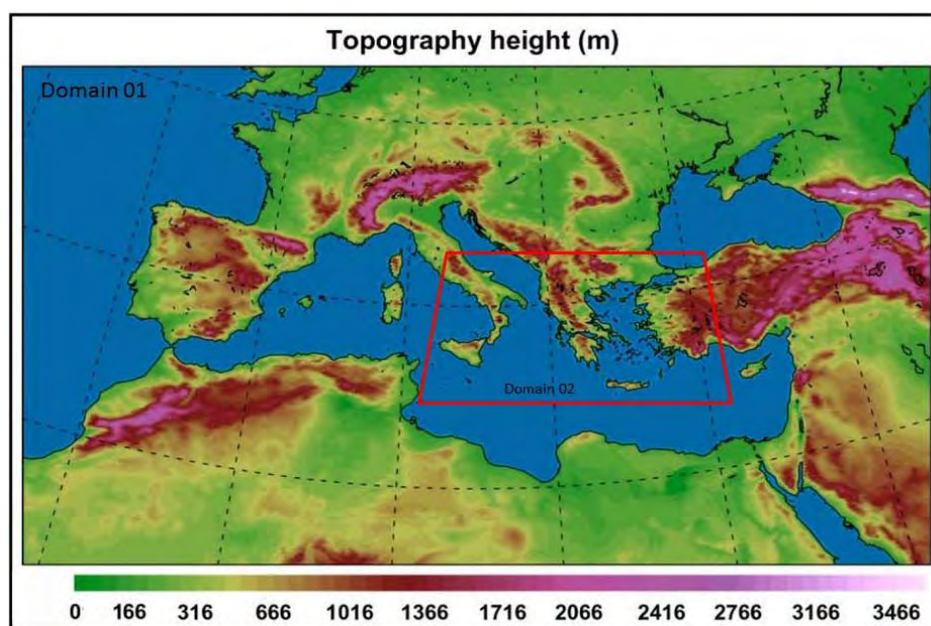
Από το 2008 το Τμήμα Γεωγραφίας του Χαροκόπειου Πανεπιστημίου Αθηνών παρέχει μέσω της ιστοσελίδας <http://meteoclima.gr> αναλυτική πρόγνωση καιρού 5 ημερών για την ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου και της Μαύρης Θάλασσας. Η πρόγνωση βασίζεται στο μη υδροστατικό μοντέλο περιορισμένης περιοχής WRF με τον δυναμικό πυρήνα NMM το οποίο εγκαταστάθηκε και προσαρμόστηκε κατάλληλα στην παράλληλη υπολογιστική υποδομή του τμήματος. Η αρχική εγκατάσταση του μοντέλου πραγματοποιήθηκε τον Ιανουάριο του 2008 ενώ η επιχειρησιακή του λειτουργία σε καθημερινή βάση ξεκίνησε τον Ιούλιο του 2008 μετά από μεγάλη περίοδο δοκιμών και αξιολογήσεων των προγνώσεων (Katsafados et al., 2011). Ο πρωτογενής κώδικας του μοντέλου αποτελείται από περίπου 5×10^7 γραμμές σε fortran95 και C και είναι πλήρως παραλληλοποιημένος ακολουθώντας το πρωτόκολλο Message Passing Interface (MPI). Παραλληλοποιημένα είναι επίσης τα στάδια προ-επεξεργασίας και μετά-επεξεργασίας των δεδομένων εισόδου και εξόδου αντίστοιχα.

Οι αρχικές και οριακές συνθήκες του μοντέλου κατά την επιχειρησιακή του λειτουργία προέρχονται από το παγκόσμιο προγνωστικό σύστημα Global Forecasting System (GFS) των National Centers for Environmental Prediction (NCEP) σε ανάλυση $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ και χρονική διακριτοποίηση 3 ώρες. Εναλλακτικά έχουν χρησιμοποιηθεί πεδία ανάλυσης ή πρόγνωσης από το European Centre for Medium range Weather Forecast (ECMWF) καθώς και αναλύσεις του συστήματος αφομοίωσης δεδομένων (LAPS). Για την επιφανειακή θερμοκρασία θάλασσας χρησιμοποιούνται τα real-time-global (rtg) δεδομένα σε $0.083^\circ \times 0.083^\circ$ ανάλυση.

