

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών  
Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος



Ανάπτυξη μοντέλου υδρομετεωρολογικής  
πρόγνωσης στη χειμαρρική λεκάνη του  
Σαρανταπόταμου

Ζαρκαδούλας Θεόδωρος-Πατάπιος

Επιβλέπων: Δ. Κουτσογιάννης, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2014

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών  
Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος

Ανάπτυξη μοντέλου υδρομετεωρολογικής πρόγνωσης  
στη χειμαρρική λεκάνη του Σαρανταπόταμου

Ζαρκαδούλας Θεόδωρος-Πατάπιος

Επιβλέπων: Δ. Κουτσογιάννης, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2014



Το παρόν έγγραφο υπάγεται στην άδεια (CC BY-NC-SA 3.0)

Ζαρκαδούλας Άκης, 2014

*«Στα ποτάμια το νερό που αγγίζεις είναι  
το τελευταίο από αυτό που πέρασε και  
το πρώτο από αυτό που έρχεται:  
το ίδιο και με το παρόν»  
Leonardo da Vinci*



## Πρόλογος

Φτάνοντας στην ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας είναι ιδιαίτερα σημαντική η «απόδοση» ευχαριστιών σε εκείνα τα πρόσωπα που θεωρώ ότι συνέβαλαν καθοριστικά για την επίτευξη του στόχου αυτού.

Πρώτα από όλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της εργασίας, κ. Δημήτρη Κουτσογιάννη, τον άνθρωπο που μέσα από τη διδασκαλία του με ενέπνευσε να ασχοληθώ με το σπουδαίο αντικείμενο της Υδρολογίας και να προσεγγίσω τελείως διαφορετικά από ότι πίστευα το αντικείμενο του Πολιτικού Μηχανικού. Ένα μεγάλο ευχαριστώ και για την τεράστια συμβολή του στη δημιουργία και τη συντήρηση της επιστημονικής ομάδας της Ιτίας και κυρίως του ιστότοπού της, ο οποίος αποτελεί έναν επιστημονικό θησαυρό, με ανοιχτή πρόσβαση στον οποιονδήποτε ενδιαφερόμενο, μακριά από εμπορευματικές σχέσεις, κάτι που σπανίζει ιδιαίτερος στις μέρες μας.

Ένα τεράστιο ευχαριστώ στον Ανδρέα Ευστρατιάδη, Δρ. Πολιτικό Μηχανικό, η συμβολή του οποίου για την ολοκλήρωση της εργασίας ήταν καθοριστική. Η καθημερινή επαφή μαζί του, η ανταλλαγή απόψεων και η κρίσιμη βοήθειά σε ορισμένες περιπτώσεις έκαναν ακόμα πιο ευχάριστη την ενασχόλησή μου με την εργασία και το τελικό αποτέλεσμα ποιοτικά αναβαθμισμένο. Η θετική και άμεση ανταπόκρισή του σε οποιαδήποτε απορία δικιά μου ή άλλων συναδέλφων είναι πραγματικά αξιοσημείωτη. Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης τον Αντώνη Κουκουβίνο για τη σημαντική συμβολή του σε όλη τη διάρκεια της εργασίας αλλά κυρίως σε ότι αφορούσε τα γεωγραφικά δεδομένα και επεξεργασίες.

Πέραν όσων συνέβαλαν με τον ένα ή τον άλλο τρόπο στην ολοκλήρωση αυτής της εργασίας, κλείνοντας ένα κύκλο στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους συντρόφους και φίλους μου από τον Εγκέλαδο Πολιτικών Μηχανικών και από την APEN, και κυρίως τους Παναγιώτη, Θεωρή και Νάντια για τα όσα ζήσαμε επί έξι χρόνια καθημερινά και κυρίως γιατί μάθαμε μαζί να δρούμε συλλογικά σε κοινωνικό, σε πολιτικό και επιστημονικό επίπεδο και να αγωνιζόμαστε για να πάρουμε όσα μας ανήκουν. Ευχαριστώ και όλα τα «παιδιά» του [MQN](#), γιατί ξεκίνησαν μια δύσκολη προσπάθεια διάχυσης της ενημέρωσης εντός του φοιτητικού συλλόγου, τα κατάφεραν και συνεχίζουν να αποδεικνύουν την αξία της συνεργασίας και της αλληλοβοήθειας.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου, και ιδιαίτερα στη μητέρα μου, Παρασκευή, που με στήριξαν και με στηρίζουν συνεχώς καθώς και στη Μαρία για τη συνεχή της υποστήριξη καθόλη τη διάρκεια της εργασίας.

Ζαρκαδούλας Άκης, Ιούλιος 2014



# ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>1</b>
1.1 Αντικείμενο της εργασίας.....	1
1.2 Σκοπός της εργασίας.....	2
1.3 Διάρθρωση της εργασίας.....	2
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ.....</b>	<b>4</b>
2.1 Εισαγωγή.....	4
2.2 Μηχανισμοί δημιουργίας κατακρημνισμάτων.....	5
2.3 Μέθοδοι πρόγνωσης καιρού.....	7
2.3.1 Εισαγωγή.....	7
2.3.2 Αριθμητικά μοντέλα πρόγνωσης καιρού.....	8
2.3.3 Μέθοδοι Ensemble.....	12
2.3.4 Πρόγνωση κατακρήμνισης.....	14
2.4 Πλημμύρες.....	15
2.4.1 Ορισμός και είδη πλημμύρας. Αίτια και επιπτώσεις.....	15
2.4.2 Πλημμύρες στον ελλαδικό χώρο.....	17
2.5 Υδρολογικά μοντέλα.....	19
2.5.1 Ορισμός-Διατύπωση.....	19
2.5.2 Πεδίο εφαρμογής.....	20
2.5.3 Κατηγοριοποίηση υδρολογικών μοντέλων.....	21
2.5.4 Ανάπτυξη υδρολογικών μοντέλων για πλημμυρικές μελέτες.....	22
2.6 Συστήματα πλημμυρικής πρόγνωσης.....	23
2.6.1 Εισαγωγή. Συστήματα πλημμυρικής πρόγνωσης μικρής κλίμακας.....	23
2.6.2 Συστήματα πλημμυρικής πρόγνωσης μεγάλης κλίμακας. Η περίπτωση του EFAS (European Flood Alert System).....	26
2.6.3 Πρόγνωση αστραπιαίων πλημμύρων (flash floods).....	30
2.6.4 Η αξιοπιστία των συστημάτων πλημμυρικής πρόγνωσης.....	33
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....</b>	<b>37</b>
3.1 Περιοχή μελέτης: Η λεκάνη του Σαρανταπόταμου.....	37
3.1.1 Η ευρύτερη περιοχή του Θριασίου Πεδίου.....	37
3.1.2 Ιστορικό πλημμυρών στο Θριασίο Πεδίο.....	39
3.1.3 Το ανάντη τμήμα της λεκάνης του Σαρανταπόταμου: Φυσιογραφικά χαρακτηριστικά.....	41
3.2 Συλλογή δεδομένων.....	46
3.2.1 Υδρομετεωρολογικά δεδομένα.....	46
3.2.2 Μετεωρολογικές προγνώσεις.....	57
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΤΟΥ ΣΑΡΑΝΤΑΠΟΤΑΜΟΥ.....</b>	<b>61</b>
4.1 Το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ.....	61
4.2 Σχηματοποίηση υδρολογικού συστήματος - Ανάλυση σε περιβάλλον MapWindow GIS.....	64



4.2.1 Εισαγωγή.....	64
4.2.2 Η εκτέλεση της εφαρμογής MW-HYDROGEIOS βήμα προς βήμα.....	65
4.3 Προσομοίωση υδρολογικού συστήματος – Το περιβάλλον HYDROGEIOS.....	70
4.3.1 Δομή επιφανειακού συστήματος.....	71
4.3.2 Δομή υπόγειου συστήματος.....	75
4.3.3 Μοντέλο διόδευσης.....	79
4.3.4 Προετοιμασία και εισαγωγή χρονοσειρών.....	81
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ – ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗ ΛΕΚΑΝΗ ΤΟΥ ΣΑΡΑΝΤΑΠΟΤΑΜΟΥ.....</b>	<b>83</b>
5.1 Η έννοια της βαθμονόμησης.....	83
5.2 Η τοποθέτηση του προβλήματος βαθμονόμησης ως πρόβλημα βελτιστοποίησης.....	85
5.3 Κριτήρια καλής προσαρμογής.....	87
5.3.1 Αποτελεσματικότητα.....	87
5.3.2 Μεροληψία.....	89
5.3.3 Σφάλμα μηδενικών παροχών.....	90
5.3.4 Σφάλμα τάσεων.....	90
5.4 Διαδικασία Βαθμονόμησης.....	93
5.4.1 Ορισμός χρονικών περιόδων.....	93
5.4.2 Παράμετροι – Όρια παραμέτρων.....	94
5.4.3 Αρχικές συνθήκες.....	94
5.4.4 Ορισμός στοχικής συνάρτησης.....	96
5.4.5 Βαθμονόμηση παραμέτρων.....	96
5.5 Παρουσίαση αποτελεσμάτων.....	98
5.5.1 Στοχική συνάρτηση – Κριτήρια καλής προσαρμογής.....	98
5.5.2 Διαγράμματα προσομοιωμένων χρονοσειρών απορροής.....	99
5.5.3 Διαγράμματα διακύμανσης στάθμης υπόγειων υδάτων.....	103
5.5.4 Υδατικό ισοζύγιο λεκάνης.....	104
5.5.5 Τιμές παραμέτρων.....	107
5.5.6 Αποτελέσματα με νέα στοχική συνάρτηση.....	111
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΠΡΟΓΝΩΣΕΩΝ.....</b>	<b>119</b>
6.1 Εισαγωγή. Περιγραφή του επιλεγμένου επεισοδίου.....	119
6.2 Σημειακή ανάλυση των προγνώσεων βροχόπτωσης με βάση τους μετεωρολογικούς σταθμούς.....	122
6.2.1 Εισαγωγή.....	122
6.2.2 Ανάλυση με μέσο όρο των γειτονικών διακριτών σημείων.....	124
6.2.3 Ανάλυση με βελτιστοποίηση της συμμετοχής των γειτονικών διακριτών σημείων.....	129
6.2.4 Ανάλυση με διαδοχικούς μέσους όρους των υπολογισμένων προγνώσεων.....	137
6.3 Επιφανειακή ανάλυση των προγνώσεων βροχόπτωσης με βάση όλα τα διακριτά σημεία της περιοχής μελέτης.....	143
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΗΣ ΠΡΟΓΝΩΣΗΣ.....</b>	<b>147</b>
7.1 Εισαγωγή. Δημιουργία χρονοσειρών πρόγνωσης.....	147

7.2 Αποτελέσματα απορροής με σημειακή ολοκλήρωση των προγνώσεων.....	148
7.3 Αποτελέσματα απορροής με επιφανειακή ολοκλήρωση των προγνώσεων.....	158
7.4 Ανακεφαλαίωση. Υπόδειξη μεθοδολογίας πλημμυρικής πρόγνωσης.....	167
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>171</b>
8.1 Συμπεράσματα.....	171
8.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	173
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....</b>	<b>175</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΜΟΝΑΔΩΝ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ SCS-CN.....</b>	<b>181</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΩΝ ΕΞΑΤΜΟΔΙΑΠΝΟΗΣ....</b>	<b>191</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΟΔΗΓΙΑΣ 2007/60/ΕΚ ΓΙΑ ΤΙΣ ΠΛΗΜΜΥΡΕΣ.....</b>	<b>195</b>

## Περίληψη

Η έρευνα σχετικά με την πλημμυρική πρόγνωση στην Ελλάδα είναι ιδιαίτερα περιορισμένη. Στις περισσότερες πλημμυρικές μελέτες χρησιμοποιούνται σχέσεις και μεθοδολογίες που έχουν αναπτυχθεί σε λεκάνες του εξωτερικού. Στην παρούσα εργασία επιχειρείται η προσέγγιση μιας μεθοδολογίας για την πρόγνωση πλημμύρας στη χειμαρρική λεκάνη του Σαρανταπόταμου, βασισμένη σε περιοχικές σχέσεις για τα ελληνικά δεδομένα. Συγκεκριμένα, αναπτύσσεται αρχικά μέσω του μοντέλου υδρολογικής προσομοίωσης ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ, το οποίο έχει αναπτυχθεί από την ερευνητική ομάδα της Ιτίας για τις ελληνικές λεκάνες απορροής, ένα βέλτιστο σετ φυσικά τεκμηριωμένων παραμέτρων για τη λεκάνη του Σαρανταπόταμου, με βάση την κατάλληλη σχηματοποίηση του επιφανειακού και υπόγειου συστήματός της. Το σετ αυτό προκύπτει μέσω βαθμονόμησης της λεκάνης του Σαρανταπόταμου, για δεδομένα βροχόπτωσης και απορροής από τους εγκατεστημένους μετεωρολογικούς και υδρομετρικούς σταθμούς για μια περίοδο 2,5 ετών και προσομοιώνει αποτελεσματικά τις παρατηρημένες χρονοσειρές απορροής και ειδικά τις μέγιστες τιμές τους. Στη συνέχεια, λαμβάνονται 8 σενάρια πρόγνωσης βροχόπτωσης από το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, για ένα επιλεγμένο επεισόδιο στη λεκάνη του Σαρανταπόταμου, τα οποία αναλύονται και συγκρίνονται με τις παρατηρημένες τιμές βροχόπτωσης για το ίδιο χρονικό διάστημα. Οι προγνώσεις βροχόπτωσης ανάγονται σε προγνώσεις για τη βροχόπτωση των μετεωρολογικών σταθμών (σημειακά), μέσω βελτιστοποίησης της συμμετοχής των γειτονικών στους σταθμούς διακριτών τους σημείων και σε προγνώσεις για τις υπολεκάνες (επιφανειακά), με μέσο όρο των προγνώσεων όλων των διακριτών σημείων που βρίσκονται εντός τους. Επιπλέον, παράγονται άλλα 7 σενάρια πρόγνωσης βροχόπτωσης για κάθε μεθοδολογία, μέσω διαδοχικών μέσων όρων των προηγούμενων προγνώσεων. Τέλος, τα σενάρια πρόγνωσης που προκύπτουν εισάγονται ως δεδομένα βροχόπτωσης στο μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ, ώστε να παραχθούν οι χρονοσειρές απορροής με βάση τις προγνώσεις, οι οποίες συγκρίνονται μεταξύ τους και με τις παρατηρημένες τιμές, ώστε να υποδειχθεί η καταλληλότερη μεθοδολογία πρόγνωσης της απορροής και κατά συνέπεια και της πλημμύρας.

## Abstract

The research on flood forecasting in Greece is very limited. Most flood studies use relationships and methodologies developed in basins abroad. This paper attempts to approximate a methodology to flood forecasting in Sarantapotamos ephemeral basin, based on regional relations for the greek meteorological and climatological conditions. Specifically, it is firstly developed by the hydrological simulation model HYROGEIOS, which is developed by the research group ITIA especially for Greek basins, an optimal set of physical-based parameters for the Sarantapotamos basin, using an appropriate shaping of surface and groundwater system of the basin. This set is obtained by calibrating the basin Sarantapotamos on rainfall and runoff data from installed meteorological and hydrometric stations for a period of 2.5 years, and simulates efficiently the observed runoff time series and especially their maximum values. Then, eight forecasting rainfall scenarios are obtained by the National Observatory of Athens, for a selected rain episode in the basin of Sarantapotamos, which are analyzed and compared with the observed values of rainfall for the same period. The scenarios create forecasts for the rainfall in the installed meteorological stations through optimization of the participation of the nearest to the stations grid points and also rainfall forecasts for sub-basins, using the average forecast of all grid points within their area. In addition, 7 further scenarios of rainfall forecasts are produced for each methodology, through successive averages of previous forecasts. Finally, the created forecasting scenarios are introduced as rainfall data to hydrological model HYDROGEIOS, to produce the runoff time series based forecasts, which are compared with the observed values in order to indicate the most appropriate methodology for runoff and consequently for flood forecasting.

— ( x ) —

# **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:** **ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

## **1.1 Αντικείμενο της εργασίας**

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τη δυνατότητα ανάπτυξης μοντέλου υδρομετεωρολογικής πρόγνωσης σε λεκάνες χειμαρρικής διάταξης. Η εφαρμογή γίνεται στη λεκάνη απορροής του Ελευσίνιου Σαρανταπόταμου. Για τη μοντελοποίηση της λεκάνης χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ, που έχει αναπτυχθεί για τη προσομοίωση των υδρολογικών διεργασιών από την ερευνητική ομάδα της Ιτιάς, μέσω χρήσης ιστορικών χρονοσειρών βροχόπτωσης και απορροής για την εύρεση ενός βέλτιστου σετ παραμέτρων. Στο υδρολογικό μοντέλο που αναπτύσσεται εισάγονται ως δεδομένα, προγνώσεις βροχόπτωσης για ένα επιλεγμένο καταγεγραμμένο επεισόδιο βροχής. Οι προγνώσεις αυτές έχουν επεξεργαστεί με διάφορες μεθοδολογίες με σημειακή και επιφανειακή αναγωγή τους. Τα αποτελέσματα του υδρολογικού μοντέλου, που αποτελούν της προγνώσεις απορροής συγκρίνονται μεταξύ τους ανάλογα με ποια μεθοδολογία έχουν παραχθεί, καθώς και με τις παρατηρημένες τιμές απορροής, ώστε να υποδειχθεί μια μεθοδολογία υδρομετεωρολογικής πρόγνωσης.

## **1.2 Σκοπός της εργασίας**

Η πλημμυρική πρόγνωση στην Ελλάδα είναι ένας τομέας που έχει αναπτυχθεί δυσανάλογα με τις αρνητικές συνέπειες που έχουν επιφέρει οι πλημμύρες στην ελληνική κοινωνία και οικονομία. Η ανάγκη για στοιχειώδη πρόγνωση των πλημμυρικών φαινομένων, συγκεκριμένα για την περιφέρεια της Αττικής, όπου το πρόβλημα είναι εντονότερο για γεωμορφολογικούς, μετεωρολογικούς αλλά και ανθρωπογενείς λόγους (λόγω της στρεβλής αστικής ανάπτυξης), καθίσταται εντονότερη, ειδικά σε περιοχές με έντονη βιομηχανική ανάπτυξη, όπως είναι η ευρύτερη περιοχή του Θριάσιου Πεδίου, όπου βρίσκεται ο Σαρανταπόταμος. Επιπλέον, η ενασχόληση με τη δυνατότητα πλημμυρικής πρόγνωσης σε ελληνικές λεκάνες και ειδικά σε εκείνες με εφήμερη ροή, είναι ουσιαστικά μία παραπάνω ευκαιρία μελέτης των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών των ελληνικών λεκανών, ανάπτυξης του δικτύου συλλογής δεδομένων σε αυτές και κατάλληλης μοντελοποίησης τους, ώστε οι μελέτες αντιπλημμυρικών έργων αλλά και συνολικά οι υδρολογικές μελέτες να βασίζονται πλέον σε τεκμηριωμένα μοντέλα και μεθοδολογίες προσαρμοσμένα σε ελληνικά δεδομένα και όχι σε αντίστοιχα μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί για λεκάνες απορροής στο εξωτερικό.

## **1.3 Διάρθρωση της εργασίας**

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται η διαδικασία ανάπτυξης συστημάτων πλημμυρικής πρόγνωσης, μέσω παραδειγμάτων τέτοιων συστημάτων, αναλύοντας παράλληλα τα βασικά στοιχεία ενός τέτοιου συστήματος, δηλαδή τις μετεωρολογικές προγνώσεις και τα υδρολογικά μοντέλα.

Στο Κεφάλαιο 3 δίδονται οι απαραίτητες πληροφορίες για την περιοχή μελέτης, το ανάντη τμήμα της λεκάνης του Σαρανταπόταμου και περιγράφεται η διαδικασία συλλογής υδρολογικών και μετεωρολογικών δεδομένων.

Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφεται η διαδικασία προσομοίωσης μέσω της σχηματοποίησης της λεκάνης του Σαρανταπόταμου με το υδρολογικό μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ, για το οποίο δίδονται οι βασικές του πτυχές.

Στο Κεφάλαιο 5 αναπτύσσεται η διαδικασία βαθμονόμησης των παραμέτρων της λεκάνης μέσω του υδρολογικού μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ και παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματά της.

Στο Κεφάλαιο 6 παρατίθενται οι απαραίτητες πληροφορίες για το επεισόδιο βροχής για το οποίο πραγματοποιήθηκε η πλημμυρική πρόγνωση, καθώς και όλες οι μεθοδολογίες επεξεργασίας των δεδομένων πρόγνωσης με σημειακή και επιφανειακή ανάλυσή τους.

Στο Κεφάλαιο 7 παρουσιάζονται τα τελικά αποτελέσματα της παρούσας εργασίας, δηλαδή οι προγνώσεις απορροής και αναλύονται με βάση τις ιστορικές παρατηρήσεις με όλες τις μεθοδολογίες που έχουν παραχθεί και υποδεικνύεται η καλύτερη μεθοδολογία υδρομετεωρολογικής πρόγνωσης.

Στο Κεφάλαιο 8 περιλαμβάνονται τα βασικά συμπεράσματα της παρούσας εργασίας και παρατίθενται ορισμένες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Στο Παράρτημα Α αναπτύσσεται η μεθοδολογία εξαγωγής των Μονάδων Υδρολογικής Απόκρισης, απαραίτητων για τη σχηματοποίηση της λεκάνης απορροής, μέσω του συντελεστή καμπύλης αναφοράς CN της SCS.

Στο Παράρτημα Β παρατίθεται η μεθοδολογία υπολογισμού των χρονοσειρών εξατμοδιαπνοής, απαραίτητο δεδομένο εισόδου για τη μοντελοποίηση της λεκάνης του Σαρανταπόταμου.

Στο Παράρτημα Γ δίδονται οι βασικές πληροφορίες αναφορικά με την Οδηγία Πλαίσιο για τις Πλημμύρες 2007/60/ΕΚ.



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:** **ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ**

### **2.1. Εισαγωγή**

Διαισθητικά και μόνο κατανοεί κανείς τη σημασία την οποία ενδεχομένως έχει η πρόγνωση της κατακρήμνισης για την *πλημμυρική πρόγνωση* (flood prediction). Η πρόγνωση των πλημμυρικών φαινομένων είναι προφανώς άμεσα συνδεδεμένη με την πρόγνωση της βροχόπτωσης, η οποία διενεργείται με τη χρήση μοντέλων πρόγνωσης καιρού (βλ. 2.3). Όμως, πολλές φορές, κυρίως σε καθημερινό επίπεδο ενημέρωσης, δίδεται λανθασμένα η εντύπωση ότι μόνον οι μεγάλες σε διάρκεια ή σε ύψος βροχοπτώσεις είναι ικανές να οδηγήσουν σε πλημμύρες.

Αυτό συμβαίνει διότι παραγνωρίζεται το γεγονός λειτουργίας του εδάφους σε επίπεδο λεκάνης απορροής ως μιας δεξαμενής νερού, γεγονός που σημαίνει ότι η «υπερχείλιση» της (δηλαδή η πλημμύρα) εξαρτάται τόσο από το «αν είναι ήδη γεμάτη» (δηλαδή από την βροχόπτωση των προηγούμενων ημερών), όσο και από το «μηχανισμό λειτουργίας» της (δηλαδή από τους παράγοντες που επηρεάζουν τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα και την επιφανειακή απορροή και εξαρτώνται από τον τύπο εδάφους). Άρα, εξίσου σημαντικό με την πρόγνωση της κατακρήμνισης για την πρόγνωση των πλημμυρών είναι τόσο η γνώση των προηγούμενων μετεωρολογικών παρατηρήσεων βροχόπτωσης, όσο κυρίως οι υδρολογικοί μηχανισμοί της υπό πλημμυρική πρόγνωση περιοχής, οι οποίοι προσομοιώνονται με τη δημιουργία και τη χρήση κατάλληλων υδρολογικών μοντέλων (hydrological models) (βλ. 2.5).

Με βάση τα παραπάνω σε ένα σύστημα πρόγνωσης πλημμύρας μετεωρολογικές παρατηρήσεις και προγνώσεις χρησιμοποιούνται μαζί με υδρολογικά και υδραυλικά μοντέλα προσομοίωσης της περιοχής μελέτης, για την ολοκληρωμένη πρόγνωση πλημμυρικών φαινομένων (Wetterhall et al, 2013). Έτσι, τα αποτελέσματα ενός προγνωστικού μοντέλου καιρού σε συνδυασμό με ιστορικές παρατηρήσεις βροχόπτωσης και απορροής χρησιμοποιούνται ως είσοδοι σε ένα υδρολογικό μοντέλο μιας περιοχής, για την πλημμυρική πρόγνωση της. Προφανώς, η αβεβαιότητα σε ένα σύστημα πρόγνωσης καιρού είναι συνάρτηση τόσο της αβεβαιότητας των μετεωρολογικών προγνώσεων της βροχόπτωσης όσο και εκείνης του υδρολογικού μοντέλου, δηλαδή το πόσο αποτελεσματικά προσομοιώνει τους μηχανισμούς μιας υπό μελέτη περιοχής.

## **2.2 Μηχανισμοί δημιουργίας κατακρημνισμάτων**

Οι κατακρημνίσεις (ή υετός, *Αγγ.: precipitation*) είναι αποτέλεσμα μιας πολύπλοκης διεργασίας, η οποία συνίσταται στην ανύψωση την ψύξη και τη συμπύκνωση των υδρατμών που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα. Πιο αναλυτικά, εξεταζόμενες από φυσικής απόψεως, οι κατακρημνίσεις είναι αποτέλεσμα της διαδοχής των παρακάτω σταδίων (Μαμάσης & Κουτσογιάννης, 2000):

*i) Δημιουργία θερμοδυναμικής κατάστασης κορεσμού των υδρατμών (σημείου δρόσου):*

Είναι αποτέλεσμα της διόγκωσης και ψύξης εμπλουτισμένου σε υγρασία αέρα κατά την ανοδική πορεία του. Η ανοδική κίνηση του αέρα, η οποία είναι αποτέλεσμα των διαφορών πίεσης και θερμοκρασίας μεταξύ αέριων μαζών στην τροπόσφαιρα, ευνοείται σε συνθήκες απότομης μείωσης της θερμοκρασίας του αέρα σε σχέση με το υψόμετρο.

*ii) Συμπύκνωση των υδρατμών:*

Οι υδρατμοί συμπυκνώνονται σε λεπτά σταγονίδια μέσης διαμέτρου 10 έως 30  $\mu\text{m}$  (υγρή φάση) ή μικρούς παγοκρυστάλλους (στερεά φάση), ανάλογα με τη θερμοκρασία που επικρατεί. Απαραίτητη είναι η διεργασία της πυρηνοποίησης (*nucleation process*), δηλαδή της δημιουργίας διεπιφάνειας μεταξύ της αέριας και της υγρής (ή στερεάς) φάσης του νερού, μέσω ειδικών σωματιδίων (πυρήνων) που βρίσκονται σε συνθήκες αιώρησης στην ατμόσφαιρα. Αποτέλεσμα της διεργασίας αυτής είναι η δημιουργία σύννεφων.

*iii) Αύξηση της μάζας των σταγόνων (ή των κρυστάλλων πάγου) σε μεγέθη κατακρημνίσματα:*

Η αύξηση μπορεί να είναι μέχρι και  $10^6$  φορές και πραγματοποιείται μέχρις ότου οι δυνάμεις βαρύτητας υπερνικήσουν την αιώρηση που τη δημιουργεί η τυρβώδης διάχυση. Η

αύξηση αυτή πραγματοποιείται μέσω της διεργασίας της σύμφυσης νεφοσταγονιδίων (*coalescence process*) στα θερμά νέφη, όπου μέσω του πολλαπλασιασμού των συγκρούσεων μεταξύ των νεφοσταγονιδίων, δημιουργούνται ολοένα και μεγαλύτερες σταγόνες, που τελικά οδηγούν σε κατακρήμνισμα μεγέθη. Αντίστοιχα, στα ψυχρά νέφη, συντελείται η διεργασία της ανάπτυξης παγοκρυστάλλων (*ice crystal process*), όπου η μάζα των παγοκρυστάλλων αυξάνει με τη συνεχή απορρόφηση των γειτονικών υγρών σταγόνων.

Απαραίτητη επίσης προϋπόθεση για την κατακρήμνιση είναι η συνεχής τροφοδότηση του συστήματος με νέους υδρατμούς ώστε να συντελούνται οι διεργασίες των τριών προηγούμενων βημάτων. Είναι δυνατό να πραγματοποιηθούν σε ένα βαθμό τα στάδια (i) έως (iii) και να μη συμβεί κατακρήμνιση οποιασδήποτε μορφής.

Επιπλέον, οι κατακρήμνισεις, εντασσόμενες σε ένα μετεωρολογικό πλαίσιο επαγωγής των παραπάνω κινήσεων και τελικά δημιουργίας κατακρήμνισης, είναι αποτέλεσμα διάφορων παραγόντων. Πιο συγκεκριμένα, ανάλογα με το μηχανισμό ψύξης μπορεί να δημιουργηθούν κατακρήμνισεις τριών ειδών (Κουτσογιάννης, 1999):

i) *Μεταγωγικές (convective) κατακρήμνισεις:*

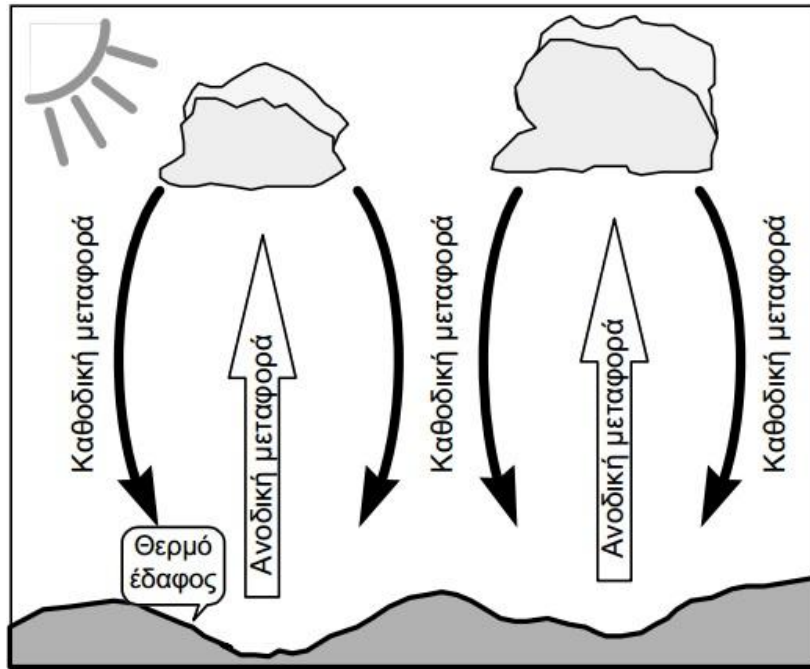
Κυριαρχεί η κατακόρυφη κίνηση του αέρα που προκαλείται λόγω της θέρμανσης της επιφάνειας του εδάφους και η δημιουργία της κατακρήμνισης είναι ταχύτητα (τυπικός χρόνος ανάπτυξης 45 min), ενώ η ανάπτυξη της κατακρήμνισης ξεκινά από τη βάση του σύννεφου (Σχήμα 2.1).

ii) *Διαστρωματικές (stratiform) κατακρήμνισεις:*

Η κατακόρυφη κίνηση του αέρα είναι ασθενής, οι χρόνοι δημιουργίας μπορεί να είναι αρκετές ώρες, ενώ η ανάπτυξη ξεκινά από το πάνω μέρος του σύννεφου. Τυπικό παράδειγμα τέτοιων κατακρήμνισεων είναι οι *εξωτροπικοί κυκλώνες* που σχηματίζονται σε πλάτη 30° έως 60° στο βόρειο και νότιο ημισφαίριο, στα όρια μεταξύ ψυχρών και θερμών αέριων μαζών και είναι υπεύθυνοι για τη μεταφορά ενέργειας με κατεύθυνση από τον ισημερινό προς τους πόλους.

iii) *Ορογραφικές (orographic) κατακρήμνισεις:*

Δημιουργούνται από την οριζόντια κίνηση του αέρα όταν συναντήσει έναν ορεινό όγκο και αναγκάζεται να ανυψωθεί, άρα να ψυχθεί και δυνητικά να προκαλέσει κατακρήμνιση. Συνδυάζονται μεταγωγικές και διαστρωματικές συνιστώσες.



**Σχήμα 2.1** Επεξηγηματικό σκαρίφημα του μηχανισμού μεταγωγικής κατακρήμνισης (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 1999)

## 2.3 Μέθοδοι πρόγνωσης καιρού

### 2.3.1 Εισαγωγή

Η *μετεωρολογία* είναι ο κλάδος της επιστήμης που ερευνά την ατμόσφαιρα στο σύνολό της και τα φαινόμενα που διεξάγονται στο εσωτερικό της. Η πλειονότητα των φαινομένων αυτών λαμβάνει χώρα στο κατώτερο στρώμα της ατμόσφαιρας, την *τροπόσφαιρα*, της οποίας το κατακόρυφο ύψος για μια συγκεκριμένη τοποθεσία εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος της και φτάνει μέχρι τα 18km. Το σύνολο των φαινομένων αυτών, που ονομάζονται *μετεωρολογικά φαινόμενα*, σε ένα συγκεκριμένο τόπο μια δεδομένη χρονική στιγμή ονομάζεται *καιρός*. Η μετεωρολογία είναι στενά συνδεδεμένη με την προσπάθεια για την πρόγνωση του καιρού, δηλαδή την εκτίμηση των συνθηκών πραγματοποίησης των μετεωρολογικών φαινομένων. Γενικώς, τα φαινόμενα αυτά έχουν διαφορετική δυνατότητα πρόγνωσης.

Συγκεκριμένα, μεταβλητές όπως η θερμοκρασία του αέρα, η ατμοσφαιρική πίεση, η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου δύνανται να προγνωστούν σε ικανοποιητικό επίπεδο, με ποσοτικά στοιχεία και μικρή σχετικά αβεβαιότητα. Αντίθετα, οι κατακρημνίσεις (βροχόπτωση, χιονόπτωση και σπανιότερα χαλάζι), μπορούν να προσδώσουν με τα

σημερινά δεδομένα μια ικανοποιητική ποιοτική πρόγνωση, χωρίς όμως επαρκή ποσοτικά στοιχεία για το ύψος της κατακρήμνισης και με σημαντικό ποσοστό αβεβαιότητας.

Οι λόγοι για αυτό εξηγούνται στο προηγούμενο υποκεφάλαιο όπου έγινε είναι φανερό ότι ένα μοντέλο πρόγνωσης κατακρημνισμάτων θα έχει ως είσοδο αρκετό αριθμό δεδομένων και πολύπλοκων διεργασιών που είναι δύσκολο να περιγραφούν αριθμητικά, επομένως είναι δεδομένη η μεγάλη αβεβαιότητα που ενυπάρχει σε τέτοιου είδους προγνώσεις. Σύμφωνα με μελέτες ενώ η δυνατότητα πρόγνωσης για μετεωρολογικές μεταβλητές όπως η θερμοκρασία έχει γίνει ακριβέστατη για προγνώσεις έως και 6 ημέρες, στην πρόγνωση υετού το αντίστοιχο διάστημα περιορίζεται το πολύ σε 3 ημέρες (Buizza et al, 1999). Η παραπάνω πρόταση εξηγεί και την καθυστερημένη εξέλιξη της τεχνολογίας πρόγνωσης κατακρημνισμάτων, ως βασικό στοιχείο της *πρόγνωσης του καιρού* γενικότερα. Συγκεκριμένα, παρά την ύπαρξη μετεωρολογικών ινστιτούτων σε πολλές χώρες του κόσμου από τις αρχές του προηγούμενου αιώνα, οι προγνώσεις βασιζόνταν περισσότερο σε εμπειρικές εκτιμήσεις.

Την ανάπτυξη της μετεωρολογίας βοήθησε σημαντικά τόσο η ανάπτυξη της θεωρίας αριθμητικής πρόγνωσης καιρού στις αρχές του περασμένου αιώνα όσο και η εξέλιξη της τεχνολογίας με την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπέρ-υπολογιστών καθώς και με τη συστηματική εγκατάσταση οργάνων μέτρησης σε πολλές θέσεις ανά τον κόσμο σε συνδυασμό με τη χρήση δορυφορικών συστημάτων μετάδοσης. Χαρακτηριστικά, η πρώτη πρόγνωση καιρού σε υπολογιστή έγινε από τον ENIAC το 1950, το 1958 ιδρύθηκε το NMC (National Meteorological Centre) στις ΗΠΑ, το πρώτο μεγάλης κλίμακας εθνικό μετεωρολογικό ινστιτούτο, ο πρώτος μετεωρολογικός δορυφόρος εκτοξεύτηκε από τις ΗΠΑ το 1960, ενώ το 1975 ιδρύθηκε το ECMWF (European Center for Mesoscale Weather Forecasts) στο Reading της Αγγλίας, που από το 1979 παρέχει αξιόπιστες καθημερινές προγνώσεις καιρού.

### **2.3.2 Αριθμητικά μοντέλα πρόγνωσης καιρού**

Σήμερα, η πρόγνωση του καιρού βασίζεται στην αξιοποίηση δεδομένων μετρήσεων σε παγκόσμια κλίμακα, στην επίλυση διαφορικών εξισώσεων που προκύπτουν από τις φυσικές συνθήκες και στην αναγωγή τους σε τοπικό επίπεδο. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται εξισώσεις που διέπουν την εξέλιξη της ατμόσφαιρας:

- Ο 2<sup>ος</sup> νόμος του Νεύτωνα για τη διατήρηση της ορμής:

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} &= -u \frac{\partial u}{\partial x} - v \frac{\partial u}{\partial y} - w \frac{\partial u}{\partial z} + fv - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + F_x \\ \frac{\partial v}{\partial t} &= -u \frac{\partial v}{\partial x} - v \frac{\partial v}{\partial y} - w \frac{\partial v}{\partial z} + fu - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + F_y \\ \frac{\partial w}{\partial t} &= -u \frac{\partial w}{\partial x} - v \frac{\partial w}{\partial y} - w \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g\end{aligned}\quad (2.1)$$

- Ο 1<sup>ος</sup> νόμος της θερμοδυναμικής για τη διατήρηση της ενέργειας:

$$Q = C_p \frac{dT}{dt} - \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dt} \quad (2.2)$$

- Η εξίσωση συνέχειας για τη διατήρηση της μάζας:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho \left\{ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right\} \rightarrow \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.3)$$

- Η εξίσωση διατήρησης της υγρασίας:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -u \frac{\partial q}{\partial x} - v \frac{\partial q}{\partial y} - w \frac{\partial q}{\partial z} + E - P \quad (2.4)$$

- Η καταστατική εξίσωση των αερίων:

$$p = \rho RT \quad (2.5)$$

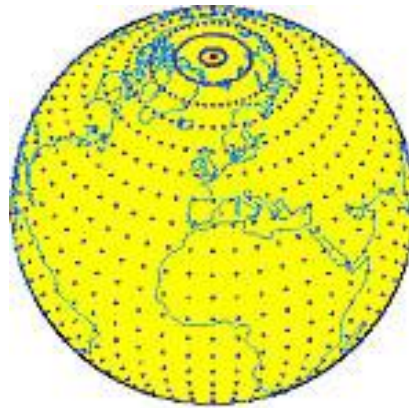
Στις παραπάνω εξισώσεις  $u, v, w$  είναι οι συνιστώσες του ανέμου,  $f$  η παράμετρος Coriolis,  $p$  η πίεση,  $F$  η τριβή,  $T$  η θερμοκρασία,  $q$  η σχετική υγρασία,  $E$  η εξατμοδιαπνοή,  $P$  η βροχόπτωση,  $\rho = 1,3 \text{ kg/m}^3$  η πυκνότητα του αέρα στους  $0^\circ \text{ C}$ ,  $R = 8,314 \text{ J/(mole} \cdot \text{K)}$  η παγκόσμια σταθερά των αερίων και  $C_p = 20,78 \text{ J/(mole} \cdot \text{K)}$  η ειδική γραμμομοριακή θερμότητα σε ισοβαρή μεταβολή.

Από τις παραπάνω εξισώσεις οι δύο πρώτες ονομάζονται *προγνωστικές εξισώσεις*, εφόσον χρησιμοποιούνται για την πρόγνωση των μετεωρολογικών μεγεθών και οι τρεις επόμενες *διαγνωστικές εξισώσεις*, καθώς με αυτές προσδιορίζεται η κατάσταση της ατμόσφαιρας. Το ζήτημα με τις εξισώσεις αυτές είναι ότι δεν υπάρχει αναλυτικό σχήμα επίλυσής τους καθώς χαρακτηρίζονται από μη γραμμικότητα ενώ μεταπίπτουν σε πολύπλοκες μερικές διαφορικές εξισώσεις (Κοτρώνη, 2010). Έτσι, η επίλυση τους προϋποθέτει την εύρεση περισσότερο απλοποιημένων μεθόδων που θα βασίζονται και σε εύλογες παραδοχές. Γενικώς ακολουθούνται οι εξής μεθοδολογίες:

- Εύρεση ακριβούς αναλυτικής λύσης μιας απλοποιημένης μορφής των εξισώσεων.
- Δημιουργία ενός απλοποιημένου φυσικού μοντέλου για το οποίο μπορούν να επιλυθούν οι εξισώσεις. Συγκεκριμένα, η ατμόσφαιρα περιγράφεται ως ένα στρώμα ρευστού που περιβάλλει τη γη.

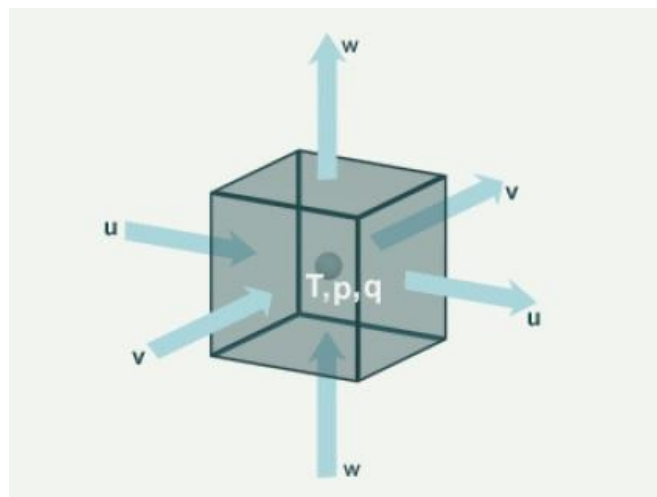
iii. Αριθμητική επίλυση των βασικών μερικών διαφορικών εξισώσεων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων σε διακριτά σημεία (*grid points*).

Η μεθοδολογία (iii) είναι αυτή που σήμερα ακολουθείται κατά κόρον καθώς μπορεί να προσφέρει τα πιο ακριβή αποτελέσματα. Η βασική της παραδοχή είναι ότι η ατμόσφαιρα αντιμετωπίζεται όχι ως ένα συνεχές μέσο, αλλά ως ένα μέσο που αποτελείται από διακριτά σημεία. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται ένα τρισδιάστατο πλέγμα σημείων πάνω στο οποίο πραγματοποιούνται όλοι οι απαιτούμενοι υπολογισμοί (Σχήμα 2.2). Ταυτόχρονα, γίνεται και η παραδοχή ότι ο χρόνος δεν είναι συνεχής και τα πάντα συμβαίνουν σε διακριτές χρονικές στιγμές, θεωρώντας έτσι ότι κάθε ατμοσφαιρική μεταβλητή μεταβάλλεται με τρόπο πεπερασμένο και διακριτό, τόσο χωρικά όσο και χρονικά.



**Σχήμα 2.2** Αναπαράσταση της ατμόσφαιρας με *grid points* σε μεγάλη κλίμακα (Πηγή: EMY)

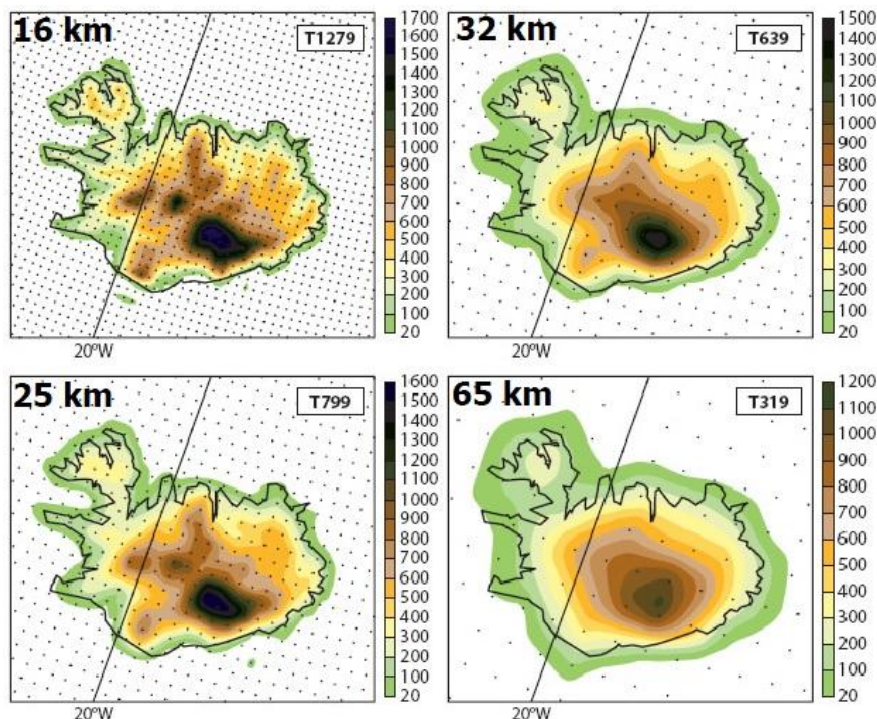
Κάθε διακριτό σημείο του πλέγματος ορίζει ένα κυβικό στοιχείο με βάση το οποίο γίνονται οι υπολογισμοί των ατμοσφαιρικών μεγεθών εφαρμόζοντας τις διαφορικές εξισώσεις. Συγκεκριμένα, οι τρεις συνιστώσες του ανέμου ( $u$ ,  $v$  και  $w$ ) υπολογίζονται στις έδρες του κύβου, ενώ η θερμοκρασία ( $T$ ), η πίεση ( $p$ ), και η υγρασία ( $q$ ) στο κέντρο του. Ένα τέτοιο κυβικό στοιχείο αναπαρίσταται στο Σχήμα 2.3.



**Σχήμα 2.3** Τυπικό κυβικό στοιχείο υπολογισμών ατμοσφαιρικών μεγεθών (Κοτρώνη, 2010)

Η επίλυση των διαφορικών εξισώσεων σε επίπεδο κυβικού στοιχείου γίνεται με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών, χρησιμοποιώντας ανάπτυξη σε σειρές Taylor. Η διαδικασία αυτή δημιουργεί αριθμητικά σφάλματα (*σφάλμα αποκοπής*), τα οποία υπάρχει η δυνατότητα να ελαχιστοποιήσουμε χρησιμοποιώντας κατάλληλες ακριβέστερες μεθόδους εφαρμογής διαφορών (για παράδειγμα, μέθοδοι Runge-Kutta 4<sup>ης</sup> τάξης).

Οι διαδικασίες μπορούν να αναπαρασταθούν σε οριζόντιο πλέγμα, απομονώνοντας μια συγκεκριμένη περιοχή. Στα όρια της περιοχής αυτής είναι απαραίτητο να τοποθετηθούν οι συνοριακές συνθήκες που προκύπτουν από τους υπολογισμούς με τα εξωτερικά ως προς την περιοχή σημεία. Υπάρχει επίσης η δυνατότητα αύξησης της οριζόντια ανάλυσης, δηλαδή πύκνωσης των σημείων υπολογισμού της περιοχής. Μια τέτοια ενέργεια αυξάνει σημαντικά τον υπολογιστικό φόρτο όμως επιτρέπει τη λεπτομερέστερη περιγραφή των φυσιογραφικών χαρακτηριστικών της περιοχής (όπως για παράδειγμα της τοπογραφίας ή της κατανομής ξηράς-θάλασσας), άρα και την ακριβέστερη πρόγνωση μετεωρολογικών παραμέτρων όπως η βροχόπτωση (Σχήμα 2.4).



**Σχήμα 2.4** Η αύξηση της οριζόντιας ανάλυσης προσδίδει ακριβέστερη περιγραφή της γεωμορφολογίας άρα και ακριβέστερη πρόγνωση (στο σχήμα φαίνεται το παράδειγμα της Ισλανδίας, Κοτρώνη, 2010)

Τα δεδομένα προς εισαγωγή στα αριθμητικά μοντέλα πρόγνωσης αποτελούν έναν συνδυασμό παρατηρήσεων σε τοπική κλίμακα την χρονική στιγμή έναρξης της διαδικασίας πρόγνωσης με προγνώσεις που έχουν προκύψει σε μεγαλύτερο του τοπικού επιπέδου



ανάλυσης. Τα δεδομένα αυτά παράγονται καθημερινά μέσω παρατηρήσεων 7 φορές την ημέρα από όλες τις μετεωρολογικές υπηρεσίες του κόσμου και διαχέονται σε όλες μέσω του Παγκόσμιου Μετεωρολογικού Οργανισμού (WMO). Στη συνέχεια, αφού ελεγχθούν για τη συμβατότητά τους μέσω Η/Υ (*data assimilation*), εισάγονται στο αριθμητικό μοντέλο πρόγνωσης, όπου προσδιορίζονται και οι αρχικές συνθήκες του μοντέλου, η εξέλιξη των οποίων θα δώσει την πρόγνωση. Τέλος, επιλύονται οι αρχικές συνθήκες προβλέποντας την κατάσταση της ατμόσφαιρας σε σύντομο χρονικό διάστημα στο μέλλον (χρονικό βήμα). Οι εξισώσεις τότε εφαρμόζονται σε αυτή τη νέα ατμοσφαιρική κατάσταση και έτσι προβλέπουν την ατμόσφαιρα σε ένα ακόμη περαιτέρω βήμα του χρόνου στο μέλλον. Αυτή η αναβάθμιση του χρόνου επαναλαμβάνεται έως ότου η λύση φτάσει στην επιθυμητή ώρα πρόβλεψης.

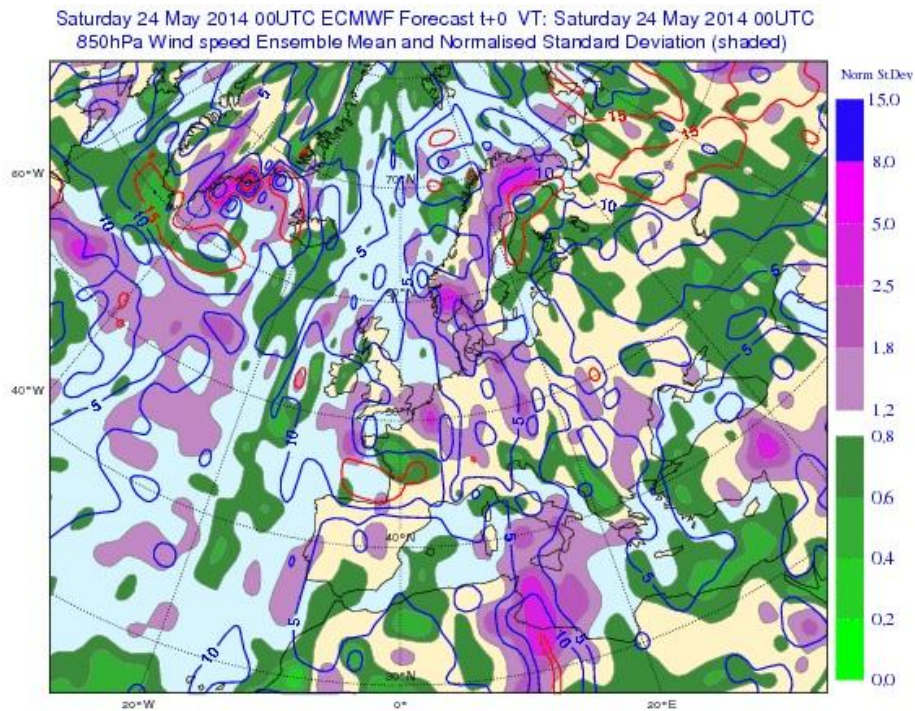
Η ανάλυση όμως άρα τελικά και η πρόγνωση μπορεί να είναι τόσο ακριβής όσο το επιτρέπουν παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια των αριθμητικών προβλέψεων και περιλαμβάνουν την πυκνότητα και την ποιότητα των παρατηρήσεων που χρησιμοποιούνται ως βάση για τις προβλέψεις, σε συνδυασμό με τις αδυναμίες των ίδιων των αριθμητικών μοντέλων. Εδώ συνυπολογίζονται και η πιθανή έλλειψη γνώσης των αρχικών συνθηκών αλλά και η έλλειψη κατανόησης των φυσικών διεργασιών της ατμόσφαιρας. Ακόμη και με την αυξανόμενη δύναμη των υπερυπολογιστών, η ικανότητα πρόβλεψης των αριθμητικών μοντέλων καιρού εκτείνεται σε περίπου έξι μόνο μέρες.

Επιπλέον, η χαοτική φύση της ατμόσφαιρας (Lorenz, 1963), δηλαδή οι μεγάλες αποκλίσεις (αριθμητική αστάθεια) σε μελλοντικές προγνώσεις που μπορούν να προκύψουν από απειροελάχιστα σφάλματα στα δεδομένα εισόδου, φτιάχνουν ένα σύνολο περιορισμών ως προς την μακροπρόθεσμη πρόγνωση της κατάστασης της ατμόσφαιρας. Για τους λόγους αυτούς από τις αρχές της δεκαετίας του 1990, αναπτύχθηκαν τεχνικές πρόγνωσης καιρού που βασιζόνταν στην παραδοχή της στοχαστικής φύσης του καιρού, οι οποίες ονομάστηκαν *Μέθοδοι Συνόλων* (*Ensemble Methods*).

### 2.3.3 Μέθοδοι Ensemble

Οι *Μέθοδοι Πρόγνωσης Ensemble* είναι αριθμητικές μέθοδοι πρόγνωσης καιρού, οι οποίες βασίζονται στη χρήση ενός συνόλου προγνώσεων από πολλά διαφορετικά μοντέλα και με ανεπαίσθητα διαφορετικές αρχικές συνθήκες για την παραγωγή μελλοντικών καταστάσεων και παραμέτρων της ατμόσφαιρας. Η τεχνική αυτή προσομοιάζει ουσιαστικά με ένα σύνολο στοχαστικών προσομοιώσεων Monte Carlo. Στόχος είναι ο προσδιορισμός της

αβεβαιότητας που ενυπάρχει στην πρόγνωση καιρού και η οποία δεν μπορεί να προσδιοριστεί με τα αριθμητικά μοντέλα πρόγνωσης.



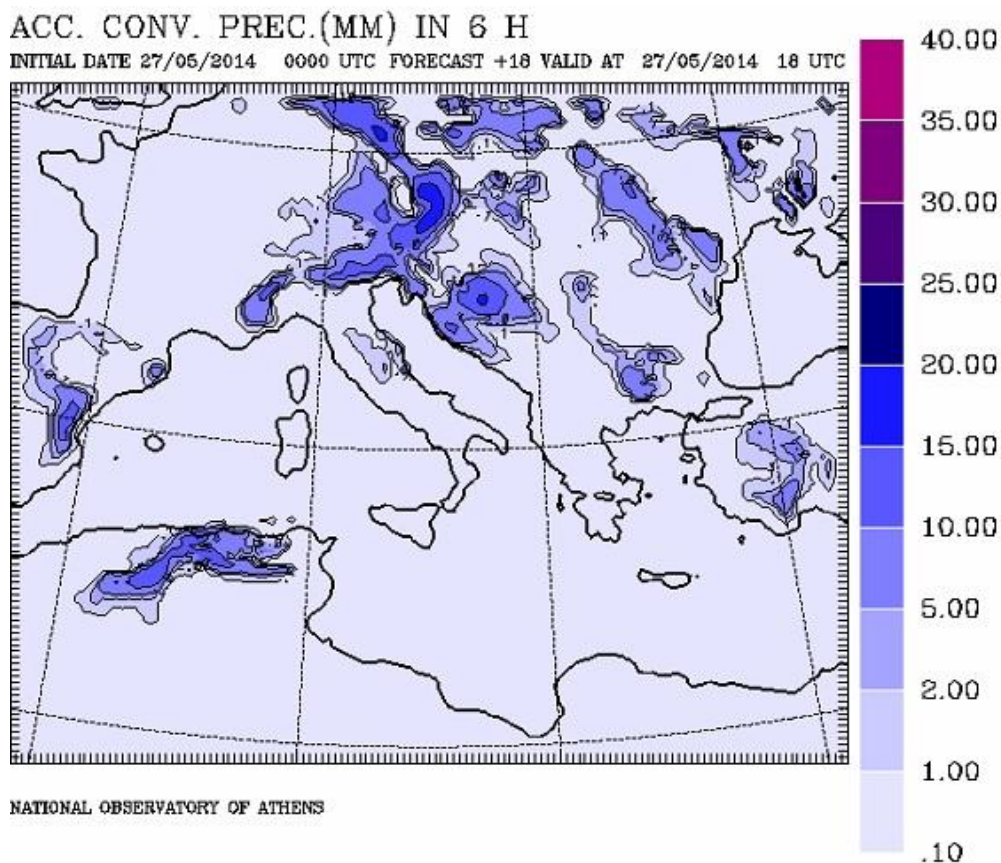
**Σχήμα 2.5** Ensemble πρόγνωση της ταχύτητας του ανέμου (Πηγή: <http://www.ecmwf.int/>)

Η εξαγωγή των αποτελεσμάτων των πολλών διαφορετικών μοντέλων σε μετεωρολογικούς χάρτες δημιουργεί ένα σύνολο προγνώσεων (μέλη του ensemble) για μια μετεωρολογική μεταβλητή. Η στατιστική επεξεργασία των προγνώσεων ποσοτικοποιεί την αβεβαιότητα της πρόγνωσης των αριθμητικών μοντέλων. Επιπλέον, δύνανται να προσδιοριστούν και η πιθανότητα εμφάνισης ακραίων καιρικών φαινομένων όταν τα περισσότερα μέλη του ensemble συνηγορούν σε αυτό, ενώ με την ίδια λογική μπορούν να προσδιοριστούν τα εύρη πολλών μετεωρολογικών παραμέτρων χρησιμοποιώντας τη μέση τιμή των προγνώσεων (*ensemble mean*) και τη διασπορά τους (*ensemble spread*).

Σήμερα, οι μέθοδοι αυτοί χρησιμοποιούνται από τα μεγαλύτερα ερευνητικά και μετεωρολογικά ινστιτούτα παγκοσμίως, αξιολογώντας και βελτιώνοντας συνεχώς την αξιοπιστία των προγνώσεων. Τα αποτελέσματα των μεθόδων αυτών εφαρμόζονται κυρίως για προγνώσεις μέσης κλίμακας (5-6 ημερών), σε συνδυασμό με τα αριθμητικά μοντέλα πρόγνωσης καιρού που χρησιμοποιούνται κατά κόρον για μικρότερη κλίμακα (2-3 ημερών). Η ευρεία χρήση των μεθόδων Ensemble έχει αποδειχθεί ότι έχει αυξήσει το διάστημα ακριβούς πρόγνωσης κατά 2 ημέρες τουλάχιστον.

### 2.3.4 Πρόγνωση κατακρήμνισης

Η πρόγνωση της κατακρήμνισης εξάγεται όπως και οι υπόλοιπες μετεωρολογικές προγνώσεις από τις χρησιμοποιούμενες εξισώσεις των αριθμητικών μοντέλων καιρού και συγκεκριμένα από την εξίσωση (2.4), ενώ στην περίπτωση των μεθόδων Ensemble είναι δυνατός και ο υπολογισμός της αβεβαιότητας της πρόγνωσης. Όμως, όπως έχει ήδη αναφερθεί, λόγω των πολύπλοκων διεργασιών δημιουργίας κατακρήμνισης (βλ. 2.2), οι προγνώσεις αυτές είναι ακριβείς για χρονικό διάστημα το πολύ τριών ημερών, ενώ όπως μας πληροφορεί ο Παγκόσμιος Μετεωρολογικός Οργανισμός (WMO, 2011), η χωρική κλίμακα ανάλυσης για την πρόγνωση βροχόπτωσης περιορίζεται στα 12 χιλιόμετρα. Αυτός είναι και ο λόγος που σε αντίθεση με τις υπόλοιπες μετεωρολογικές μεταβλητές, οι προγνώσεις καιρού για τη βροχόπτωση είναι κυρίως ποιοτική.



**Σχήμα 2.6** Ποσοτική πρόγνωση υετού (*precipitation*) στην Ευρώπη στις 27/05/2014 18 UTC με αρχικές συνθήκες στις 27/05/2014 0000 UTC (Πηγή: <http://www.noa.gr/forecast>)

Η έρευνα γύρω από την ακριβέστερη ποσοτική πρόγνωση κατακρήμνισης (*quantitative precipitation forecast - QPF*) επιδιώκει να αυξήσει τη δυνατότητα πρόγνωσης σε 5 έως και 10 ημέρες και τη χωρική ανάλυση στα 2 χιλιόμετρα. Στη κατεύθυνση αυτή μπορούν να συμβάλλουν η ανάπτυξη ενός πυκνού δικτύου επίγειων βροχογράφων με αυτόματη

μετάδοση δεδομένων σε παγκόσμια κλίμακα, η ευρύτερη χρήση και εξέλιξη των μετεωρολογικών ραντάρ για την πρόγνωση των βροχομετρικών δεδομένων όπου δεν είναι δυνατή η εγκατάσταση βροχογράφων, καθώς και η ανάπτυξη των μετεωρολογικών δορυφόρων, των οποίων η προγνωστική λειτουργία βασίζεται στην ανάλυση νεφών. Σημαντικό ρόλο επίσης μπορεί να παίξει η ανάπτυξη ενός δικτύου επικοινωνίας και ταχείας ανταλλαγής δεδομένων των μετεωρολογικών υπηρεσιών παγκοσμίως. Τέλος, η ευρεία χρήση των Μεθόδων Ensemble, είναι δυνατό με την ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας να οδηγήσει σε ακριβέστερα αποτελέσματα προγνώσεων.

## 2.4 Πλημμύρες

### 2.4.1 Ορισμός και είδη πλημμύρας. Αίτια και επιπτώσεις

Οι πλημμύρες αποτελούν ένα σοβαρό φυσικό φαινόμενο που συχνά χαρακτηρίζεται ως ακραίο εξαιτίας των σοβαρών υλικών ζημιών και των ανθρώπινων απωλειών. Ένας από τους πιο πλήρεις ορισμούς για την πλημμύρα αναφέρεται στο *International Glossary of Hydrology* (WMO – No. 385, 2012):

«Πλημμύρα είναι (α) η αύξηση, συνήθως σύντομη, της στάθμης του νερού ενός υδατορεύματος ή μιας μάζας νερού, σε μια μέγιστη στάθμη από την οποία υποχωρεί με βραδύτερο ρυθμό, (β) η σχετικά υψηλή ροή όπως μετράται από τη στάθμη του νερού ή την ένταση της ροής σε ένα υδατόρευμα, (γ) η αύξηση της παλίρροιας».

Ο παραπάνω ορισμός είναι αναλυτικός και ουσιαστικά σκιαγραφεί και ορισμένα από τα αίτια των πλημμυρών. Ένας πιο δόκιμος ορισμός παρατίθεται στην *Οδηγία Πλαίσιο για τις Πλημμύρες 2007/60/EK* (άρθρο 2):

«Πλημμύρα είναι η προσωρινή κάλυψη από νερό εδάφους το οποίο υπό φυσιολογικές συνθήκες δεν καλύπτεται από νερό».

Το πιο συχνό αίτιο των πλημμυρών είναι οι τοπικές, παρατεταμένες βροχοπτώσεις, παράγοντας που οφείλεται και για τις περισσότερες πλημμύρες στον ελλαδικό χώρο. Άλλα αίτια των πλημμυρών είναι η τήξη του χιονιού (εποχιακές πλημμύρες), η θραύση

φράγματος, η υπερχειλίση ποταμού και η εισροή της θάλασσας (παλιρροιακά κύματα). Η κατηγοριοποίηση των πλημμυρών ανάλογα με τα αίτια που τις προκαλούν καθώς και οι σημαντικότερες επιπτώσεις τους παρατίθενται στον Πίνακα 2.1. Επισημαίνεται εδώ ότι όλες οι κατηγορίες πλημμυρών είναι δυνατόν υπό προϋποθέσεις να προκαλέσουν και ανθρώπινες απώλειες.

**Πίνακας 2.1** Κατηγορίες πλημμύρων, αιτίες πρόκλησης και επιπτώσεις (Πηγή: EXCIMAP, 2007 · Τουτζάρη, 2011)

Τύπος πλημμύρας	Αιτίες πλημμύρας	Επιπτώσεις πλημμύρας	Σχετικές παράμετροι
Πλημμύρα ποταμών	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Έντονη βροχόπτωση ή λιώσιμο χιονιού</li> <li>• Απόφραξη λόγω πάγου</li> <li>• Κατάρρευση αναχωμάτων ή άλλων έργων προστασίας</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Στάσιμα νερά ή νερά σε ροή εκτός της κύριας κοίτης του ποταμού</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Έκταση (σύμφωνα με την πιθανότητα εμφάνισης)</li> <li>• Βάθος νερού</li> <li>• Ταχύτητα νερού</li> <li>• Διάδοση πλημμύρας</li> </ul>
Παράκτια πλημμύρα	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Πλημμύρα λόγω καταιγίδας</li> <li>• Τσουνάμι</li> <li>• Παλιρροϊκό κύμα</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Στάσιμα νερά ή νερά σε ροή πίσω από την ακτογραμμή</li> <li>• Υφαλμύριση αγροτικών εκτάσεων</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ομοίως με παραπάνω</li> </ul>
Ορεινοί χείμαρροι	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ξαφνική καταιγίδα</li> <li>• Υπερχειλίση λίμνης</li> <li>• Ασταθής κλίση του υδροκρίτη</li> <li>• Ροή φερτών υλών</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Πρόσχωση περιοχών με νερό και ιζήματα</li> <li>• Διάβρωση κατά μήκος της κύριας κοίτης του ποταμού</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ομοίως με παραπάνω</li> <li>• Εναπόθεση ιζημάτων</li> </ul>
Στιγμιαίες πλημμύρες στη Μεσόγειο από εφήμερα ρεύματα (flash floods)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ξαφνική καταιγίδα</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Στάσιμα νερά στην πλημμυρική κοίτη (μεγάλης διάρκειας πλημμύρας)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ομοίως με παραπάνω</li> </ul>
Πλημμύρα υπόγειων υδροφορέων	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Υψηλή στάθμη νερού σε παρακείμενα υδάτινα σώματα</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Έκταση (σύμφωνα με την πιθανότητα εμφάνισης)</li> <li>• Βάθος νερού</li> </ul>

Σε ευρωπαϊκό επίπεδο οι πλημμύρες θεωρούνται η δεύτερη πιο συχνή αιτία καταστροφών μετά τις δασικές πυρκαγιές, με επιπτώσεις τόσο σε οικονομικό επίπεδο, όσο και σε απώλειες ζωών. Πιο πρόσφατο παράδειγμα καταστροφών είναι οι πλημμύρες σε Σερβία, Βοσνία και Κροατία που επέφεραν το θάνατο 80 ανθρώπων, την μόνιμη αναγκαστική μετακίνηση 30.000, ενώ κατά τη διάρκεια των πλημμυρών μετακινήθηκαν προσωρινά από τις εστίες τους περισσότεροι από 2,5 εκατομμύρια άνθρωποι. Χαρακτηριστικό είναι ότι για την περίοδο 1980-2009 έχουν σημειωθεί στην ευρωπαϊκή επικράτεια πλημμύρες που έχουν επιφέρει το θάνατο πάνω από 5000 ανθρώπων, την αναγκαστική μετακίνηση μισού εκατομμυρίου και την επίδραση στις ζωές περίπου 30 εκατομμυρίων καθώς και οικονομικές ζημιές πολλών δισεκατομμυρίων ευρώ (Doocy et al., 2013).



**Εικόνα 2.1** Πλημμυρισμένο χωριό στη Βοσνία (Πηγή: ["The Telegraph"](#), 16/05/2014)

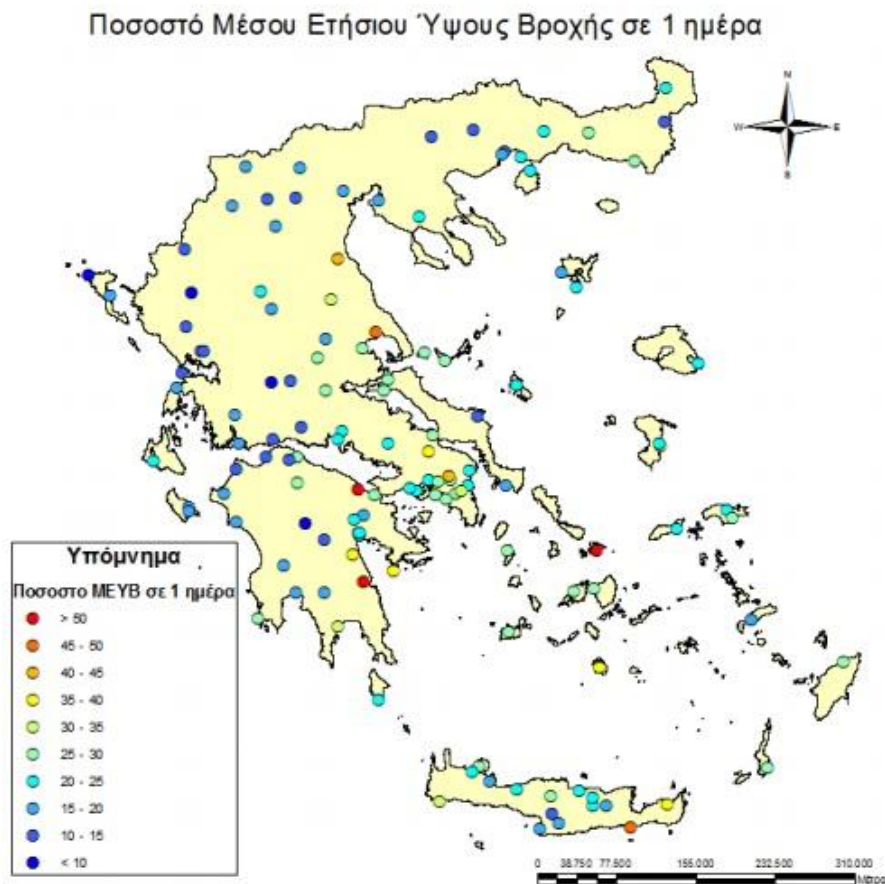
Για αυτούς τους λόγους η Ευρωπαϊκή Ένωση εξέδωσε στις 23 Οκτωβρίου του 2007, την Οδηγία 2007/60/ΕΚ για την αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας, με σκοπό τη δημιουργία θεσμικού πλαισίου και τη λήψη μέτρων για τη μείωση των δυσμενών συνεπειών των πλημμυρών στην ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον, την οικονομία και τον πολιτισμό (άρθρο 1, 2007/60/ΕΚ). Η συνοπτική παρουσίαση της συγκεκριμένης οδηγίας γίνεται στο Παράρτημα Γ.

#### **2.4.2 Πλημμύρες στον ελλαδικό χώρο**

Η εκδήλωση πλημμυρικών γεγονότων στην Ελλάδα είναι γενικώς αποτέλεσμα της έντονης γεωγραφικής μεταβλητότητας των κλιματικών στοιχείων σε συνδυασμό με τη συνύπαρξη ανεπτυγμένης ακτογραμμής και ορογραφίας. Συγκεκριμένα, η οροσειρά της Πίνδου ουσιαστικά αποτελεί ένα «υδρολογικό σύνορο», εφόσον η μέση ετήσια βροχόπτωση στη Δυτική Ελλάδα είναι της τάξης των 1800 mm ενώ στην Ανατολική είναι περίπου 400 mm.

Ωστόσο, η παρατήρηση αυτή σχετικά με την ανομοιομορφία των βροχοπτώσεων δεν συμβαδίζει με μία αντίστοιχη εκδήλωση πλημμυρικών γεγονότων στο ανατολικό και δυτικό μέρος της χώρας, καθώς οι πλημμύρες στα ανατολικά είναι πολύ συχνότερες.

Αυτό συμβαίνει διότι στα ανατολικά (για παράδειγμα στην Αττική) συναντώνται μεγαλύτερα ποσοστά μέσου ετήσιου ύψους βροχής σε μία ημέρα από ότι στα δυτικά (βλ. Σχήμα 2.7), που σημαίνει ότι σε πολλές περιοχές στα ανατολικά το ένα τέταρτο ή ακόμα και το μισό της ετήσιας βροχόπτωσης μπορεί να κατακρημνιστεί σε μία μόνο ημέρα (Koutsoyiannis et al., 2012). Επιπλέον, οι λεκάνες στα ανατολικά είναι μικρού μεγέθους και απότομες και έχουν ως επί το πλείστον εφήμερη ροή άρα διευκολύνουν την ταχεία ύψωση του νερού και την εκδήλωση πλημμυρών. Εξάλλου, η πλημμύρα ως επί το πλείστον προκαλείται, ειδικά στον ελλαδικό χώρο, από μεγάλα ύψη βροχής σε μικρό χρόνο. Έτσι, οι περισσότερες από τις πλημμύρες στην Ελλάδα προκαλούνται από εφήμερα ρεύματα λόγω ξαφνικών καταιγίδων και έχουν «αστραπιαία» δράση, για αυτό και ονομάζονται *flash floods* («αστραπιαίες» πλημμύρες).



**Σχήμα 2.7** Ποσοστό μέσου ετήσιου ύψους βροχής σε μία ημέρα (Πηγή: Φαρμακάκη, 2012)

Σε τέτοιες πλημμύρες είναι δύσκολη η έγκαιρη προειδοποίηση για κίνδυνο πλημμύρας εφόσον εμφανίζονται σε μικρό χρονικό διάστημα λίγων ωρών ή λιγότερο και έχουν σαν αποτέλεσμα ταχεία ύψωση νερού, το οποίο στο πέρασμα του μπορεί να προκαλέσει μεγάλες καταστροφές σε κατασκευές, όπως κτίρια, γέφυρες, να παρασύρει αυτοκίνητα, να ξεριζώσει δέντρα, να προκαλέσει κατολισθήσεις, ενώ δυστυχώς τα περισσότερα ανθρώπινα θύματα προέρχονται από τέτοιου είδους πλημμύρες. Σε μια τέτοια πλημμύρα συνηγορούν και άλλοι παράγοντες όπως η τοπογραφία, οι συνθήκες του εδάφους, η φυτοκάλυψη, η καταστροφή των δασών καθώς και η αστικοποίηση. Ειδικά οι δύο τελευταίοι παράγοντες καθιστούν στον ελλαδικό χώρο πιο δυσμενείς τις επιπτώσεις των *flash floods*, λόγω των συχνών πυρκαγιών και της στρεβλής πολεοδομίας (για παράδειγμα το «μπάζωμα» των ρευμάτων στην Αττική και σε άλλες αστικές περιοχές).

## 2.5 Υδρολογικά μοντέλα

### 2.5.1 Ορισμός-Διατύπωση

Η προσομοίωση των υδρολογικών διεργασιών του εδάφους με σκοπό της εκτίμηση της απορροής και τελικά της πλημμυρική πρόγνωση γίνεται, όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή του παρόντος κεφαλαίου, μέσω κατάλληλων υδρολογικών μοντέλων.

Ο όρος *υδρολογικό μοντέλο* αναφέρεται «σε ένα ευρύ φάσμα μαθηματικών μετασχηματισμών, που χρησιμοποιούν δεδομένα πεδίου και εύλογες υποθέσεις σχετικά με τους φυσικούς μηχανισμούς, με στόχο την ποσοτική εκτίμηση υδρολογικών μεταβλητών που είναι πρακτικά δύσκολο να μετρηθούν στο πεδίο» (Ευστρατιάδης, 2008). Τα μοντέλα αυτά είτε περιγράφουν μεμονωμένα γεγονότα (όπως για παράδειγμα ένα υδρογράφημα) και τότε αναπαριστώνται με εμπειρικές προσεγγίσεις, είτε τη διαχρονική εξέλιξη του ισοζυγίου των υδατικών πόρων μιας πεπερασμένης χωρικής ενότητας, όπου η αναπαράσταση διέπεται εν μέρει από κάποιο φυσικό υπόβαθρο.

Γενικά, τα μοντέλα υδρολογικής προσομοίωσης περιγράφονται μέσα από συστήματα διαφορικών εξισώσεων. Ειδικότερα ένα τέτοιο μοντέλο μπορεί να θεωρηθεί ένας μη γραμμικός μετασχηματισμός της μορφής:

$$y' = h(s_0, x, \theta) \quad (2.6)$$

όπου



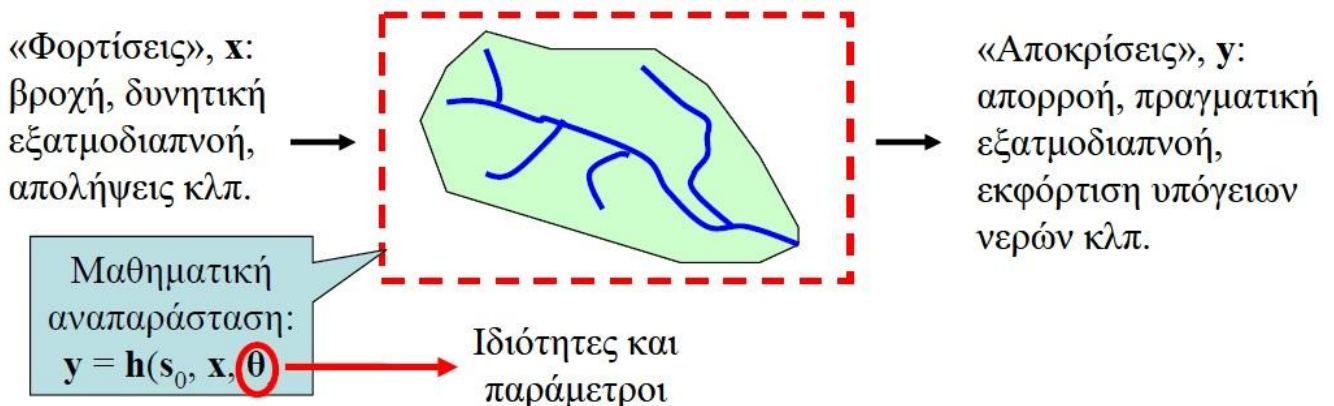
$s_0$ , οι αρχικές συνθήκες του φυσικού συστήματος στην έναρξη της προσομοίωσης (ύψη εδαφικής υγρασίας, στάθμες υπόγειου νερού),

$x$ , οι υδρολογικές μεταβλητές εισόδου ή αλλιώς φορτίσεις (βροχόπτωση, δυνητική εξατμισοδιαπνοή),

$\theta$ , οι παράμετροι του συστήματος που αναπαριστούν τα φυσικά του χαρακτηριστικά και εκτιμώνται έμμεσα ώστε η προσομοιωμένη συμπεριφορά του να αποτυπώνει όσο το δυνατό πιο αξιόπιστα την παρατηρημένη και

$y'$ , οι μεταβλητές εξόδου ή αποκρίσεις του συστήματος (απορροή, εξατμισοδιαπνοή, εκφόρτιση υπογείων νερών).

Όλες οι μεταβλητές μεταβάλλονται στο χρόνο και δίνονται σε μορφή χρονοσειρών για ορισμένο χρονικό ορίζοντα.



**Σχήμα 2.8** Σχηματική απεικόνιση ενός υδρολογικού μοντέλου (Ευστρατιάδης, 2009)

## 2.5.2 Πεδίο εφαρμογής

Το πεδίο εφαρμογής των υδρολογικών μοντέλων είναι η λεκάνη απορροής και ο υδροφόρας και μπορούν να εξεταστούν είτε ξεχωριστά είτε κάτω από την ίδια μαθηματική βάση.

Στην πρώτη περίπτωση αναφερόμαστε συνήθως σε σχήματα του υδατικού ισοζυγίου που επιδιώκουν τη συνολική αναπαράσταση του υδρολογικού κύκλου σε μια συγκεκριμένη χωρική ενότητα (ενιαία λεκάνη ή διακριτά τμήματά της), περιγράφοντας το μετασχηματισμό των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων σε απορροή (εξ ου και ο προσφιλής όρος μοντέλα βροχής-απορροής). Η βασική (υπόγεια) ροή θεωρείται συνιστώσα της συνολικής απορροής. Στη δεύτερη περίπτωση προσομοιώνεται ο μηχανισμός κίνησης του υπόγειου νερού με τη χωρική διακριτοποίηση να γίνεται σε στοιχειώδη τμήματα που

καλούνται κύτταρα (cells). Η διακριτοποίηση είναι ως επί το πλείστον πολύ πιο λεπτομερής από τα μοντέλα επιφανειακής υδρολογίας.

Τέλος, η περίπτωση συνδυασμένης προσομοίωσης αν και λιγότερο συχνή, κρίνεται επιβεβλημένη σε περίπτωση συνδυασμένης χρήσης υπόγειου και επιφανειακού νερού ή σε περίπτωση σημαντικής συνεισφοράς του υπόγειου δυναμικού στη συνολική απορροή της λεκάνης. Επιπλέον κρίνεται απαραίτητη και στην περίπτωση που ο χρόνος απόκρισης του υπόγειου συστήματος είναι συγκρίσιμος με εκείνον του επιφανειακού συστήματος, γεγονός που καταδεικνύει την παρουσία καρστικοποιημένων ανθρακικών πετρωμάτων, όπως και στην εξεταζόμενη λεκάνη του Σαρανταπόταμου (βλ. Κεφάλαιο 3).

### **2.5.3 Κατηγοριοποίηση υδρολογικών μοντέλων**

Τα υδρολογικά μοντέλα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα:

*α) Με τη χωρική διακριτότητα σε:*

- Αδιαμέριστα ή συγκεντρωτικά, όπου οι χρονοσειρές φόρτισης ολοκληρώνονται σε όλη τη λεκάνη για την οποία προκύπτουν κοινές παράμετροι,
- Ημικατανεμημένα, όπου η λεκάνη χωρίζεται σε διακριτές περιοχές (υπολεκάνες ή ΜΥΑ, βλ. Κεφάλαιο 4) με διαφορετικές χρονοσειρές φόρτισης και παραμέτρους,
- Ημι-αδιαμέριστα, όπου η λεκάνη χωρίζεται πάλι σε διακριτές περιοχές με διαφορετικές φορτίσεις αλλά με κοινές παραμέτρους και σε
- Κατανεμημένα, όπου η λεκάνη χωρίζεται σε διακριτές περιοχές με διαφορετικές φορτίσεις και παραμέτρους χωρίς όμως κάποιο φυσικό νόημα στο διαχωρισμό αυτόν.

*β) Με τη χρονική διακριτότητα σε:*

- Μηνιαίας κλίμακας (ειδικά για μελέτες διαχειριστικού ενδιαφέροντος)
- Ημερήσιας ή μικρότερης (ωριαίας) κλίμακας (ειδικά για περιγραφή πλημμυρικών φαινομένων)

*γ) Με τη μαθηματική τους δομή σε:*

- Φυσικής βάσης, τα οποία είναι εξ ορισμού κατανεμημένα, χρησιμοποιούν εξισώσεις ακόρεστης και κορεσμένης ροής και άλλες εμπειρικές εξισώσεις από πειραματικές λεκάνες και η φυσική τους συνέπεια είναι για μικρή χωρική κλίμακα θεωρητικά πλήρης,
- Εννοιολογικά, τα οποία χρησιμοποιούν παραμετρικές σχέσεις με υδραυλικά ανάλογα που αναπαριστούν τις κύριες υδρολογικές διεργασίες, πλεονεκτούν ως προς την απλότητά τους

και η φυσική του συνέπεια είναι συνάρτηση της αντιπροσωπευτικότητας των παραμέτρων ως μακροσκοπικές ιδιότητες της λεκάνης,

-Στατιστικά-Στοχαστικά, τα οποία βασίζονται στην πιθανοτική προσέγγιση των υδρολογικών διεργασιών, τις οποίες αντιμετωπίζουν ως τυχαίες μεταβλητές, ποσοτικοποιούν την αβεβαιότητα των προγνώσεων και έχουν στοιχειώδη φυσική συνέπεια και προφανώς πλήρη στατιστική συνέπεια και

-«Μαύρου Κουτιού», τα οποία χρησιμοποιούν μη γραμμικούς μετασχηματισμούς σχέσεων αιτίου-αποτελέσματος και μπορεί να είναι ικανά να αναπαραστήσουν οιαδήποτε πολύπλοκη υδρολογική, αλλά δεν έχουν απολύτως καμία φυσική συνέπεια.

#### **2.5.4 Ανάπτυξη υδρολογικών μοντέλων για πλημμυρικές μελέτες**

Γενικώς, η ανάπτυξη υδρολογικών μοντέλων, προσανατολισμένων για την πλημμυρική πρόγνωση και γενικότερα για μελέτες πλημμύρας, γίνεται ανεξάρτητα από τις υπόλοιπες κατηγοριοποιήσεις με *μοντέλα συνεχούς προσομοίωσης* και περιλαμβάνει τα επόμενα στάδια:

- (1) την επιλογή των κατάλληλων διεργασιών προς προσομοίωση (διεργασίες επιφανειακού και υπόγειου συστήματος και μοντέλα διόδευσης) έτσι ώστε να συμβαδίζουν με τα γενικά χαρακτηριστικά του επιθυμητού πεδίου εφαρμογής του μοντέλου (λεκάνη απορροής, υδροφορέας ή συνδυασμένα μοντέλα)
- (2) τη διατύπωση των μαθηματικών εξισώσεων των παραπάνω διεργασιών μέσω της επιλογής και των κατάλληλων παραμέτρων και την αντίστοιχη κωδικοποίηση της εν λόγω υπολογιστικής διαδικασίας
- (3) τη βαθμονόμηση<sup>1</sup> (calibration) των παραμέτρων (δηλαδή την εύρεση των βέλτιστων τιμών τους) με τη βοήθεια ιστορικών χρονοσειρών του συγκεκριμένου πεδίου εφαρμογής (βροχόπτωσης και πιθανότατα εξατμοδιαπνοής) και την αποτίμηση της ακρίβειας του μοντέλου (validation)
- (4) την εισαγωγή χρονοσειρών βροχόπτωσης πρόγνωσης βροχής (και σπανιότερα εξατμοδιαπνοής) μέχρι το χρονικό σημείο της πρόγνωσης για την εξαγωγή προγνώσεων απορροής και αξιολόγησή τους σχετικά με το ενδεχόμενο πλημμύρας

---

<sup>1</sup> Η έννοια της βαθμονόμησης ενός υδρολογικού μοντέλου αναλύεται στα υποκεφάλαια 5.1 και 5.2. Η βαθμονόμηση είναι προφανώς συνδεδεμένη με τα εννοιολογικά μοντέλα, όμως αποδεικνύεται ότι και στις υπόλοιπες κατηγορίες μοντέλων (φυσική βάση, στοχαστικά ή «μαύρου κουτιού») υπάρχει ανάγκη προσαρμογής των παραμέτρων στις παρατηρήσεις του παρελθόντος, αν και για το ζήτημα αυτό προκύπτουν έντονες διαφωνίες εντός της επιστημονικής κοινότητας (βλ. 5.1).

Ασφαλώς η επιτυχία ενός υδρολογικού μοντέλου δεν είναι μονοσήμαντη καθώς επηρεάζεται σαφώς από την εμπειρία του μελετητή καθώς και τα διαθέσιμα δεδομένα. Σε αυτά περιλαμβάνονται εκτός από τις αναγκαίες χρονοσειρές και τα απαραίτητα γεωγραφικά δεδομένα της περιοχής μελέτης τα οποία τίθενται προς επεξεργασία με τη βοήθεια Συστημάτων Γεωγραφικής Πληροφορίας. Βέβαια, η σημασία επιλογής του κατάλληλου υδρολογικού μοντέλου για ένα σύστημα πρόγνωσης πλημμύρας είναι ο κυριότερος παράγοντας επιτυχίας του, αφού και σύμφωνα με τους Serban & Askew: “*the heart of any flow forecasting system is the hydrological model*” (Serban & Askew, 1991).

Για την προσομοίωση των διεργασιών των ελληνικών λεκανών χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον μέθοδοι και μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί με βάση λεκάνες του εξωτερικού (για παράδειγμα το μοντέλο HEC-HMS που αναπτύχθηκε από τον αμερικάνικο στρατό). Έτσι, τα ιδιαίτερα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά των ελληνικών λεκανών (βλ. 2.4.2) παραγνωρίζονται και η αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων αυξάνει. Το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ, που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, είναι κατασκευασμένο ειδικά για τις ελληνικές λεκάνες. Η αναλυτική παρουσίαση των διαδικασιών προσομοίωσης και βαθμονόμησης του μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ γίνεται στα Κεφάλαια 4 και 5 αντίστοιχα.

## 2.6 Συστήματα πλημμυρικής πρόγνωσης

### 2.6.1 Εισαγωγή. Συστήματα πλημμυρικής πρόγνωσης μικρής κλίμακας

Τα συστήματα πλημμυρικής πρόγνωσης αποτελούν ίσως το σημαντικότερο στοιχείο ενός ολοκληρωμένου αντιπλημμυρικού σχεδιασμού και διαχείρισης πλημμυρών (flood management). Αποτελούν μία σύζευξη μετεωρολογικών δεδομένων και προγνώσεων και υδρολογικών μοντέλων σε συνδυασμό με συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης για τον πλημμυρικό κίνδυνο. Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Μετεωρολογικό Οργανισμό (WMO, 2011) οι κύριες συνιστώσες ενός επιτυχημένου συστήματος πρόγνωσης και έγκαιρης προειδοποίησης πλημμύρων είναι:

- (i) συλλογή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο για την πρόβλεψη του χρόνου έναρξης και της σοβαρότητας των πλημμύρων
- (ii) κατάλληλη προετοιμασία των πληροφοριών που προκύπτουν από τις προγνώσεις σχετικά με τις επιπτώσεις των πλημμυρών στο φυσικό και ανθρωπογενές περιβάλλον και την αντίστοιχη προετοιμασία μηνυμάτων προειδοποίησης

- (iii) διάδοση και ανακοίνωση των εν λόγω μηνυμάτων χωρίς ασάφειες με παράλληλη υπόδειξη των ενδεδειγμένων δράσεων για την αποφυγή των καταστροφών και αναμονή ανταπόκρισης από τις αρμόδιες υπηρεσίες
- (iv) επαναξιολόγηση του συστήματος πλημμυρικής πρόγνωσης και προειδοποίησης μετά από πλημμυρικά γεγονότα

Οι παραπάνω συνιστώσες αναφέρονται στο σχεδιασμό ενός τέτοιου συστήματος σε εθνικό επίπεδο. Είναι σημαντικό να σημειωθεί εδώ ότι ο σχεδιασμός ενός συστήματος πλημμυρικής πρόγνωσης γίνεται με την παραδοχή ότι δεν είναι δυνατόν να προβλεφθούν με ακρίβεια όλα τα πλημμυρικά γεγονότα και έντασή τους και αυτό γιατί οι πλημμύρες είναι φαινόμενα στα οποία ενυπάρχουν πολλές συνιστώσες που είναι δύσκολο να προβλεφθούν (βλ. 2.6.4).