Πεδίο ολοκλήρωσης των προσομοιώσεων αποτελεί η ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου και της Ευρώπης ενώ ο χρονικός ορίζοντας των προγνωστικών προϊόντων είναι 120 ώρες (5 ημέρες). Τα δεδομένα υποβάθρου τοπογραφίας προέρχονται από το United States Geological Survey (USGS) Digital Elevation Model (DEM) σε αρχική ανάλυση 30x30s (Σχήμα

Δ.3), ενώ τα δεδομένα υποβάθρου για χρήση γης και τύπο εδάφους προέρχονται από το USGS (24 κατηγορίες) και το Federal Agricultural Organization (16 κατηγορίες) αντίστοιχα σε ανάλυση 30x30s.

Το μοντέλο παρέχει επίσης τη δυνατότητα πολλαπλών εσωτερικών πλεγμάτων (nests) με μονή ή αμφίδρομη επίδραση δηλαδή ενημέρωση του εσωτερικού και υψηλότερης οριζόντιας ανάλυσης πλέγματος από το εξωτερικό πλέγμα (μονόδρομη επίδραση) ή πέρασμα της προγνωστικής πληροφορίας και από το πυκνό εσωτερικό πλέγμα στο αραιότερο εξωτερικό (αμφίδρομη επίδραση).



Σχήμα Δ.3: Τοπογραφία του πεδίου ολοκλήρωσης.

Στην εγκατάσταση του μοντέλου στο ΧΠΑ και για λόγους υπολογιστικής επάρκειας έχει επιλεγεί ένα ενιαίο πεδίο ολοκλήρωσης 305x273 σημείων, με 0.09° οριζόντια διακριτοποίηση (~12 km), χρονικό βήμα ολοκλήρωσης 24 sec και 38 ασύμμετρα κατακόρυφα επίπεδα από την επιφάνεια μέχρι τα 25 hPa. Η κατακόρυφη διακριτοποίηση του μοντέλου ακολουθεί τη σ-συντεταγμένη μέχρι τα 400 hPa και την εφαρμογή ισοβαρικών επιπέδων από εκεί και πάνω.

Η επιχειρησιακή διαδικασία των καθημερινών προσομοιώσεων αποτελείται από τρεις κύριες φάσεις (Σχήμα Δ.4):

- Τη φάση συλλογής και προ-επεξεργασίας των αρχικών και οριακών συνθηκών.
- Τη φάση εκτέλεσης του μοντέλου και παραγωγής πρωτογενών δεδομένων.

Τη φάση μετά-επεξεργασίας των προγνώσεων (αλλαγή προβολικού συστήματος στο οριζόντιο επίπεδο, παρεμβολή πεδίων σε προκαθορισμένα ισοβαρικά επίπεδα, εξαγωγή προγνωστικών χρονοσειρών, οπτικοποίηση).



Σχήμα Δ.4: Δομοδιάγραμμα της φάσης προεπεξεργασίας των δεδομένων.

Το μοντέλο WRF αποτελεί ένα αξιόπιστο σύστημα με αυξημένες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ για την εκτίμηση ατμοσφαιρικών φαινομένων σε τοπικό επίπεδο (όπως συστήματα κατακόρυφης ανάπτυξης, συνοπτική και υποσυνοπτική κυκλοφορία και φαινόμενα στη meso-α και meso-β χαρακτηριστική κλίμακα κινήσεων). Χρησιμοποιεί εξισώσεις συμπιεσμένου ρευστού διαχωρισμένες σε υδροστατικές και μη-υδροστατικές επιλύσεις.

Η δυναμική του μοντέλου βασίζεται στον πυρήνα NMM (Non-hydrostatic Mesoscale Model), ενώ τα σχήματα φυσικής που περιλαμβάνει είναι:

Για την μικροφυσική εφαρμόζεται το σχήμα Ferrier (Ferrier et al., 2002), Το σχήμα Ferrier είναι ένα μικροφυσικό σχήμα double-moment bulk cloud, το οποίο εκτιμά διάφορες μορφές συμπυκνώματος (condensate) με τη μορφή σύννεφων νερού, μικρών κρυστάλλων πάγου, βροχής και κατακρημνισμάτων σε μορφή πάγου. Τα κατακρημνίσματα σε μορφή πάγου είναι το χιόνι, χαλάζι και το χιονόνερο.

Το ισοζύγιο ακτινοβολιών παραμετροποιείται με το σχήμα του Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL) των Schwarzkopf and Fels (1991), ακολουθεί την απλουστευμένη μέθοδο εναλλαγής των Fels και Schwarzkopf, με τον υπολογισμό σε φασματικές ζώνες που συνδέονται με τις ζώνες απορρόφησης του διοξειδίου του άνθρακα, των υδρατμών, και του όζοντος. Περιλαμβάνει τους συντελεστές εκπομπής διοξειδίου του άνθρακα των Schwarzkopf και Fels, τα αποτελέσματα της επικάλυψης υδρατμών – διοξειδίου του άνθρακα και της διόρθωσης γραμμικού σχήματος Voigt.

Το σχήμα Betts-Miller-Janjic χρησιμοποιείται για τις διεργασίες των νεφών και βροχόπτωσης (Janjic et al., 2001, Janjic, 2003), χρησιμοποιείται για τις διεργασίες των νεφών και βροχόπτωσης (Janjic et al., 2001, Janjic, 2003). Το σχήμα αυτό βασίζεται στο σχήμα κατακόρυφης μεταφοράς των Betts-Miller. Οι αρχικές τροποποιήσεις έγιναν από τον Janjic, και περιλαμβάνουν της εισαγωγής του σχήματος «cloud efficiency» έτσι ώστε να παρέχει έναν επιπλέον βαθμό ελευθερίας κατά τον καθορισμό των κατακόρυφων κατατομών της θερμότητας και της υγρασίας.

Η φυσική του επιφανειακού στρώματος παραμετροποιείται με το σχήμα Monin-Obukhov-Janjic (Zilitinkevich, 1995), Αυτό το σχήμα περιλαμβάνει την παραμετροποίηση του ιξώδους υποστρώματος. Για τις υδάτινες επιφάνειες το ιξώδες υπόστρωμα παραμετροποιείται όπως προτείνεται από τον Janjic. Για την ξηρά, οι επιδράσεις του ιξώδους υποστρώματος λαμβάνονται υπόψη μέσω του ευμετάβλητου ύψους της θερμοκρασίας, και της υγρασίας όπως προτείνεται από τον Zilitinkevitch (1995). Η διόρθωση (του) Beljaars (1994) εφαρμόζεται έτσι ώστε να αποφευχθούν ιδιομορφίες σε περιπτώσεις ασταθούς επιφανειακού στρώματος και άπνοιας. Οι επιφανειακές ροές υπολογίζονται με μία επαναληπτική μέθοδο.

Για την τυρβώδη κινητική ενέργεια του πλανητικού οριακού στρώματος χρησιμοποιείται το σχήμα Mellor-Yamada-Janjic (Mellor and Yamada, 1982; Janjic, 1996) και

Υπομοντέλο εδάφους είναι το ενοποιημένο NOAH (Chen and Dudhia, 2001) σε 4 υπεδάφια στρώματα (0.10, 0.40, 1.0 και 2.0 m). Υπολογίζεται η επιφανειακή και υπεδάφια απορροή καθώς και οι ροές θερμότητας και υγρασίας σε 4 υπεδάφια στρώματα μέχρι το βάθος των 2 μέτρων.