Ένα ολοκληρωμένο σύστημα πρόγνωσης πλημμύρας με αναφορά σε μία συγκεκριμένη λεκάνη απορροής περιλαμβάνει:

- (i) ένα πυκνό δίκτυο σταθμών, μετεωρολογικών και υδρομετρικών, εντός ή στην ευρύτερη περιοχή της λεκάνης, σε συνδυασμό με ένα αυτόματο (τηλεμετρικό) σύστημα συλλογής των δεδομένων αυτών για την κατάλληλη επεξεργασία. Το δίκτυο αυτό μπορεί να υποβοηθείται από μετεωρολογικά ραντάρ ή δορυφόρους και θα λειτουργεί σε πραγματικό χρόνο.
- (ii) πρόσβαση στην έξοδο των μετεωρολογικών προγνώσεων για την ευρύτερη περιοχή και συγκεκριμένα στις ποσοτικές (ή ποιοτικές αν δεν είναι δυνατή η ποσοτική πρόγνωση) προγνώσεις βροχόπτωσης (ή και θερμοκρασίας για την εκτίμηση της εξατμοδιαπνοής) με όσο το δυνατόν μικρότερη κλίμακα πρόγνωσης. Οι προγνώσεις αυτές μπορεί να προέρχονται είτε από αριθμητικά μοντέλα πρόγνωσης καιρού είτε από μεθόδους Ensemble.
- (iii) ένα κατάλληλο βαθμονομημένο υδρολογικό μοντέλο προσομοίωσης της λεκάνης απορροής που έχει ενσωματωμένο και κατάλληλο μοντέλο διόδευσης, το οποίο θα είναι ικανό να συλλέγει όλα τα απαραίτητα δεδομένα εισόδου και θα εκτιμά την απορροή στην έξοδο της λεκάνης απορροής μαζί με την ενυπάρχουσα σε αυτή αβεβαιότητα.

Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 2.4.2, απαραίτητη είναι και η γνώση των ιστορικών χρονοσειρών βροχόπτωσης-απορροής για την κατάλληλη βαθμονόμηση των επιλεγμένων παραμέτρων του υδρολογικού μοντέλου. Επομένως, απαραίτητη είναι και η συνεχής πρόσβαση και ανανέωση των χρονοσειρών αυτών για τη συνεχή βελτίωση της

αποτελεσματικότητας προσομοίωσης του μοντέλου. Τέλος, απαραίτητη είναι η πρόσβαση και στα γεωγραφικά δεδομένα της περιοχής με τη συνεχή παρακολούθηση και αναθεώρησή τους, μέσω ολοκληρωμένων συστημάτων GIS. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι είναι απαραίτητη για την ομαλή λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος, η στενή συνεργασία των μετεωρολογικών και υδρολογικών υπηρεσιών, ενώ μπορεί να φανεί χρήσιμη σε αυτή την κατεύθυνση και η ενοποίησή τους.

Παρόλα αυτά, για την ολοκληρωμένη αντιμετώπιση των πλημμυρών δεν αρκεί μία επαρκής χρονικά (δηλαδή έγκαιρα) και ποσοτικά πρόγνωση της απορροής, αλλά και το πώς τα δεδομένα εξόδου του υδρολογικού μοντέλου θα αξιολογηθούν ώστε να ληφθούν οι απαραίτητες ενέργειες για την πλημμυρική προστασία και την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων μιας πλημμύρας. Έτσι, τα συστήματα έγκαιρης πλημμυρικής προειδοποίησης είναι διακριτά από τα συστήματα πρόγνωσης πλημμύρας και έχουν ως σκοπό να αξιολογήσουν τις πλημμυρικές προγνώσεις ώστε ανάλογα με τη σοβαρότητα της κατάστασης (WMO, 2011):

- (i) να ειδοποιήσουν τις αρμόδιες αρχές πολιτικής προστασίας να είναι σε ετοιμότητα
- (ii) να ενημερώσουν το κοινό για τον τόπο και χρόνο εκδήλωσης πλημμύρας
- (iii) να προειδοποιήσουν για τις πιθανές επιπτώσεις στην οδική κυκλοφορία, σε κατοικίες ή σε αντιπλημμυρικά έργα
- (iv) να παρέχουν σε άτομα και φορείς τον αναγκαίο χρόνο να προβούν σε κατάλληλες δράσεις
- (v) να δώσουν προειδοποίηση, σε ακραίες καταστάσεις, για την προετοιμασία για εκκένωση της περιοχής

Η μορφή της προειδοποίησης ποικίλλει και μπορεί να είναι από ένα απλό ποιοτικό σήμα κινδύνου εντοπισμένο σε μια αύξουσα κλίμακα επικινδυνότητας, μέχρι μια συγκεκριμένη τιμή της πλημμυρικής στάθμης σε μία περιοχή ή η κατασκευή ενός χάρτη επικινδυνότητας πλημμύρας ή πλημμυρικής στάθμης.

Οι ενέργειες σχετικές με την αξιολόγηση των πλημμυρικών προγνώσεων μπορούν να υπό την ευθύνη είτε των υδρολογικών υπηρεσιών είτε των υπηρεσιών πολιτικής προστασίας που αναπτύσσουν και κατάλληλα επιχειρησιακά σχέδια. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη και η γνώση των ανθρωπογενών δεδομένων της περιοχής, δηλαδή των δημογραφικών δεδομένων, των θέσεων των αντιπλημμυρικών έργων, των κυκλοφοριακών δεδομένων και των χρήσεων γης και ειδικά των βιομηχανικών χρήσεων, ώστε να μπορούν να λαμβάνονται οι κατάλληλες επιχειρησιακές ενέργειες προστασίας.

Τέλος, η συνεχής αξιολόγηση των συστημάτων πλημμυρικής πρόγνωσης και η ανάλυση και αποθήκευση των αποτελεσμάτων τους, μπορούν να συμβάλλουν καθοριστικά στην βελτίωση του αντιπλημμυρικού σχεδιασμού των περιοχών και άρα στην *de facto* αντιπλημμυρική προστασία τους.

### **2.6.2 Συστήματα πλημμυρικής πρόγνωσης μεγάλης κλίμακας. Η περίπτωση του EFAS (European Flood Alert System)**

Πολλές φορές η ανάπτυξη ενός συστήματος πλημμυρικής πρόγνωσης σε τοπικό ακόμα και σε εθνικό επίπεδο, δεν αρκεί για την αποφυγή των κινδύνων που σχετίζονται με τις πλημμύρες. Αυτό συμβαίνει διότι οι μεγάλες λεκάνες απορροής, όπως οι μεγάλες ευρωπαϊκές λεκάνες, απλώνονται σε πολλές περισσότερες από μία χώρες. Έτσι, οι «διασυνοριακές» πλημμύρες απαιτούν ένα σχεδιασμό συστημάτων πλημμυρικής πρόγνωσης και έγκαιρης προειδοποίησης σε μεγαλύτερη της εθνικής κλίμακα.

Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι το *EFAS* (European Flood Alert System - Ευρωπαϊκό Σύστημα Πλημμυρικής Προειδοποίησης). Το *EFAS* αναπτύχθηκε λόγω των συνεχών μεγάλων πλημμυρικών γεγονότων στις διασυνοριακές λεκάνες της Ευρώπης και συγκεκριμένα αμέσως μετά τις μεγάλες πλημμύρες στη λεκάνες απορροής του Έλβα και του Δούναβη το 2002 που άφησαν πίσω τους τεράστιες οικονομικές ζημιές και ευτυχώς όχι ανθρώπινα θύματα.

Το αμέσως επόμενο έτος η Ευρωπαϊκή Ένωση πήρε την πρωτοβουλία να αναπτύξει ένα σύστημα το οποίο θα μπορούσε να παρέχει μέσης κλίμακας (3 με 10 ημέρες νωρίτερα) πλημμυρικές προγνώσεις στις διασυνοριακές λεκάνες απορροής της Ευρώπης, με σκοπό την αύξηση της ετοιμότητας και άρα τη μείωση των δυσμενών συνεπειών από την πλημμυρική δράση (Bartholmes et al, 2009). Έτσι, τρία χρόνια αργότερα, το 2006, το *EFAS* άρχισε την δοκιμαστική λειτουργία του, ενώ μετά από 6 χρόνια συνεχούς αξιολόγησης και βελτίωσης ξεκίνησε το 2012 την επιχειρησιακή λειτουργία του, με πάνω από 30 εθνικές υδρολογικές υπηρεσίες και υπηρεσίες πολιτικής προστασίας να συμμετέχουν στο εγχείρημα (Wetterhall et al, 2013).

Το *EFAS* χρησιμοποιεί μετεωρολογικά δεδομένα που έχουν προκύψει από αριθμητικά μοντέλα πρόγνωσης καιρού από τη DWD (German National Weather Service) με χρονική ανοχή (*lead time*) 7 ημερών και από το ECMWF (βλ. 2.3.1) χρησιμοποιεί δεδομένα που έχουν προκύψει τόσο από αριθμητικά μοντέλα πρόγνωσης καιρού όσο και δεδομένα προερχόμενα από μεθόδους Ensemble (51 σετ διαφορετικών ντετερμινιστικών

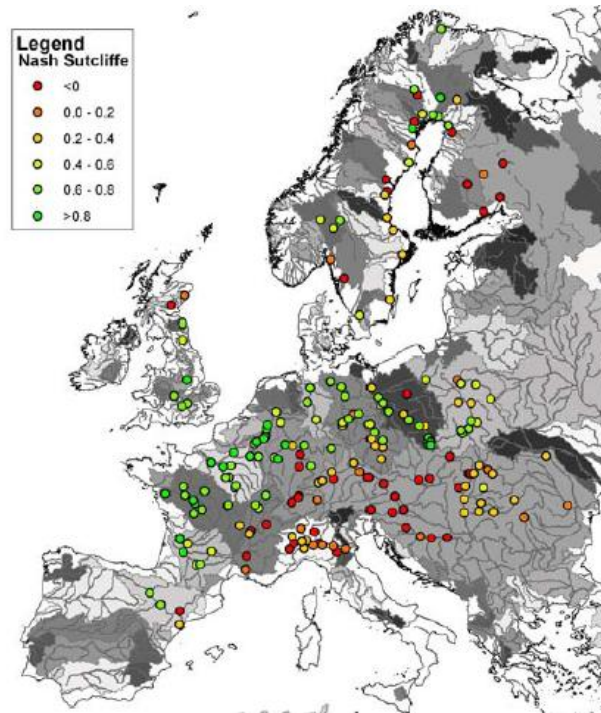
μετεωρολογικών προγνώσεων) με χρονική ανοχή 10 ημερών (Thielen et al., 2009). Επιπλέον χρησιμοποιεί δεδομένα Ensemble και από το πιο τοπικό μοντέλο Cosmo-LEPS για τη νότια Ευρώπη (16 σετ προγνώσεων).

Όσον αφορά τα πραγματικά δεδομένα το EFAS χρησιμοποιεί παρατηρήσεις απορροής και βροχής από όλη την Ευρώπη μέσω των συστημάτων EU-FLOOD-GIS και ETN-R που τέθηκαν σε λειτουργία από το 2009, ενώ μέσω του JRC (Joint Research Centre, Italy) αντλεί και όλα τα απαραίτητα γεωγραφικά δεδομένα.

Με τα παραπάνω δεδομένα καλύπτεται η πλημμυρική πρόγνωση σε χωρική ανάλυση 5 km σε όλη την Ευρώπη και οι κατάλληλες επεξεργασίες για την πλημμυρική πρόγνωση πραγματοποιούνται δύο φορές τη μέρα και τα αποτελέσματά τους διοχετεύονται σε όλες τις εθνικές αρμόδιες υπηρεσίες.

Το υδρολογικό μοντέλο που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση, ονομάζεται LISFLOOD και είναι ένα υβριδικό μοντέλο μεταξύ εννοιολογικού και φυσικής βάσης μοντέλου που συνδυάζεται με ένα μοντέλο διόδευσης (Thielen et al., 2009) και προσομοιώνει συνδυασμένα τις επιφανειακές και υπόγειες υδρολογικές διεργασίες. Το LISFLOOD είναι ειδικά σχεδιασμένο για μεγάλες λεκάνες απορροής ποταμών, και χρησιμοποιώντας γεωγραφικά δεδομένα από το JRC, καθίσταται συμβατό με το EFAS (περισσότερες πληροφορίες για το LISFLOOD μπορούν να βρεθούν στο Van der Knijff et al., 2008). Το LISFLOOD έχει ακολουθήσει μια στοχαστική διαδικασία βαθμονόμησης των παραμέτρων του, θεωρώντας τις σταθερές κατά τη φάση λειτουργίας του και επιχειρώντας να προσδιορίσει την αβεβαιότητα στις τιμές τους. Η γενική επίδοση του μοντέλου στις ευρωπαϊκές λεκάνες φαίνεται στο Σχήμα 2.9 (βλ. και 5.3.1). Αποδεικνύεται ότι στους περισσότερους υδρομετρικούς σταθμούς το μοντέλο προσομοιώνει ικανοποιητικά τις υδρομετρικές παρατηρήσεις.





**Σχήμα 2.9** Η γενική επίδοση του μοντέλου LISFLOOD σε επιλεγμένους υδρομετρικούς σταθμούς (Πηγή: Thielen et al., 2009)

Για την πλημμυρική προειδοποίηση έχουν αναπτυχθεί ορισμένα ποιοτικά κρίσιμα όρια, εφόσον τα προσομοιωμένα υδρογραφήματα δε μπορούν να δώσουν κάποια συγκεκριμένη πληροφορία για την πλημμυρική επικινδυνότητα. Τα όρια αυτά, ορίζονται με βάση την υπέρβαση ιστορικών παρατηρήσεων απορροής για κάθε σημείο (grid) προσομοίωσης και φαίνονται στον Πίνακα 2.2. Τα όρια αυτά αναδεικνύονται σε αντίστοιχες πλημμυρικές προειδοποιήσεις σε κάθε σημείο μόνο όταν ξεπεραστούν για τρεις συνεχόμενες 12-ωρες προσομοιώσεις (criterion of persistence, Thielen et al., 2009).

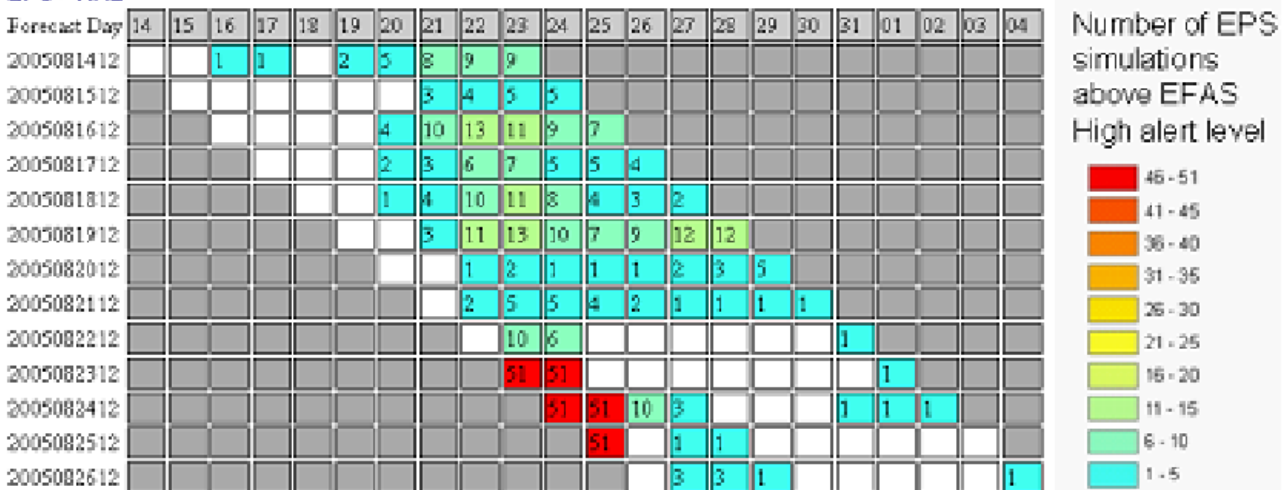
**Πίνακας 2.2** Τα κρίσιμα όρια (critical thresholds) του μοντέλου EFAS για την πλημμυρική επικινδυνότητα (Thielen et al. 2009)

EFAS threshold	Colour	Description
S (Severe)	■	Very high possibility of flooding, potentially severe flooding expected.
H (High)	■	High possibility of flooding, bank-full conditions or higher expected.
M (Medium)	■	Water levels high but no flooding expected.
L (Low)	■	Water levels higher than normal but no flooding expected.

Τα τελικά οπτικοποιημένα αποτελέσματα του EFAS είναι είτε πλημμυρικά υδρογραφήματα με υπολογισμένο το εύρος διακύμανσης της πλημμυρικής πρόγνωσης που αναφέρονται σε χρήση ντετερμινιστικών δεδομένων, είτε πίνακες που απεικονίζουν τις πλημμυρικές προειδοποιήσεις (Σχήμα 2.10) με βάση ντετερμινιστικά ή πιθανολογικά (ensemble)

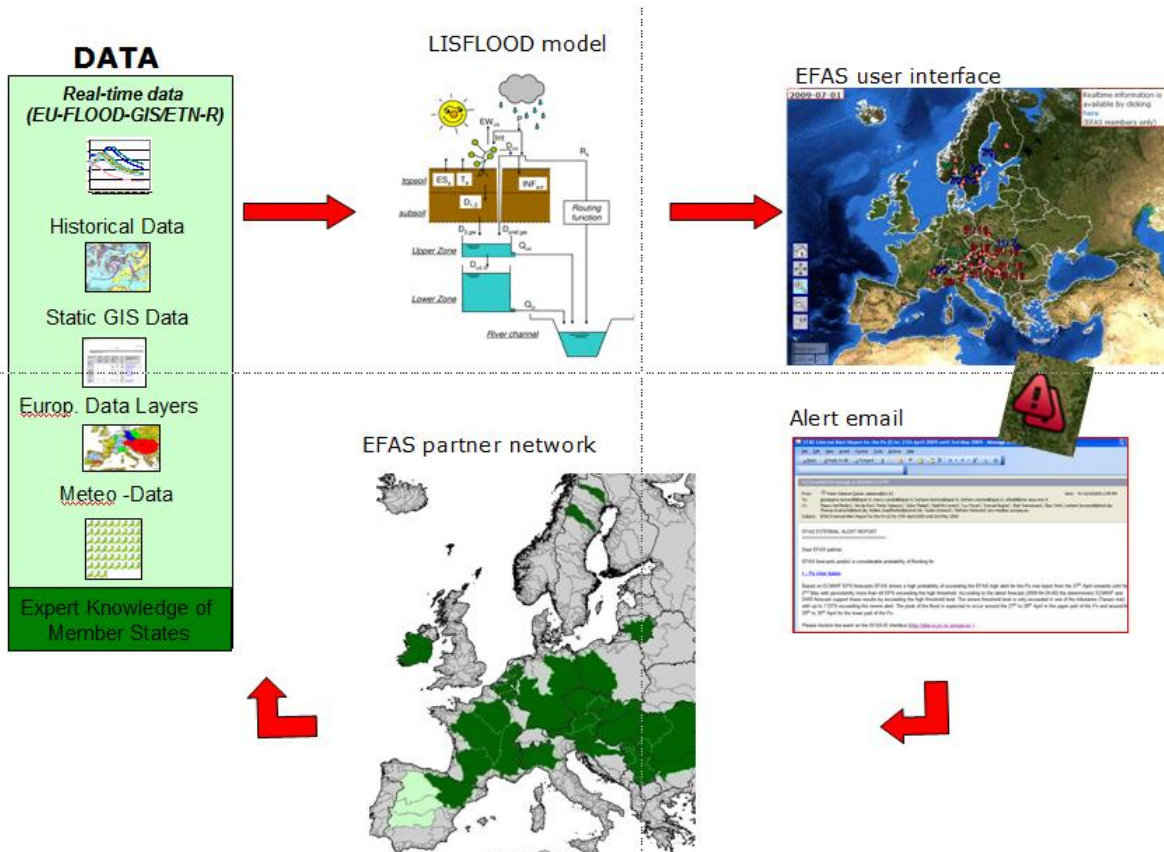
δεδομένα, τα οποία χρησιμοποιούνται κατά κόρον. Ένα πλημμυρικό γεγονός ορίζεται είτε όταν ξεπεραστεί το “high alert threshold” με βάση το “criterion of persistence” για ντετερμινιστικές προγνώσεις, είτε όταν 10 από τα 51 σετ προγνώσεων των δεδομένων Ensemble υποδεικνύουν πλημμυρικό γεγονός με βάση τον ντετερμινιστικό ορισμό, για πιθανολογικές προγνώσεις. Οι προειδοποιήσεις στέλνονται μέσω e-mail αυτόματα στις αρμόδιες υπηρεσίες της χώρας για την οποία υπάρχει ο κίνδυνος πλημμύρας σε κάποια περιοχή της.

**EPS > HAL**



**Σχήμα 2.10** Πίνακας απεικόνισης της πλημμυρικής προειδοποίησης με βάση προγνώσεις Ensemble (Πηγή: Thielen et al., 2009)

Γενικά, έχει αποφασιστεί η προληπτική πλημμυρική προειδοποίηση ακόμα και για περιπτώσεις που ο κίνδυνος πλημμύρας δε φαίνεται τόσο πιθανός. Ακόμα και με αυτή την υπόθεση, μέχρι σήμερα έχει προβλεφθεί σωστά πάνω από το 80% των πλημμυρικών γεγονότων, με έγκαιρες και έγκυρες προγνώσεις έως και 5 ημέρες πριν. Για παράδειγμα, στις πλημμύρες που έπληξαν την κεντρική Ευρώπη αλλά κυρίως την Πολωνία το 2010, θεωρείται ότι λειτουργία του EFAS, ελαχιστοποίησε κατά πολύ τις οικονομικές συνέπειες των πλημμυρών. Επίσης έχει καταδειχθεί ότι η χρήση δεδομένων ensemble οδηγεί σε πιο αξιόπιστες πλημμυρικές προγνώσεις από τις ντετερμινιστικές προγνώσεις με αριθμητικά μοντέλα καιρού (Bartholmes et al., 2009). Η λειτουργία του EFAS αποδίδεται παραστατικά στο Σχήμα 2.11.



**Σχήμα 2.11** Η επιχειρησιακή λειτουργία του EFAS (Πηγή: <http://newsletter.gmes.info/>)

Ένα ανάλογο σύστημα επιχειρείται να αναπτυχθεί και στην αφρικανική ήπειρο, το AFFS (African Flood Forecasting System). Το AFFS έχει σχεδιαστεί στα πρότυπα του EFAS, χρησιμοποιώντας το υδρολογικό μοντέλο LISFLOOD και τη λογική των κρίσιμων ορίων για την πλημμυρική επικινδυνότητα. Χρησιμοποιεί επίσης δεδομένα από το ECMWF και η επίδοσή του έχει κριθεί ικανοποιητική για μεγάλα πλημμυρικά γεγονότα σε μεγάλες λεκάνες απορροής, όχι όμως και σε μικρότερες λεκάνες (Thiemig et al., 2014).

### 2.6.3 Πρόγνωση αστραπιαίων πλημμυρών (flash floods)

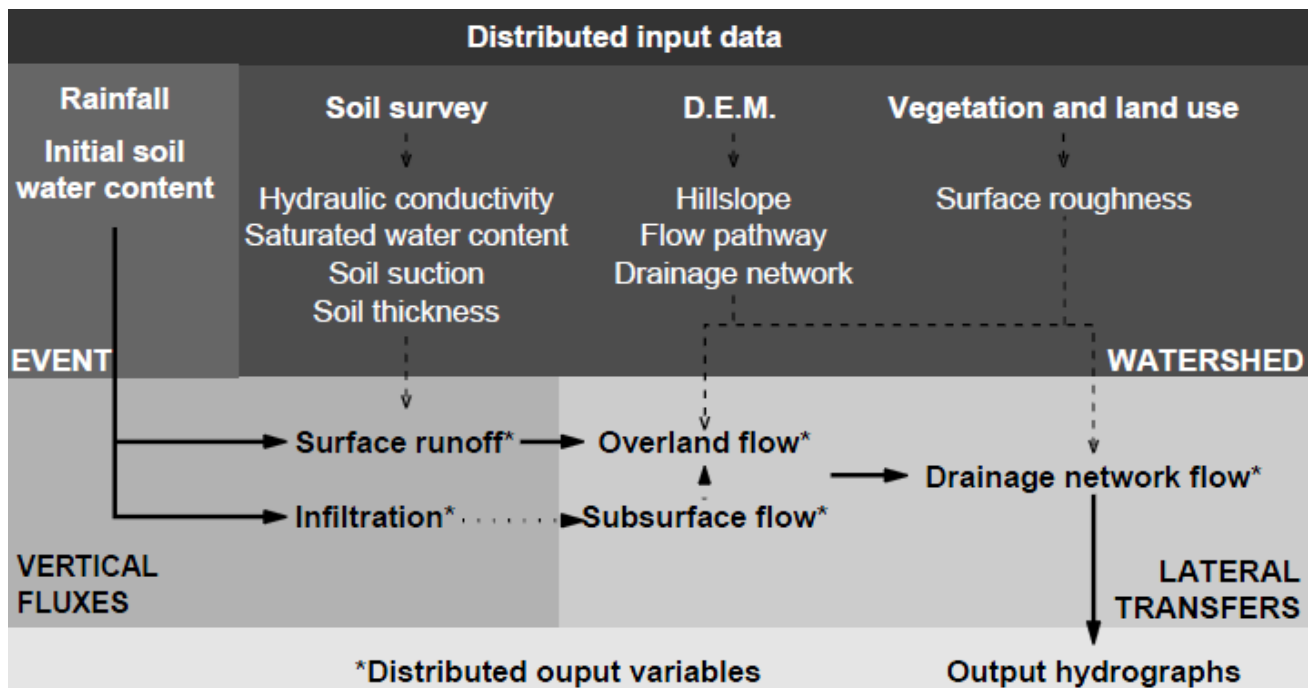
Ορισμένα στοιχεία για την εμφάνιση και τη δράση των *flash floods* δόθηκαν στην παράγραφο 2.4.2. Αναμφίβολα, η ανάπτυξη συστημάτων πρόγνωσης τέτοιων πλημμυρών έχει διακριτά στοιχεία από τα συστήματα πρόγνωσης μεγάλης κλίμακας, εφόσον η δράση των *flash floods* εντοπίζεται σε μικρές λεκάνες απορροής κυρίως στη Μεσόγειο και με πολύ πιο περιορισμένους χρόνους απόκρισης, αφού η πλημμύρα μπορεί σε ορισμένες περιπτώσεις να εμφανιστεί λίγα λεπτά μετά την εκδήλωση της βροχής, σε αντίθεση με τις πλημμύρες σε μεγάλες ευρωπαϊκές λεκάνες όπου παρά τη μεγάλη τους εμβέλεια, εκδηλώνονται τις περισσότερες φορές μετά από ένα επαρκές χρονικό διάστημα από τη στιγμή δράσης του αίτιου που της προκαλεί.

Οι ιδιαιτερότητες των συστημάτων πλημμυρικής πρόγνωσης για *flash floods* είναι οι εξής (WMO, 2011 · Meon, 2006):

- (i) τα μετεωρολογικά δεδομένα που χρησιμοποιούνται αφορούν ως επί το πλείστον προγνώσεις μικρής κλίμακας (1 ή 2 ημερών, ενώ για ορισμένα μοντέλα ο χρόνος αυτός είναι μικρότερος από 24 ώρες) και απαιτείται μεγάλη χωρική ανάλυση
- (ii) τα υδρολογικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται είναι γενικώς κατανεμημένα ώστε να αναπαριστώνται όσο πιο φειδωλά οι υδρολογικές διεργασίες των υπό εξέταση λεκανών, καθώς το αποτέλεσμα των μοντέλων δεν ενδιαφέρει να είναι η ακριβής προσέγγιση του μεγέθους ή της ακριβούς στιγμής εμφάνισης της πλημμύρας, αλλά το αν θα ξεπεραστούν ορισμένα κρίσιμα πλημμυρικά όρια, ενώ επίσης τα κατανεμημένα μοντέλα προσαρμόζονται καλύτερα στην έντονη χωρική μεταβλητότητα της βροχόπτωσης αλλά και της τοπογραφίας που σχετίζονται με τα *flash floods*
- (iii) η έλλειψη μετρήσεων σε λεκάνες που αποκρίνουν *flash floods*, ειδικά στις μεσογειακές λεκάνες λόγω της ιδιαίτερης γεωμορφολογίας τους και του ιδιαίτερα μικρού μεγέθους τους, συνηγορεί επίσης στη φειδωλότητα των μοντέλων (επιλογή παραμέτρων ορισμένες φορές ακόμα και χωρίς βαθμονόμηση) αλλά και στην αναβάθμιση του ρόλου των μετεωρολογικών ραντάρ για την παροχή επιπλέον δεδομένων
- (iv) η «αστραπιαία» εμφάνιση τέτοιων πλημμύρων σε σχέση με την εμφάνιση των βροχών ή καταιγίδων που τις προκαλούν καθιστά απαραίτητη την αντιμετώπιση των *flash floods* ως ένα υδρο-μετεωρολογικό και όχι αμιγώς υδρολογικό φαινόμενο γεγονός που καθιστά απαραίτητη την αναβαθμισμένη συνεργασία των αρμόδιων υδρολογικών και μετεωρολογικών υπηρεσιών για την έγκαιρη και έγκυρη πρόγνωση

Στα πλαίσια αυτά έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι πλημμυρικής πρόγνωσης για *flash floods*, καθώς και ειδικά σχεδιασμένα υδρολογικά μοντέλα. Ένα από αυτά, διαδεδομένο σε χρήση στις μεσογειακές λεκάνες για τις οποίες αναπτύχθηκε, είναι το MARINE (Γαλ.: *Modélisation de l'Anticipation du Ruissellement et des Inondations pour des événements Extrêmes*: «Μοντέλο για την πρόγνωση της απορροής και των πλημμυρών για ακραία γεγονότα», Roux et al., 2011), το οποίο είναι ένα κατανεμημένο υδρολογικό μοντέλο, που χρησιμοποιεί απλές σχέσεις για την προσομοίωση των φυσικών διεργασιών (επιφανειακή ροή, διήθηση, διόδευση) με φειδωλή χρήση φυσικά ορισμένων παραμέτρων. Η επίδοση (βλ. 5.3.1) του

μοντέλου αυτού στην προσομοίωση διάφορων πλημμυρικών γεγονότων (*flash flood events*) σε διάφορες μεσογειακές λεκάνες είναι πάνω από 70% (Garambois et al., 2013), ενώ η προσαρμογή του σε λεκάνες χωρίς υδρομετρικά δεδομένα (*ungauged basins*) έχει επιτευχθεί μέσω ανάλυσης ευαισθησίας των παραμέτρων του και επαρκούς επαλήθευσής του σε λεκάνες με επαρκή δεδομένα. Η δομή του μοντέλου MARINE φαίνεται σχηματικά στο Σχήμα 2.12.



**Σχήμα 2.12** Η δομή του μοντέλου MARINE προσαρμοσμένου για την προσομοίωση *flash floods* (Πηγή: Roux et al., 2011)

Μία ακόμη μέθοδος έχει αναπτυχθεί για την πρόγνωση των *flash floods* είναι η FFG (*flash flood guidance method*). Ως FFG ορίζεται το ύψος βροχοπτώσης μιας ορισμένης διάρκειας που λαμβάνεται ομοιόμορφη στο χώρο και στο χρόνο σε μια συγκεκριμένη λεκάνη απορροής και είναι ικανό να προκαλέσει μικρής έκτασης πλημμύρες (για παράδειγμα με περίοδο επαναφοράς ίση με 2 έτη) στην έξοδο της λεκάνης (Norbiato et al., 2009). Το FFG υπολογίζεται «τρέχοντας» αντίστροφα ένα ημικαταναμημένο εννοιολογικό συνεχές υδρολογικό μοντέλο, με αρχικές συνθήκες την εδαφική υγρασία στην εν λόγω λεκάνη. Πραγματοποιώντας καθημερινά με βάση τις νέες αρχικές συνθήκες μία νέα τιμή για το FFG, είναι δυνατό να ανιχνευθεί η πλημμυρική πιθανότητα: η τιμή του FFG συγκρίνεται είτε με την σε πραγματικό χρόνο παρατηρημένη βροχοπτώση είτε με την πρόγνωση για βροχοπτώση στην ίδια λεκάνη την ίδια χρονική στιγμή και αν οι δεύτερες ξεπερνούν το FFG, τότε με βάση όρια που ορίζονται αναλύοντας τα ιστορικά δεδομένα της λεκάνης, μπορεί να εκτιμηθεί η πλημμυρική επικινδυνότητα. Και σε αυτή τη περίπτωση δεν

εκτιμάται το ακριβές μέγεθος και η χρονική στιγμή της πλημμύρας αλλά η πλημμυρική ένδειξη είναι τις περισσότερες φορές αρκετή ώστε να ληφθούν όλα τα απαραίτητα προληπτικά μέτρα μετρίασης των πλημμυρικών συνεπειών.

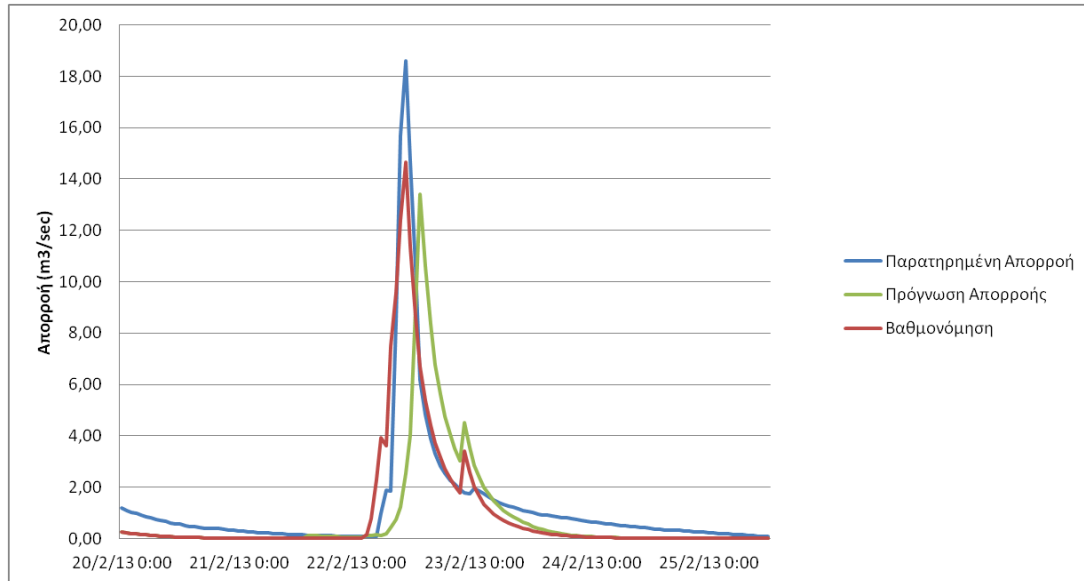
Σε ελληνικό επίπεδο, όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 2.5.4, δεν έχουν αναπτυχθεί ακόμα τα κατάλληλα υδρολογικά μοντέλα για τις ελληνικές λεκάνες απορροής, οπότε η ανάπτυξη ολοκληρωμένων συστημάτων πλημμυρικής πρόγνωσης απουσιάζει παντελώς και οι πλημμυρικές προγνώσεις όταν πραγματοποιούνται, βασίζονται στην εμπειρία ή τη διαίσθηση των αρμόδιων αρχών με βάση το παρατηρημένο ή εκτιμώμενο ύψος βροχής σε μια περιοχή.

#### **2.6.4 Η αξιοπιστία των συστημάτων πλημμυρικής πρόγνωσης**

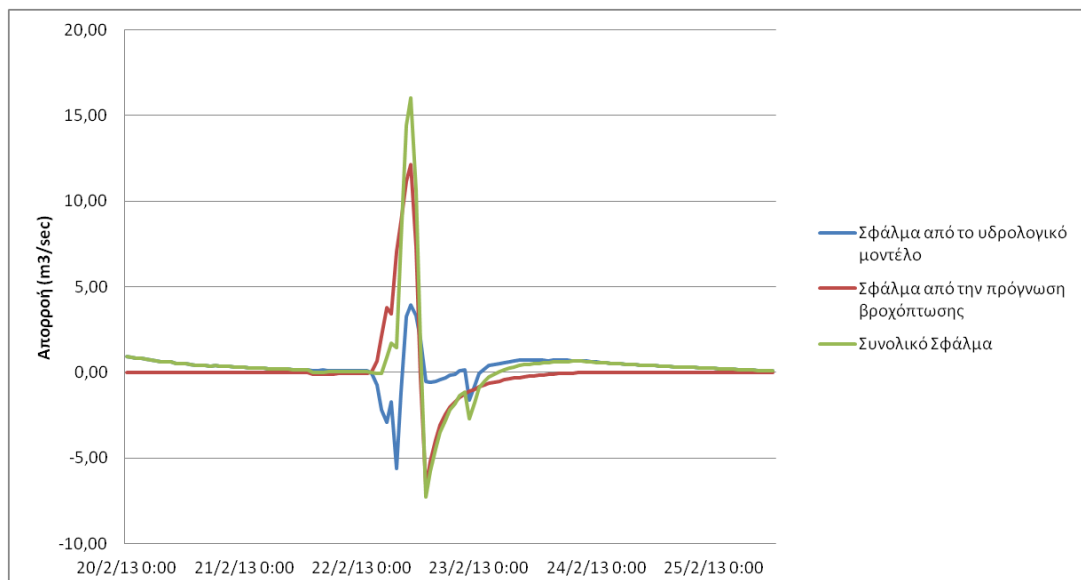
Είναι δεδομένο ότι σε ένα τόσο πολύπλοκο και πολυπαραγοντικό τεχνικό σύστημα, όπως ένα σύστημα πλημμυρικής πρόγνωσης, τα σφάλματα που υπεισέρχονται είναι διάφορων πηγών. Συγκεκριμένα, τα σφάλματα μπορεί να προέρχονται από (WMO, 2011):

- (i) το υδρολογικό μοντέλο (μη επαρκής προσομοίωση των φυσικών διεργασιών)
- (ii) την επιλογή και τις τιμές των βαθμονομημένων παραμέτρων
- (iii) την επιλογή των αρχικών συνθηκών
- (iv) τις παρατηρημένες χρονοσειρές που χρησιμοποιούνται για τη βαθμονόμηση των παραμέτρων ή και την πρόγνωση σε πραγματικό χρόνο (λόγω για παράδειγμα σφάλματος στα όργανα μέτρησης ή τη μεθοδολογία αναγωγής τους σε επιφανειακά μεγέθη)
- (v) τα δεδομένα πρόγνωσης που εισάγονται στο μοντέλο

Η ποσοτικοποίηση των παραπάνω σφαλμάτων είναι δύσκολο να πραγματοποιηθεί αφενός αλλά αφετέρου δεν έχει ιδιαίτερο νόημα. Σε γενικές γραμμές, μπορούμε να ισχυριστούμε ότι το σφάλμα που οφείλεται στους τέσσερις πρώτους παράγοντες είναι η διαφορά της παρατηρημένης απορροής από την απορροής που προέκυψε από τη βαθμονόμηση και μπορεί να ονομαστεί *σφάλμα από το υδρολογικό μοντέλο*, ενώ η διαφορά της τελικής πρόγνωσης απορροής από τη βαθμονόμηση οφείλεται στον πέμπτο παράγοντα και μπορεί να ονομαστεί *σφάλμα από την πρόγνωση βροχόπτωσης*. Το άθροισμα των δύο παραπάνω σφαλμάτων είναι το συνολικό *σφάλμα της πλημμυρικής πρόγνωσης* (Σχήματα 2.13 και 2.14).



**Σχήμα 2.13** Παράδειγμα πλημμυρικής πρόγνωσης



**Σχήμα 2.14** Παράδειγμα υπολογισμού σφάλματος με βάση το Σχήμα 2.13

Είναι σημαντικό να σημειωθεί εδώ ότι με τη χρήση των μεθόδων ensemble, οι οποίες επιτρέπουν τον υπολογισμό της αβεβαιότητας της πρόγνωσης βροχοπτώσεως, μπορεί μεν να βοηθήσει στον προσδιορισμό του σφάλματος από την πρόγνωση βροχοπτώσεως, αλλά δεν υπάρχει σε καμία περίπτωση γραμμική σχέση μεταξύ της αβεβαιότητας αυτής και του εν λόγω σφάλματος (Bartholmes et al., 2009).

Όσον αφορά τα συστήματα προειδοποίησης, ο υπολογισμός των σφαλμάτων γίνεται με βάση την επιτυχή ή όχι προειδοποίηση ανάλογα με το σύστημα κρίσιμων ορίων που έχει οριστεί σε σχέση με το πραγματικό μέγεθος της πλημμύρας που συντελείται. Με βάση τη λογική αυτή ορίζονται ορισμένα μεγέθη σύμφωνα με τον Πίνακα 2.3.

**Πίνακας 2.3** Μεγέθη που χρησιμοποιούνται για την αξιοπιστία της πλημμυρικής πρόγνωσης

		Παρατηρήθηκε πλημμύρα;		
		ΝΑΙ	ΟΧΙ	SUM
Προγνώστηκε πλημμύρα;	ΝΑΙ	a (HIT)	b	a+b
	ΟΧΙ	c (MISS)	d	c+d
	SUM	a+c	b+d	a+b+c+d

Με βάση τα παραπάνω μεγέθη ορίζονται οι ακόλουθοι δείκτες (Bartholmes et al., 2009):

- η πιθανότητα ανίχνευσης της πλημμύρας (*probability of detection - POD*):

$$POD = \frac{a}{a+c} \quad (2.7)$$

- η συχνότητα των "hits" (*frequency of hits - FOH*):

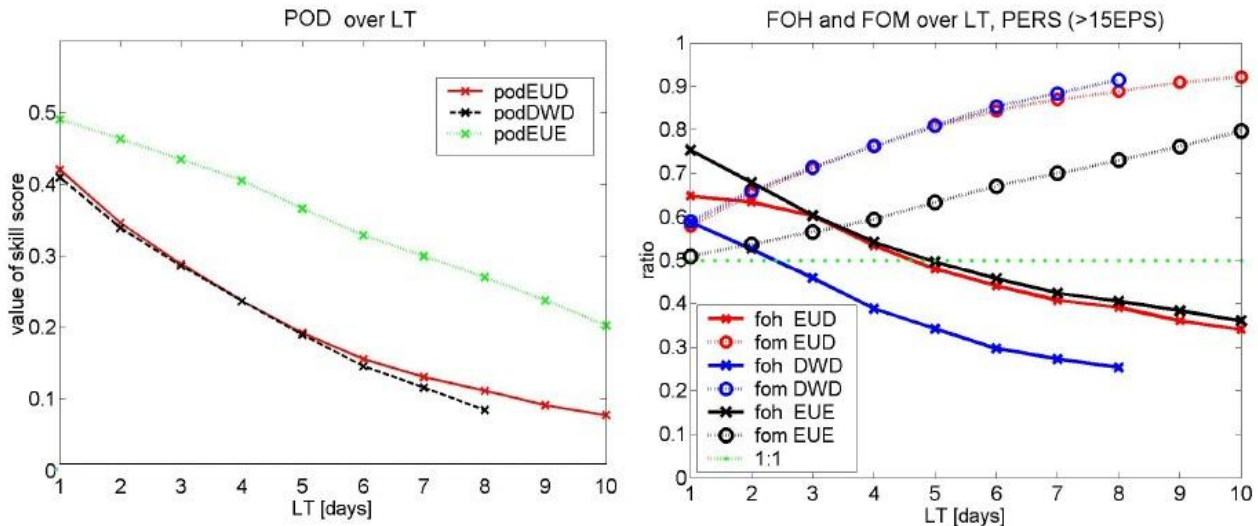
$$FOH = \frac{a}{a+b} \quad (2.8)$$

- η συχνότητα των "misses" (*frequency of misses - FOM*):

$$FOM = \frac{c}{a+c} \quad (2.9)$$

Οι παραπάνω δείκτες λαμβάνουν, όπως είναι λογικό, τιμές από 0 έως 1 (για το *POD* και το *FOH* η καλύτερη τιμή είναι το 1 ενώ για το *FOM* το 0) και είναι οι πιο ενδεικτικοί όσον αφορά την ένδειξη της αξιοπιστίας των πλημμυρικών προειδοποιήσεων. Στο Σχήμα 2.15 φαίνεται η εξέλιξη των δεικτών αυτών σε σχέση με τα χρονικά όρια πρόγνωσης (*lead times*) στο EFAS, όπου παρατηρούμε ότι η επίδοση του συστήματος μειώνεται όσο αυξάνουμε το όριο πρόγνωσης, όπως είναι λογικό. Παρατηρούμε ότι, όπως έχει ήδη αναφερθεί η χρήση δεδομένων ensemble (πιθανοτικών) έχει σαφώς καλύτερες επιδόσεις.





**Σχήμα 2.15** Η επίδοση του EFAS χρησιμοποιώντας τόσο ντετερμινιστικά και πιθανοτικά δεδομένα σε σχέση το χρόνο διεξαγωγής της πρόγνωσης (Πηγή: Bartholmes et al., 2009)

Συμπερασματικά, η πυκνωση του δικτύου συλλογής μετεωρολογικών και υδρομετρικών δεδομένων, η χρήση μετεωρολογικών ραντάρ και δορυφόρων για τον υπολογισμό επιπλέον μετεωρολογικών στοιχείων, η ευρεία διάδοση και χρήση των μεθόδων ensemble για την πρόγνωση της βροχόπτωσης, η συστηματική μελέτη των ιδιαίτερων φυσιογραφικών χαρακτηριστικών των λεκανών απορροής και της μεταβολής τους για τη δημιουργία αποτελεσματικότερων υδρολογικών μοντέλων, η συστηματική ενιαία συλλογή δεδομένων στην κλίμακα αντιμετώπισης των πλημμυρικών δεδομένων, η ένταση της συνεργασίας των υδρολογικών και μετεωρολογικών υπηρεσιών, η ταχεία και σαφής αυτόματη μετάδοση δεδομένων και προγνώσεων σε πραγματικό χρόνο (ειδικά για flash floods) καθώς και η εκπόνηση των απαραίτητων από την Οδηγία 2007/60/EK για τις πλημμύρες, χαρτών πλημμυρικής επικινδυνότητας είναι όλοι παράγοντες που θα συντελούσαν σε ελληνικό και ευρωπαϊκό επίπεδο στην καλύτερη αντιμετώπιση των πλημμυρικών φαινομένων, τόσο με αύξηση της κλίμακας πρόγνωσης, όσο και στη βελτίωση της αξιοπιστίας τους.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:** **ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΣΥΛΛΟΓΗ** **ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ**

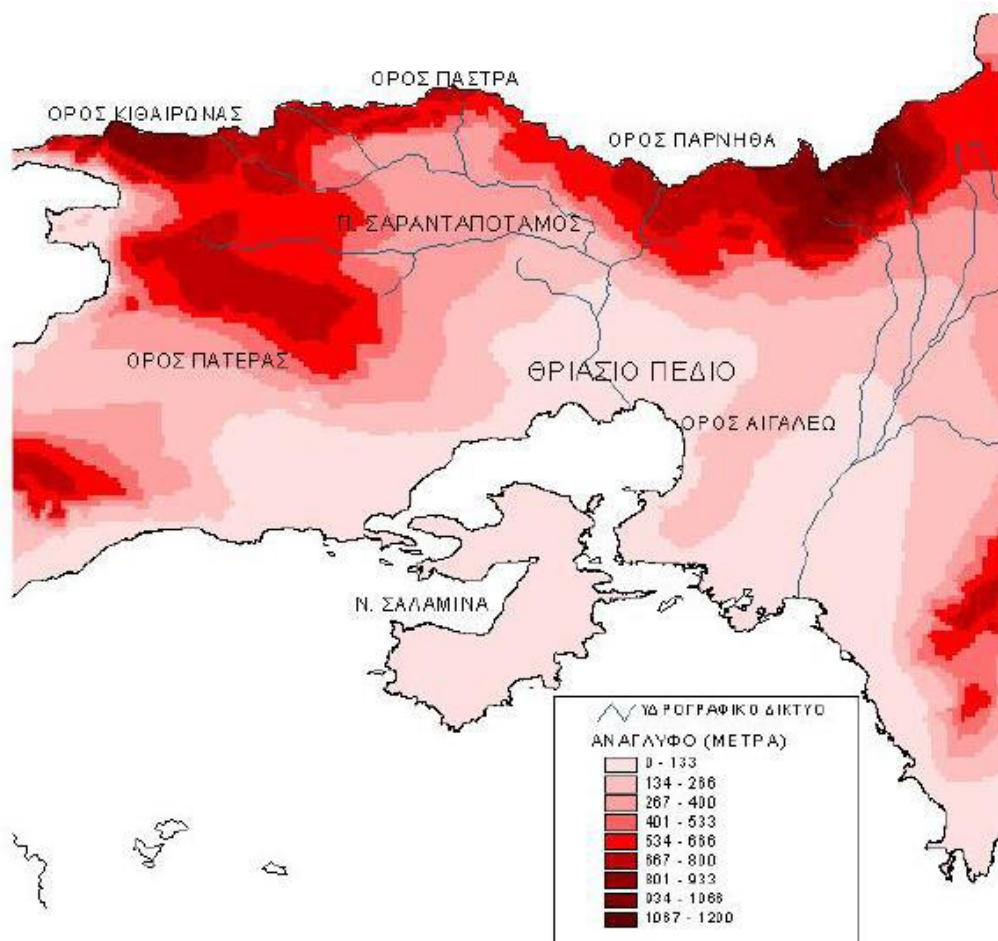
### **3.1 Περιοχή μελέτης: Η λεκάνη του Σαρανταπόταμου**

#### **3.1.1 Η ευρύτερη περιοχή του Θριασίου Πεδίου**

Η περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας είναι το ανάντη τμήμα της λεκάνης απορροής του Σαρανταπόταμου και ανήκει στο Υδατικό Διαμέρισμα της Αττικής (ΥΔ 06). Στο τμήμα αυτό δε υπάρχει κάποια αστική ανάπτυξη, παρά μόνο χωριά, με σημαντικότερα από αυτά τα Βίλια (1.269 κάτοικοι, 2011, ΕΛΣΤΑΤ) και η Οινόη (765 κάτοικοι, 2001, ΕΛΣΤΑΤ). Αντίθετα, η ευρύτερη περιοχή της Δυτικής Αττικής και συγκεκριμένα το κατάντη τμήμα του Σαρανταπόταμου, παρουσιάζει έντονα το φαινόμενο της αστικοποίησης, με κυριότερα αστικά κέντρα την Ελευσίνα, τον Ασπρόπυργο, τη Μάνδρα και τη Μαγούλα και συνολικό πληθυσμό περίπου 70.000 κατοίκους (σύμφωνα με την τελευταία απογραφή του 2011). Παράλληλα, η περιοχή έχει εξελιχθεί σε ένα από τα σημαντικότερα βιομηχανικά κέντρα της Ελλάδος.

Η συνολική λεκάνη απορροής του Σαρανταπόταμου (Σχήμα 3.1) έχει έκταση 310 km<sup>2</sup> και ορίζεται περιμετρικά από το όρος Πατέρας στα δυτικά, το όρος Κιθαιρώνας στα βορειοδυτικά, το όρος Πάστρα στα βόρεια και την Πάρνηθα στα ανατολικά. Ο Σαρανταπόταμος (ή Ελευσίνιος Κηφισός) διασχίζει την κοιλάδα της Οινόης και το Θριάσιο

Πεδίο και εκβάλλει στον κόλπο της Ελευσίνας. Αποτελεί το μεγαλύτερο ποτάμι της περιοχής, συνολικού μήκους περίπου 43 km, όντας ο αποδέκτης των απορροών των τριγύρω ορεινών όγκων. Ουσιαστικά, ο Σαρανταπόταμος, πριν την είσοδό του στο Θριασίο πεδίο, αποτελείται από δύο επιμέρους υδατορεύματα, του ρέματος Πέλκας που διασχίζει την κοιλάδα της Οινόης και του ρέματος Αγίου Γεωργίου που διασχίζει νοτιότερα την ομώνυμη κοιλάδα. Η κύρια πηγή του είναι στον Κιθαιρώνα και συγκεκριμένα κοντά στα Βίλια και τα κυριότερα ρέματα που συμβάλουν σε αυτό είναι το ρέμα Αγίου Βλασίου, το Ξηρόρεμα και το ρέμα Μεγάλο Κατερίνι (Κουτσογιάννης & Μαμάσης, 2001, ΟΡΣΑ, 2011).



**Σχήμα 3.1** Η περιοχή του Θριασίου Πεδίου (Πηγή: Κουτσογιάννης και Μαμάσης 2001)

Το υδρογραφικό δίκτυο, που φαίνεται λεπτομερώς στο Σχήμα 3.2, είναι αρκετά πυκνό και αποτελείται κυρίως από εποχιακής ροής χειμάρρους (ΟΡΣΑ, 2011). Όπως θα διαπιστωθεί και από την ανάλυση των παροχών στη συνέχεια ο Σαρανταπόταμος χαρακτηρίζεται γενικά από εφήμερη ροή.



**Σχήμα 3.2** Το υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης απορροής του Σαρανταπόταμου (Πηγή: <http://www.e-per.gr/>).

Όσον αφορά τα κλιματικά δεδομένα της περιοχής, το κλίμα χαρακτηρίζεται γενικώς μεσογειακό με εξαίρεση τα υψηλά σημεία της λεκάνης όπου είναι ορεινό. Το μέσο ετήσιο ύψος βροχής κυμαίνεται από 300 έως 400 mm ετησίως ενώ οι μέρες βροχής από 50 έως 100 σε ένα έτος. Η χιονόπτωση είναι σπάνια στις παράκτιες περιοχές, ενώ αυξάνει στα υψηλότερα σημεία της λεκάνης. Η μέση ετήσια θερμοκρασία κυμαίνεται μεταξύ 17° C και 19° C, ανάλογα με το υψόμετρο και την απόσταση από τη θάλασσα, ενώ το ετήσιο θερμομετρικό εἶδος είναι περίπου 19° C (Κουτσογιάννης & Μαμάσης, 2001).

### 3.1.2 Ιστορικό πλημμυρών στο Θριασίου Πεδίο

Η ευρύτερη περιοχή του Θριασίου πεδίου έχει πληγεί στο παρελθόν αρκετές φορές από έντονα πλημμυρικά γεγονότα, τα οποία έχουν οδηγήσει σε ορισμένες περιπτώσεις και σε ανθρώπινες απώλειες. Χαρακτηριστικά επίσης είναι και τα πλημμυρικά γεγονότα που επηρεάζουν την κυκλοφορία στην Εθνική Οδό Αθηνών-Κορίνθου στο ύψος της «Χαλυβουργικής»: 8 φορές τα τελευταία 40 χρόνια έχει μετατραπεί σε λίμνη η Εθνική Οδός στο εν λόγω ύψος με αποτέλεσμα την πολύωρη διακοπή της κυκλοφορίας (βλ. Εικόνα 3.1). Παρά όμως τα σοβαρά προβλήματα που έχουν προκληθεί από τις πλημμύρες, η αντιπλημμυρική προστασία στην ευρύτερη περιοχή είναι εντελώς αναντίστοιχη, ενώ

δυσχεραίνεται και από την αυθαίρετη δόμηση πολλών κατοικιών και βιομηχανικών μονάδων. Αναλυτικά το ιστορικό των πλημμυρικών γεγονότων φαίνεται στον Πίνακα 3.1.

**Πίνακας 3.1** Το ιστορικό έντονων πλημμυρικών γεγονότων στο Θριάσιο Πεδίο (Πηγή: Ζύγουρα, 2011)

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΥΨΟΣ ΥΕΤΟΥ (mm)	ΥΨΟΣ ΥΕΤΟΥ (mm/h)	ΔΙΑΡΚΕΙΑ (min)	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
Ρωμαϊκά Χρόνια				Υπήρχαν θύματα
7/11/1961				40 θύματα στην Αττική
19/11/1963	25,00	4,35	345	1 θύμα στην περιοχή Μπλόκου-Πυρκάλ
29/11/1963	59,90	11,57	311	
2/11/1977	90,50	7,49	725	20 θύματα στην περιοχή Ασπρόπουργου
3/11/1977	11,00	3,67	180	
11/12/1977	27,00	2,75	589	16 θύματα
17/12/1977	16,50	0,94	1053	
18/12/1977	13,80	0,82	1010	
5/2/1978	2,70	0,50	324	
6/2/1978	26,40	2,93	541	2 θύματα
27/1/1996	17,30	1,60	649	2 θύματα σε Ελευσίνα, Μάνδρα-Μαγούλα
29/1/1996	0,90	0,54	100	
8/7/2002	4,50	3,00	90	
17/6/2003	39,00	18,72	125	
4/11/2003	31,00	1,96	949	
24/12/2003	35,90	2,43	886	

Από τον παραπάνω Πίνακα μπορούν να εξαχθούν κάποια γενικά συμπεράσματα για την πλημμυρική συμπεριφορά της περιοχής:

- σημαντικά ύψη βροχής ενδέχεται να προκαλέσουν ή να μην προκαλέσουν ανθρώπινα θύματα
- οι πλημμύρες που προξένησαν τα περισσότερα ανθρώπινα θύματα σχετίζονται με σημαντικά ύψη βροχής (2/11/1977, ύψος βροχής 90.50mm, 20 θύματα)

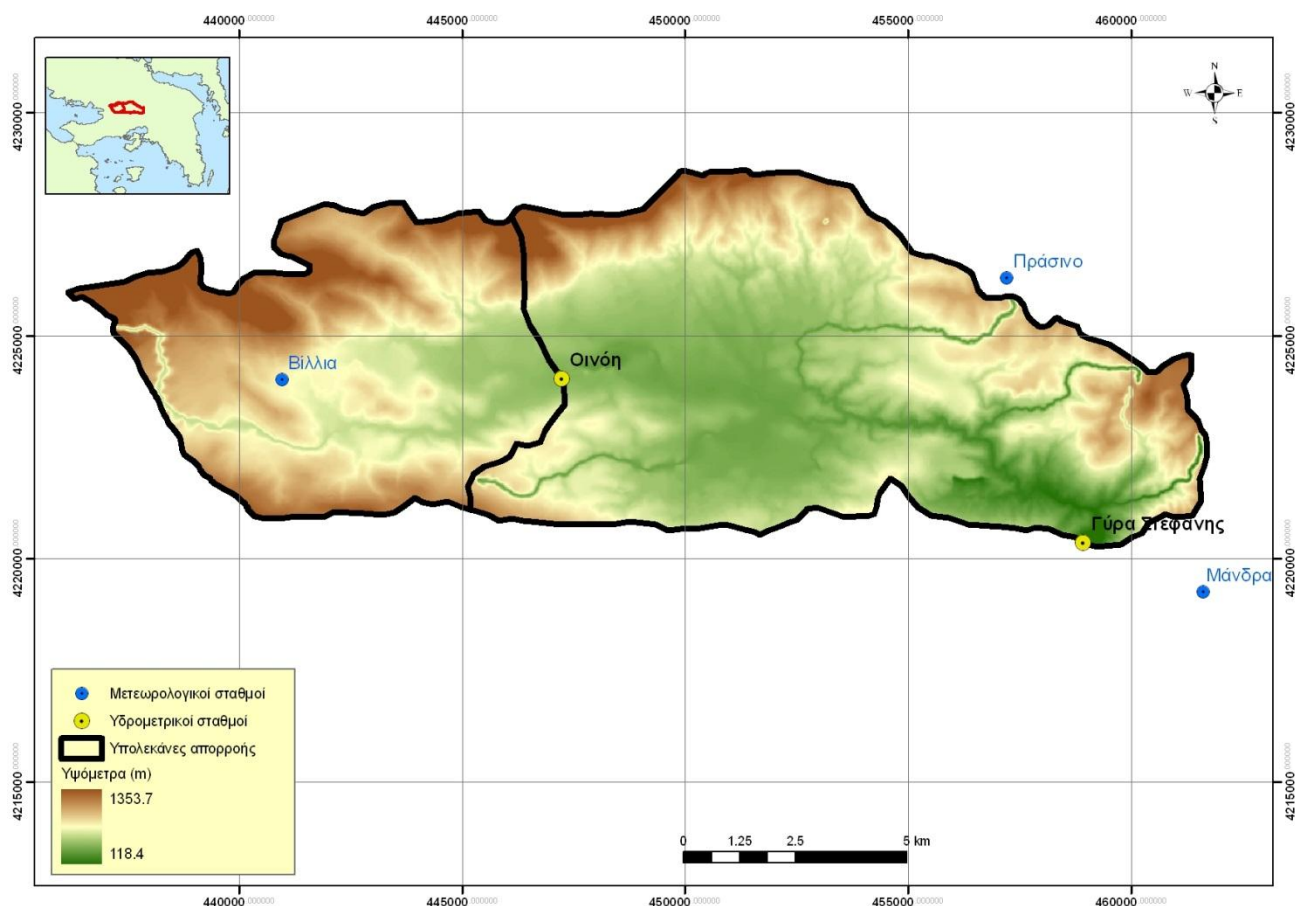
- ακόμα και σε πλημμυρικά επεισόδια με σημαντικά μικρότερο ύψος βροχής υπήρξαν ανθρώπινα θύματα (27/1/1996, ύψος βροχής 17.30mm, 2 θύματα)



**Εικόνα 3.1** Πλημμύρα στην εθνική οδό Αθηνών-Κορίνθου στο ύψος της «Χαλυβουργικής», κατάντη της υπό μελέτη λεκάνης απορροής του Σαρανταπόταμου (Πηγή: [Ελευθεροτυπία](#), 26/10/2009)

### 3.1.3 Το ανάντη τμήμα της λεκάνης του Σαρανταπόταμου: Φυσιογραφικά Χαρακτηριστικά

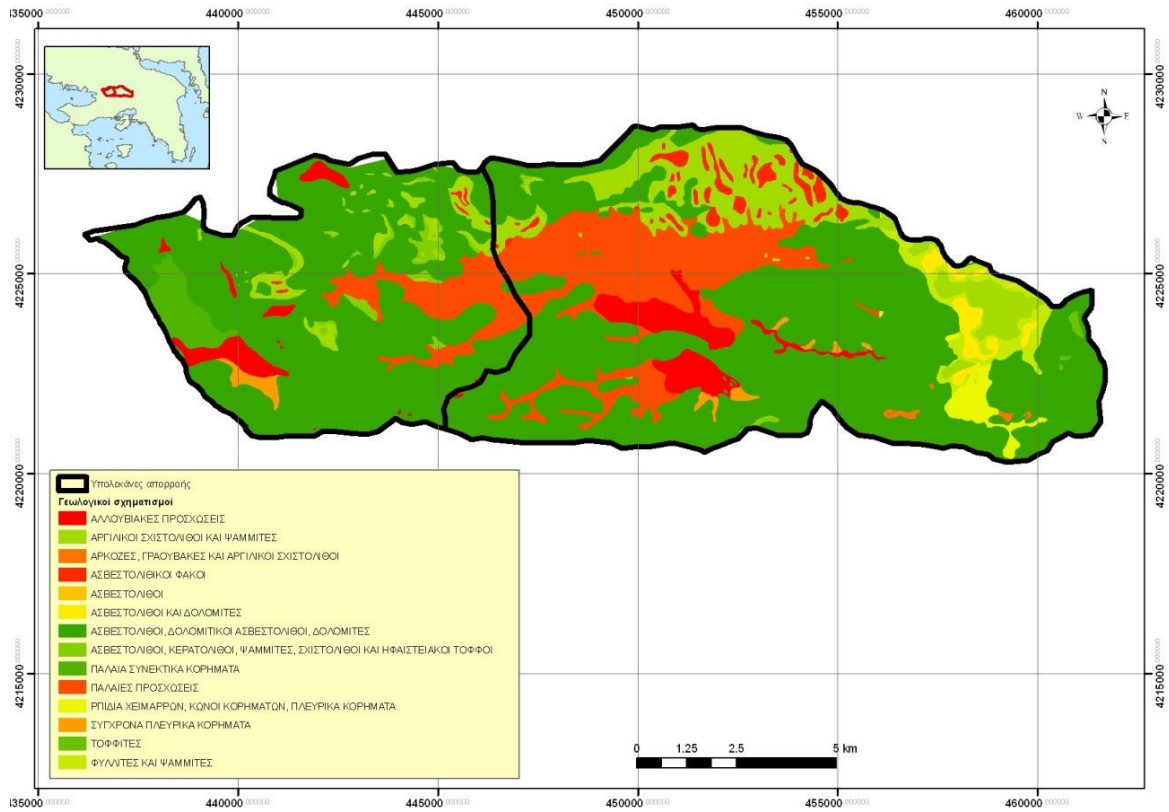
Στην παρούσα εργασία θα μελετηθεί το ανάντη τμήμα της λεκάνης του Σαρανταπόταμου έκτασης 144.6 km<sup>2</sup>, που δύναται να χωριστεί χονδροειδώς σε δύο υπολεκάνες, κάθε μία για τους εγκατεστημένους υδρομετρικούς σταθμούς της περιοχής, την ανάντη της Οινόης και την ενδιάμεση, έκτασης 51.2 και 93.4 km<sup>2</sup> αντίστοιχα. Η λεκάνη ανάντη της Οινόης καλύπτεται σε μεγάλο ποσοστό από ορεινές εκτάσεις. Η έξοδος στη Γύρα Στεφάνης βρίσκεται σε υψόμετρο +157m ενώ στην Οινόη σε +333m.



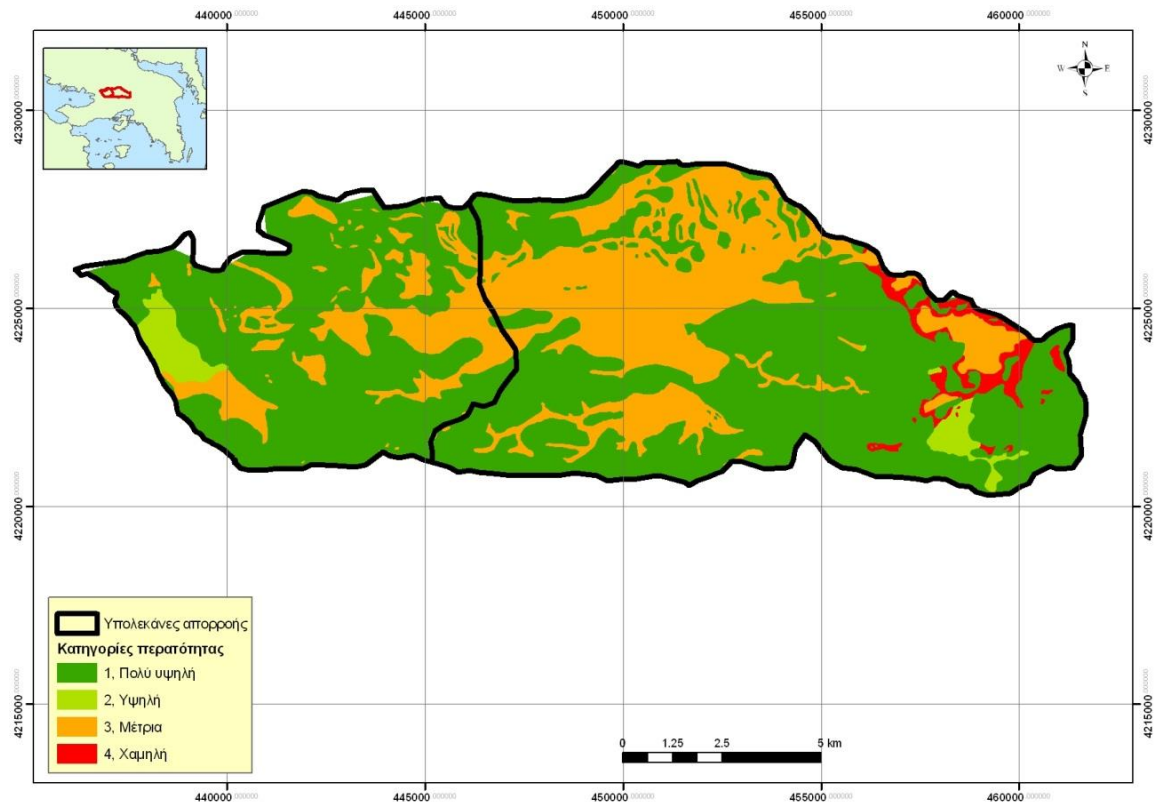
**Σχήμα 3.3** Οι υπολεκάνες, η υδρογραφία και οι υδρομετρικοί σταθμοί της υπό μελέτη λεκάνης του Σαρανταπόταμου (Πηγή: Κουκουβίνος, 2012)

Η υπό μελέτη λεκάνη χαρακτηρίζεται από υψηλή υδατοπερατότητα λόγω της καρστικοποίησης των ασβεστολιθικών πετρωμάτων που κυριαρχούν στην περιοχή, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.4 όπου αναπαρίστανται οι γεωλογικοί σχηματισμοί. Υπενθυμίζεται εδώ ότι η καρστική διάβρωση των ασβεστολιθικών πετρωμάτων είναι το φαινόμενο διάλυσης του  $CaCO_3$  του ασβεστόλιθου λόγω κυκλοφορίας του νερού (Μαρίνος, 1993). Λόγω της διαλύσεως αυτής δημιουργούνται κοιλότητες (καρστ) στο έδαφος καθώς και κενά που πολλές φορές επεκτείνονται σε μεγάλο βάθος, τα οποία αυξάνουν σε πολύ μεγάλο βαθμό την κατείδυση του επιφανειακού νερού. **Για τους λόγους αυτούς χαρακτηρίζεται ως χειμαρρική λεκάνη, με εφήμερη ροή.**

Παρά την κυριαρχία όμως των ιδιαίτερα περατών περιοχών, συναντώνται και περιοχές με μέτρια ή χαμηλή υδατοπερατότητα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.5. Από τη σύγκριση των δύο σχημάτων φαίνεται ότι το μεγαλύτερο μέρος των ασβεστόλιθων έχει καρστικοποιηθεί και είναι ιδιαίτερος περατοί, ενώ τα εδάφη με μικρότερη περατότητα είναι κυρίως ασβεστολιθικοί φακοί και αλλουβιακές προσχώσεις και απαντώνται ως επί το πλείστον στο ενδιάμεσο τμήμα της λεκάνης.



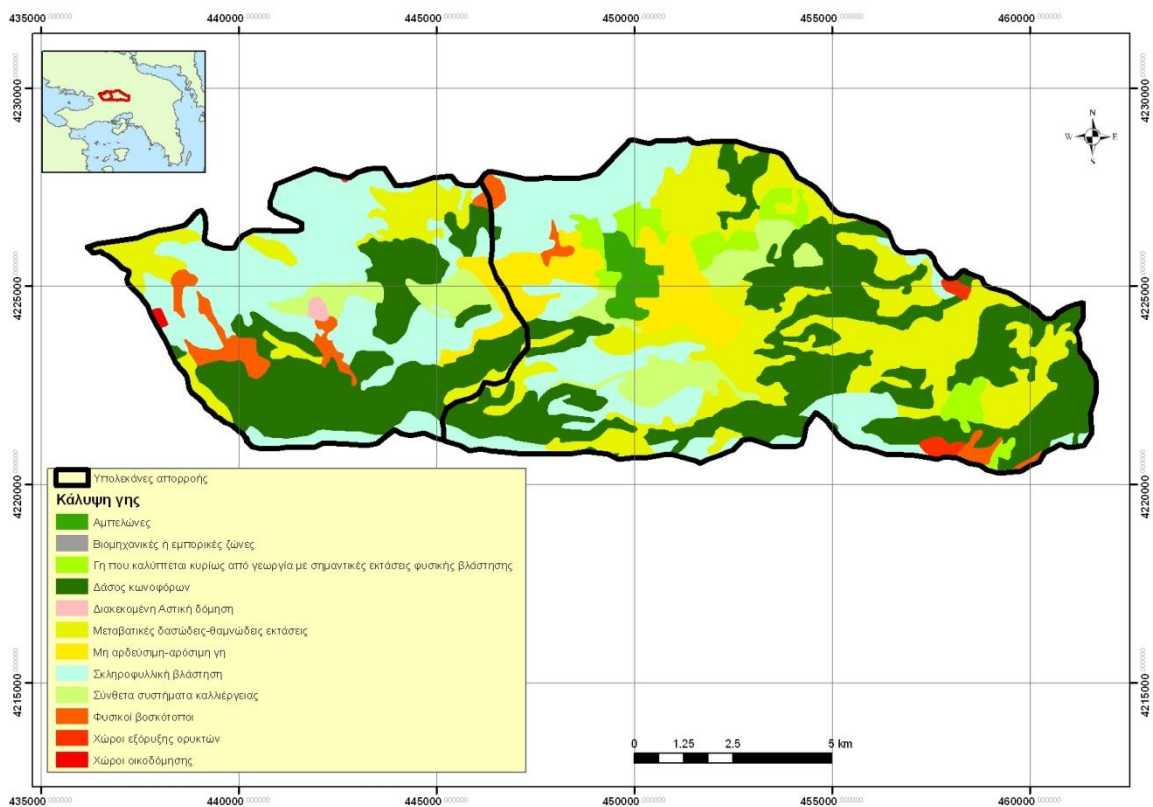
Σχήμα 3.4 Οι γεωλογικοί σχηματισμοί της υπό μελέτη λεκάνης του Σαρανταπόταμου



Σχήμα 3.5 Η διαβάθμιση της υδατοπερατότητας της υπό μελέτη λεκάνης του Σαρανταπόταμου

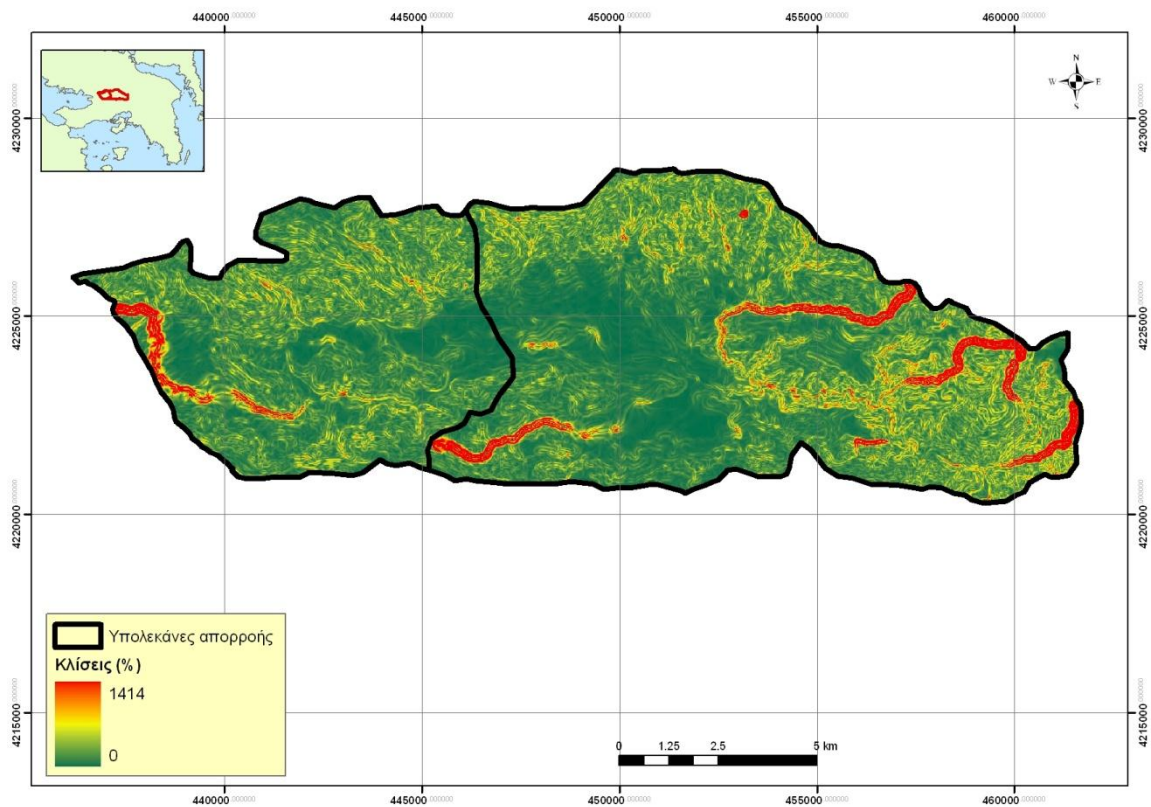


Οι καλύψεις γης χαρακτηρίζονται, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως από την απουσία έντονα αστικοποιημένων περιοχών. Τα ποσοστά επί της συνολικής λεκάνης των επικρατέστερων χρήσεων είναι 31.6% για τα δάση κωνοφόρων, 22.4% για τις μεταβατικές δασώδεις-θαμνώδεις εκτάσεις και 26.5% για τη σκληροφυλλική βλάστηση και αναπαριστώνται στο Σχήμα 3.6.



**Σχήμα 3.6** Η κάλυψη γης της λεκάνης του Σαρανταπόταμου (Πηγή: Κουκουβίνος, 2012).

Οι κλίσεις γης φαίνονται στο κάτωθι Σχήμα 3.7. Παρατηρείται πως στο μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής η κλίση κυμαίνεται από 10 έως 30% και από 30 έως 100%, ενώ υπάρχουν και λίγες εκτάσεις με μεγαλύτερη κλίση.



**Σχήμα 3.6** Οι κλίσεις γης της υπό μελέτη λεκάνης του Σαρανταπόταμου (Πηγή: Κουκουβίνος, 2012).

Τα τρία αυτά χαρακτηριστικά (υδατοπερατότητα, κάλυψη γης για τον προσδιορισμό της βλάστησης και κλίσεις γης για τον προσδιορισμό της αποστραγγιστικής ικανότητας του εδάφους) θα χρησιμοποιηθούν για την προσέγγιση των ΜΥΑ (Μονάδων Υδρολογικής Απόκρισης-HRU) με βάση τη μέθοδο SCS-CN (βλ. Παράρτημα Α).

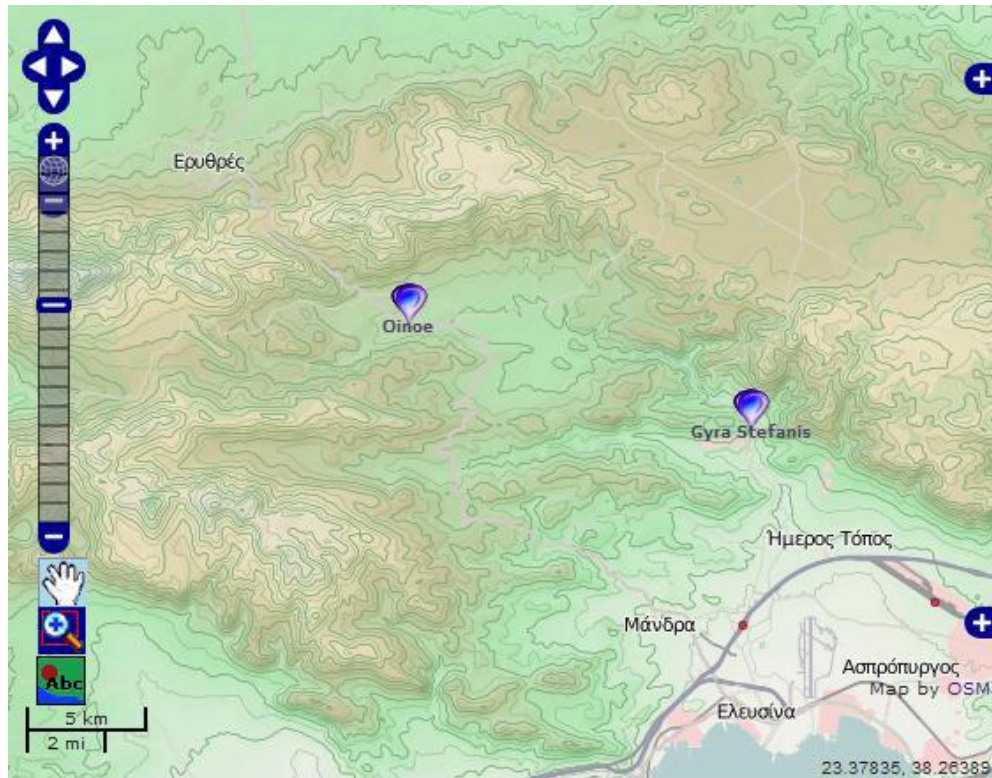
## 3.2 Συλλογή δεδομένων

Για την υλοποίηση της παρούσας εργασίας συλλέχθηκαν υδρολογικά δεδομένα απορροής και δεδομένα βροχόπτωσης για την υδρολογική μοντελοποίηση της περιοχής μελέτης καθώς και μετεωρολογικά δεδομένα πρόγνωσης βροχής για την υλοποίηση της πλημμυρικής πρόγνωσης.

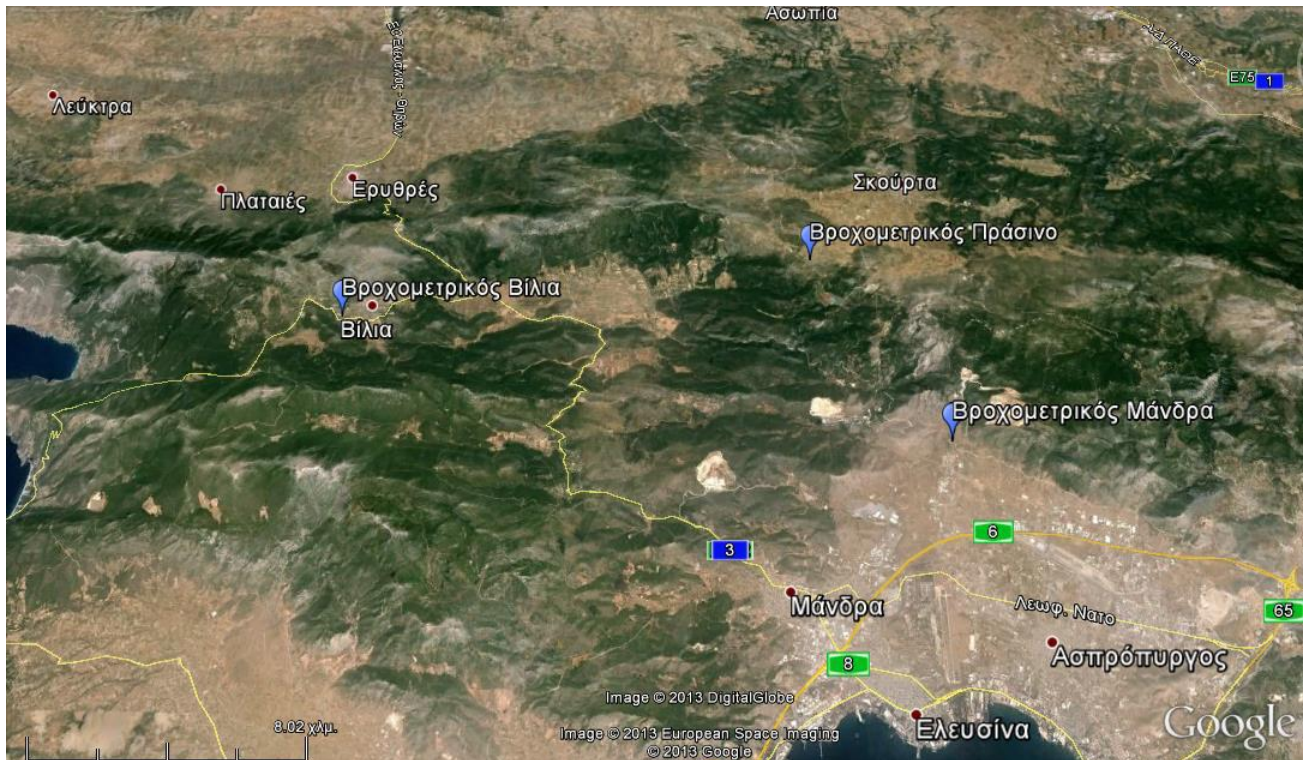
### 3.2.1 Υδρομετεωρολογικά δεδομένα

Αρχικά, τα υδρολογικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τη μοντελοποίηση του άνω τμήματος της λεκάνης του Σαρανταπόταμου συλλέχθηκαν κυρίως από δίκτυο δεδομένων «Δευκαλιών» (<http://deucalionproject.gr/>). Πιο αναλυτικά συλλέχθηκαν:

- Δεδομένα παροχής (σε m<sup>3</sup>/sec με 15-λεπτο χρονικό βήμα) στον υδρομετρικό σταθμό στη Γύρα Στεφάνης (συντεταγμένες Χ=458923.39 και Υ=4220368.15). Ο σταθμός λειτουργεί από τις 09/12/11.
- Δεδομένα παροχής (σε m<sup>3</sup>/sec με 15-λεπτο χρονικό βήμα) στον υδρομετρικό σταθμό στην Οινόη (συντεταγμένες Χ=447240.65 και Υ=4224040.43). Ο σταθμός λειτουργεί από τις 09/12/11.
- Δεδομένα βροχής (σε mm με 10-λεπτο βήμα) και ημερήσιας θερμοκρασίας (σε °C) στον μετεωρολογικό σταθμό στα Βίλια (συντεταγμένες Χ=440959.37 και Υ=4224015.73). Ο σταθμός λειτουργεί από τις 12/12/11.
- Δεδομένα βροχής (σε mm με 10-λεπτο βήμα) και ημερήσιας θερμοκρασίας (σε °C) στον μετεωρολογικό σταθμό στο Πράσινο (συντεταγμένες Χ=457212.0 και Υ= 4226291.0). Ο σταθμός λειτουργεί από τις 17/01/12.
- Δεδομένα βροχής (σε mm με 10-λεπτο βήμα) και ημερήσιας θερμοκρασίας (σε °C) στον μετεωρολογικό σταθμό στη Μάνδρα (συντεταγμένες Χ=461615.13 και Υ=4219262.43). Τα εν λόγω δεδομένα είναι τα μόνα που συλλέχθηκαν από την ιστοσελίδα του Υδρολογικού Παρατηρητηρίου της Αθήνας (Hydrological Observatory of Athens - <http://hoa.ntua.gr/>) στο οποίο ανήκει ο εν λόγω σταθμός. Ο σταθμός λειτουργεί από τις 06/07/05.



**Σχήμα 3.7** Χάρτης των υδρομετρικών σταθμών στην Οινόη και στη Γύρα Στεφάνης (Πηγή: <http://deucalionproject.gr/>).



**Σχήμα 3.8** Χάρτης των μετεωρολογικών σταθμών στα Βίλια, στο Πράσινο και στη Μάνδρα (Πηγή: <http://deucalionproject.gr/>).

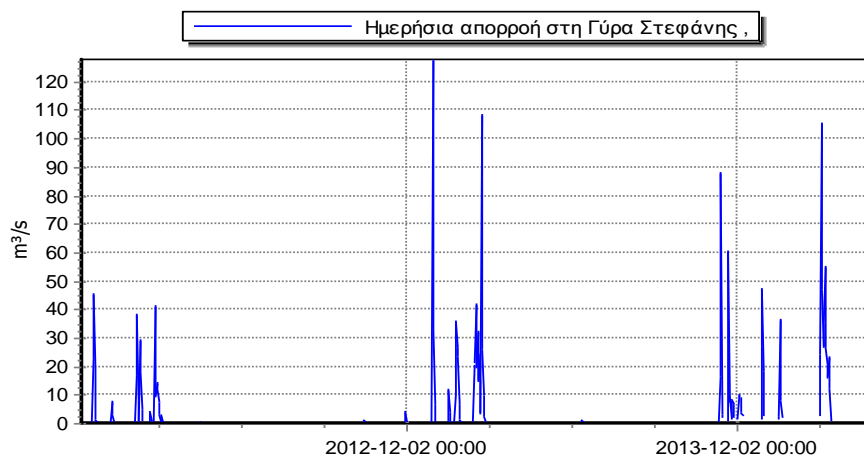
Ορισμένα από τα στατιστικά χαρακτηριστικά των παραπάνω χρονοσειρών φαίνονται στους πίνακες και τα διαγράμματα που ακολουθούν, τα οποία υπολογίστηκαν με τη βοήθεια του ΥΔΡΟΓΝΩΜΟΝΑ (περισσότερες πληροφορίες για τον Υδρογνώμονα στον ιστότοπο <http://hydrognomon.org/>). Για τις χρονοσειρές της απορροής και της βροχόπτωσης, τα χαρακτηριστικά αναφέρονται στην αναγωγή των πρωτογενών χρονοσειρών (με 15-λεπτο και 10-λεπτο βήμα αντίστοιχα) σε ωριαίες και ημερήσιες.

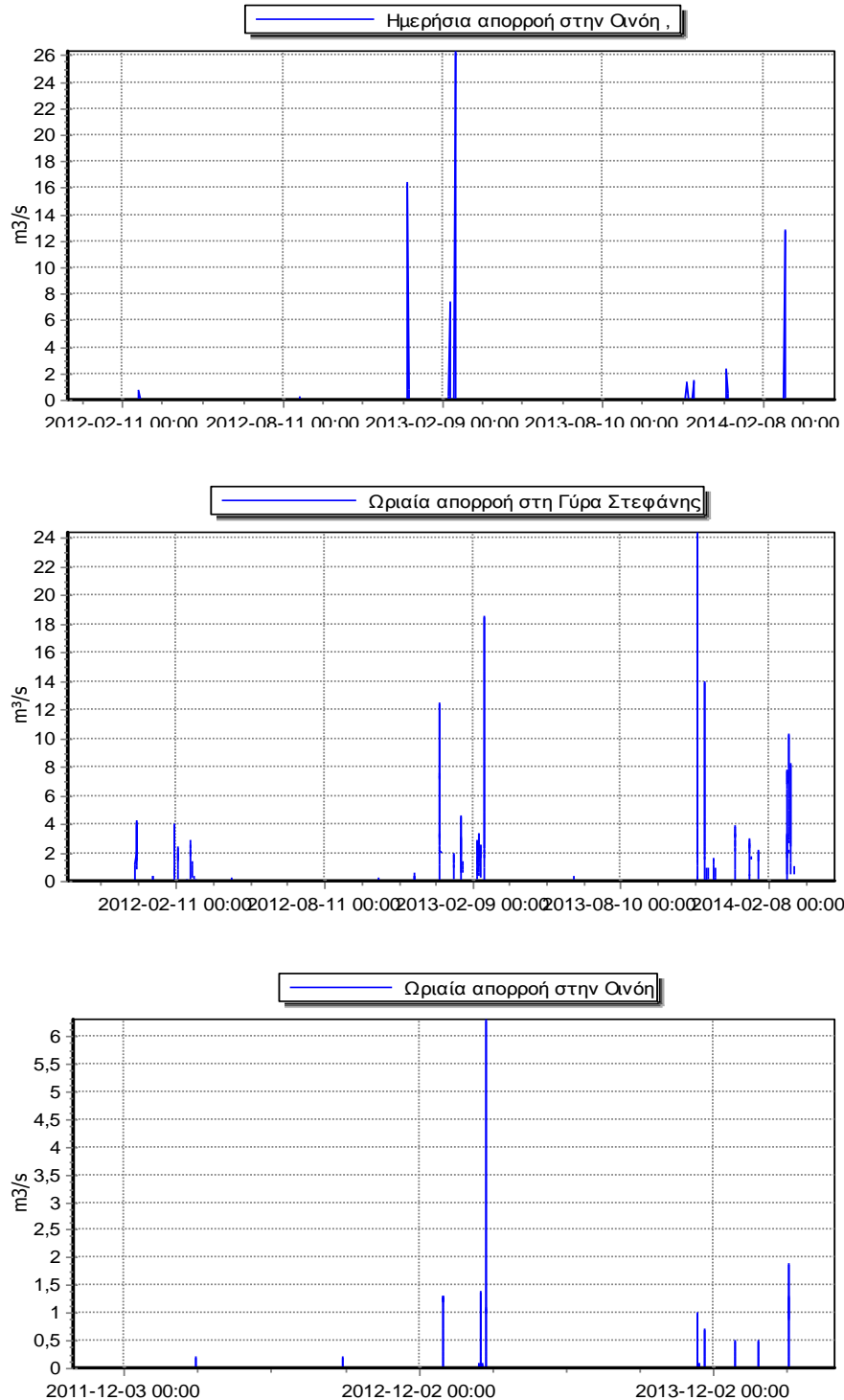
**Πίνακας 3.2** Τα στατιστικά χαρακτηριστικά των χρονοσειρών παροχής σε ημερήσια και ωριαία κλίμακα

Χαρακτηριστικό	Ημερήσια Παροχή	
	Γύρα Στεφάνης	Οινόη
Αριθμός δεδομένων	777	805
Μέση τιμή (m <sup>3</sup> /s)	2,46	0,09
Μέγιστη τιμή (m <sup>3</sup> /s)	127,67	26,30
Άθροισμα (m <sup>3</sup> /s)	1914,73	72,60

Χαρακτηριστικό	Ωριαία Παροχή	
	Γύρα Στεφάνης	Οινόη
Αριθμός δεδομένων	18746	20143
Μέση τιμή (m <sup>3</sup> /s)	0,10	0,00
Μέγιστη τιμή (m <sup>3</sup> /s)	24,39	6,30
Άθροισμα (m <sup>3</sup> /s)	1932,43	73,40





**Σχήμα 3.9** Απεικόνιση της εξέλιξης της απορροής σε ημερήσια (πάνω) και ωριαία (κάτω) κλίμακα στους σταθμούς σε Γύρα Στεφάνης και Οινόη

Είναι αξιοσημείωτη η παρατήρηση ότι με βάση τα υδρομετρικά δεδομένα, η υπολεκάνη της Οινόης, παρά το ότι αντιπροσωπεύει το 1/3 της συνολικής λεκάνης του Σαρανταπόταμου, συμβάλει μόνο κατά 3,8% (=72,60/1914,13) στη συνολική απορροή καθόλη τη διάρκεια των μετρήσεων. Επιπλέον, η μέγιστη ημερήσια παροχή αποτελεί το 6,67% της συνολικής

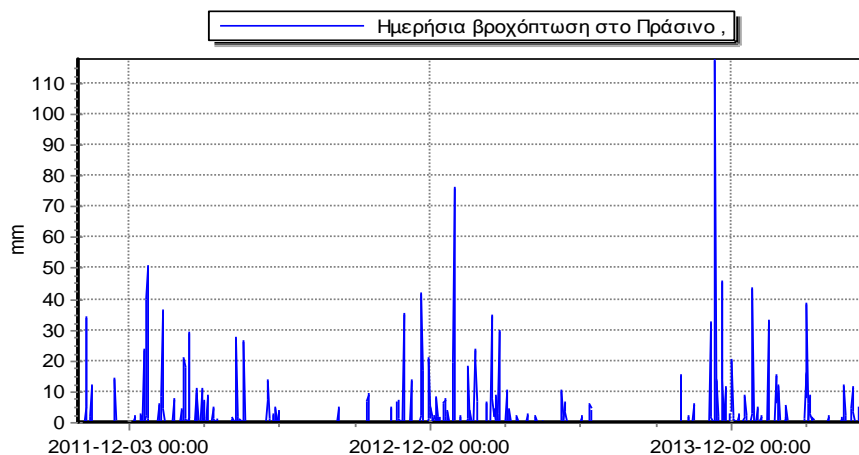
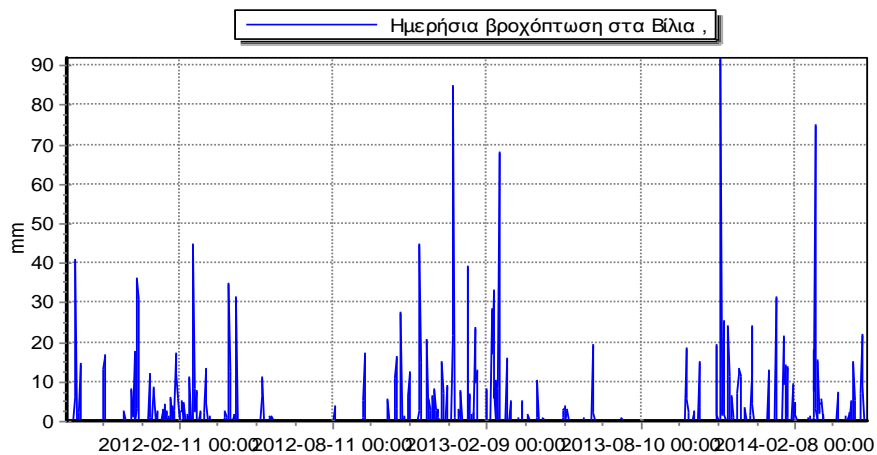
απορροής στη Γύρα Στεφάνης ενώ η μέγιστη ωριαία το 1,26%, ενώ τα ανάλογα ποσοστά στην Οινόη ανεβαίνουν σε 36,22% και 8,58% αντίστοιχα.