Παράρτημα Ε: Δείγμα πρόγνωσης από τα τρία συστήματα πρόγνωσης καιρού

1. Σύστημα του Χαροκόπειου Πανεπιστημίου Αθηνών

Mornos 22.198 38.494

dd/mm/yyyy UTC t2(C) msl(hpa) rh2(%) w10(ms) w10(d) ar(mm) as(mm)

09/02/2013	12	6.93	1011.62	78.90	4.78	227.05	0.00	0.00
09/02/2013	15	5.22	1010.99	82.84	2.94	277.51	1.21	0.00
09/02/2013	18	2.50	1011.89	100.00	1.40	248.87	0.96	0.00
09/02/2013	21	3.62	1011.50	99.92	4.66	249.18	1.94	0.00
10/02/2013	00	3.71	1011.01	99.54	4.84	242.48	0.13	0.00
10/02/2013	03	1.80	1011.53	100.00	1.87	280.78	1.14	0.00
10/02/2013	06	1.16	1012.38	100.00	1.72	310.14	0.00	0.00
10/02/2013	09	4.95	1013.10	61.50	5.16	274.52	0.00	0.00
10/02/2013	12	6.53	1012.52	57.62	5.67	274.31	0.00	0.00
10/02/2013	15	5.80	1012.31	55.13	3.62	263.04	0.00	0.00
10/02/2013	18	3.87	1011.87	61.30	1.61	328.01	0.00	0.00
10/02/2013	21	3.83	1011.19	60.08	1.78	347.25	0.00	0.00
11/02/2013	00	0.73	1011.52	96.76	0.73	327.95	1.13	0.17
11/02/2013	03	0.62	1012.14	93.35	1.06	317.37	1.92	1.93
11/02/2013	06	0.01	1014.16	71.47	1.95	321.29	0.00	0.00
11/02/2013	09	3.81	1015.14	46.71	5.93	307.22	0.00	0.00
11/02/2013	12	5.10	1015.86	48.76	6.07	298.10	0.00	0.00
11/02/2013	15	4.15	1017.69	52.33	5.41	285.29	0.00	0.00
11/02/2013	18	0.93	1019.57	66.74	2.51	339.85	0.00	0.00
11/02/2013	21	1.12	1019.86	54.34	2.21	336.85	0.00	0.00
12/02/2013	00	1.58	1019.49	53.34	1.46	336.98	0.00	0.00

2. Σύστημα του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών

14943	09/02/2013 09:00	3.8	93	250	3	1010.4	6	2.0
14943	09/02/2013 12:00	4.5	90	241	2	1010.8	6	1.9
14943	09/02/2013 15:00	4.4	93	231	2	1010.9	6	2.5
14943	09/02/2013 18:00	4.0	97	214	2	1011.2	6	2.9
14943	09/02/2013 21:00	4.6	99	229	3	1010.5	6	5.4
14943	10/02/2013 00:00	3.4	96	266	2	1011.5	10	3.2
14943	10/02/2013 03:00	3.4	100	246	2	1011.6	10	0.9
14943	10/02/2013 06:00	2.6	82	284	2	1012.4	10	1.3
14943	10/02/2013 09:00	3.8	70	272	3	1012.6	0	0.0
14943	10/02/2013 12:00	4.9	62	263	3	1012.5	1	0.0
14943	10/02/2013 15:00	3.1	79	261	2	1012.9	2	0.0
14943	10/02/2013 18:00	1.8	88	280	2	1013.0	3	0.0
14943	10/02/2013 21:00	1.1	88	350	1	1011.8	3	0.0
14943	11/02/2013 00:00	0.7	94	345	1	1012.2	7	4.6
14943	11/02/2013 03:00	-0.8	96	314	1	1013.7	11	0.6
14943	11/02/2013 06:00	-1.5	88	330	2	1015.1	1	0.0
14943	11/02/2013 09:00	1.9	74	283	2	1015.6	0	0.0
14943	11/02/2013 12:00	3.6	57	272	3	1016.0	0	0.0
14943	11/02/2013 15:00	2.6	60	265	2	1017.4	0	0.0
14943	11/02/2013 18:00	0.6	71	313	2	1018.7	2	0.0
14943	11/02/2013 21:00	0.5	65	328	2	1019.4	3	0.0
14943	12/02/2013 00:00	1.0	54	333	2	1019.1	3	0.0