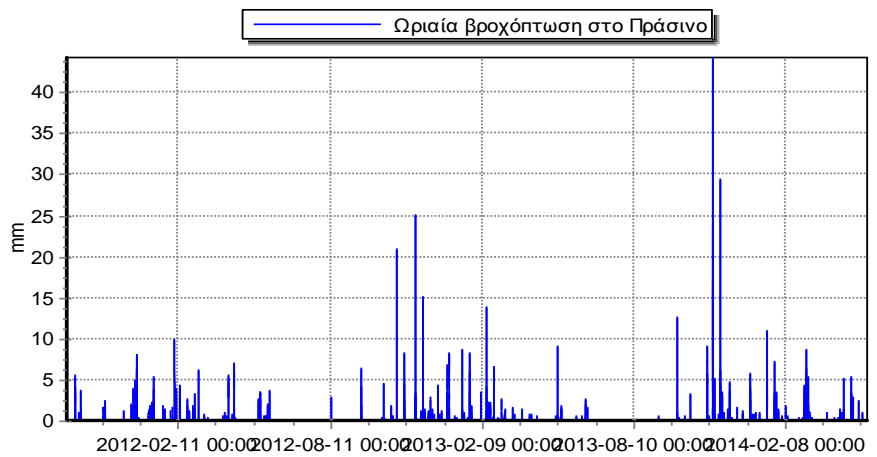
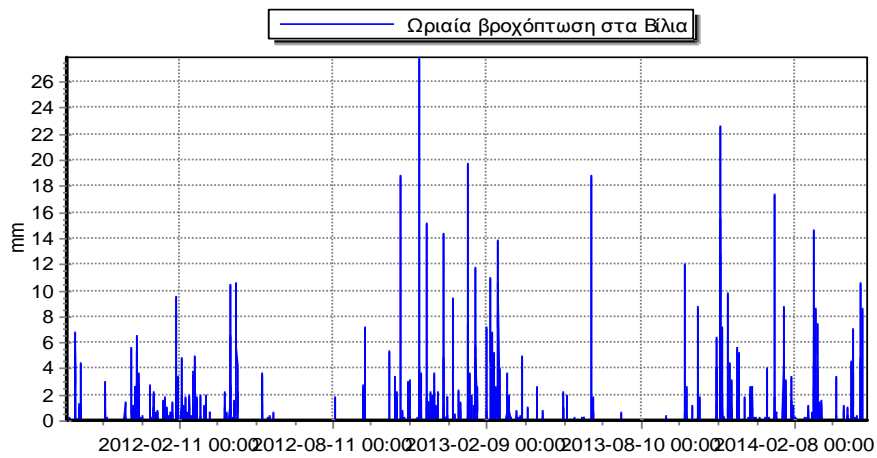
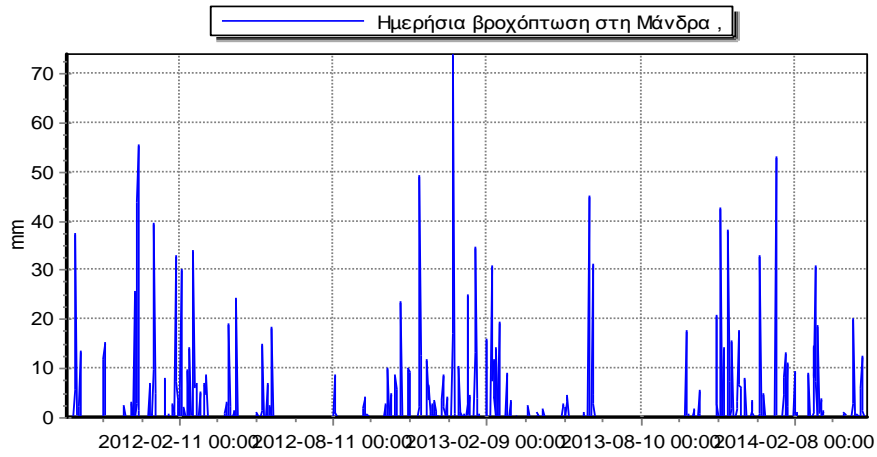
**Πίνακας 3.3** Τα στατιστικά χαρακτηριστικά των χρονοσειρών βροχόπτωσης σε ημερήσια και ωριαία κλίμακα

Χαρακτηριστικό	Ημερήσια Βροχόπτωση		
	Βίλια	Πράσινο	Μάνδρα
Αριθμός δεδομένων	947	959	947
Μέση τιμή (mm)	2,06	1,76	1,82
Μέγιστη τιμή (mm)	91,80	117,60	73,80
Άθροισμα (mm)	1951,85	1618,88	1723,40

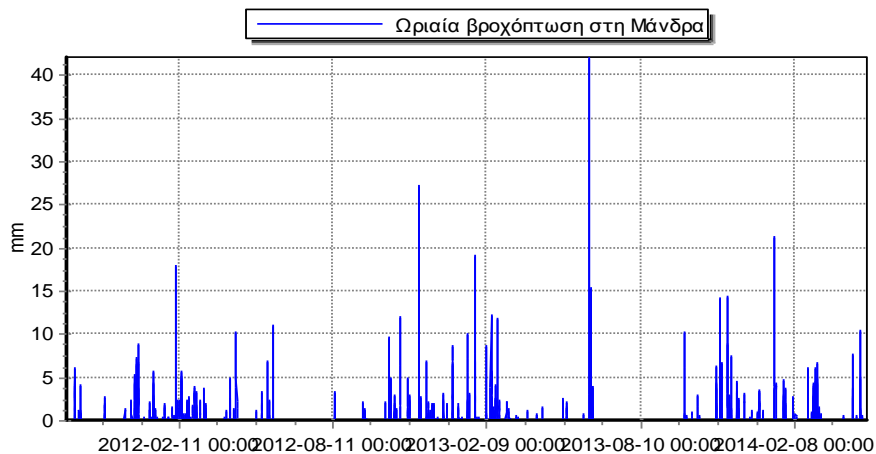
  

Χαρακτηριστικό	Ωριαία Βροχόπτωση		
	Βίλια	Πράσινο	Μάνδρα
Αριθμός δεδομένων	22742	23025	22742
Μέση τιμή (mm)	0,09	0,07	0,08
Μέγιστη τιμή (mm)	27,85	44,20	42,00
Άθροισμα (mm)	1951,85	1618,88	1723,60







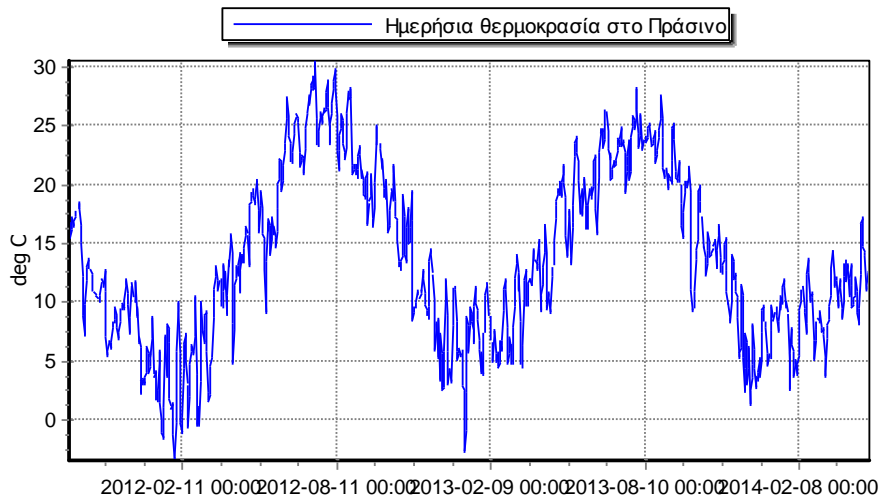


**Σχήμα 3.10** Απεικόνιση της εξέλιξης της βροχόπτωσης σε ημερήσια (πάνω) και ωριαία (κάτω) κλίμακα στους σταθμούς σε Βίλια, Πράσινο και Μάνδρα

Η παρατηρημένη βροχόπτωση είναι αθροιστικά της ίδιας κλίμακας και στους τρεις μετεωρολογικούς σταθμούς, με τα Βίλια να έχουν την υψηλότερη τιμή και το Πράσινο τη χαμηλότερη. Με δεδομένο ότι η μέση ετήσια βροχόπτωση στην Αττική είναι περίπου 410mm, και ότι το άθροισμα των παρατηρημένων βροχοπτώσεων αναφέρεται σε 3 υγρές περιόδους, η «αυθαιρετη» αναγωγή σε ετήσια βροχόπτωση δείχνει ότι η βροχόπτωση στις περιοχές αυτές είναι από τις υψηλότερες στην Αττική (για παράδειγμα στα Βίλια  $1951,85/3=650\text{mm}$ ). Επιπλέον, με την ίδια «αυθαιρετη» αναγωγή, η μέγιστη ημερήσια βροχόπτωση αποτελεί το 14,1% της συνολικής βροχόπτωσης στα Βίλια ενώ η μέγιστη ωριαία το 4,3%, ενώ τα ανάλογα ποσοστά στο Πράσινο είναι 21,8% και 8,2% αντίστοιχα και στη Μάνδρα 12,85% και 7,3% αντίστοιχα.

**Πίνακας 3.4** Τα στατιστικά χαρακτηριστικά των χρονοσειρών θερμοκρασίας σε ημερήσια κλίμακα

Χαρακτηριστικό	Ημερήσια Θερμοκρασία		
	Βίλια	Πράσινο	Μάνδρα
Αριθμός δεδομένων	945	946	946
Μέση τιμή ( C)	14,59	13,73	16,79
Μέγιστη τιμή ( C)	31,73	30,48	33,60
Ελάχιστη τιμή ( C)	-2,87	-3,50	-0,60



**Σχήμα 3.11** Απεικόνιση της εξέλιξης της ημερήσιας θερμοκρασίας στους σταθμούς σε Βίλια, Πράσινο και Μάνδρα

Όσον αφορά τα τεχνικά χαρακτηριστικά των σταθμών μέτρησης, οι αυτόματοι υδρομετρικοί σταθμοί στη Γύρα Στεφάνης και στην Οινόη μετράνε τη στάθμη του υδατορεύματος χρησιμοποιώντας αισθητήρες υπερήχων και μεταδίδουν την πληροφορία τηλεμετρικά (Κούσης κ.α., 2012).

Ο σταθμός στη Γύρα Στεφάνης βρίσκεται σε οχετό κάτω από την γέφυρα στην είσοδο της βιοτεχνίας Παναγόπουλου Α.Β.Β.Ε.Τ.Ε.. Η διατομή κάτω από τη Γύρα Στεφάνης είναι οκταγωνική (βλ. Εικόνα 3.2), η κοίτη είναι πλήρως διευθετημένη ενώ η μέτρηση της στάθμης γίνεται στη μέση της κοίτης και η μέτρηση της θερμοκρασίας γίνεται εκτός οχετού. Η παροχή εκτιμάται από τη μετρηθείσα στάθμη με τη βοήθεια αριθμητικών προσομοιώσεων σε τρεις διαστάσεις.



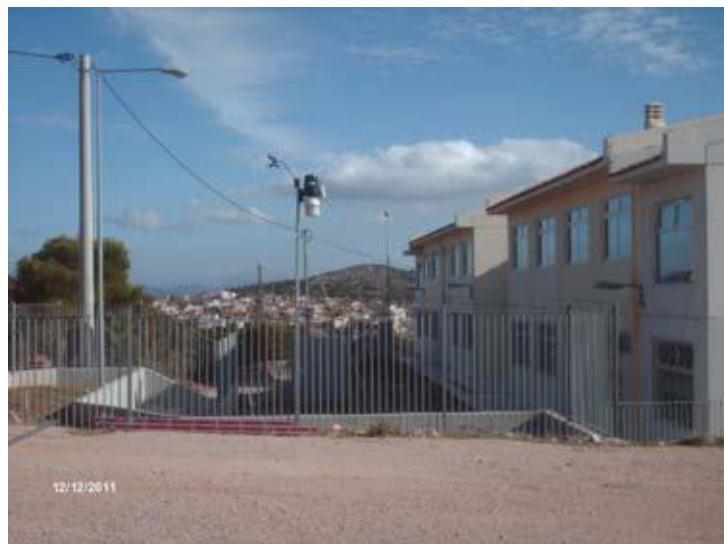
**Εικόνα 3.2** Υδρομετρικός σταθμός Σαρανταπόταμου, θέση Γύρα Στεφάνης (Πηγή: <http://deucalionproject.gr/>).

Ο σταθμός της Οινόης βρίσκεται στον οχετό κάτω από την οδό Βιλίων-Οινόης, κοντά στην Οινόη. Η διατομή στην Οινόη είναι ορθογωνική (βλ. Εικόνα 3.3) και η μέτρηση της στάθμης όσο και της θερμοκρασίας γίνεται από το μέσο της διευθετημένης κοίτης. Στην έξοδο του οχετού υπάρχει αναβαθμός, ο οποίος επιτρέπει τον έμμεσο προσδιορισμό της παροχής από μετρήσεις της στάθμης του ύδατος, μέσω υδραυλικών υπολογισμών.



**Εικόνα 3.3** Υδρομετρικός σταθμός Σαρανταπόταμου, στη θέση Οινόη (Πηγή: <http://deucalionproject.gr/>).

Ο μετεωρολογικός σταθμός των Βιλίων είναι εγκατεστημένος στις δυτικές-νοτιοδυτικές παρυφές του οικισμού στο Γυμνασιού-Λυκείου Βιλίων και η μετάδοση των δεδομένων γίνεται διαδικτυακά (βλ. Εικόνα 3.4). Ο περιβάλλον χώρος είναι σε μεγάλο βαθμό ελεύθερος εμποδίων. Το βροχόμετρο τοποθετήθηκε σε ύψος σχεδόν 4m από το χωμάτινο έδαφος, ενώ η ύπαρξη παροχής ηλεκτρικού ρεύματος επέτρεψε την εγκατάσταση θερμαντικού στοιχείου στο βροχόμετρο το οποίο λιώνει το χιόνι και διασφαλίζει τη χρονικά σωστή καταγραφή των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων.



**Εικόνα 3.4** Μετεωρολογικός Σταθμός Βιλίων (Πηγή: <http://deucalionproject.gr/>)

Ο σταθμός στο Πράσινο εγκαταστάθηκε στη βόρεια παρυφή του οικισμού, στην ταράτσα εξοχικής οικίας και η μετάδοση γίνεται με διαδικτυακή σύνδεση κινητής τηλεφωνίας. Ο

περιβάλλον χώρος είναι ελεύθερος εμποδίων και το βροχόμετρο τοποθετήθηκε σε ύψος περίπου 4m από το έδαφος (Εικ. 8), ενώ η ύπαρξη παροχής ηλεκτρικού ρεύματος επέτρεψε και εδώ την εγκατάσταση θερμαντικού στοιχείου στο βροχόμετρο (Κούσης κ.α., 2012).



**Εικόνα 3.5** Άποψη του μετεωρολογικού σταθμού στο Πράσινο (Πηγή: <http://deucalionproject.gr/>)

Τέλος, ο σταθμός στη Μάνδρα είναι εγκατεστημένος στην Εγκατάσταση Επεξεργασίας Νερού της Μάνδρας, ιδιοκτησίας της Ε.Υ.Δ.Α.Π (<http://hoa.ntua.gr/>).

Για τη μοντελοποίηση της λεκάνης θα χρησιμοποιηθούν τα δεδομένα βροχής, θερμοκρασίας και παροχής από 01/10/2011 έως και 01/05/2014, δηλαδή ένα χρονικό διάστημα περίπου 2,5 ετών. Το χρονικό διάστημα αυτό κρίνεται επαρκές για την ικανοποιητική μοντελοποίηση της εν λόγω χειμαρρικής διαίτας λεκάνης. Κατά τη διάρκεια του διαστήματος αυτού έχουν καταγραφεί και κατηγοριοποιηθεί 8 επεισόδια, με βασικά χαρακτηριστικά τη σχετική σύμπτωση του προφίλ της βροχοπτώσης με της απορροής και την αργή εκφόρτιση της απορροής, τις περισσότερες φορές αρκετά μεγαλύτερη από το χρόνο συγκέντρωσης, γεγονός που ενδέχεται να καταδεικνύει την παρουσία έντονης υποδερμικής ροής (για την ανάλυση των επεισοδίων, βλ. <http://deucalionproject.gr/events/sarantapotamos/index.htm>).

Λόγω της μεταγενέστερης έναρξης λειτουργίας ορισμένων σταθμών από την έναρξη των δεδομένων μελέτης πραγματοποιήθηκαν διορθώσεις με βάση τις μεταγενέστερες παρατηρημένες μετρήσεις. Με τον ίδιο τρόπο συμπληρώθηκαν και τα υπόλοιπα κενά που παρουσιάστηκαν στις χρονοσειρές εξαιτίας τεχνικών ζητημάτων στους σταθμούς μέτρησης.

### 3.2.2 Μετεωρολογικές προγνώσεις

Για την εφαρμογή της πλημμυρικής πρόγνωσης, επιλέγουμε να προσομοιωθεί το επεισόδιο στη λεκάνη του Σαρανταπόταμου με αύξοντα αριθμό 7, όπως έχει καταγραφεί από το δίκτυο δεδομένων ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ. Το επεισόδιο αυτό είναι το σημαντικότερο στην περιοχή μελέτης για το χρονικό διάστημα όπου διαθέτουμε μετρήσεις και έλαβε χώρα από τις 13/02/2013 έως τις 22/02/2013, με τα μεγαλύτερα ύψη βροχόπτωσης να καταγράφονται τις πρώτες πρωινές ώρες στις 22/02/2013.

Για την προσομοίωση της βροχόπτωσης στο εν λόγω επεισόδιο χρησιμοποιείται το αριθμητικό μοντέλο καιρού WRF. Το αριθμητικό μοντέλο WRF (Weather Research and Forecasting model), σχεδιάστηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1990 από πολλά ερευνητικά ινστιτούτα στις ΗΠΑ και είναι ένα σύγχρονο αριθμητικό μοντέλο πρόγνωσης καιρού μέσης κλίμακας με σκοπό να εξυπηρετεί τις ανάγκες τόσο του τομέα έρευνας της ατμόσφαιρας, όσο και της επιχειρησιακής πρόγνωσης καιρού (Κούσης κ.α., 2014). Το WRF χρησιμοποιείται για αυτούς τους σκοπούς και από το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών από όπου και ελήφθησαν οι προσομοιώσεις του επεισοδίου, δηλαδή οι μετεωρολογικές προγνώσεις βροχόπτωσης για το εν λόγω επεισόδιο.

Για τις αρχικές και οριακές συνθήκες των προσομοιώσεων, χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα FNL (Final Operational Global Analyses) των Εθνικών Κέντρων Περιβαλλοντολογικής Πρόγνωσης (NCEP / National Centers for Environmental Prediction) των Η.Π.Α., τα οποία παρέχονται σε χωρική ανάλυση μίας μοίρας και χρονικού βήματος 6 ωρών. Τα δεδομένα αυτά, προέρχονται από Παγκόσμιο Σύστημα Αφομοίωσης (GDAS, Global Data Assimilation System), στο οποίο συλλέγονται διαρκώς δεδομένα παρατηρήσεων μέσω του Παγκόσμιου Τηλεπικοινωνιακού Συστήματος (GTS, Global Telecommunications System) και άλλων πηγών μέσω. Τα δεδομένα αναλύσεων περιλαμβάνουν όλες τις απαραίτητες μετεωρολογικές παραμέτρους για την πρόγνωση στην επιφάνεια και σε άλλα ατμοσφαιρικά επίπεδα.

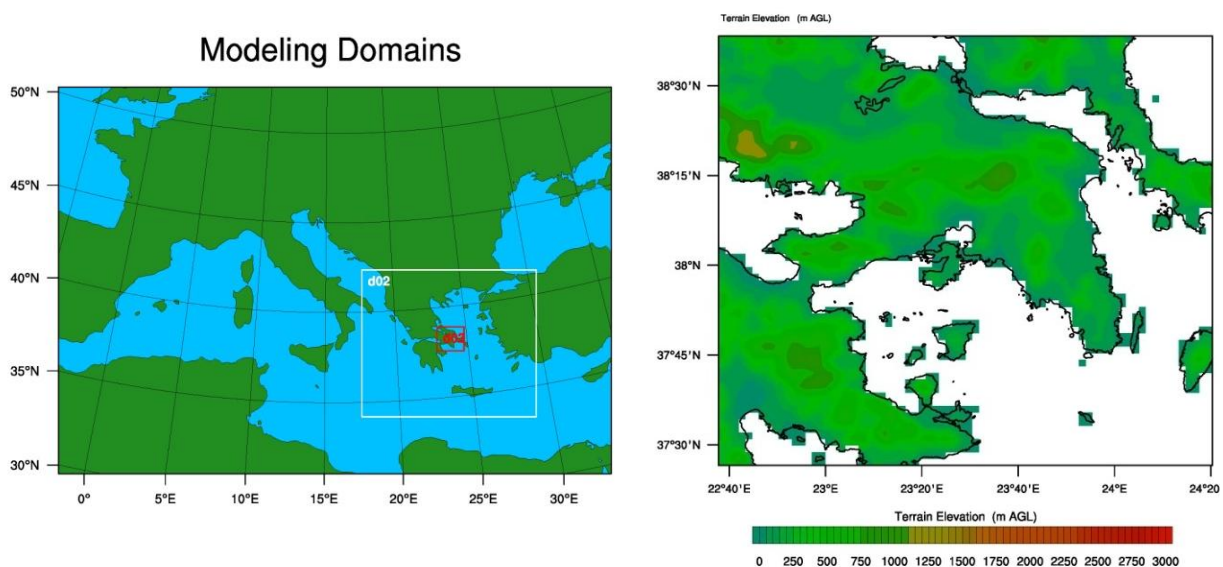
Με βάση τα δεδομένα αυτά καθορίστηκαν τρία πλέγματα με αυξανόμενη χωρική ανάλυση τα οποία επιλύθηκαν διαδοχικά για την εξαγωγή των μετεωρολογικών παραμέτρων στην περιοχή ενδιαφέροντος, με βάση τη διαδικασία που περιγράφηκε στο υποκεφάλαιο 2.3.2. Πιο αναλυτικά:

- το **πλέγμα 1** αποτελείται από 184×129 σημεία πλέγματος (σύνολο 23.736 σημεία), με οριζόντια χωρική ανάλυση 18 km. Το πλέγμα καλύπτει το μεγαλύτερο τμήμα της

Ευρώπης, των ακτών της Βόρειας Αφρικής, καθώς επίσης και το μεγαλύτερο τμήμα της Μεσογείου και της Μαύρης Θάλασσας,

- το **πλέγμα 2** αποτελείται από 174×147 σημεία πλέγματος (σύνολο 25.578 σημεία), με οριζόντια χωρική ανάλυση 6 km. Το πλέγμα καλύπτει τον Ελλαδικό χώρο και τις ακτές της Δυτικής Τουρκίας,
- το **πλέγμα 3** αποτελείται από 75×66 σημεία πλέγματος (σύνολο 4.950 σημεία), με οριζόντια χωρική ανάλυση 2 km, και καλύπτει την Αττική, τμήματα της Ανατολικής Βοιωτίας, της Βορειοανατολικής Πελοποννήσου και της Εύβοιας, καθώς επίσης και τα νησιά του Σαρωνικού και την Κέα.

Οι θέσεις των τριών πλεγμάτων παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.12 (α), ενώ ολόκληρο το πλέγμα καθώς επίσης και η τοπογραφία του, όπως υπολογίζεται από το μοντέλο, εμφανίζονται στο Σχήμα 3.12 (β).



**Σχήμα 3.12** : (α) Απεικόνιση των επιλεγμένων τριών πλεγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για τις διαδοχικές προσομοιώσεις του επεισοδίου ισχυρής βροχόπτωσης στην Αττική από το αριθμητικό μοντέλο καιρού WRF, (β) το ενδότερο εσωτερικό πλέγμα 3, με την τοπογραφία της περιοχής, όπως υπολογίζεται από το μοντέλο WRF (Πηγή: Κούσης κ.α., 2014).

Για το συγκεκριμένο επεισόδιο, πραγματοποιήθηκε μία σειρά προσομοιώσεων με διαφορετικό χρόνο έναρξης της προσομοίωσης (και επομένως διαφορετικές αρχικές συνθήκες) και ίδιο χρόνο λήξης (άρα διαφορετική διάρκεια) ώστε να προσομοιώνεται το σύνολο του επεισοδίου. Έτσι, για τη διάρκεια του επεισοδίου παρήχθησαν πολλαπλά δείγματα (ensemble forecasts, βλ. και 2.3.3) ωριαίων προγνώσεων βροχόπτωσης τα οποία στη συνέχεια χρησιμοποιούνται για τις αντίστοιχες υδρολογικές προσομοιώσεις. Συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων καλύπτουν χρονικά το διάστημα από

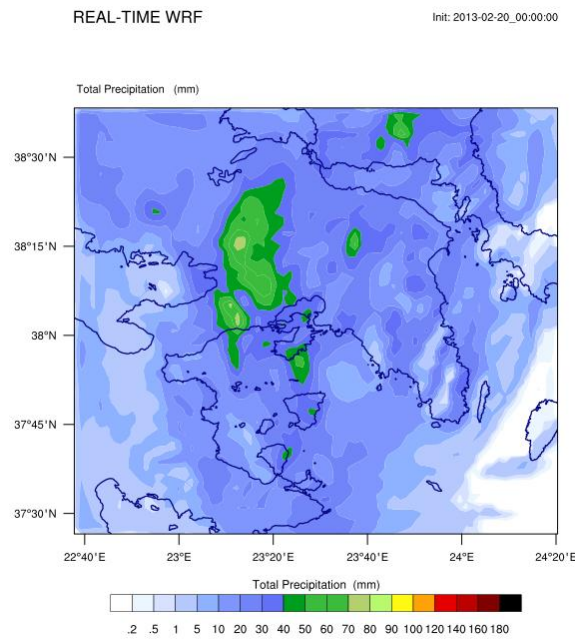
20/02/2013 0000 UTC<sup>1</sup> έως τις 22/02/2013 1200 UTC, με ένα σύνολο οκτώ διαδοχικών προσομοιώσεων, με έναρξη των διαδοχικών προσομοιώσεων στις 20/02/2013 0000 UTC και λήξη στις 21/02/2013 1800 UTC, χρονικού βήματος 6 ωρών. Με τον τρόπο αυτό τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων μπορούν να αναλυθούν με βάση και τη στοιχειώδη εκτίμηση της αβεβαιότητας της πρόγνωσης.

Για την κάθε προσομοίωση δημιουργήθηκε ένα αρχείο σε μορφή .txt, το οποίο αποτελείται από 4950 γραμμές (75 x 66 σημεία του πλέγματος 3) και n-στήλες, όπου n ο αριθμός των ωρών από την πρώτη ώρα της προσομοίωσης έως την τελευταία (22/02/2013 1200 UTC). Στην Εικόνα 3.6 φαίνεται ένα τέτοιο αρχείο όπως ανοίγει από το Microsoft Excel, ενώ στο Σχήμα 3.13 απεικονίζονται τα αποτελέσματα για το ύψος βροχόπτωσης στην περιοχή της Αττικής για το χρονικό διάστημα από 21/02/2013 1200 UTC έως τις 22/02/2013 1200 UTC, όπως παράχθηκε από την πρώτη προσομοίωση (20/02/2013 0000 UTC), του αριθμητικού μοντέλου καιρού WRF.

**Εικόνα 3.7** Αρχείο ωριαίων προγνώσεων βροχής για κάθε σημείο πλέγματος για την πρώτη προσομοίωση. Στην πρώτη στήλη (A), εμφανίζεται ο αύξων αριθμός των σημείων του πλέγματος 3, στις επόμενες δύο στήλες το γεωγραφικό πλάτος και μήκος (B, C) της περιοχής μελέτης και από την τέταρτη στήλη και δεξιότερα το ωριαίο ύψος βροχής.

<sup>1</sup> UTC σημαίνει ώρα Γκρήνουιτς, δηλαδή δύο ώρες πίσω από την ώρα Ελλάδας.





**Σχήμα 3.13** Ύψος βροχόπτωσης στην περιοχή της Αττικής για το χρονικό διάστημα από 21/02/2013 1200 UTC έως τις 22/02/2013 1200 UTC, όπως παράχθηκε στην πρώτη προσομοίωση (20/02/2013 0000 UTC), του αριθμητικού μοντέλου καιρού WRF (Πηγή: Κούσης κ.α., 2014).

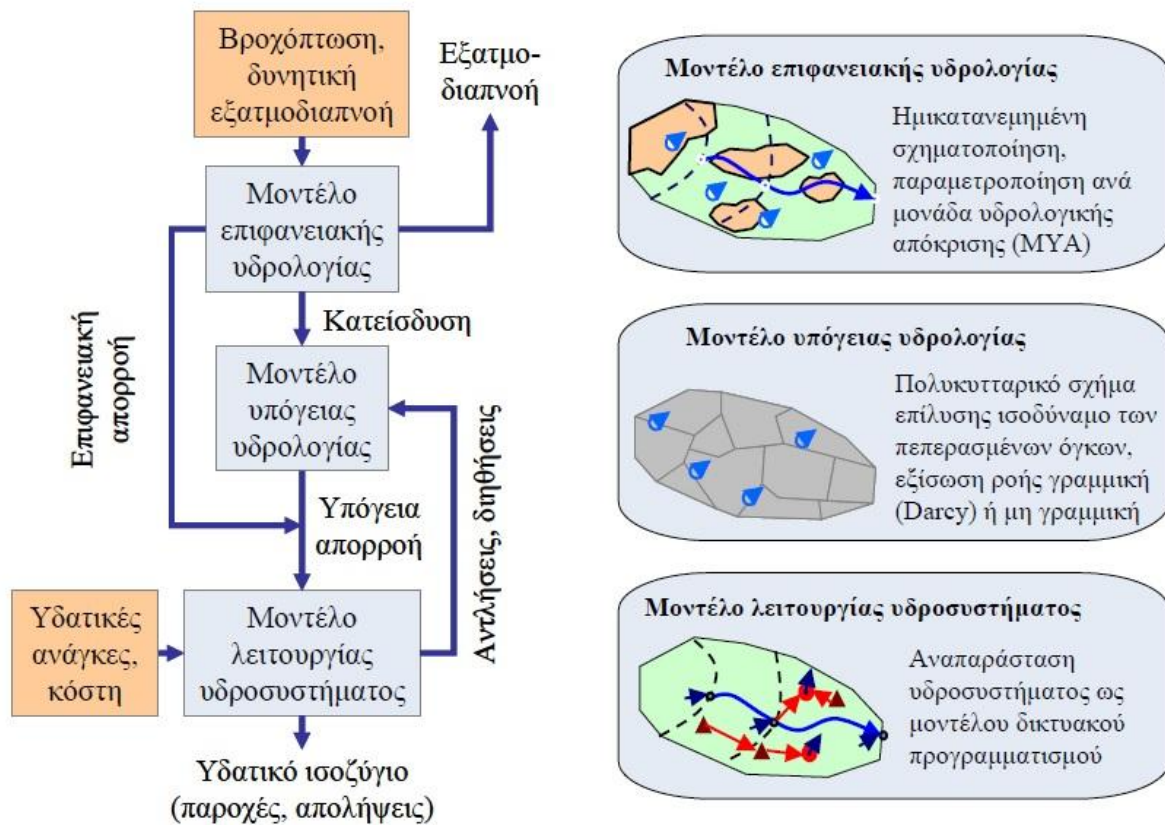
Η αναγωγή των προγνώσεων βροχόπτωσης των διακριτών σημείων σε προγνώσεις βροχόπτωσης για τη λεκάνη του Σαρανταπόταμου θα πραγματοποιηθεί τόσο σημειακά με βάση τα βροχομετρικά δεδομένα των τριών μετεωρολογικών σταθμών και τις προγνώσεις των γειτονικών διακριτών σημείων τους, όσο και επιφανειακά με βάση τις προγνώσεις για όλα τα διακριτά σημεία που βρίσκονται εντός της (βλ. Κεφάλαιο 6). Οι προγνώσεις αυτές θα αποτελέσουν την είσοδο του υδρολογικού μοντέλου που θα αναπτυχθεί στα Κεφάλαια 4 και 5, ώστε να παραχθούν και να αναλυθούν προγνώσεις απορροής (Κεφάλαιο 7).

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:** **ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ** **ΤΟΥ ΣΑΡΑΝΤΑΠΟΤΑΜΟΥ**

### **4.1 Το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ**

Η μοντελοποίηση της λεκάνης του Σαρανταπόταμου έγινε με τη χρήση του μοντέλου υδρολογικής και υδρογεωλογικής προσομοίωσης ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ και συγκεκριμένα από την τρίτη έκδοση (Ευστρατιάδης κ.α., 2014), η οποία υποστηρίζει ωριαίο χρονικό βήμα και εισάγει μεθόδους μονοδιάστατης υδραυλικής ανάλυσης για τη διόδευση, ενώ είναι βελτιωμένη ως προς τις εφαρμοζόμενες τεχνικές βελτιστοποίησης. Η εν λόγω έκδοση αναπτύχθηκε στα πλαίσια του προγράμματος Δευκαλίων για την εκτίμηση των πλημμυρικών ροών στην Ελλάδα (περισσότερες πληροφορίες για την ΥΔΡΟΓΕΙΟ και τις προηγούμενες εκδόσεις της στον ιστότοπο: <http://itia.ntua.gr/el/softinfo/25/>).

Η Υδρογείος είναι ένα ολοκληρωμένο σχήμα προσομοίωσης, το οποίο υλοποιεί ένα *συνδυαστικό (επιφανειακό και υπόγειο) υδρολογικό μοντέλο* που αναπαριστά τις διεργασίες στο έδαφος και το υπέδαφος, σε συνδυασμό με ένα σχήμα διαχείρισης συστημικού προσανατολισμού, το οποίο εκτιμά τις ροές κατά μήκος του φυσικού (υδρογραφικού) και τεχνητού (έργα μεταφοράς) δικτύου και τις πραγματικές απολήψεις του υδροσυστήματος, λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά και τους περιορισμούς των τεχνικών έργων αξιοποίησης των υδατικών πόρων.



**Σχήμα 4.1** Διάγραμμα ροής και συνοπτική περιγραφή των επιμέρους μοντέλων του λογισμικού ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ (Ευστρατιάδης, 2008).

Η χωρική κλίμακα αναπαράστασης των διεργασιών βασίζεται σε μια ημικατανεμημένη σχηματοποίηση, με την οποία εκτιμάται το ισοζύγιο των υδατικών πόρων σε χαρακτηριστικά σημεία (κόμβοι) της λεκάνης απορροής. Οι κόμβοι τοποθετούνται κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου (στις συμβολές των κλάδων ή σε άλλα σημεία ελέγχου) και σε θέσεις όπου πραγματοποιούνται επιφανειακές και υπόγειες απολήψεις. Η περιγραφή του πεδίου υπόγειας ροής βασίζεται σε μια πολυκυτταρική χάραξη, δημιουργώντας ένα εννοιολογικό δίκτυο διασυνδεδεμένων δεξαμενών, η στάθμη των οποίων αντιστοιχεί στη μέση στάθμη του αντίστοιχου τμήματος του υδροφορέα. Τέλος, το σύστημα διαχείρισης των υδατικών πόρων (υδροσύστημα), περιλαμβάνει μια εννοιολογική απεικόνιση των θέσεων προσφοράς και ζήτησης νερού, των κύριων έργων αξιοποίησης των υδατικών πόρων της λεκάνης (υδραγωγεία, έργα εκτροπής, γεωτρήσεις και ομάδες γεωτρήσεων) και των χρήσεων νερού. Για τη διαμόρφωση των χωρικών δεδομένων του μοντέλου χρησιμοποιείται το σύστημα γεωγραφικής πληροφορίας MapWindow.

Ως προς τη χρονική κλίμακα, το μοντέλο υποστηρίζει μηνιαίο, ημερήσιο και προσφάτως και ωριαίο βήμα προσομοίωσης, το οποίο επιλέγεται με βάση το σκοπό της μελέτης καθώς και τη

διαθεσιμότητα των υδρολογικών δεδομένων εισόδου. Στις μελέτες πλημμυρών ενδείκνυται η εφαρμογή του ωριαίου χρονικού βήματος, που προϋποθέτει την προσομοίωση όχι μόνο των υδρολογικών αλλά και των υδραυλικών διεργασιών, ήτοι την αναπαράσταση της διόδευσης των πλημμυρικών παροχών κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου. Για τον σκοπό αυτό, εκτός από το συνδυαστικό σχήμα των τριών προαναφερθέντων μοντέλων, υλοποιούνται και σχήματα διόδευσης, είτε στη μορφή απλών εννοιολογικών μοντέλων (κινηματικό κύμα, μέθοδος Muskingum) είτε μοντέλων μονοδιάστατης ανάλυσης. Τέλος, το ημερήσιο χρονικό βήμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο σε διαχειριστικές μελέτες όσο και για την περιγραφή πλημμυρικών φαινομένων σε μεγάλες λεκάνες, για τη συνήθη περίπτωση δεν διατίθενται επαρκή χωρικά δεδομένα βροχοπτώσης σε λεπτές χρονικές κλίμακες. Στην τελευταία περίπτωση, εφαρμόζεται ένα εμπειρικό σχήμα επιμερισμού των ημερήσιων απορροών κάθε υπολεκάνης σε υδρογραφήματα ωριαίας χρονικής κλίμακας.

Ως προς τη μοντελοποίηση των υδρολογικών διεργασιών στην επιφάνεια, την ακόρεστη και την κορεσμένη ζώνη του εδάφους, υιοθετείται μια *εννοιολογική δομή* επιχειρώντας παράλληλα μια *προσέγγιση φυσικής βάσης* (δεδομένου ότι η σχηματοποίηση του συστήματος γίνεται με χρήση κατανεμημένης γεωγραφικής πληροφορίας μέσω του Map Window GIS), η οποία είναι όσο το δυνατό φειδωλή ως προς τον αριθμό των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται. Οι παράμετροι αντιστοιχούν σε χωρικές ενότητες της λεκάνης (μονάδες υδρολογικής απόκρισης) και του υδροφορέα (ζώνες) με κοινά γεωμορφολογικά και υδρολογικά χαρακτηριστικά, το οποίο επιτρέπει την αποσύνδεση της παραμετροποίησης από τη χωρική λεπτομέρεια της σχηματοποίησης. Η εκτίμηση των παραμέτρων γίνεται μέσω βαθμονόμησης, δηλαδή με προσαρμογή του μοντέλου στις παρατηρημένες συνθήκες του παρελθόντος. Για το σκοπό αυτό, στο λογισμικό έχουν ενσωματωθεί αυτοματοποιημένες διαδικασίες, οι οποίες βασίζονται σε πολλαπλά μέτρα επίδοσης (στατιστικά και εμπειρικά) και εξελιγμένες τεχνικές βελτιστοποίησης, ολικής και πολυκριτηριακής.

Η Υδρόγειος υλοποιεί δύο τύπους προσομοίωσης. Ο πρώτος τύπος, αναφέρεται ως *ιστορική προσομοίωση*, αφορά στην αναπαράσταση της παρελθούσας κατάστασης της λεκάνης, για την οποία διατίθενται μετρήσεις παροχών ή άλλων μεταβλητών του συστήματος, που επιτρέπουν τη βαθμονόμηση του μοντέλου, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Ο δεύτερος τύπος, που καλείται *στοχαστική προσομοίωση*, αναφέρεται στην αναπαράσταση υποθετικών καταστάσεων της λεκάνης, με τη θεώρηση συνθετικών χρονοσειρών φόρτισης (βροχοπτώση, δυνητική εξατμοδιαπνοή). Η στοχαστική προσομοίωση επιτρέπει την εκτίμηση στατιστικών

μεγεθών, όπως η αξιοπιστία και η πλημμυρική διακινδύνευση, που αποτελούν βασικά μεγέθη των μελετών διαχείρισης υδατικών πόρων και πλημμυρών, αντίστοιχα.

## 4.2 Σχηματοποίηση υδρολογικού συστήματος - Ανάλυση σε περιβάλλον MapWindow GIS

### 4.2.1 Εισαγωγή

Ο όρος *σχηματοποίηση* αναφέρεται στη «διακριτοποίηση των υδρολογικών διεργασιών σε επιφανειακές χωρικές ενότητες, εφόσον αναφερόμαστε σε μοντέλο επιφανειακής υδρολογίας, ή του πεδίου κατεισδυσης σε κύτταρα υδροφορέα, εφόσον αναφερόμαστε σε μοντέλο υπόγεια υδρολογίας» (Ευστρατιάδης κ.α., 2009). Μέσω του περιβάλλοντος MapWindow και την υποστήριξη της ειδικής εφαρμογής (αρθρώματος, plug-in) MW-HYDROGEIOS κατασκευάζονται, οπτικοποιούνται και γίνονται αντικείμενο επεξεργασίας τα γεωγραφικά δεδομένα της περιοχής μελέτης (λεκάνη απορροής) με αποτέλεσμα να διαμορφώνεται μια δικτυακή της σχηματοποίηση με τα ακόλουθα θεματικά επίπεδα:

- ❖ **το επιφανειακό σύστημα**, που περιλαμβάνει το υδρογραφικό δίκτυο, τις υπολεκάνες ανάντη κάθε κόμβου του δικτύου και τις πηγές (οι πηγές αποτελούν μάλιστα τη διεπιφάνεια με το υπόγειο σύστημα
- ❖ **τις μονάδες υδρολογικής απόκρισης (MYA, HRU - Hydrological Response Units)**, που είναι γεωγραφικές ενότητες με κοινά γεωμορφολογικά και υδρολογικά χαρακτηριστικά και αναπαριστούν διαφορετικούς τύπους εδαφών
- ❖ **το υπόγειο σύστημα (υδροφορέας)**, που αναπαρίσταται ως ένα σύστημα κυττάρων πολυγωνικού σχήματος, στα οποία αντιστοιχούν εννοιολογικές δεξαμενές αποθήκευσης του νερού που συνδέονται μεταξύ τους με εννοιολογικά στοιχεία μεταφοράς και εκφορτίζονται είτε επιφανειακά μέσω των πηγών, είτε υπόγεια προς γειτονικές λεκάνες ή τη θάλασσα
- ❖ **το σύστημα διαχείρισης υδατικών πόρων (υδροσύστημα)**, δηλαδή μια εννοιολογική απεικόνιση των θέσεων προσφοράς και ζήτησης νερού, των κύριων έργων αξιοποίησης των υδατικών πόρων της λεκάνης (υδραγωγεία, έργα εκτροπής, γεωτρήσεις και ομάδες γεωτρήσεων) και των χρήσεων νερού.