3. Σύστημα του Ελληνικού Κέντρου Θαλάσσιων Ερευνών

09/02/13 00	3	1	183	1008	99	1
09/02/13 01	3	1	198	1009	99	1
09/02/13 02	3	1	172	1010	99	0
09/02/13 03	3	1	190	1010	99	0
09/02/13 04	3	2	210	1010	99	0
09/02/13 05	3	2	216	1010	99	1
09/02/13 06	3	3	222	1011	99	0
09/02/13 07	4	1	252	1011	98	0
09/02/13 08	5	1	252	1012	98	0
09/02/13 09	5	1	228	1012	97	1
09/02/13 10	5	1	227	1013	93	2
09/02/13 11	6	2	234	1012	90	0
09/02/13 12	7	3	220	1011	90	1
09/02/13 13	7	4	225	1011	88	1
09/02/13 14	7	4	222	1011	87	0
09/02/13 15	7	4	212	1012	87	0
09/02/13 16	6	3	204	1011	95	0
09/02/13 17	4	3	219	1011	99	3
09/02/13 18	4	4	227	1012	98	4
09/02/13 19	3	2	222	1013	99	2
09/02/13 20	3	2	205	1013	99	1
09/02/13 21	3	2	208	1013	99	2
09/02/13 22	3	2	213	1013	99	2
09/02/13 23	3	2	213	1013	99	1
10/02/13 00	3	2	217	1013	99	1
10/02/13 01	3	1	216	1012	99	1
10/02/13 02	3	1	214	1012	99	1
10/02/13 03	3	1	207	1012	99	0
10/02/13 04	3	1	204	1012	99	0
10/02/13 05	3	2	201	1012	99	1
10/02/13 06	3	5	210	1012	99	2
10/02/13 07	3	3	235	1013	98	2
10/02/13 08	4	2	245	1013	96	1
10/02/13 09	5	1	257	1013	93	0
10/02/13 10	6	2	272	1013	89	0
10/02/13 11	7	4	267	1012	77	0
10/02/13 12	7	4	267	1012	75	0
10/02/13 13	6	4	269	1012	73	0
10/02/13 14	6	4	270	1012	71	0
10/02/13 15	6	3	271	1012	70	0
10/02/13 16	5	2	270	1012	76	0
10/02/13 17	4	2	267	1013	76	0
10/02/13 18	4	2	270	1013	79	0
10/02/13 19	3	2	280	1013	82	0
10/02/13 20	2	2	283	1014	83	0
10/02/13 21	2	2	289	1014	84	0
10/02/13 22	1	2	307	1014	86	0
10/02/13 23	1	2	328	1014	85	0

11/02/13 00	1	2	338	1013	86	0
11/02/13 01	1	2	330	1013	87	0
11/02/13 02	1	1	312	1013	88	0
11/02/13 03	1	0	321	1013	88	0
11/02/13 04	1	0	291	1014	91	0
11/02/13 05	0	3	245	1014	99	2
11/02/13 06	0	3	256	1015	99	1
11/02/13 07	1	3	266	1016	99	0
11/02/13 08	3	3	272	1016	96	0
11/02/13 09	4	3	274	1016	84	0
11/02/13 10	4	3	272	1017	81	0
11/02/13 11	5	2	264	1017	84	0
11/02/13 12	5	2	250	1016	86	1
11/02/13 13	5	2	237	1016	90	1
11/02/13 14	5	4	238	1016	91	1
11/02/13 15	5	4	244	1017	91	0
11/02/13 16	4	3	272	1018	95	0
11/02/13 17	3	2	293	1018	97	0
11/02/13 18	2	2	303	1018	95	0
11/02/13 19	2	2	317	1019	96	0
11/02/13 20	1	2	331	1020	97	0
11/02/13 21	1	2	346	1019	99	0
11/02/13 22	1	2	355	1020	99	0
11/02/13 23	1	2	2	1020	99	0
12/02/13 00	1	2	9	1020	99	0