Στην παρούσα εργασία για την λεκάνη απορροής του Σαρανταπόταμου, δεν έγινε διαχειριστική μελέτη, ως εκ τούτου το σύστημα διαχείρισης υδατικών πόρων απουσιάζει ενώ τα άλλα θεματικά επίπεδα συνδέονται μέσω του υδρογραφικού δικτύου και των πηγών

(επιφανειακό – υπόγειο σύστημα). Έτσι, τα γεωγραφικά δεδομένα που απαιτούνται για τη λειτουργία της εφαρμογής για την συγκεκριμένη λεκάνη είναι τα ακόλουθα:

- Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (hdr)
- Έξοδος λεκάνης (outlet)
- Υπολεκάνες (Subbasin)
- Υδρογραφικό Δίκτυο (River)
- Υπόγειοι Υδροφορείς (Groundwater)
- Μονάδες Υδρολογικής Απόκρισης (HRU)
- Πηγές (Spring)
- Κόμβοι υδροσυστήματος (HydroJunction)

Η παραπάνω ονοματολογία είναι ρητή και πρέπει να τηρείται υποχρεωτικά. Επισημαίνεται ακόμα ότι όλα τα παραπάνω αρχεία πρέπει να βρίσκονται αποθηκευμένα στον ίδιο φάκελο μεταξύ τους καθώς και με το αρχείο του MapWindow (με επέκταση mwrpj).

#### **4.2.2 Η εκτέλεση της εφαρμογής MW-HYDROΓΕΙΟΣ βήμα προς βήμα**

Πριν από την εκτέλεση της εφαρμογής απαραίτητη είναι η δημιουργία ενός νέου αρχείου στο οποίο αυτή θα πραγματοποιηθεί. Έτσι, δημιουργείται το αρχείο project.mwrpj και αποθηκεύεται σε σύνδεσμο όπου βρίσκονται τα αρχικά δεδομένα. Στη συνέχεια, προστίθεται το ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων, το hdr, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για τη χάραξη των υπολεκανών και του υδρογραφικού δικτύου.



**Σχήμα 4.2** Η απεικόνιση της ανάντη λεκάνης του Σαρανταπόταμου σε ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων (Πηγή: Κουκουβίνος, 2012)

Τα βήματα που πρέπει να ακολουθηθούν στη συνέχεια ανοίγοντας το εργαλείο MW-HYDROΓΕΙΟΣ φαίνονται στην επόμενη εικόνα.



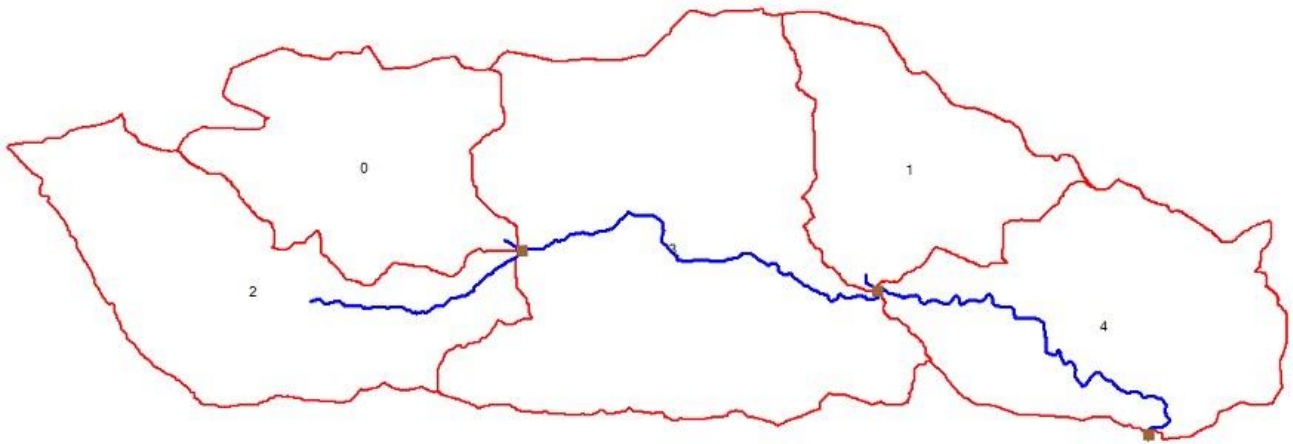
**Εικόνα 4.1** Η υπολογιστική διαδικασία στο άρθρωμα (plug-in) MW Hydrogeios

• Βήμα 1

Δημιουργείται το δενδροειδούς μορφής υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης (River) καθώς και η διακριτοποίηση σε υπολεκάνες (Subbasin) στο εισηγμένο ψηφιακό μοντέλο εδάφους. Εδώ, επιλέγεται η ελάχιστη επιφάνεια που δημιουργεί απορροή ίση με 15 sq.km (ήτοι 37.500 κελιά) που είναι μεγαλύτερη από τα 10sq.km που ορίζει η Οδηγία 2000/60 για τα νερά ως την ελάχιστη επιτρεπτή έκταση λεκάνης απορροής ποταμού. Η επιλογή αυτή δημιουργεί πέντε υπολεκάνες, που η κάθε μία αντιστοιχεί σε έναν κλάδο (ένα κύριο υδατόρευμα με τρεις κλάδους και δύο σημαντικά μικρότερα) του υδρογραφικού δικτύου (Σχήμα 4.3).

• Βήμα 2

Δημιουργείται το θεματικό επίπεδο που περιλαμβάνει τα πλέον κατάντη σημεία όλων των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου όπως και την έξοδο της λεκάνης (Outlet). Σε κάθε σημείο από αυτά θεωρείται ότι συγκεντρώνεται το σύνολο της απορροής των ανάντη υδατορευμάτων. Τα σημεία αυτά συμπίπτουν με τις θέσεις των εγκατεστημένων υδρομετρικών σταθμών που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 3, στην Οινόη ανάντη, όπου συμβάλουν και οι κλάδοι του υδατορεύματος και στη Γύρα Στεφάνης κατάντη όπου βρίσκεται και η έξοδος της λεκάνης (Σχήμα 4.3), ενώ ενδιάμεσά τους δημιουργείται άλλο ένα τέτοιο σημείο όπου συμβάλει ο επόμενο κλάδος.



**Σχήμα 4.3** Οι υπολεκάνες, το υδρογραφικό δίκτυο και οι κόμβοι όπως διαμορφώθηκαν μετά την τελική επιλογή *Delineate Watershead*

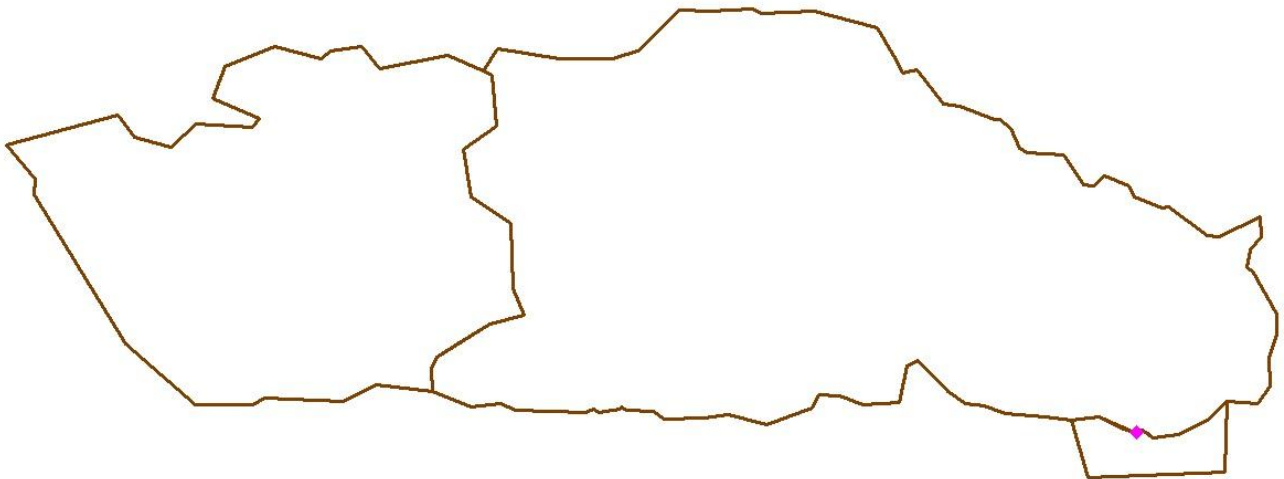
• Βήμα 3

Δημιουργούνται τα ακόλουθα αρχεία δεδομένων: κύτταρα υδροφορέα (πολύγωνα), πηγές (σημεία), γεωτρήσεις (σημεία), αρδευόμενες εκτάσεις (πολύγωνα), υδραγωγεία (γραμμές) και οι κόμβοι του υδροσυστήματος (σημεία). Από αυτά στην εν λόγω λεκάνη χρησιμοποιούνται τα κύτταρα του υδροφορέα (GroundWater), που χαράσσονται στο επόμενο βήμα και οι πηγές (Spring). Συγκεκριμένα, τοποθετείται στο σημείο εξόδου της λεκάνης μία πηγή, εφόσον στη συγκεκριμένη θέση έχει παρατηρηθεί εκροή νερού από το έδαφος μετά από έντονες βροχοπτώσεις (Σχήμα 4.4).

• Βήμα 4

Χαράσσονται χειροκίνητα τα κύτταρα του υπόγειου υδροφορέα και υπολογίζονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη των πολυγώνων (εμβαδά κυττάρων, αποστάσεις κέντρου βάρους, μήκη κοινών ακμών). Κατά τη χάραξη είναι πολύ σημαντικό τα γειτονικά κύτταρα να έχουν κοινές κορυφές. Λόγω της απουσίας στοιχείων και για λόγους μείωσης του υπολογιστικού φόρτου της επερχόμενης βαθμονόμησης χαράσσονται μόνο δύο κύτταρα, ένα για τις δύο ανάντη της θέσης του υδρομετρικού σταθμού της Οινόης υπολεκάνες και ένα για τις τρεις κατάντη, που ακολουθούν σε γενικές γραμμές την ίδια γεωμετρία με τα επιφανειακά και γεωγραφικά όρια της περιοχής. Δημιουργήθηκε και ένα επιπλέον κύτταρο μετά την έξοδο της λεκάνης το οποίο λειτουργεί ως συλλεκτήριο όλων των υπόγειων διαφυγών και είναι εικονικό (Σχήμα 4.4).

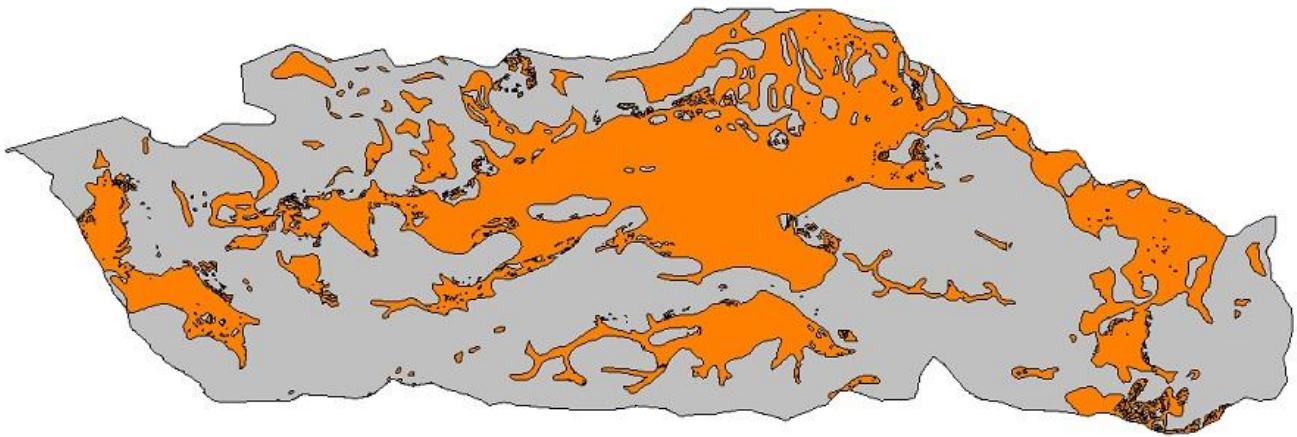




**Σχήμα 4.4** Τα πολυγωνικά κύτταρα του υπόγειου υδροφορέα και η θέση της πηγής

• Βήμα 5

Δημιουργούνται οι Μονάδες Υδρολογικής Απόκρισης (HRU), των οποίων εμπνευστής είναι ο Wolfgang Albert Flügel (1995). Οι ΜΥΑ δημιουργούνται λαμβάνοντας υπόψη τις διαβαθμίσεις τριών χαρακτηριστικών της περιοχής της λεκάνης της υδατοπερατότητας, της κάλυψης γης και της κλίσης του εδάφους, όπως αυτές αναπαριστώνται στα Σχήματα 3.4, 3.5 και 3.6 αντίστοιχα του προηγούμενου κεφαλαίου. Η δημιουργία των ΜΥΑ δε θα γίνει με τον κλασικό τρόπο τομής των θεματικών επιπέδων των επιμέρους χαρακτηριστικών καθώς αυτό θα δημιουργούσε αρκετούς συνδυασμούς χαρακτηριστικών άρα και περισσότερες ΜΥΑ, δηλαδή τελικά πολλές περισσότερες παραμέτρους (εφόσον θεωρείται ενιαίος υδρολογικός μηχανισμός σε κάθε ΜΥΑ άρα κοινό σετ παραμέτρων σε όλη της την έκταση) και άρα υπολογιστικό φόρτο. Γίνεται η επιλογή να φτιαχτούν δύο μόνο ΜΥΑ με τη βοήθεια της μεθόδου SCS-CN. Συγκεκριμένα η ΜΥΑ 1, αφορά τα εδάφη με CN μικρότερο από 50, δηλαδή περισσότερο περατά και καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος της έκτασης, ενώ αντίστοιχα η ΜΥΑ 2, αφορά τα εδάφη με CN μεγαλύτερο από 50 δηλαδή λιγότερο περατά και άρα με δυνατότητα μεγαλύτερης επιφανειακής απορροής (Σχήμα 4.5). Υπενθυμίζεται εδώ ότι ο αριθμός καμπύλης απορροής CN παίρνει τιμές από 0 έως 100 και επηρεάζεται από τον εδαφικό τύπο, τις προηγούμενες συνθήκες υγρασίας και τις χρήσεις γης. Ο αναλυτικός προσδιορισμός των ΜΥΑ γίνεται στο Παράρτημα Α.



**Σχήμα 4.5** Οι Μονάδες Υδρολογικής Απόκρισης. Συγκεκριμένα, η ΜΥΑ 1 (μεγαλύτερη περατότητα) αναπαρίσταται με γκρι χρώμα, ενώ η ΜΥΑ 2 (μικρότερη περατότητα) με πορτοκαλί χρώμα.

• Βήμα 6

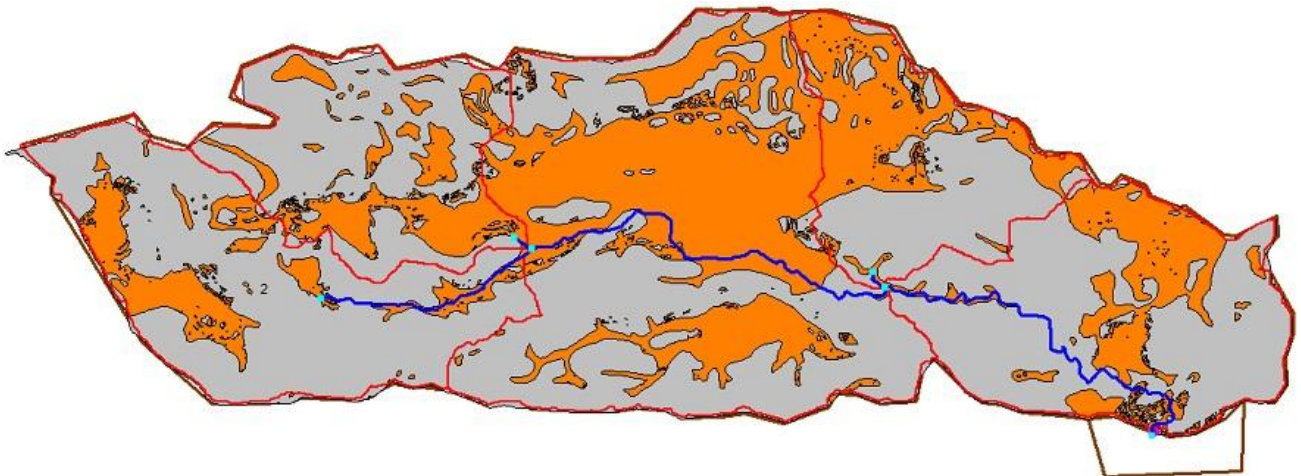
Δημιουργούνται τα παράγωγα θεματικά επίπεδα των συνδυασμών μεταξύ των υπολεκανών, των κυττάρων των υπόγειων υδροφορέων και των ΜΥΑ. Πιο συγκεκριμένα, παράγονται η ένωση κυττάρων υδροφορέα - υπολεκανών - μονάδων υδρολογικής απόκρισης, με βάση την οποία υπολογίζεται στη συνέχεια η κατεισδυση και η τομή κυττάρων υδροφορέα - υδατορευμάτων, με βάση την οποία υπολογίζεται στη συνέχεια η διήθηση. Δεν είναι δυνατή η τροποποίηση των δεδομένων αυτών που είναι απαραίτητα για την προετοιμασία για την υπολογιστική μηχανή της Υδρογείου.

• Βήμα 7

Δημιουργούνται ως θεματικό επίπεδο πλέον οι κόμβοι του υδροσυστήματος (HydroJunctions), στα σημεία διακλάδωσης του υδρογραφικού δικτύου καθώς και στα σημεία εκκίνησής του και στο σημείο εξόδου της λεκάνης.

• Βήμα 8

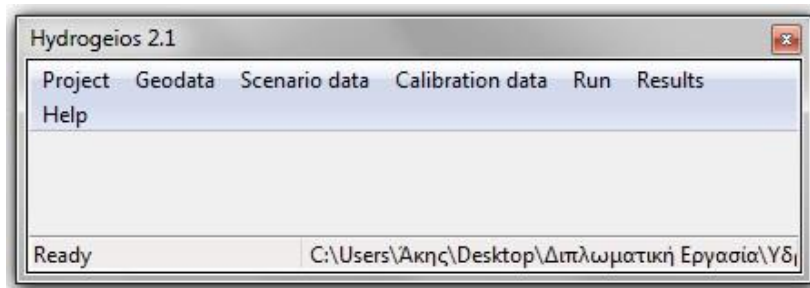
Κατασκευάζεται η τελική τοπολογία του δικτύου (Σχήμα 4.6). Μετά την εκτέλεση αυτής της εντολής, μπορεί να κληθεί η κύρια εφαρμογή, με την επιλογή Start Hydrogeios Engine, η οποία έως τότε διατηρείται ανενεργή.



**Σχήμα 4.6** Η τελική τοπολογία της περιοχής μελέτης με προσθήκη όλων των δημιουργούμενων στοιχείων

### 4.3 Προσομοίωση υδρολογικού συστήματος - Το περιβάλλον HYDROGEIOS

Μεταβαίνοντας στην κύρια εφαρμογή της ΥΔΡΟΓΕΙΟΥ εμφανίζεται το παρακάτω μενού (Εικόνα 4.2), του οποίου όλες οι επιλογές ενεργοποιούνται όταν ενεργοποιηθεί το σενάριο με το οποίο έχουμε σχηματοποιήσει την περιοχή μελέτης. Με αυτό τον τρόπο είναι διαθέσιμα στην κύρια εφαρμογή πλέον όλα τα γεωμετρικά και φυσιογραφικά στοιχεία που υπολογίστηκαν και ορίστηκαν στη σχηματοποίηση. Απομένει η είσοδος των κατάλληλων χρονοσειρών ώστε να ξεκινήσει η διαδικασία της βαθμονόμησης.



**Εικόνα 4.2** Το αρχικό μενού της εφαρμογής Hydrogeios 2.1

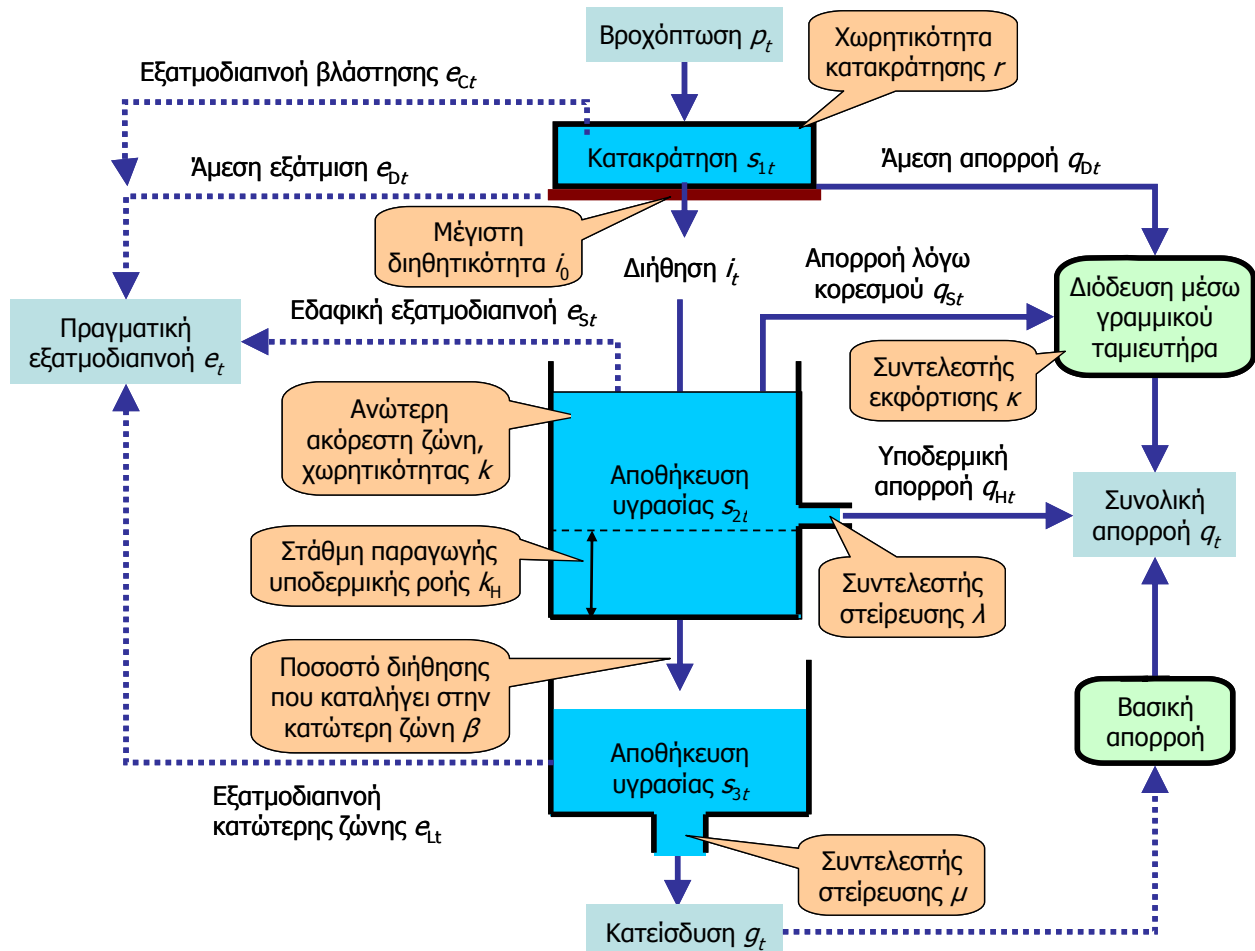
Πριν παρουσιαστούν τόσο η διαδικασία όσο και τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης της λεκάνης απορροής θεωρείται σκόπιμο να περιγραφούν οι διαδικασίες προσομοίωσης του υδρολογικού μοντέλου τόσο για το επιφανειακό όσο και για το υπόγειο σύστημα, προκειμένου να γίνουν κατανοητές οι φυσικές διεργασίες που συντελούνται. Επισημαίνεται ότι σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στο υποκεφάλαιο 4.2, θα ακολουθηθεί ιστορικός τύπος προσομοίωσης.

### 4.3.1 Δομή επιφανειακού συστήματος

Καταρχήν, επιλέγουμε *ωριαίο χρονικό βήμα* εφόσον η παρούσα εργασία αφορά την πλημμυρική συμπεριφορά της λεκάνης. Στην ημερήσια και ωριαία κλίμακα εφαρμόζεται μια διαφοροποιημένη δομή μοντέλου από τη μηνιαία κλίμακα, ώστε να αποτυπώνονται πιο ρεαλιστικά οι υδρολογικές διεργασίες στην κλίμακα του επεισοδίου βροχής. Η δομή αυτή απεικονίζεται στο Σχήμα 4.7 και περιλαμβάνει τέσσερις συνιστώσες:

- την δεξαμενή κατακράτησης, χωρητικότητας  $r$ , που υποδηλώνει τη μέγιστη ποσότητα νερού της βροχόπτωσης που μπορεί να συγκρατήσει η βλάστηση, η οποία στη συνέχεια μετατρέπονται σε άμεση εξατμοδιαπνοή.
- η εδαφική επιφάνεια, μέγιστης διηθητικότητας  $i_0$ , που τροφοδοτείται από την περίσσεια βροχής, την οποία επιμερίζει σε επιφανειακή απορροή και διήθηση, που με τη σειρά της επιμερίζεται στην ανώτερη και κατώτερη ζώνη εδαφικής υγρασίας, με βάση ένα σταθερό ποσοστό  $\beta$ .
- την ανώτερη ακόρεστη ζώνη, χωρητικότητας  $k$ , που τροφοδοτείται από ποσοστό  $(1 - \beta)$  της διήθησης, η οποία παράγει υποδερμική απορροή, εφόσον η αποθήκευση υγρασίας υπερβεί τη στάθμη  $k_H$ , και απορροή λόγω κορεσμού, εφόσον η αποθήκευση υγρασίας υπερβεί τη χωρητικότητα  $k$ , και επιπλέον αναλώνει ένα μέρος της αποθηκευμένης υγρασίας σε εδαφική εξατμοδιαπνοή.
- την κατώτερη ακόρεστη ζώνη, απεριόριστης χωρητικότητας  $k$ , που τροφοδοτείται από ποσοστό  $\beta$  της διήθησης, η οποία παράγει κατείσδυση, και επιπλέον αναλώνει ένα μέρος της αποθηκευμένης υγρασίας σε βαθιά εξατμοδιαπνοή.

Η συνολική απορροή επιμερίζεται σε τρεις συνιστώσες, την άμεση απορροή, την απορροή λόγω κορεσμού και την υποδερμική απορροή. Οι δύο πρώτες συνιστώσες αναφέρονται σε ροή πάνω στην επιφάνεια του εδάφους, και αποτελούν την επιφανειακή απορροή του εδαφικού στοιχείου, ενώ η υποδερμική ροή πραγματοποιείται στο ρηχό τμήμα του υπεδάφους, ήτοι την ανώτερη ακόρεστη ζώνη. Η επιφανειακή απορροή διοδεύεται μέχρι την έξοδο της λεκάνης μέσω ενός γραμμικού ταμιευτήρα, στην οποία καταλήγουν ακόμη η υποδερμική απορροή καθώς και η βασική απορροή. Η τελευταία προέρχεται από την επιφανειακή εκφόρτιση του υδροφορέα, που τροφοδοτείται από την κατείσδυση των ανώτερων στρωμάτων.



**Σχήμα 4.7** Σχηματική αναπαράσταση του μοντέλου ημερήσιου/ωριαίου υδατικού ισοζυγίου. Στα ροζ πλαίσια διακρίνονται οι παράμετροι του επιφανειακού συστήματος (Ευστρατιάδης κ.α., 2014)

Έστω ότι στο χρονικό διάστημα  $[t, t + \Delta t]$ , όπου  $\Delta t$  το βήμα της προσομοίωσης (στην προκειμένη περίπτωση ωριαίο) είναι γνωστά η συνολική κατακρήμνιση,  $p_t$ , η δυνητική εξατμοδιαπνοή,  $e_{pt}$  (τα παραπάνω δεδομένα εισάγονται μέσω των παρατηρημένων χρονοσειρών), η κατακράτηση νερού στη χλωρίδα,  $s_{1t}$ , και η αποθήκευση εδαφικής υγρασίας στην ανώτερη,  $s_{2t}$ , και κατώτερη,  $s_{3t}$ , ακόρεστη ζώνη. Για τις τρεις συνιστώσες αποθήκευσης, που αποτελούν τις μεταβλητές κατάστασης του μοντέλου, απαιτείται η γνώση των αρχικών τιμών τους στον χρόνο  $t = 0$ . Εφόσον η προσομοίωση ξεκινά στην αρχή του υδρολογικού έτους και δεν έχει πραγματοποιηθεί κάποιο σημαντικό επεισόδιο βροχής τις προηγούμενες μέρες, η αρχική τιμή των τριών μεταβλητών μπορεί να θεωρηθεί ίση με μηδέν. Η υλοποίηση των διεργασιών πραγματοποιείται βήμα προς βήμα, ως εξής:

- Εκτιμάται η κατακράτηση μέρους (ή του συνόλου) της προσπίπτουσας βροχόπτωσης από τη χλωρίδα, ως εξής:

$$r_{0t} = \min(p_t, r - s_{1t}) \quad (4.1)$$

όπου  $r$  η χωρητικότητα κατακράτησης, που έχει διαστάσεις ισοδύναμου ύψους νερού και αποτελεί παράμετρο του μοντέλου. Η παράμετρος αυτή θεωρείται εποχιακά μεταβαλλόμενη. Ειδικότερα, την περίοδο Νοεμβρίου-Μαρτίου η τιμή της μειώνεται στο μισό, ώστε να ληφθεί υπόψη η αντίστοιχη μείωση της επιφάνειας των φύλλων κατά τη χειμερινή περίοδο.

- Μετά την προσθήκη της κατακρατούμενης ποσότητας  $r_{0t}$ , η συνολική υγρασία που έχει αποθηκευτεί στη βλάστηση επικαιροποιείται σε:

$$s_{1t} \rightarrow s_{1t} + r_{0t} \quad (4.2)$$

- Εκτιμώνται οι απώλειες λόγω της άμεσης εξατμοδιαπνοής από τη χλωρίδα. Η ποσότητα αυτή είναι το ελάχιστο μεταξύ της διαθέσιμης υγρασίας που έχει κατακρατηθεί στη χλωρίδα και της αντίστοιχης θεωρητικής ζήτησης, ήτοι:

$$e_{ct} = \min[s_{1t}, PET(s_{1t}/r)^{2/3}] \quad (4.3)$$

Στην παραπάνω σχέση, ο όρος της θεωρητικής ζήτησης εκτιμάται από την ημιεμπειρική εξίσωση του Deardorff (1978).

- Η τελική αποθήκευση υγρασίας στη δεξαμενή κατακράτησης υπολογίζεται από την εξίσωση ισοζυγίου, ήτοι:

$$s_{1,t+1} = s_{1t} + r_{0t} - e_{ct} \quad (4.4)$$

ενώ η περίσσεια της βροχής  $\Delta p_t = p_t - r_{0t}$  πέφτει στο έδαφος. Από την ποσότητα αυτή, ένα μέρος (ή το σύνολο) διηθείται προς την ακόρεστη ζώνη, ενώ το υπόλοιπο τμήμα (ή καθόλου) απορρέει επιφανειακά, ως άμεση απορροή.

- Η διηθητικότητα του εδάφους εκτιμάται από την ακόλουθη εμπειρική σχέση, συναρτήσει της μέγιστης δυναμικής διηθητικότητας,  $i_0$ , και του ποσοστού πλήρωσης της ανώτερης ακόρεστης ζώνης σε υγρασία,  $s_{2t}/k$ , ήτοι:

$$i_{max,t} = i_0 \exp(-s_{2t}/k) \quad (4.5)$$

Σύμφωνα με την παραπάνω έκφραση, αν η ανώτερη ζώνη είναι εντελώς ξηρή, ήτοι  $s_2 = 0$ , τότε το έδαφος μπορεί να απορροφήσει ποσότητα ίση με τη μέγιστη δυναμική διηθητικότητα,  $i_0$ , που αποτελεί παράμετρο του μοντέλου και εξαρτάται από το εδαφικό υλικό. Αντίθετα, αν το ανώτερο στρώμα του εδάφους είναι κορεσμένο, ήτοι  $s_2 = k$  (όπου  $k$  η χωρητικότητα της δεξαμενής εδαφικής υγρασίας), τότε το έδαφος μπορεί δυναμικά να απορροφήσει ποσότητα ίση με  $0.367i_0$ . Η παραπάνω σχέση εξασφαλίζει ότι κατά τη διάρκεια ισχυρών επεισοδίων βροχής, η διηθητικότητα του εδάφους μειώνεται, όπως προβλέπει και η υδρολογική θεωρία.

- Η πραγματική διήθηση θα είναι ίση με το ελάχιστο μεταξύ της δυναμικής διηθητικότητας και της περίσσειας βροχής, ήτοι:

$$i_t = \min(\Delta p_t, i_{max,t}) \quad (4.6)$$

- Η διηθούμενη ποσότητα νερού επιμερίζεται στην ανώτερη και κατώτερη ακόρεστη ζώνη, με βάση έναν συντελεστή  $\beta$ , που αποτελεί αδιάστατη παράμετρο του μοντέλου. Οι τιμές αποθήκευσης στις δύο ζώνες εδαφικής υγρασίας, οι οποίες στο μοντέλο αναπαρίστανται ως δεξαμενές, επικαιροποιούνται ως εξής:

$$s_{2t} \rightarrow s_{2t} + (1 - \beta) i_t \quad (4.7)$$

$$s_{3t} \rightarrow s_{3t} + \beta i_t \quad (4.8)$$

- Η ποσότητα νερού που απομένει πάνω στο έδαφος αναλώνεται, καταρχήν, σε απώλειες λόγω άμεσης εξάτμισης, σύμφωνα με τη σχέση:

$$e_{Dt} = \min[\Delta p_t - i_t, PET - e_{ct}] \quad (4.9)$$

- Υπολογίζεται η υπολειπόμενη ποσότητα που αποτελεί την άμεση απορροή, η οποία πραγματοποιείται στην επιφάνεια του εδάφους, χωρίς να έχει μεσολαβήσει διήθησή της στο έδαφος. Η απορροή αυτή υπολογίζεται ως εξής:

$$q_{Dt} = \Delta p_t - i_t - e_{Dt} \quad (4.10)$$

- Οι διεργασίες της άνω δεξαμενής είναι η εδαφική εξατμοδιαπνοή, η υποδερμική απορροή και η απορροή λόγω κορεσμού. Για την εδαφική εξατμοδιαπνοή της ανώτερης ακόρεστης ζώνης θεωρείται ότι μπορεί να ικανοποιηθεί το σύνολο της υπολειπόμενης θεωρητικής ζήτησης, εφόσον υπάρχει επάρκεια υγρασίας, ήτοι:

$$e_{St} = \min[s_{2t}, PET - e_{ct} - e_{Dt}] \quad (4.11)$$

- Μετά την αφαίρεση της εν λόγω ποσότητας, ήτοι  $s_{2t} \rightarrow s_{2t} - e_{St}$ , εξετάζεται αν η διαθέσιμη υγρασία υπερβαίνει το κατώφλι  $k_H$ , που αποτελεί παράμετρο του μοντέλου με διαστάσεις ισοδύναμου ύψους νερού, οπότε παράγεται υποδερμική απορροή σύμφωνα με τη σχέση:

$$q_{Ht} = \max[0, \lambda(s_{2t} - k_H)] \quad (4.12)$$

όπου  $\lambda$  αδιάστατη παράμετρος (συντελεστής στείρευσης), που σχετίζεται με την οριζόντια υδραυλική αγωγιμότητα του ρηχού εδαφικού στρώματος.

- Αν μετά την αφαίρεση της υποδερμικής ροής, ήτοι  $s_{2t} \rightarrow s_{2t} - q_{Ht}$ , η τρέχουσα τιμή της εδαφικής υγρασίας ξεπερνά τη χωρητικότητα της δεξαμενής,  $k$ , που αποτελεί παράμετρο του μοντέλου με διαστάσεις ισοδύναμου ύψους νερού, παράγεται απορροή λόγω κορεσμού του εδάφους από κάτω, με τη μορφή υπερχειλίσης της δεξαμενής, ήτοι:

$$q_{St} = \max[0, s_{2t} - k] \quad (4.13)$$

Συνεπώς, η τελική τιμή της εδαφικής υγρασίας στην ανώτερη ακόρεστη ζώνη δεν μπορεί να υπερβεί την χωρητικότητα  $k$ . Η απορροή λόγω κορεσμού, μαζί με την άμεση απορροή, αποτελούν τις δύο συνιστώσες της επιφανειακής απορροής.

• Οι υδρολογικές διεργασίες της κάτω δεξαμενής, που αντιπροσωπεύει την κατώτερη ακόρεστη ζώνη, αυτές είναι η βαθιά εξατμοδιαπνοή και η κατείσδυση. Εφόσον δεν έχει ικανοποιηθεί πλήρως η θεωρητική ζήτηση εξατμοδιαπνοής, δηλαδή  $PET - e_{Ct} - e_{Dt} - e_{St} > 0$ , τότε μια ισόποση ποσότητα υγρασίας θεωρείται ότι ανυψώνεται προς την ανώτερη ζώνη, μέσω των δυνάμεων μύζησης. Η εν λόγω ποσότητα δίνεται από τη σχέση:

$$u_t = \min(s_{3t}, PET - e_{Ct} - e_{Dt} - e_{St}) \quad (4.14)$$

και προστίθεται στην αποθηκευμένη ποσότητα της άνω δεξαμενής, ήτοι  $s_{2t} \rightarrow s_{2t} + u_t$ , ενώ αφαιρείται από την αποθήκευση της κάτω δεξαμενής, ήτοι  $s_{3t} \rightarrow s_{3t} - u_t$ .

• Η παραγόμενη βαθιά εξατμοδιαπνοή εξαρτάται από το βαθμό κορεσμού της ανώτερης ζώνης, σύμφωνα με την εμπειρική σχέση:

$$e_{Lt} = (PET - e_{Ct} - e_{Dt} - e_{St})(s_{2t} / k)^{2/3} \quad (4.15)$$

• Η κατείσδυση προς τα βαθύτερα στρώματα (κορεσμένη ζώνη) δίνεται από τη σχέση:

$$g_t = \mu s_{3t} \quad (4.16)$$

όπου  $\mu$  αδιάστατη παράμετρος (συντελεστής στείρευσης), που σχετίζεται με την κατακόρυφη υδραυλική αγωγιμότητα εδάφους.

• Η τελική αποθήκευση υγρασίας στην άνω και κάτω ακόρεστη ζώνη υπολογίζεται από τις αντίστοιχες εξισώσεις υδατικού ισοζυγίου, ήτοι:

$$s_{2,t+1} = s_{2t} + (1 - \beta)i_t + u_t - e_{St} - e_{Lt} - q_{Ht} - q_{St} \quad (4.17)$$

$$s_{3,t+1} = s_{3t} + \beta i_t - u_t - g_t \quad (4.18)$$

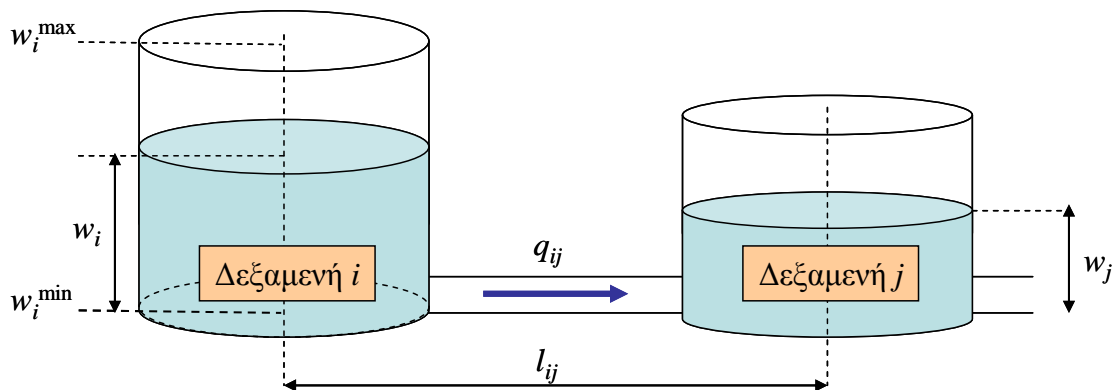
### 4.3.2 Δομή υπόγειου συστήματος

Στο μοντέλο υπόγειας υδρολογίας, όπως έχει ήδη αναφερθεί, η διακριτοποίηση του πεδίου ροής βασίζεται στη διαμόρφωση ενός συστήματος πολυγωνικών κυττάρων ευέλικτης γεωμετρίας, τα οποία αναπαριστούν, σε κάτοψη, δεξαμενές αποθήκευσης του υπόγειου νερού. Οι δεξαμενές δέχονται τριών ειδών φορτίσεις:

- την κατανεμημένη κατείσδυση της εδαφικής υγρασίας
- την γραμμική διήθηση νερού κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου
- την σημειακή άντληση νερού από τις γεωτρήσεις του υδροσυστήματος



Στην παρούσα περιοχή μελέτης δεν υπάρχουν γεωτρήσεις άρα οι φορτίσεις των κυττάρων συνίστανται σε κατειόδυση και διήθηση, που αποτελούν τη φυσική τροφοδοσία του υδροφορέα με νερό λόγω της βροχοπτώσης. Έτσι, το υπόγειο σύστημα αναπαρίσταται από εννοιολογικές δεξαμενές που συνδέονται μεταξύ τους με εικονικά στοιχεία μεταφοράς (αγωγοί) και δέχονται τις παραπάνω δύο φορτίσεις. Η μεταβολή της στάθμης των δεξαμενών απεικονίζει την πιεζομετρία στον υδροφορέα, άρα η ροή συντελείται από τη δεξαμενή υψηλότερης σε αυτή με τη χαμηλότερη στάθμη. Το υδραυλικό ανάλογο δύο τέτοιων γειτονικών δεξαμενών παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.8.



**Σχήμα 4.8** Σχηματική αναπαράσταση του μοντέλου υπόγειων διεργασιών και απεικόνιση χαρακτηριστικών μεγεθών (Ευστρατιάδης κ.α., 2014)

- Η στάθμη του νερού  $w_i$  αποτελεί τη μεταβλητή κατάστασης του συστήματος και αντιπροσωπεύει το μέσο ύψος νερού στην περιοχή του κυττάρου.
- Σε συνθήκες φρεάτιου υδροφορέα η στάθμη κυμαίνεται μεταξύ ανώτατης (οροφής) και κατώτατης (βάσης) στάθμης  $w_i^{\max}$  και  $w_i^{\min}$ . Όταν ξεπεραστεί η οροφή της δεξαμενής ο υδροφορέας θεωρείται περιορισμένος.
- Το υδραυλικό φορτίο  $h_i$  της δεξαμενής  $i$  υπολογίζεται ως εξής:

$$h_i = \begin{cases} w_i^{\min} + w_i & w_i \leq w_i^{\max} \\ w_i^{\max} + (w_i - w_i^{\max})\theta & w_i > w_i^{\max} \end{cases} \quad (4.19)$$

όπου  $\theta \gg 1$  ο λόγος της ειδικής απόδοσης προς την αποθηκευτικότητα σε συνθήκες πίεσης. Αν  $h_i > h_j$  τότε η ροή πραγματοποιείται  $i \rightarrow j$ .

- Μία αδιάστατη παράμετρος του προβλήματος είναι η τιμή της ειδικής απόδοσης  $S_{yi}$ , που συνδέεται με το πορώδες  $n_i$  του εδάφους, ενώ μία δεύτερη είναι η υδραυλική αγωγιμότητα  $K_i$  που έχει μονάδες ταχύτητας. Κάθε δεξαμενή κύτταρο έχει και διαφορετικές τιμές παραμέτρων.

- Για δεδομένη στάθμη  $w_i$ , ο αποθηκευμένος όγκος νερού,  $V_i$ , υπολογίζεται από τη σχέση:

$$V_i = w_i F_i \quad (4.20)$$

όπου  $F_i$  το εμβαδόν της βάσης της δεξαμενής  $i$  το οποίο ισούται με το εμβαδό του αντίστοιχου κοττάρου επί την ειδική απόδοση του υδροφορέα, ήτοι  $F_i = S_{yi} A_i$ .

- Η ροή  $q_{ij}$  στον εννοιολογικό αγωγό χαρακτηρίζεται πλήρως από τρία μεγέθη: το μήκος του  $l_{ij}$ , το εμβαδόν της κορεσμένης διατομής  $a_{ij}$  και την υδραυλική του αγωγιμότητα  $k_{ij}$ , που είναι διαφορετική (αλλά εξαρτάται) από την υδραυλική αγωγιμότητα των δεξαμενών.

- Το μήκος,  $l_{ij}$ , του αγωγού είναι σταθερό και ισούται με την απόσταση των κέντρων βάρους των δεξαμενών  $i$  και  $j$ , ήτοι:

$$l_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (4.21)$$

- Εφόσον ο υδροφορέας είναι φρεάτιος, το εμβαδό της κορεσμένης διατομής,  $a_{ij}$ , εξαρτάται από τα υψόμετρα βάσης και την επίκαιρη στάθμη των δύο δεξαμενών, ήτοι:

$$a_{ij} = \begin{cases} w_i \beta_{ij} & w_i \geq w_j^{\min} + w_j \\ (w_i^{\min} + w_i - w_j) \beta_{ij} & w_i \leq w_j^{\min} + w_j \end{cases} \quad (4.22)$$

όπου  $\beta_{ij}$  το μήκος της κοινής ακμής των δύο δεξαμενών, το οποίο υπολογίζεται από το ΣΓΠ (αν θεωρηθεί συνθήκη αδιαπέρατου ορίου, η ακμή λαμβάνεται μηδενική, οπότε δεν πραγματοποιείται ροή). Αν ο υδροφορέας είναι περιορισμένος, τότε το εμβαδό της διατομής δεν εξαρτάται από τη στάθμη αλλά από τη σχετική θέση των υψομέτρων πυθμένα και οροφής των δύο δεξαμενών. Για παράδειγμα, αν  $w_i^{\min} > w_j^{\min}$ ,  $w_i^{\max} > w_j^{\max}$  και  $w_i^{\min} < w_j^{\max}$ , τότε το εμβαδό ισούται με  $(w_j^{\max} - w_i^{\min}) \beta_{ij}$ .

- Η υδραυλική αγωγιμότητα  $k_{ij}$  του αγωγού, η οποία εκφράζει τη μέση ταχύτητα ροής στον αγωγό και είναι σταθερή, προκύπτει με συνδυασμό των αγωγιμοτήτων των δεξαμενών,  $K_i$  και  $K_j$ . Για τον υπολογισμό της μπορούν να χρησιμοποιηθούν τρεις αριθμητικοί συνδυασμοί (αριθμητικός μέσος, αρμονικός μέσος, γεωμετρικός μέσος). Στην παρούσα εργασία επιλέγεται ο υπολογισμός της υδραυλικής αγωγιμότητας να γίνει με τον αρμονικό μέσο, ο οποίος ενέχει μεγαλύτερη φυσική συνέπεια ήτοι:

$$k_{ij} = 2K_i K_j / (K_i + K_j) \quad (4.23)$$

- Με γνωστά όλα τα μεγέθη των δεξαμενών και του αγωγού, η επίκαιρη παροχή  $q_{ij}$  μεταξύ των δύο δεξαμενών υπολογίζεται από την εξίσωση Darcy, δηλαδή:

$$q_{ij} = k_{ij} a_{ij} \frac{h_i - h_j}{l_{ij}} \quad (4.24)$$

- Η επίλυση του μοντέλου υπόγειων νερών γίνεται με χρονικό βήμα  $\Delta t$ , το οποίο είναι μικρότερο από την χρονική διακριτότητα της προσομοίωσης,  $\Delta \tau$ , που αντιστοιχεί στην περίοδο φόρτισης. Το βήμα επιλέγεται με κριτήριο την επίτευξη αριθμητικής ευστάθειας.

Αυτό γίνεται εμπειρικά, ελέγχοντας αν η περαιτέρω μείωση του χρονικού βήματος οδηγεί σε σημαντικά διαφορετικά αποτελέσματα. Είναι προφανές ότι η θεώρηση πολύ μικρού  $\Delta t$  συνεπάγεται αντίστοιχα αυξημένο υπολογιστικό φόρτο, δεδομένου ότι η επίλυση του δικτύου ροής γίνεται  $N_\delta = \Delta T / \Delta t$  φορές για κάθε περίοδο φόρτισης. Συνεπώς, τα ύψη κατείδουσης, διήθησης και άντλησης διαιρούνται με την ποσότητα  $N_\delta$ . Εδώ επιλέγεται  $N_\delta=10$ .

• Στο ρητό σχήμα επίλυσης, υπολογίζονται οι μεταβολές στάθμης εντός όλων των δεξαμενών στο χρονικό βήμα  $\Delta t$  λόγω της ανταλλαγής νερού μεταξύ τους και με την παραδοχή ότι το υδραυλικό ύψος παραμένει πρακτικά σταθερό. Συγκεκριμένα σε κάθε χρονικό βήμα εκτελείται η παρακάτω ακολουθία υπολογισμών για το κύτταρο (δεξαμενή)  $i$ :

- για τον υπολογισμό της παροχής του (εννοιολογικού) αγωγού που συνδέει τα κύτταρα  $i$  και  $j$  (φορά από το  $i$  στο  $j$ ):

$$q_{ij} = T_{ij}(h_i - h_j) \quad (4.25)$$

όπου  $T_{ij} = K_{ij} a_{ij} / l_{ij}$ .

-για τη μεταβολή της στάθμης λόγω :

$$\Delta w_{ij} = -q_{ij} \Delta t / F_i \quad (4.26)$$

-τελικά για τη στάθμη μετά το χρονικό βήμα  $\Delta t$  στη δεξαμενή  $i$  θα έχουμε:

$$w_i = w_i^{t-\Delta t} + \sum_{j=1}^n \Delta w_{ij} + g_i \Delta t \quad (4.27)$$

όπου  $w_i^{t-\Delta t}$  η αρχική στάθμη στη δεξαμενή  $i$ ,  $n$  ο αριθμός των δεξαμενών που προσδίδουν παροχή στη δεξαμενή  $i$  (εν προκειμένω  $n=0$  για τη δεξαμενή 0 και  $n=1$  για τις δεξαμενές 1 και 2), και  $g_i$  η κατείδουση (επιφανειακή φόρτιση) προς τη δεξαμενή  $i$  το χρονικό διάστημα  $\Delta t$ .

• Τέλος, οι υδρολογικές μεταβλητές εισόδου δηλαδή η κατανεμημένη κατείδουση και η γραμμική διήθηση μεταβάλλονται για κάθε συνδυασμό υπολεκάνης  $i$  όπου  $i=1,2,3,4,5$  με μονάδα υδρολογικής απόκρισης  $j$  όπου  $j=1,2$ . Έτσι, για το κύτταρο  $k$  με έκταση  $F_k$  θα έχουμε:

$$g_k = \frac{1}{F_k} \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^2 g_{ij} F_{ijk} \quad (4.28)$$

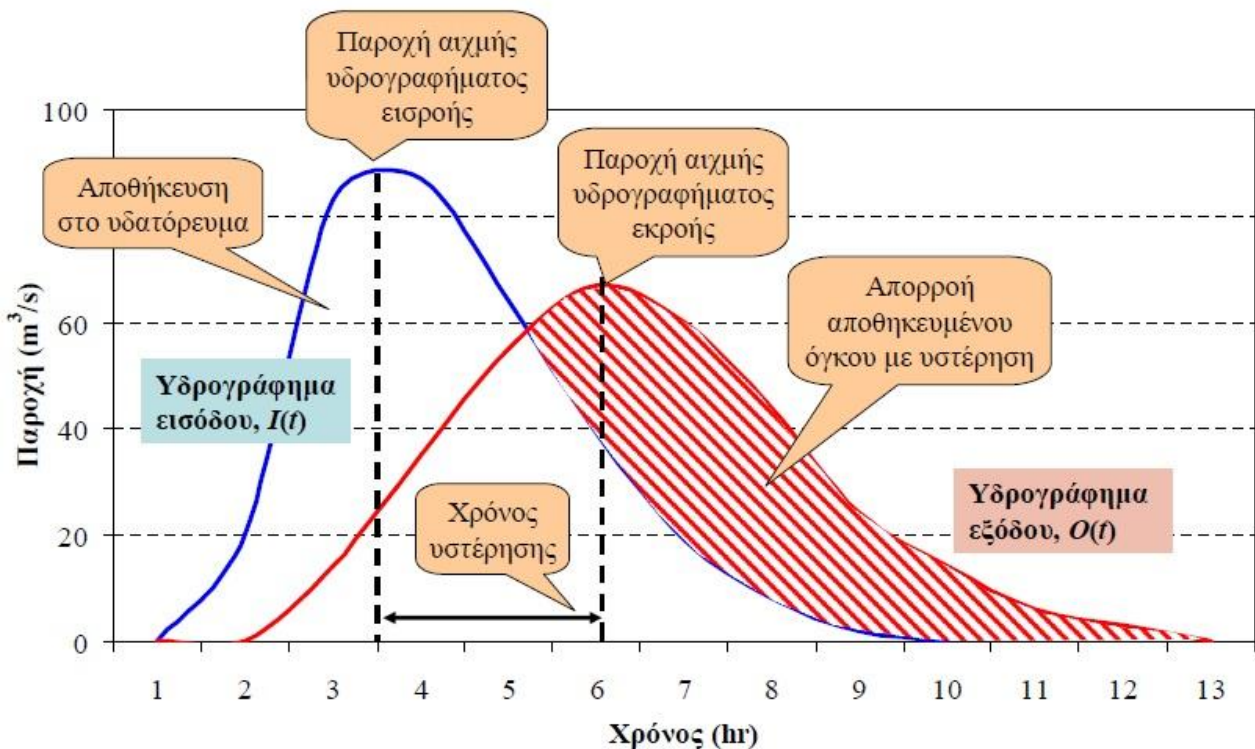
$$\delta_k = \frac{1}{F_k} \sum_{i=1}^{NR} \Delta_i L_{ik} / L_i \quad (4.29)$$

όπου  $g_k$  κατείδυση στο κύτταρο  $k$ ,  $\delta_k$  η αντίστοιχη διήθηση,  $F_{ijk}$  η κοινή επιφάνεια του κυττάρου  $k$ , της υπολεκάνης  $i$  και της ΜΥΑ  $j$ ,  $L_{ik}$  το μήκος του κλάδου  $i$  που αναπτύσσεται πάνω από το κύτταρο  $k$ ,  $L_i$  το συνολικό του μήκος και  $\Delta t$  ο όγκος απωλειών κατά μήκος του κλάδου  $t$ , ο οποίος σχετίζεται με το συντελεστή διήθησης του κλάδου.

### 4.3.3 Μοντέλο διόδευσης

Διόδευση (routing) είναι το φαινόμενο της χρονικής ανάσχεσης της ροής κατά τη διαδρομή του πλημμυρικού κύματος στο υδρογραφικό δίκτυο με την ταυτόχρονη εξομάλυνση των αιχμών του, παράλληλα με την αυξημένη χρονική διασπορά του, λόγω της προσωρινής αποθήκευσης νερού κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου (βλ. Σχήμα 4.9).

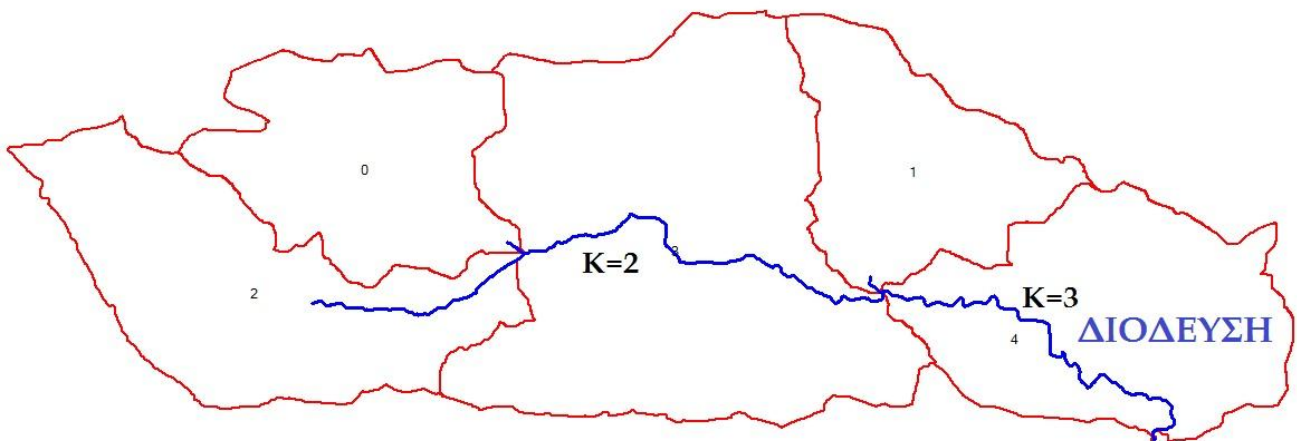
Η περιγραφή της διόδευσης βασίζεται σε ένα σύστημα μη γραμμικών διαφορικών εξισώσεων και συγκεκριμένα στην εξίσωση συνέχειας, την εξίσωση ποσότητας κίνησης και την εξίσωση Manning. Η πολυπλοκότητα των εξισώσεων αυτών δεν επιτρέπει την αναλυτική επίλυσή τους και έτσι αναπαράσταση της διόδευσης στο μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ αλλά και γενικά στα υδρολογικά μοντέλα, πραγματοποιείται με όσο το δυνατόν περισσότερες απλοποιήσεις ως προς τις χρησιμοποιούμενες εξισώσεις και παραμέτρους.



**Σχήμα 4.9** Τυπική μορφή μεταβολής ενός υδρογραφήματος μεταξύ δύο διατομών (Ευστρατιάδης κ.α., 2009)

Γενικώς, έχουν αναπτυχθεί δύο κατηγορίες μεθόδων για την αναπαράσταση της διόδευσης: οι υδραυλικές μέθοδοι, που βασίζονται στην επίλυση με πεπερασμένες διαφορές και σε απλοποιήσεις των εξισώσεων, και οι υδρολογικές μέθοδοι, οι οποίες αγνοώντας τη χωροχρονική εξέλιξη του φαινομένου, βασίζονται στον έλεγχο της στάθμης σε δύο σημεία ανάντη και κατάντη. Συγκεκριμένα, το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ υποστηρίζει την εφαρμογή τόσο υδραυλικών μεθόδων και συγκεκριμένα της μεθόδου κινηματικού κύματος, όσο και υδρολογικών και συγκεκριμένα της μεθόδου *Muskingum* (διάχυσης κύματος).

Στην παρούσα εργασία λόγω των σχετικά μεγάλων κλίσεων των κλάδων εφαρμόστηκε η μέθοδος του κινηματικού κύματος με ωριαίο προφανώς χρονικό βήμα. Η διόδευση πρακτικά υλοποιείται στους κλάδους του υδατορεύματος με επαρκές μήκος ώστε να μπορεί να συντελεστεί η χρονική ανάσχεση της ροής. Το μόνο μέγεθος που ορίζεται από το χρήστη είναι ο χρόνος υστέρησης  $K$  στους δύο μεγάλους κλάδους του υδατορεύματος. Η διηθητικότητα των κλάδων αυτών εκτιμώνται από την ακολουθούμενη βαθμονόμηση. Τα παραπάνω αναπαριστώνται στο Σχήμα 4.10.



**Σχήμα 4.10** Η υστέρηση των κλάδων του υδατορεύματος. Η διόδευση συντελείται στον τελευταίο πριν την έξοδο (κατάντη) κλάδο.

Επιπλέον, όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 4.3.1, θεωρείται ότι η επιφανειακή απορροή διοδεύεται μέχρι την έξοδο της λεκάνης μέσω ενός μοντέλου γραμμικού ταμιευτήρα με συντελεστή εκφόρτισης  $k$  (όπου  $S(t)=k*Q(t)$ , δηλαδή ο συντελεστής εκφόρτισης είναι το ποσοστό της αποθήκευσης  $S(t)$  στην υπολεκάνη που καταλήγει σε απορροή  $Q(t)$  για κάθε υπολεκάνη, ο οποίος επίσης θα υπολογιστεί μέσω της διαδικασίας βαθμονόμησης (για περισσότερες πληροφορίες για το μοντέλο γραμμικού ταμιευτήρα, Ευστρατιάδης κ.α., 2012).

#### 4.3.4 Προετοιμασία και εισαγωγή χρονοσειρών

Έχοντας σχηματοποιήσει την περιοχή μελέτης επόμενο βήμα είναι η εισαγωγή χρονοσειρών, ώστε να μπορεί να ξεκινήσει η διαδικασία της βαθμονόμησης. Συγκεκριμένα, απαιτείται η εισαγωγή χρονοσειρών:

- Ωριαίας βροχόπτωσης ανά υπολεκάνη σε mm
- Ωριαίας δυνητικής εξατμοδιαπνοής ανά υπολεκάνη σε mm
- Παρατηρημένης ωριαίας επιφανειακής απορροής ανά υδρομετρικό σταθμό σε m<sup>3</sup>/sec

Με τη σχηματοποίηση που έγινε στο υποκεφάλαιο 4.3 με πέντε υπολεκάνες είναι αναγκαία η κατασκευή 5 χρονοσειρών βροχόπτωσης και 5 χρονοσειρών δυνητικής εξατμοδιαπνοής με βάση τις παρατηρημένες (και συμπληρωμένες) χρονοσειρές βροχόπτωσης σε 10-λεπτο βήμα και ημερήσιας θερμοκρασίας στους τρεις εγκατεστημένους μετεωρολογικούς σταθμούς (Βιλια, Πράσινο, Μάνδρα).

Για την παραγωγή των χρονοσειρών είναι απαραίτητη η εφαρμογή της μεθόδου επιφανειακής ολοκλήρωσης Thiessen για τις 5 υπολεκάνες. Υπενθυμίζεται εδώ ότι η μέθοδος Thiessen βασίζεται στην γεωμετρική κατασκευή ζωνών επιρροής για κάθε σταθμό μέσω χάραξης των μεσοκαθέτων των ευθύγραμμων τμημάτων που συνδέουν ανά δύο τους εγκατεστημένους σταθμούς (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 1999). Αξιοποιώντας την εφαρμογή στο MapWindow για την παραγωγή των πολυγώνων Voronoi (Thiessen) βρίσκουμε τους συντελεστές Thiessen ανά υπολεκάνη όπως απεικονίζονται στο Σχήμα 4.11.



**Σχήμα 4.11** Απεικόνιση συντελεστών Thiessen ανά υπολεκάνη μέσω ανάλογης εφαρμογής του MapWindow. Στο σχήμα φαίνονται και οι θέσεις των 3 μετεωρολογικών σταθμών

Έτσι, αφού μετατρέψουμε τις χρονοσειρές με 10-λεπτο χρονικό βήμα σε χρονοσειρές ωριαίου χρονικού βήματος μέσω ανάλογου εργαλείου του ΥΔΡΟΓΝΩΜΟΝΑ, πάλι μέσω

του Υδρογνώμονα παράγουμε τους γραμμικούς συνδυασμούς των συντελεστών Thiessen με τις παρατηρημένες, ωριαίες πλέον, χρονοσειρές βροχόπτωσης, που αποτελούν τις προς εισαγωγή στην Υδρόγειο χρονοσειρές.

Όσον αφορά τις χρονοσειρές εξατμοδιαπνοής αυτές θα προκύψουν μέσω επιλογής κάποιας από τις γνωστές μεθόδους υπολογισμού εξατμοδιαπνοής από τις χρονοσειρές της ημερήσιας θερμοκρασίας, οι οποίες θα αναχθούν ανά υπολεκάνη χρησιμοποιώντας ξανά τους συντελεστές Thiessen. Συγκεκριμένα, επιλέγεται η χρήση της παραμετρικής μεθόδου υπολογισμού της εξατμοδιαπνοής, που αναπτύχθηκε από τους Koutsoyiannis & Xanthopoulos και αναλύθηκε με βάση τα ελληνικά δεδομένα (Tegos et al, 2013) και απαιτεί τη γνώση μόνο της ημερήσιας θερμοκρασίας και του γεωγραφικού πλάτους καθώς και δεδομένων παραμέτρων. Η ανάλυση της συγκεκριμένης μεθόδου και του υπολογισμού των χρονοσειρών προς εισαγωγή στην Υδρόγειο παρατίθεται στο Παράρτημα Β.

Τέλος, χρησιμοποιούμε τον Υδρογνώμονα και για την αναγωγή του 15-λεπτου βήματος των χρονοσειρών παροχής (επιφανειακής απορροής) σε ωριαίο βήμα στους δύο υδρομετρικούς σταθμούς σε Οινόη και Γύρα Στεφάνης, παράγοντας και τις προς εισαγωγή χρονοσειρές απορροής για την Υδρόγειο.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5:** **ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ:** **ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗ ΛΕΚΑΝΗ ΤΟΥ** **ΣΑΡΑΝΤΑΠΟΤΑΜΟΥ**

### **5.1 Η έννοια της βαθμονόμησης**

Η *βαθμονόμηση* (calibration) ενός υδρολογικού μοντέλου ορίζεται ως «**η συστηματική διαδικασία προσαρμογής των τιμών των παραμέτρων ενός υδρολογικού μοντέλου έτσι ώστε οι προσομοιωμένες αποκρίσεις του να προσεγγίζουν όσο το δυνατόν περισσότερο τις αντίστοιχες παρατηρημένες τιμές του**» (Ευστρατιάδης κ.α., 2009). Η επιτυχία μιας τέτοιας διαδικασίας προϋποθέτει συστηματικές μετρήσεις των υδρολογικών μεταβλητών (βροχόπτωση και θερμοκρασία για την εξατμισοδιαπνοή) και μετρήσεις απόκρισης του φυσικού συστήματος (επιφανειακή απορροή).

Η έννοια της βαθμονόμησης είναι στενά συνδεδεμένη με εκείνη της βελτιστοποίησης όχι όμως με τη λογική βελτιστοποίησης της απόκρισης ως προς κάποια εξωτερικά κριτήρια (όπως για παράδειγμα το κόστος ή η αξιοπιστία), αλλά βελτιστοποίησης της ίδιας της μαθηματικής δομής ώστε οι προσομοιωμένες τιμές να προσεγγίζουν καλύτερα τις παρατηρημένες (Ευστρατιάδης, 2009). Για αυτό το λόγο η εκτίμηση παραμέτρων των υδρολογικών μοντέλων, σε αντίθεση με το ευθύ πρόβλημα της βελτιστοποίησης είναι γνωστή και ως *αντίστροφο πρόβλημα* (inverse problem).

Το πρόβλημα της βαθμονόμησης υδρολογικών μοντέλων, αν και έχει διερευνηθεί διεξοδικά εδώ και παραπάνω από τέσσερις δεκαετίες, δεν έχει αντιμετωπιστεί πλήρως, δεδομένου ότι



τα μοντέλα τείνουν να γίνουν όλο και πιο σύνθετα στη δομή και τον αριθμό των παραμέτρων τους, αλλά και όλο και πιο απαιτητικά σε δεδομένα και σε υπολογιστικό φόρτο. Οφείλουμε να σημειώσουμε εδώ ότι το εν λόγω πρόβλημα, αν και παραδοσιακά έχει θεωρηθεί ότι αφορά αποκλειστικά στα εννοιολογικά σχήματα, αποδεικνύεται τελικά κοινό και για τις υπόλοιπες κατηγορίες μοντέλων (φυσικής βάσης, πιθανοτικά ή «μαύρου κουτιού»), καθώς σε όλες τις περιπτώσεις προκύπτει η ανάγκη προσαρμογής των παραμέτρων στις παρατηρήσεις του παρελθόντος.

Σε σύνδεση με την προηγούμενη σημείωση, οφείλουμε να επισημάνουμε ότι η επιστημονική κοινότητα εμφανίζεται αρκετά επιφυλακτική, όσον αφορά στην καταλληλότητα του όρου «παράμετρος» για τις σταθερές εισόδου των μοντέλων φυσικής βάσης. Αρκετοί υποστηρίζουν ότι υποχρεούνται να αντιπροσωπεύουν πραγματικές ιδιότητες του φυσικού συστήματος, που μπορούν να γίνουν γνωστές από πληροφορίες πεδίου. Κατά κανόνα όμως, οι πληροφορίες αυτές είτε δεν είναι διαθέσιμες είτε προέρχονται από σημειακές μετρήσεις, που εξαιτίας της έντονης χωρικής ανομοιογένειας των χαρακτηριστικών της λεκάνης δεν είναι εφικτό να αναχθούν στη χωρική κλίμακα του μοντέλου, οσοδήποτε μικρή και αν είναι αυτή. Η περιορισμένη, λοιπόν, χωρική πληροφορία οδηγεί στην εκτίμηση ορισμένων τουλάχιστον χαρακτηριστικών μεγεθών, με τις ίδιες τεχνικές που εφαρμόζονται στα εννοιολογικά μοντέλα, θεωρώντας τα εν λόγω χαρακτηριστικά ως (άγνωστες) παραμέτρους προς βελτιστοποίηση. Επιλέγοντας ωστόσο αυτή τη τεχνική, δηλαδή τη βαθμονόμηση έστω και για μία παράμετρό του, τότε αυτή δεν αντιπροσωπεύει πλέον κάποιο φυσικό μέγεθος, και η όλη προσέγγιση χαρακτηρίζεται ως εννοιολογική και όχι φυσικής βάσης (Mroczkowski *et al.*, 1997). Ανάλογα ζητήματα εμφανίζονται και στα μοντέλα «μαύρου κουτιού» όπου ο όρος «παράμετρος» δεν είναι καν αποδεκτός (ονομάζονται δε non-parametric models).

Το παραπάνω πρόβλημα συνδέεται και με την αξιοπιστία της βαθμονόμησης, εφόσον η βαθμονόμηση ενός υδρολογικού μοντέλου κρίνεται αξιόπιστη εφόσον:

- (α) το μοντέλο διαθέτει επαρκή προγνωστική ικανότητα, δηλαδή μπορεί να αναπαράξει όλο το φάσμα των αποκρίσεων μιας λεκάνης, με ικανοποιητική ακρίβεια,
- (β) στις βελτιστοποιημένες παραμέτρους του μοντέλου μπορεί να αποδοθεί κάποιο φυσικό νόημα, ώστε να θεωρηθούν συμβατές με τα χαρακτηριστικά του φυσικού συστήματος.

Ο πρώτος στόχος συμπυκνώνει την ανάγκη επέκτασης του πεδίου εφαρμογής πέρα από το διάστημα στο οποίο υπάρχουν ιστορικές παρατηρήσεις (βάσει των οποίων έχει γίνει η

προσαρμογή των παραμέτρων του), στο παρελθόν είτε στο μέλλον, ενώ ο δεύτερος εξασφαλίζει ότι το μοντέλο αναπαριστά με συνέπεια τους υδρολογικούς μηχανισμούς της λεκάνης γεγονός που είναι και προϋπόθεση και για τον πρώτο στόχο. Οι στόχοι αυτοί προϋποθέτουν προφανώς, ότι τα ιστορικά δείγματα φορτίσεων και αποκρίσεων που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των παραμέτρων του μοντέλου είναι αντιπροσωπευτικά της υδρολογικής διαίτας της λεκάνης.

## 5.2 Η τοποθέτηση του προβλήματος βαθμονόμησης ως πρόβλημα βελτιστοποίησης

Η βαθμονόμηση ενός υδρολογικού μοντέλου μπορεί να διατυπωθεί μαθηματικά ως πρόβλημα βελτιστοποίησης ως εξής:

$$\text{minimize } e(\theta) = [e_1(\theta), e_2(\theta), \dots, e_T(\theta)], \theta \in \Theta \quad (5.1)$$

όπου  $e$  το διάνυσμα σφάλματος ή αλλιώς *υπόλοιπο* (residual) του μοντέλου, το οποίο ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ των παρατηρημένων και των προσομοιωμένων αποκρίσεων, ήτοι  $e = y' - y$  και  $\Theta \subset R_n$  ο εφικτός χώρος, ο οποίος συνήθως ορίζεται από δύο διανύσματα ακραίων τιμών  $\theta_{\min}$  και  $\theta_{\max}$ , τα οποία εκφράζουν τα επιτρεπόμενα όρια διακύμανσης των τιμών των παραμέτρων (ορίζονται είτε με βάση μαθηματικές συνθήκες είτε με βάση τα χαρακτηριστικά της λεκάνης και την υδρολογική εμπειρία, βλ. 5.4.2).

Η συνάρτηση (5.1) είναι διανυσματική και μάλιστα με εξαιρετικά μεγάλο αριθμό υπολοίπων τα οποία είναι μεταξύ τους ισχυρά συσχετισμένα. Άρα, συμπεραίνουμε ότι το πρόβλημα της βαθμονόμησης είναι ένα *πολυκριτηριακό* (multiobjective) πρόβλημα βελτιστοποίησης και μάλιστα όχι καλώς ορισμένο (Efstratiadis and Koutsoyiannis, 2010). Για το λόγο αυτό, στην απλούστερη περίπτωση, διατυπώνεται μια ενιαία αριθμητική έκφραση που περιγράφει ένα καθολικό μέτρο *καλής προσαρμογής* (goodness-of-fit) του μοντέλου στις μετρημένες αποκρίσεις  $y$ , το οποίο και θεωρείται ως στοχική συνάρτηση ενός προβλήματος μη γραμμικής βελτιστοποίησης με μεταβλητές ελέγχου τις παραμέτρους του μοντέλου. Η τελική επιλογή των παραμέτρων είναι αποτέλεσμα βελτιστοποίησης.

Αν υποθέσουμε ότι για κάθε κριτήριο βελτιστοποίησης που αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη μεταβλητή  $f_i$ , εισάγεται ένας μη μηδενικός συντελεστής βάρους  $w_i$  με  $i = 1, 2, \dots, m$ , τότε η γενική μαθηματική διατύπωση του προβλήματος θα είναι η εξής:

$$\min g(\theta) = g[w_1 f_1(\theta), w_2 f_2(\theta), \dots, w_m f_m(\theta)], \theta \in \Theta \quad (5.2)$$

Εφόσον όλα τα κριτήρια συναθροιστούν σε μια ενιαία έκφραση, τότε η στοχική συνάρτηση λαμβάνει τη μορφή:

$$g(\theta) = \sum_{j=1}^m w_j f_j(\theta) \quad (5.3)$$

και τότε το ζητούμενο γίνεται ο εντοπισμός της ελάχιστης τιμής του βαθμωτής ποσότητας  $g(\theta)$  ως προς τις παραμέτρους  $\theta$ . Η προσέγγιση αυτή αποσκοπεί στην εύρεση ενός καθολικά βέλτιστου συνόλου παραμέτρων  $\theta^*$ , και βασίζεται στην τοπική στατιστική θεώρηση περί της προσαρμογής εμπειρικών μοντέλων σε μετρήσεις.

Η παραπάνω διαδικασία μπορεί να περιγραφεί ως ένα τυπικό πρόβλημα *ολικής βελτιστοποίησης* (global optimization), που στο πρόγραμμα ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ αντιμετωπίζεται με τον *εξελικτικό αλγόριθμο ανόπτωσης-απλόκου*. Ο εν λόγω αλγόριθμος (Ευστρατιάδης, 2008) προσπαθεί να αντιμετωπίσει προβλήματα μη γραμμικής βελτιστοποίησης συστημάτων υδατικών πόρων, τα οποία παρουσιάζουν σημαντικές δυσχέρειες που οφείλονται στις ιδιαιτερότητες των μη κυρτών χώρων αναζήτησης, όπως για παράδειγμα την ύπαρξη πολλών τοπικών ακρότατων, ενσωματώνοντας στρατηγικές ολικής και τοπικής αναζήτησης.

Η διαδικασία αναζήτησης ακολουθεί το γενικό πρότυπο των *εξελικτικών αλγορίθμων* (evolutionary algorithms)<sup>1</sup>. Η εξέλιξη των λύσεων γίνεται κατά στάδια, που με βάση τη σχετική ορολογία ονομάζονται *γενιές* (generations). Σε κάθε γενιά, ένα ή περισσότερα άτομα αντικαθίσταται από νέα σημεία (απογόνους), διατηρώντας σταθερό μέγεθος πληθυσμού. Οι απόγονοι παράγονται είτε από τη διασταύρωση πολλαπλών γονέων, στη βάση ενός τροποποιημένου σχήματος *κατερχόμενου απλόκου* (downhill simplex)<sup>2</sup>, είτε μέσω

<sup>1</sup> Οι *εξελικτικοί αλγόριθμοι* ακολουθούν το πρότυπο των φυσικών εξελικτικών διεργασιών, χρησιμοποιώντας πληθυσμούς λύσεων που βελτιώνουν τα χαρακτηριστικά τους καθώς εξελίσσονται, με εφαρμογή των λεγόμενων γενετικών τελεστών (επιλογή, διασταύρωση, μετάλλαξη).

<sup>2</sup> Το *κατερχόμενο άπλοκο* είναι μια κλασική τεχνική αναζήτησης τοπικών ακρότατων, που βασίζεται σε διαδοχικούς γεωμετρικούς μετασχηματισμούς  $n+1$  εφικτών σημείων, που αντιπροσωπεύουν τις κορυφές ενός απλόκου στο  $n$ -διάστατο χώρο. Το άπλοκο διερευνά το πεδίο αναζήτησης, πραγματοποιώντας τυποποιημένες προσδιοριστικές κινήσεις που εξασφαλίζουν σύγκλιση στο εγγύτερο τοπικό ακρότατο (ανάκλαση ως προς τη χειρότερη κορυφή, επέκταση στην κατεύθυνση της ανάκλασης, συμπίεση προς το κεντροειδές του, συρρίκνωση γύρω από την καλύτερη κορυφή).

μετάλλαξης (mutation). Ο αλγόριθμος αναζητά βελτιωμένες λύσεις, αν όμως δεν μπορεί να βρει τέτοιες επιδιώκει να διερευνήσει νέες περιοχές του εφικτού χώρου, αποδεχόμενος λύσεις που μπορεί να είναι χειρότερες από τις προηγούμενες. Η πιθανότητα αποδοχής τέτοιων λύσεων ρυθμίζεται αυτόματα, μέσω μιας προσαρμοστικής στρατηγικής προσομοιωμένης απόπτωσης (simulated annealing)<sup>3</sup>.

### 5.3 Κριτήρια καλής προσαρμογής

Τα κριτήρια καλής προσαρμογής αποτελούν αριθμητικούς δείκτες που ελέγχουν της προσαρμογή του μοντέλου στα ιστορικά δεδομένα, δηλαδή το πόσο αποτελεσματικά προσομοιώνονται οι υδρολογικοί μηχανισμοί μιας περιοχής από το υδρολογικό μοντέλο, ώστε οι προσομοιωμένες χρονοσειρές απόκρισης να πλησιάζουν όσο το δυνατόν καλύτερα τις παρατηρημένες.

Τα κριτήρια καλής προσαρμογής εμπεριέχονται, όπως αναφέρθηκε, στη στοχική συνάρτηση, άρα είναι έτσι ορισμένα ώστε να την ελαχιστοποιούν. Παρακάτω αναλύονται τα κριτήρια που υποστηρίζει το υποσύστημα βαθμονόμησης του μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ. Τα κριτήρια αυτά αναλύονται για λόγους πληρότητας, όμως δεν είναι δεδομένο ότι θα χρησιμοποιηθούν όλα για τη διαμόρφωση της στοχικής συνάρτησης (βλ. 5.4.4).

#### 5.3.1 Αποτελεσματικότητα

Η *αποτελεσματικότητα* (efficiency) αποτελεί το περισσότερο χρησιμοποιούμενο μέτρο της επίδοσης (καλής προσαρμογής) των υδρολογικών μοντέλων. Αποτελεί ουσιαστικά ένα μέτρο «απόστασης» μεταξύ των παρατηρημένων  $y_t$  και των προσομοιωμένων  $y_t'$  τιμών απόκρισης, για όλο το χρονικό ορίζοντα της περιόδου ελέγχου που συμβολίζεται με  $T$ .

---

<sup>3</sup> *Ανόπτωση* (annealing) ονομάζεται η φυσική διεργασία ψύξης των μετάλλων, που συνεπάγεται ελαχιστοποίηση της κινητικής ενέργειας των μορίων τους. Κατά τη διαδικασία ψύξης, επιτρέπεται η μετάβαση του συστήματος σε καταστάσεις υψηλότερης ενέργειας, ακολουθώντας έναν πιθανοτικό κριτήριο που στη στατιστική μηχανική αναφέρεται ως νόμος του Boltzman. Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία του συστήματος, τόσο μεγαλύτερη είναι και η πιθανότητα αποδοχής τέτοιων καταστάσεων. Με τον τρόπο αυτό, είναι δυνατή η υπερπήδηση των τοπικών ενεργειακών ακρότατων, προς όφελος της απόκτησης μιας τέλει κρυσταλλικής δομής. Αναγκαία προϋπόθεση για κάτι τέτοιο είναι ο αργός ρυθμός ψύξης, διαφορετικά η διαδικασία καταλήγει σε μια άμορφη μάζα, που αντιστοιχεί σε κάποιο τοπικό ενεργειακό ακρότατο. Στις αρχές της παραπάνω διεργασίας βασίζεται η τεχνική της *προσομοιωμένης απόπτωσης*.

Η αποτελεσματικότητα δίνεται από τον τύπο:

$$EFF = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (y_t - y'_t)^2}{\sum_{t=1}^T (y_t - \bar{Y})^2} \quad (5.4)$$

όπου με  $\bar{Y}$  συμβολίζεται η μέση τιμή της παρατηρημένης χρονοσειράς.

Ουσιαστικά, η αποτελεσματικότητα εκφράζει το ποσοστό της στατιστικής αβεβαιότητας που «εξηγείται» από το μοντέλο, ελέγχοντας κατά πόσο η προσομοιωμένη χρονοσειρά είναι καλύτερη εκτιμήτρια σε σχέση με τη μέση τιμή των παρατηρήσεων. Θεωρητικά η μέγιστη τιμή της είναι η μονάδα, που υποδηλώνει τέλεια προσαρμογή του μοντέλου. Δεν υπάρχει κάτω όριο για την ελάχιστη τιμή αντίστοιχα, όμως αρνητικές τιμές καθιστούν το μοντέλο εντελώς αναξιόπιστο για προγνώσεις. Στην πράξη, τιμές 0.80-0.90 θεωρούνται πολύ ικανοποιητικές για την προσαρμογή του μοντέλου, τιμές 0.30 είναι οριακές για την αποδοχή του μοντέλου ως αντιπροσωπευτικού του προσομοιωμένου φυσικού συστήματος, ενώ τέλος η μηδενική τιμή υποδηλώνει ότι το μοντέλο αποτελεί ισοδύναμη εκτιμήτρια με την παρατηρημένη μέση τιμή, δηλαδή η αβεβαιότητα ταυτίζεται σε αυτή την περίπτωση με την υδρολογική αβεβαιότητα.

Πάντως, ακόμα και υψηλές τιμές της αποτελεσματικότητας δε διασφαλίζουν απαραίτητα καλή προγνωστική ικανότητα, καθώς το μέτρο αυτό είναι ευαίσθητο σε παράγοντες όπως το μέγεθος και η χρονική διακριτότητα του δείγματος, οι εξωκείμενες τιμές και η μεροληψία (βλ. 5.3.2). Πιο συγκεκριμένα, λόγω του ότι οι διαφορές μεταξύ των παρατηρημένων και προσομοιωμένων τιμών είναι υψωμένες στο τετράγωνο, οι υψηλές τιμές τους υπερεκτιμώνται, ενώ οι χαμηλές τους εμφανώς υποεκτιμώνται και επί της ουσίας δε λαμβάνονται υπόψη. Έτσι, αναφορικά με την ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας της πρόγνωσης, το μοντέλο οδηγείται σε μια υπερεκτίμηση σε περιόδους υψηλών απορροών και σε μια εμφανή υποεκτίμηση σε περιόδους χαμηλών παροχών, για τις οποίες ο δείκτης της αποτελεσματικότητας τίθεται προς αμφισβήτηση.

Για την αποτελεσματικότητα των υψηλών απορροών έχει δημιουργηθεί ένας ειδικό μέτρο καλής προσαρμογής, η *αποτελεσματικότητα υψηλών απορροών (high flow efficiency)*. Ουσιαστικά ορίζεται όπως και η αποτελεσματικότητα με τη μοναδική διαφορά ότι αναφέρεται στις τιμές της απορροής, οι οποίες είναι μεγαλύτερες από τη μέση τιμή των απορροών. Πρόκειται για ένα μέτρο το οποίο ενδείκνυται η συμπληρωματική στην

αποτελεσματικότητα χρήση του για παρατηρημένες χρονοσειρές μη μόνιμης και χειμαρρικής απορροής, ενώ έχει ιδιαίτερη σημασία και σε πλημμυρικές μελέτες, όπου ενδιαφέρουν οι υψηλές τιμές των παροχών.

### 5.3.2 Μεροληψία

Προκειμένου να είναι η αναπαράσταση των διεργασιών από ένα υδρολογικό μοντέλο όσο το δυνατόν πιο ικανοποιητική, είναι σημαντική και η αναπαραγωγή του υπερετήσιου υδατικού ισοζυγίου της λεκάνης, δηλαδή ότι η μέση τιμή της προσομοιωμένης απόκρισης πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στην αντίστοιχη μέση παρατηρημένη τιμή. Ωστόσο, εξαιτίας της μη γραμμικότητας των εν λόγω μοντέλων, η παραπάνω απαίτηση δεν προκύπτει από την ελαχιστοποίηση των μέτρων μέσου τετραγωνικού σφάλματος, όπως η αποτελεσματικότητα. Συνεπώς, για τον έλεγχο της αναπαραγωγής της παρατηρημένης μέσης τιμής εισάγεται ένα μέτρο *μεροληψίας* (bias), που ορίζεται ως:

$$AVERBIAS = \frac{\bar{Y}' - \bar{Y}}{\bar{Y}} \quad (5.5)$$

όπου  $\bar{Y}'$  η μέση τιμή της προσομοιωμένης χρονοσειράς και  $\bar{Y}$  της παρατηρημένης για το ίδιο μήκος δείγματος. Στην ΥΔΡΟΓΕΙΟ, το μέτρο μεροληψίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί συνδυαστικά με την αποτελεσματικότητα ή μεμονωμένα, εφόσον υπάρχουν χονδρικές εκτιμήσεις σχετικά με τη μέση τιμή.

Είναι προφανές ότι αν  $EFF = 1$ , τότε  $BIAS = 0$ , χωρίς ωστόσο να ισχύει το αντίστροφο. Συνεπώς, ένα μοντέλο ενδέχεται να αναπαράγει με εξαιρετικά μεγάλη ακρίβεια τη μέση τιμή της παρατηρημένης απόκρισης, χωρίς αυτό απαραίτητα να συνεπάγεται και καλή προσαρμογή του. Ως χαρακτηριστικό παράδειγμα αναφέρεται το στοιχειώδες μοντέλο  $y_t' = \bar{Y}$ , για το οποίο ισχύουν  $AVERBIAS = 0$  (αναπαράγεται ακριβώς η παρατηρημένη μέση τιμή της μεταβλητής) αλλά  $EFF = 0$ . Δηλαδή, η αβεβαιότητα του μοντέλου «μέσης τιμής» ταυτίζεται με την υδρολογική αβεβαιότητα, όπως αυτή εκφράζεται μέσω της τυπικής απόκλισης.

Εκτός της μέσης τιμής, ορίζονται μέτρα μεροληψίας ως προς δύο ακόμη τυπικούς στατιστικούς δείκτες, την τυπική απόκλιση,  $\sigma_y$ , τον συντελεστή μεταβλητότητας, δηλαδή τον λόγο της τυπικής απόκλισης προς τη μέση τιμή. Τα αντίστοιχα μέτρα διατυπώνονται ως:

$$SDEVBIAS = \frac{\sigma_y' - \sigma_y}{\sigma_y} \quad (5.6)$$

$$CVARBIAS = \frac{\sigma_y' / \bar{Y}' - \sigma_y / \bar{Y}}{\sigma_y / \bar{Y}} \quad (5.7)$$

Θετική τιμή της μεροληψίας υποδηλώνει υπερεκτίμησή του αντίστοιχου δείκτη, ενώ αρνητική υποδηλώνει υποεκτίμηση του. Επισημαίνεται ότι στη διατύπωση του προβλήματος βελτιστοποίησης, επειδή στόχος είναι ο μηδενισμός της μεροληψίας, όλα τα σχετικά μέτρα εκφράζονται ως απόλυτες τιμές.

### 5.3.3 Σφάλμα μηδενικών παροχών

Το σφάλμα των μηδενικών παροχών είναι ένα εμπειρικό μέτρο, με το οποίο ελέγχεται αν το μοντέλο αναπαράγει φαινόμενα διακοπής της ροής ή, αντίστροφα, μηδενίζει αδικαιολόγητα την απορροή ενός ποταμού ή μιας πηγής. Πρόκειται για μια σημαντική πληροφορία, που μάλιστα δεν υπόκειται σε κανενός είδους σφάλμα μέτρησης, όπως συμβαίνει με την παροχή, ειδικά όταν η τελευταία εκτιμάται με βάση αραιές υδρομετρήσεις (Ευστρατιάδης κ.ά., 2009).

Για τη μαθηματική διατύπωση του μέτρου μηδενικών παροχών εισάγεται η μεταβλητή:

$$z_t = \begin{cases} y_t & \text{αν } y_t' = 0 \\ y_t' & \text{αν } y_t = 0 \\ 0 & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (5.8)$$

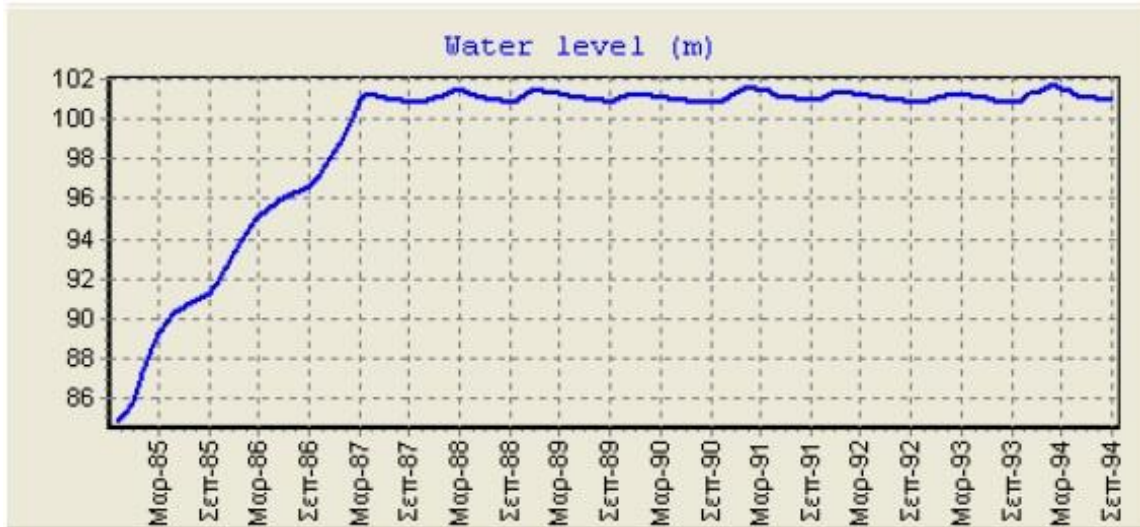
Αν  $T_0$  ο αριθμός των χρονικών βημάτων κατά τα οποία το μοντέλο είτε δεν αναπαράγει την παρατηρημένη μηδενική τιμή ( $y_t' > 0, y_t = 0$ ), είτε μηδενίζει την παροχή, ενώ κάτι τέτοιο δε συμβαίνει στην παρατηρημένη χρονοσειρά, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα αναπαραγωγής μηδενικών τιμών υπολογίζεται ως εξής:

$$e_0 = \sqrt{\frac{1}{T_0} \sum_{t=1}^T z_t^2} \quad (5.9)$$

### 5.3.4 Σφάλμα τάσεων

Η εισαγωγή ενός σφάλματος τάσεων εκκινεί από τη χωρική διαφορά που προκύπτει στο μοντέλο υπόγειας υδρολογίας μεταξύ των κυττάρων που έχουν μεγάλη κλίμακα και των πιεζομέτρων με τη μικρή τοπική τους κλίμακα. Αν η παρατήρηση αυτή συνδυάζεται με το γεγονός της απουσίας ή της έλλειψης μετρήσεων υπόγειας στάθμης νερού, άρα η βαθμονόμηση γίνεται κατά βάση με τις μετρήσεις των επιφανειακών νερών, οι παράμετροι που σχετίζονται με το υπόγειο σύστημα καθίστανται ουσιαστικά μη ελεγχόμενες. Το τελικό αποτέλεσμα είναι να αναπαράγονται χρονοσειρές παροχής με μη ρεαλιστικές διακυμάνσεις τις υπόγειας στάθμης του νερού, λόγω εμφάνισης είτε θετικών ή αρνητικών τάσεων που είναι αναντίστοιχες με την υδρολογική διαίτα της περιοχής μελέτης, η οποία εξαρτάται από

την εποχιακή κατανομή των βροχοπτώσεων, είτε απότομων πτώσεων ή ανόδων της στάθμης που αποδίδεται σε λανθασμένη εκτίμηση των αρχικών συνθηκών (βλ. Σχήμα 5.1).



**Σχήμα 5.1** Μη συνεπής διακύμανση της στάθμης των υπόγειων υδάτων: Τα πρώτα χρόνια της προσομοίωσης εμφανίζεται γραμμική αύξηση της στάθμης και στη συνέχεια αυτή ισορροπεί με ανεπαίσθητες εποχιακές μεταβολές (Efstatiadis and Koutsoyiannis 2009).

Έτσι, δημιουργήθηκε ένα εμπειρικό μέτρο ποιότητας, μέσω του οποίου ελέγχεται η υπερετήσια τάση ανύψωσης ή ταπεινώσης της στάθμης των υπόγειων δεξαμενών, ώστε να είναι συνεπής με τις πιεζομετρικές παρατηρήσεις στη λεκάνη. Η δοκιμή υλοποιείται ως εξής: Για μια δεδομένη χρονοσειρά  $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ , υπολογίζεται η τυποποιημένη κανονική μεταβλητή:

$$T = r / \sqrt{\sigma_x^2} \quad (5.10)$$

όπου:

$$r = 4P / [N(N-1)] \quad (5.11)$$

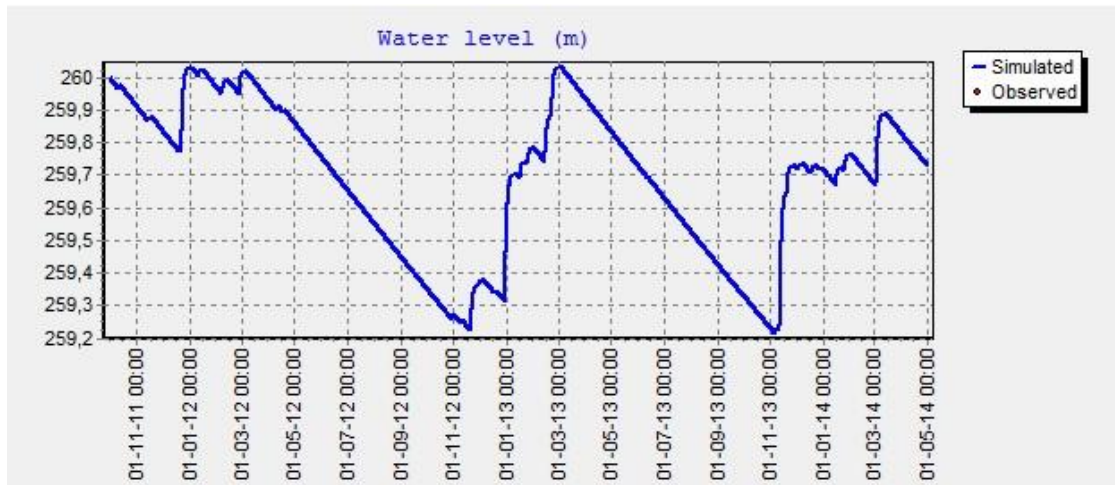
$$\sigma_x^2 = 2(2N+5) / [9N(N-1)] \quad (5.12)$$

και  $P$  ο αριθμός όλων των ζευγών  $\{x_i, x_j, j > i\}$  με  $x_i < x_j$ . Θεωρώντας αμφίπλευρο έλεγχο (δηλαδή τόσο για θετική όσο και για αρνητική τάση) και επίπεδο σημαντικότητας  $\alpha$ , απορρίπτεται η μηδενική υπόθεση μη ύπαρξης τάσης εφόσον  $|T| < z_{\alpha/2}$ . Με βάση τον παραπάνω έλεγχο, και με θεώρηση επιπέδου σημαντικότητας  $\alpha = 95\%$ , οπότε  $z_{\alpha/2} = 1.96$ , εισάγεται ένα εμπειρικό μέτρο, για εισαγωγή ποιότητας στα κύτταρα των οποίων η μηνιαία στάθμη εμφανίζει στατιστικά σημαντική τάση. Το μέτρο αυτό υπολογίζεται από τη σχέση:

$$e_T = \max(0, |T| - 1.96) \quad (5.13)$$



Επισημαίνεται ότι το παραπάνω σφάλμα δεν έχει νόημα για τα εικονικά κύτταρα που αντιπροσωπεύουν συγκέντρωση των υπόγειων διαφυγών προς τη θάλασσα, τα οποία εξ ορισμού παρουσιάζουν θετική τάση, όπως και για τα κύτταρα που αντιπροσωπεύουν τη λειτουργία πηγών. Μια συνεπής διακύμανση της στάθμης των υπόγειων υδάτων, απόρροια της εφαρμογής του σφάλματος τάσεων, παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.2



Σχήμα 5.2 Συνεπής διακύμανση της στάθμης των υπόγειων υδάτων

## 5.4 Διαδικασία Βαθμονόμησης

### 5.4.1 Ορισμός Χρονικών Περιόδων

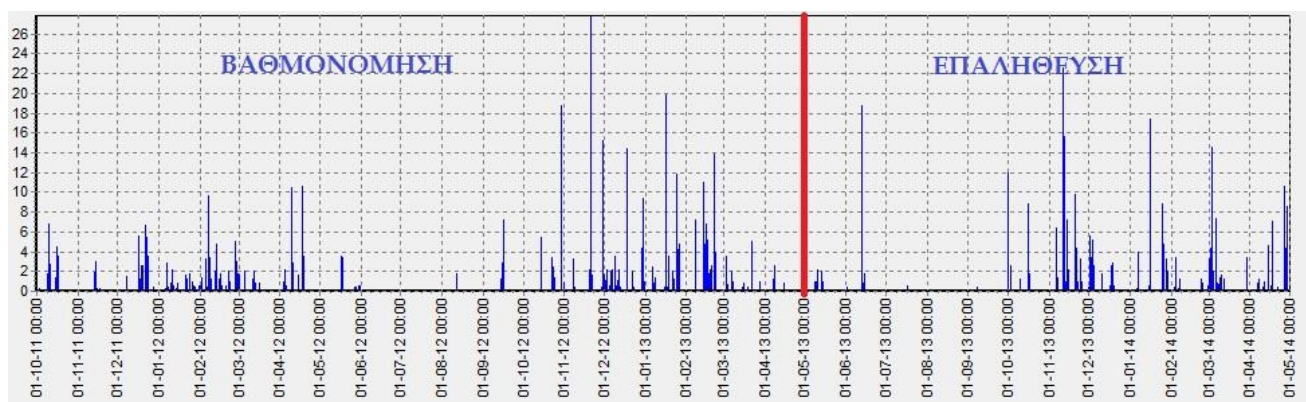
Στο μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ η περίοδος προσομοίωσης, που συνήθως ταυτίζεται με την περίοδο των παρατηρημένων χρονοσειρών, χωρίζεται ως προς τη διαδικασία της βαθμονόμησης σε δύο περιόδους: την *περίοδο βαθμονόμησης* (calibration period) και την *περίοδο επαλήθευσης* (validation period). Η ενέργεια αυτή προκύπτει από την ανάγκη ικανοποίησης του στόχου (α) (βλ. 5.1), δηλαδή της επαρκούς προγνωστικής ικανότητας του μοντέλου.

Συγκεκριμένα, οι βέλτιστες παράμετροι που προκύπτουν μέσα από τη διαδικασία της βαθμονόμησης με βάση τη λογική της ελαχιστοποίησης της στοχικής συνάρτησης είναι λογικό να προσεγγίζουν τις παρατηρημένες τιμές για την περίοδο βαθμονόμησης. Όμως, δεν εξασφαλίζεται ότι με την εισαγωγή άλλων ιστορικών δεδομένων η προσέγγιση θα είναι εξίσου ικανοποιητική, καθώς είναι πιθανό το μοντέλο να λειτουργεί ως «μαύρο κουτί» και οι παράμετροι να μην αντιπροσωπεύουν μακροσκοπικά τα φυσικά χαρακτηριστικά του συστήματος.

Για αυτό το λόγο καθίσταται απαραίτητη η χρήση μιας μικρότερης αλλά σημαντικής περιόδου της συνολικής προσομοίωσης για την επαλήθευση της διαδικασίας. Η μέθοδος αυτή διαχωρισμού είναι γνωστή ως *data-split*. Για την παρούσα εργασία, οι χρονικές περιοδοί έχουν ως εξής (Σχήμα 5.3):

- Συνολική περίοδος προσομοίωσης: από 01/10/2011 12:00 πμ έως 01/05/2014 12:00 πμ
- Περίοδος βαθμονόμησης: από 01/05/2011 12:00 πμ έως 01/05/2013 12:00 πμ
- Περίοδος επαλήθευσης: από 01/05/2013 12:00 πμ έως 01/05/2014 12:00 πμ

Η εκκίνηση της προσομοίωσης την 1<sup>η</sup> Οκτωβρίου, υποβοηθά και τον εύκολο προσδιορισμό των αρχικών συνθηκών για το επιφανειακό σύστημα (βλ. 5.4.3).



**Σχήμα 5.3** Ο διαχωρισμός (*data-split*) της περιόδου προσομοίωσης σε περίοδο βαθμονόμησης και επαλήθευσης, όπως αναπαρίσταται στα δεδομένα της βροχόπτωσης για την υπολεκάνη 2.

#### 5.4.2 Παράμετροι-Όρια παραμέτρων

Όπως έχει ήδη αναφερθεί και κατά την περιγραφή των διεργασιών του μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ για το ωριαίο βήμα προσομοίωσης (βλ. Κεφάλαιο 4), είναι αναγκαία η εισαγωγή ενός ευρέως φάσματος παραμέτρων. Αναλυτικά:

- 7 παράμετροι (χωρητικότητα κατακράτησης, μέγιστη διηθητικότητα, χωρητικότητα ανώτερης ακόρεστης ζώνης, στάθμη παραγωγής υποδερμικής ροής, ποσοστό διήθησης που καταλήγει στην κατώτερη ακόρεστη ζώνη, συντελεστής στέρειυσης για την υποδερμική ροή, συντελεστής στέρειυσης για την κατείσδυση) για κάθε μονάδα υδρολογικής απόκρισης
- 2 παράμετροι (πορώδες, υδραυλική αγωγιμότητα) για κάθε υπόγεια δεξαμενή, πηγή ή εικονική δεξαμενή που πραγματοποιεί διαφυγές εκτός λεκάνης
- 1 παράμετρο (συντελεστής διήθησης) για κάθε κλάδο του υδατορεύματος
- 1 παράμετρο (συντελεστής εκφόρτισης) για κάθε υπολεκάνη (διόδευση)

Άρα, συνολικά έχοντας σχηματοποιήσει τη περιοχή μελέτης σε 5 υπολεκάνες με 5 κλάδους υδατορεύματος, 2 ΜΥΑ, 3 υπόγεια κύτταρα (2 υπόγειες δεξαμενές και 1 εικονική) και μία πηγή ο συνολικός αριθμός παραμέτρων προς βελτιστοποίηση είναι:

$$7*2+2*4+1*5+1*5 = 32 \text{ παράμετροι}$$

Εφόσον προσδιοριστούν οι προς βελτιστοποίηση παράμετροι, είναι απαραίτητη η προσέγγιση των ορίων τους (άνω και κάτω). Τα όρια των παραμέτρων τα θέτει χειροκίνητα ο χρήστης εκφράζοντας τη διαίσθησή του σχετικά με την υδρολογική συμπεριφορά της λεκάνης προσδίδοντας ταχύτερη σύγκλιση στην όλη διαδικασία. Παρόλα αυτά, η τεχνική αυτή εισάγει μια επιπλέον δυσκολία στη βελτιστοποίηση, εφόσον απαγορεύεται έτσι η κίνηση προς υποσχόμενες περιοχές του πεδίου αναζήτησης. Με βάση το σκεπτικό αυτό, προκύπτουν δύο αντικρουόμενες απαιτήσεις, αφού για λόγους «ασφαλείας» είναι επιθυμητή η θέσπιση ενός μεγάλου πεδίου ορισμού των τιμών των μεταβλητών, ενώ για λόγους ταχύτητας είναι επιθυμητό το ακριβώς αντίθετο.

Το ζήτημα αυτό επιχειρεί να «συμβιβάσει» ο καθορισμός διπλών ορίων για τις παραμέτρους, δηλαδή ενός εσωτερικού πεδίου ορισμού, το οποίο ορίζει ο χρήστης και ενός εξωτερικού, το οποίο συνήθως ταυτίζεται με τα φυσικά όρια των παραμέτρων, αν τα τελευταία μπορούν να προσδιοριστούν. Με τον τρόπο αυτό, ενώ ο αρχικός πληθυσμός γεννάται εντός του εσωτερικού πεδίου, όπου και επικεντρώνεται το ενδιαφέρον της αναζήτησης, δεν αποκλείεται η «διεύρυνση» του χώρου της εξελικτικής διαδικασίας πέρα από τα όρια του εσωτερικού πεδίου, εφόσον εντοπιστεί μια πορεία βελτίωσης της επίδοσης του πληθυσμού.

Πρακτικά, κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης πρέπει να γίνεται συνεχής έλεγχος των βέλτιστων τιμών που λαμβάνουν οι παράμετροι. Αν αυτές βρίσκονται εκτός των ορίων που έχουν τεθεί τότε αυτά πρέπει να επανεξεταστούν και να αλλάξουν. Αν βρίσκονται κοντά στο άνω ή κάτω όριο που έχει τεθεί, τότε πρέπει να μεγαλώσει το εύρος τιμών, ώστε να ελεγχθεί η περίπτωση εύρεσης βέλτιστης λύσης στη γειτονική περιοχή του εφικτού χώρου (βλ και 5.4.5). Τα όρια των παραμέτρων που τέθηκαν παρουσιάζονται με τις τελικές τιμές των βέλτιστων παραμέτρων στην παράγραφο 5.5.5.

### **5.4.3 Αρχικές συνθήκες**

Οι αρχικές συνθήκες του μοντέλου αφορούν στις στάθμες των δεξαμενών εδαφικής υγρασίας και τις στάθμες των δεξαμενών υπόγειου νερού στην αρχή της προσομοίωσης.

Στις τοπικές ελληνικές (και γενικά στις μεσογειακές) συνθήκες, εφόσον η προσομοίωση ξεκινά στην αρχή του υδρολογικού έτους, η παραμένουσα εδαφική υγρασία είναι πρακτικά μηδενική, καθώς έχει στο σύνολό της καταναλωθεί για εξατμοδιαπνοή στη διάρκεια του καλοκαιριού (εκτός και αν έχουν μεσολαβήσει έντονες βροχοπτώσεις τις προηγούμενες ημέρες). Συνεπώς, για όλες τις δεξαμενές που αναπαριστούν την αναρρύθμιση της εδαφικής υγρασίας, ήτοι για κάθε συνδυασμό (διαμέριση) υπολεκάνης-ΜΥΑ, το αρχικό ύψος νερού μπορεί να υποτεθεί μηδενικό. Σημειώνεται εδώ ότι στην περίπτωση που το μήκος του δείγματος είναι μεγάλο, ο καθορισμός του ύψους αυτού είναι ελάσσονος σημασίας για την πορεία της προσομοίωσης.

Αντίθετα, ο καθορισμός της στάθμης εκκίνησης των υπόγειων δεξαμενών είναι κομβικής σημασίας, καθώς προϋποθέτει αρκετή εμπειρία και πιθανώς τη διεξαγωγή δοκιμών. Εφόσον η διακριτοποίηση του μοντέλου υπόγειας υδρολογίας του προσδίδει εννοιολογικό χαρακτήρα (όπως και στην περίπτωση μας), τότε οι αρχικές συνθήκες πρέπει να είναι συμβατές με τη σύλληψη του μοντέλου, δηλαδή να αποδίδουν σωστά την κατεύθυνση κίνησης του νερού, την εκφόρτιση στις πηγές (η στάθμη των οποίων θεωρείται ότι ταυτίζεται με το μέσο υψόμετρο ανάπτυξής τους) και τις τυχόν διαφυγές.

Στην παρούσα εργασία εφόσον εκκινούμε την προσομοίωση στην αρχή του υδρολογικού έτους, χωρίς επεισόδια βροχής τις προηγούμενες ημέρες, η αρχική στάθμη σε κάθε δεξαμενή εδαφικής υγρασίας λαμβάνεται μηδενική. Όσον αφορά τις στάθμες εκκίνησης των υπόγειων δεξαμενών, λαμβάνονται σύμφωνα με τα κριτήρια που τίθενται παραπάνω και αναπαριστώνται στον Πίνακα 5.1.

**Πίνακας 5.1<sup>4</sup>** Οι αρχικές στάθμες των υπόγειων δεξαμενών και πηγών όπως επιλέχθησαν

ΟΝΟΜΑ	ΤΥΠΟΣ	ΕΜΒΑΔΟΝ ΒΑΣΗΣ (km <sup>2</sup> )	ΠΥΘΜΕΝΑΣ (m)	ΟΡΟΦΗ (m)	ΑΡΧΙΚΗ ΣΤΑΘΜΗ (m)
Κύτταρο 0	Δεξαμενή	49,223	250,00	400,00	260,00
Κύτταρο 1	Δεξαμενή	96,314	140,00	300,00	150,00
Κύτταρο 2	Έξοδος Λεκάνης	∞	140,00	200,00	140,00
Πηγή 0	Πηγή	∞	150,00	10000,00	150,00

<sup>4</sup> Το εμβαδόν βάσης για το εικονικό κύτταρο και την πηγή είναι θεωρητικά άπειρο, ενώ η επιλογή πολύ υψηλής τιμής για την οροφή της πηγής γίνεται για εννοιολογικούς λόγους συμβατότητας με το μοντέλο.

#### 5.4.4 Ορισμός στοχικής συνάρτησης

Η στοχική συνάρτηση είναι, όπως έχει αναφερθεί, η συνάρτηση προς βελτιστοποίηση και εν προκειμένω στο μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ προς ελαχιστοποίηση. Ο ορισμός της έχει να κάνει με όλα ή κάποια από τα κριτήρια που αναφέρθηκαν στο υποκεφάλαιο 5.3 και συγκεκριμένα την αποτελεσματικότητα, τη μεροληψία, το σφάλμα μηδενικών παροχών και το σφάλμα τάσεων, πολλαπλασιασμένα με κατάλληλους συντελεστές βάρους.

Στην παρούσα εργασία, η προς μοντελοποίηση λεκάνη του Σαρανταπόταμου είναι λεκάνη χειμαρρικής διαίτας λόγω της κυρίαρχης ασβεστολιθικής δομής του εδάφους που έχει δημιουργήσει πολλές καρστικές κοιλότητες (βλ. 3.1). Αντικειμενικά τέτοιου τύπου τέτοιου είδους λεκάνες με κυριαρχία μηδενικών παροχών είναι δύσκολο να μοντελοποιηθούν, σε αντίθεση με μεγάλες λεκάνες συνεχούς απορροής, που συμπεριφέρονται πολύ πιο "γραμμικά". Επιπλέον, η ύπαρξη πολλών παραμέτρων επιτάσσει τον ταυτόχρονο έλεγχο κριτηρίων καλής προσαρμογής, πρακτική που είναι σύμφωνη με αυτή που ακολουθείται διεθνώς (Wagener et al, 2001). Συγκεκριμένα, διαμορφώθηκε μια σύνθετη στοχική συνάρτηση με τις ακόλουθες συνιστώσες:

- δείκτης αποτελεσματικότητας (efficiency) στη θέση μέτρησης της παροχής στη Γύρα Στεφάνης (που συμπίπτει με την έξοδο της λεκάνης) με συντελεστή βαρύτητας 2
- δείκτης αποτελεσματικότητας (efficiency) στη θέση μέτρησης της παροχής στην Οινόη με συντελεστή βαρύτητας 1
- μέτρα ποινης για την αναπαραγωγή τάσης (trend penalty) στα δύο υπόγεια κύτταρα με συντελεστή βαρύτητας 1

Όπως είναι φανερό τα μεγέθη σταθμίστηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να δίνεται στην αναπαραγωγή των παροχών, που είναι και το βασικό κριτήριο ελέγχου της αξιοπιστίας του μοντέλου (Ζωγάκης, 2012). Η αυξημένη βαρύτητα στην αποτελεσματικότητα στη Γύρα Στεφάνης επιλέχθηκε καθώς στην πλημμυρική πρόγνωση έχει αυξημένη σημασία η απορροή στην έξοδο της λεκάνης.

#### 5.4.5 Βαθμονόμηση παραμέτρων

Για τη βαθμονόμηση των παραμέτρων ακολουθήθηκε μια διαδικασία ημιαυτόματης βαθμονόμησης, δηλαδή μια διαδραστική προσέγγιση που επιδιώκει την επέμβαση του χρήστη στη διαδικασία βελτιστοποίησης των παραμέτρων, ώστε να «κατευθύνει» την αναζήτηση προς τις πλέον πρόσφορες περιοχές του πεδίου ορισμού τους. Πρόκειται για

έναν συνδυασμό της παραδοσιακής χειρωνακτικής βαθμονόμησης και της πλήρως αυτοματοποιημένης προσέγγισης, με τη χρήση αλγορίθμων ολικής και τοπικής βελτιστοποίησης (Boyle et al, 2000), όπως αυτόν που υποστηρίζει το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ.

Σίγουρα, παρά τα εξελιγμένα εργαλεία βελτιστοποίησης του μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ, δεν είναι λογικό να αναμένει κανείς ότι με μία μόνο μεμονωμένη αναζήτηση, έστω και με πολλές δοκιμές, θα προσδιοριστούν οι κατάλληλες τιμές για τις παραμέτρους, αφού λόγω των πολλαπλών πηγών αβεβαιότητας και της πολυπλοκότητας του αλγορίθμου βελτιστοποίησης μια τέτοια διαδικασία δε μπορεί να δώσει καθόλου ικανοποιητικά αποτελέσματα. Αντιθέτως, στη διαδικασία βαθμονόμησης ακολουθήθηκε η εξής μεθοδολογία:

- Αρχικά, επιχειρήθηκε η μείωση των παραμέτρων προς βελτιστοποίηση αφού η λεπτομερής σε ορισμένα σημεία σχηματοποίηση του μοντέλου, ενδεχομένως να οδηγήσει σε μη ρεαλιστικά αποτελέσματα λόγω υπερπροσαρμογής. Έτσι, επιλέγεται να μην βελτιστοποιηθούν οι συντελεστές διήθησης των αμελητέων σε μήκων κλάδων υδατορεύματος, το πορώδες των υπόγειων κυττάρων λαμβάνεται ενιαίο ενώ δεν βελτιστοποιείται εκείνο του εικονικού κυττάρου και της πηγής και τέλος ο συντελεστής εκφόρτισης λαμβάνεται ενιαίος για όλες τις υπολεκάνες. Με αυτές τις κινήσεις, οι παράμετροι προς βελτιστοποίηση μειώνονται από 32 σε 22.
- Στη συνέχεια, και σταδιακά επιλέγεται η βελτιστοποίηση ενός μικρού τμήματος παραμέτρων κάθε φορά, οι οποίες επηρεάζουν συγκεκριμένες και όσο το δυνατόν πιο ελεγχόμενες διαδικασίες του επιφανειακού συστήματος, δίνοντας έμφαση στον χονδροειδή προσδιορισμό των παραμέτρων.
- Επόμενη κίνηση αφορά τη σταδιακή βελτιστοποίηση των παραμέτρων του υπόγειου συστήματος, οι οποίες με δεδομένη τη μικρή βασική απορροή της χειμαρρικής διαίτας λεκάνης του Σαρανταπόταμου, αναμένεται να είναι σχετικά «ανεξάρτητες» από τις παραμέτρους του επιφανειακού μοντέλου και άρα βαθμονομούνται εν μέρει αυτόνομα. Παράλληλα, ελέγχεται και η τάση της στάθμης των υπόγειων υδάτων, η οποία εν προκειμένω ακολουθεί γενικώς συνεπή κατανομή.
- Σε όλη τη διάρκεια της βαθμονόμησης ελέγχονται οι τιμές των παραμέτρων ώστε να είναι στα φυσικά τους όρια, συμβατά με την εννοιολογική τους ερμηνεία, ενώ όταν οι τρέχουσες τιμές τους πλησιάζουν τα όρια που έχουν τεθεί εξετάζεται η διεύρυνση των ορίων αυτών, καθώς τότε υπάρχει το ενδεχόμενο να ευρεθεί καλύτερη λύση εκτός του τρέχοντος εφικτού χώρου.

- Τέλος, με βάση και τα παραπάνω, οι παράμετροι βελτιστοποιούνται μέσα από διαδοχικές αναζητήσεις πολλών δοκιμών με στόχο την ελαχιστοποίηση της στοχικής συνάρτησης, την καλύτερη επίδοση των αποκρίσεων (responses – μέτρων καλής προσαρμογής) και άλλων πτυχών του μοντέλου όπως αυτή του μακροπρόθεσμου υδατικού ισοζυγίου της λεκάνης.

## 5.5 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων

### 5.5.1 Στοχική Συνάρτηση - Κριτήρια Καλής Προσαρμογής

Μετά από πολλές διαδοχικές δοκιμές με τη μεθοδολογία που περιγράφηκε προηγουμένως η τελική τιμή της στοχικής συνάρτησης για τις περιόδους βαθμονόμησης και επαλήθευσης προέκυψαν ίσες με:

$$g(\text{calibration}) = 0,984$$

$$g(\text{validation}) = 1,524$$

Στους παρακάτω πίνακες δίδονται οι τιμές όλων των κριτηρίων καλής προσαρμογής των προσομοιωμένων χρονοσειρών απορροής στις παρατηρημένες για τις περιόδους βαθμονόμησης και επαλήθευσης αντίστοιχα και για τις δύο θέσεις ελέγχου στην έξοδο της λεκάνης απορροής στη Γύρα Στεφάνης και στην Οινόη.

**Πίνακας 5.2** Βέλτιστες τιμές κριτηρίων καλής προσαρμογής των χρονοσειρών ωραίας απορροής στις θέσεις μέτρησης της παροχής για την περίοδο βαθμονόμησης (01/10/2011-01/05/2013)

Θέση μέτρησης	Συντελεστής βάρους	Αποτελεσματικότητα	Αποτελεσματικότητα υψηλών παροχών	Μεροληψία Μέσης Τιμής	Μεροληψία Τυπικής Απόκλισης	Μεροληψία Συντ. Μεταβλ.	Σφάλμα Μηδενικών Παροχών
Γύρα Στεφάνης	2,000	0,708	0,701	0,048	-0,159	-0,198	0,161
Οινόη	1,000	0,600	0,306	0,309	-0,278	-0,448	0,024

**Πίνακας 5.3** Βέλτιστες τιμές κριτηρίων καλής προσαρμογής των χρονοσειρών ωραίας απορροής στις θέσεις μέτρησης της παροχής για την περίοδο επαλήθευσης (01/05/2013-01/05/2014)

Θέση μέτρησης	Συντελεστής βάρους	Αποτελεσματικότητα	Αποτελεσματικότητα υψηλών παροχών	Μεροληψία Μέσης Τιμής	Μεροληψία Τυπικής Απόκλισης	Μεροληψία Συντ. Μεταβλ.	Σφάλμα Μηδενικών Παροχών
Γύρα Στεφάνης	2,000	0,531	0,303	-0,426	-0,42	0,01	0,054
Οινόη	1,000	0,415	0,229	0,647	-0,194	-0,511	0,021

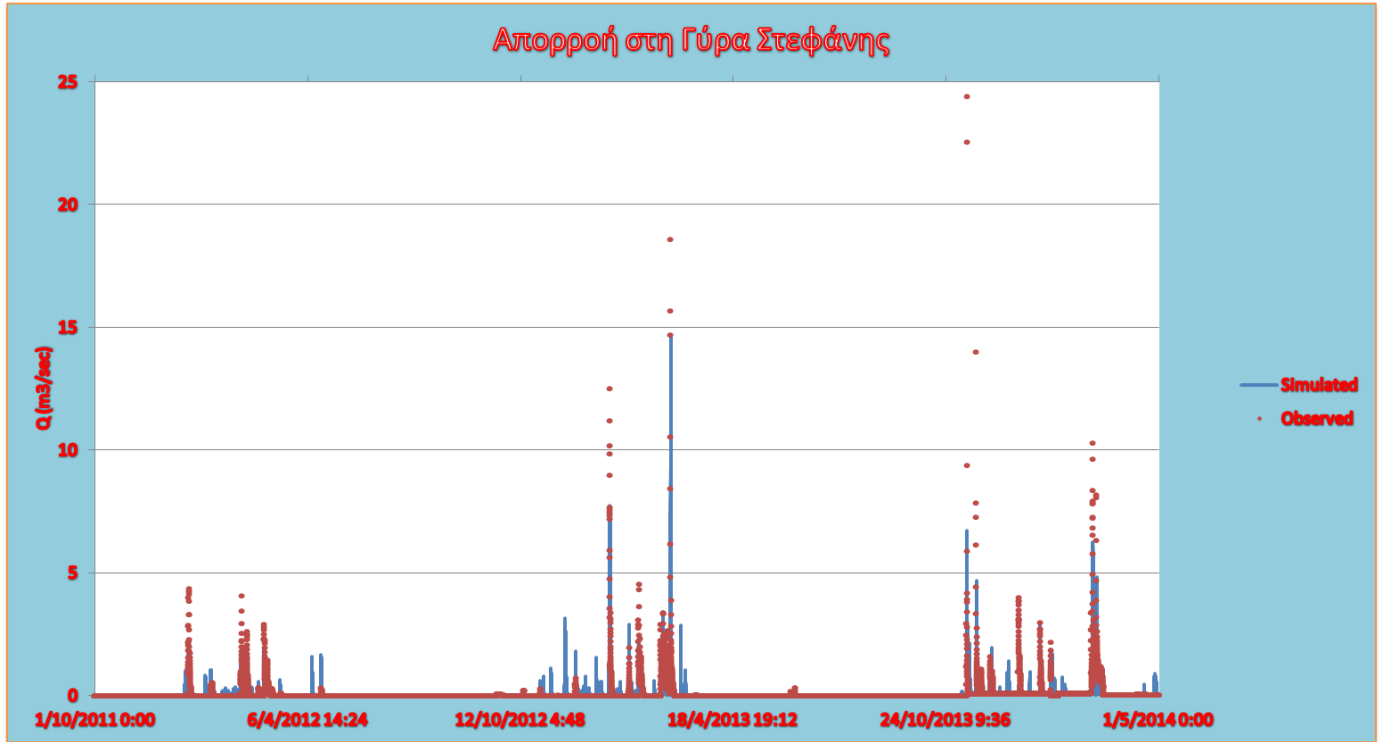
Από τους παραπάνω πίνακες μπορούμε να συνάγουμε τα εξής συμπεράσματα:

- Το μοντέλο παρουσιάζει πολύ καλή επίδοση για την περίοδο βαθμονόμησης και αποδεκτή επίδοση για την περίοδο επαλήθευσης (70,8% και 53,1% αντίστοιχα) στο σημείο ελέγχου στη Γύρα Στεφάνης, σύμφωνα και με όσα αναφέρθηκαν στο υποκεφάλαιο 5.3.1.
- Όσον αφορά το αντίστοιχο σημείο ελέγχου στην Οινόη οι επιδόσεις χειρότερες καθώς παρουσιάζεται αρκετά καλή επίδοση για την περίοδο βαθμονόμησης και όχι αρκετή επίδοση για την περίοδο επαλήθευσης (60,0% και 41,5% αντίστοιχα).
- Κανένα από τα υπόλοιπα κριτήρια καλής προσαρμογής δεν παρουσιάζει απαγορευτική τιμή παρότι δεν εισήχθησαν στην στοχική συνάρτηση, ορισμένα δε παρουσιάζουν αρκετά καλές τιμές.
- Η επίδοση του μοντέλου στην περίοδο βαθμονόμησης είναι εμφανώς καλύτερη από την επίδοση την περίοδο επαλήθευσης.

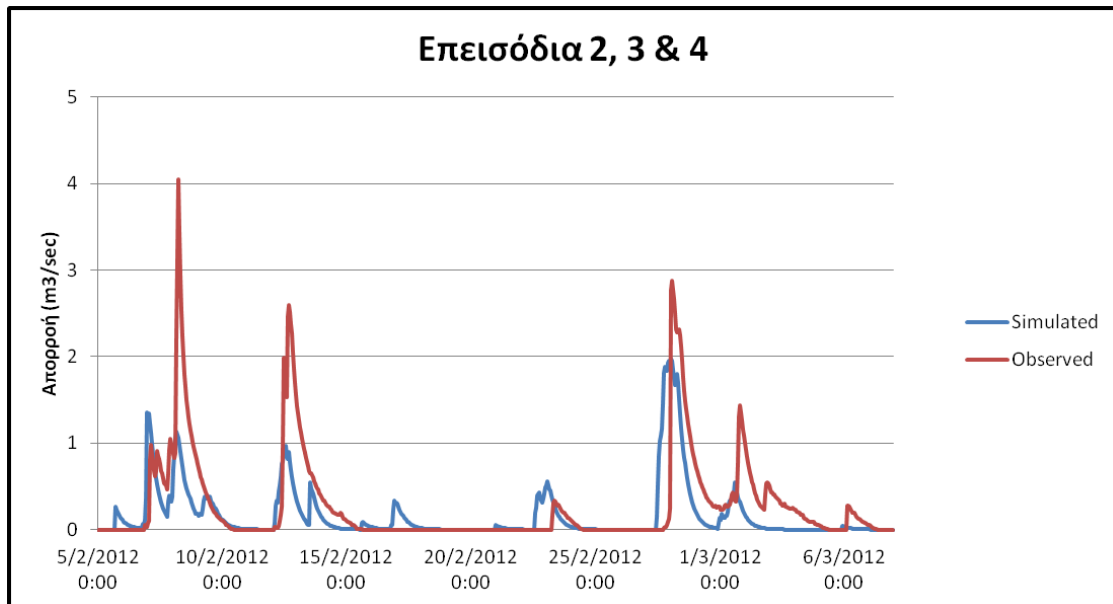
### 5.5.2 Διαγράμματα προσομοιωμένων χρονοσειρών απορροής

Τα διαγράμματα των προσομοιωμένων χρονοσειρών απορροής δείχνουν εποπτικά την αποτελεσματικότητα του μοντέλου να προσομοιώσει τις παρατηρημένες χρονοσειρές, άρα ουσιαστικά αναπαριστούν την ένταση των κριτηρίων καλής προσαρμογής. Παρακάτω παρατίθενται τα δύο διαγράμματα σε Γύρα Στεφάνης και Οινόη αντίστοιχα καθώς και μεγενθυμένα τμήματα αυτών με χαρακτηριστικά επεισόδια, σύμφωνα με την αρίθμηση του ερευνητικού προγράμματος ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ (βλ. 3.2.1).

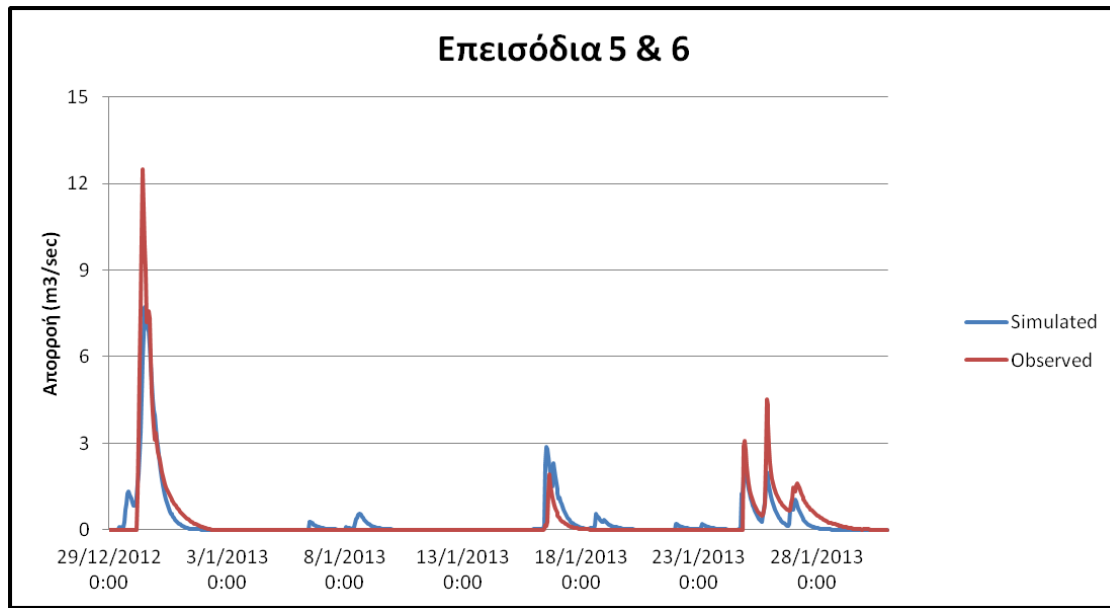




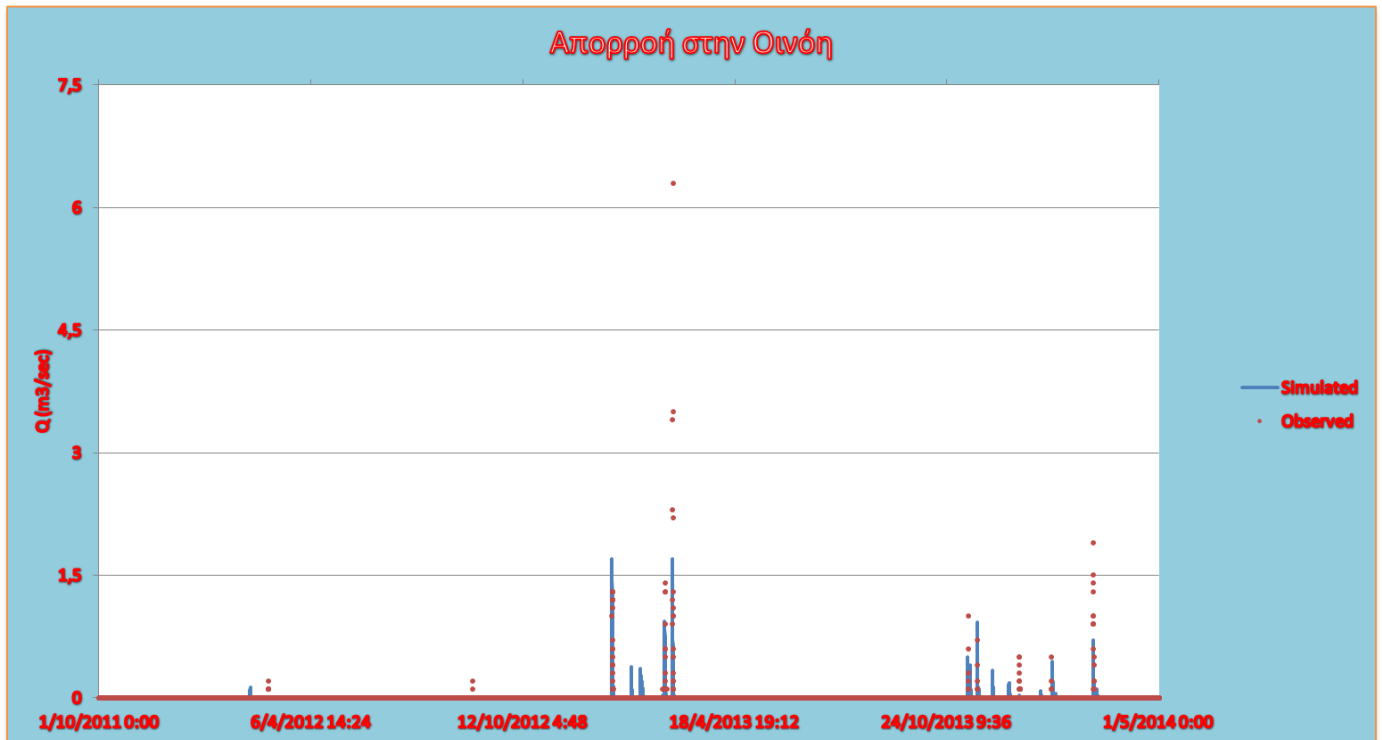
**Σχήμα 5.4** Οι παρατηρημένες (observed) και οι προσομοιωμένες (simulated) χρονοσειρές απορροής στη θέση ελέγχου στη Γύρα Στεφάνης



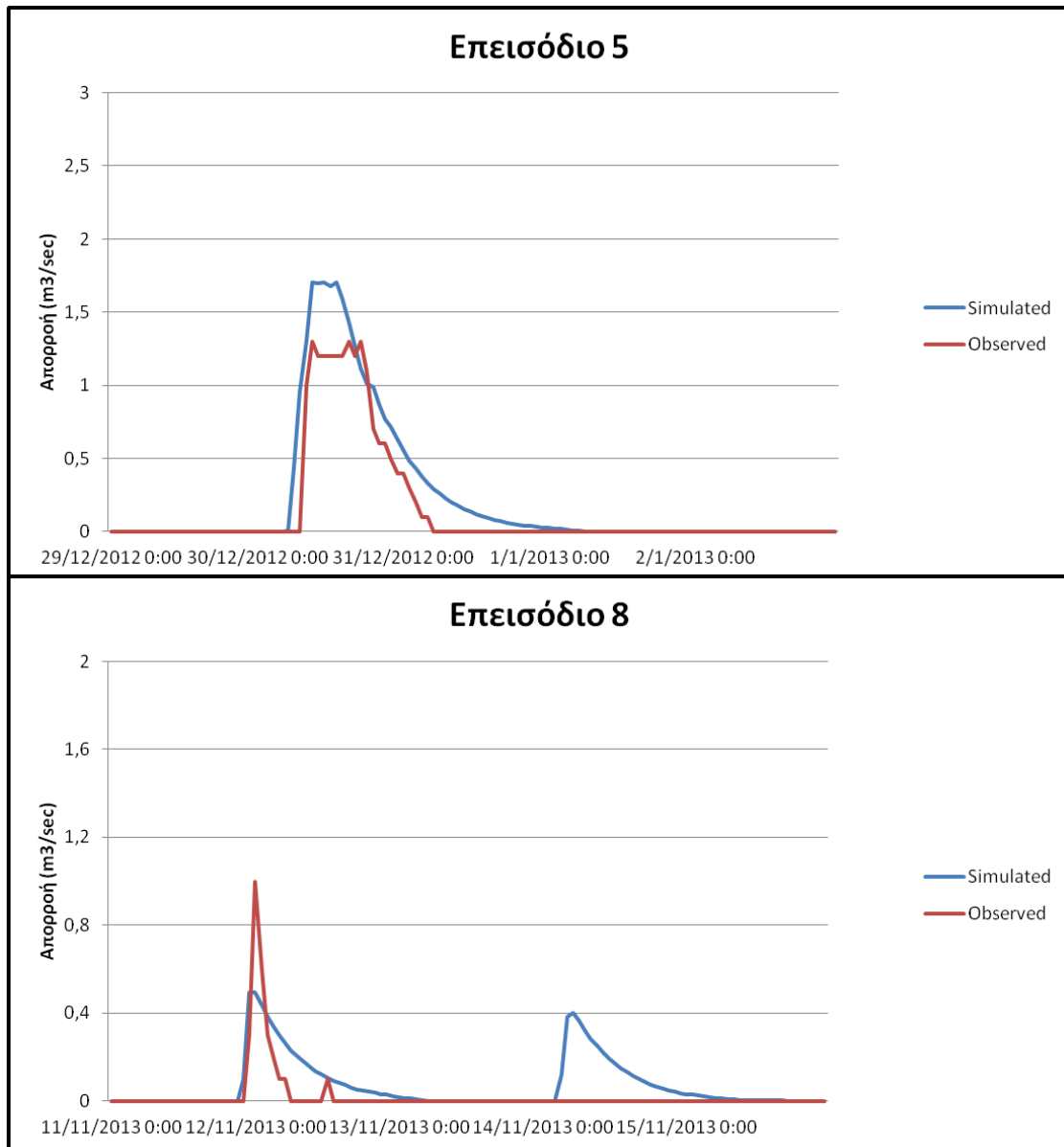
**Σχήμα 5.5** Αναπαράσταση των χρονοσειρών απορροής (προσομοιωμένων και παρατηρημένων) στη θέση ελέγχου στη Γύρα Στεφάνης κατά τα επεισόδια 2,3 & 4.



**Σχήμα 5.6** Αναπαράσταση των χρονοσειρών απορροής (προσομοιωμένων και παρατηρημένων) στη θέση ελέγχου στη Γύρα Στεφάνης κατά τα επεισόδια 5 & 6



**Σχήμα 5.7** Οι παρατηρημένες (*observed*) και οι προσομοιωμένες (*simulated*) χρονοσειρές απορροής στη θέση ελέγχου στην Οινόη



**Σχήμα 5.8** Αναπαράσταση των χρονοσειρών απορροής (προσομοιωμένων και παρατηρημένων) σε επιλεγμένα επεισόδια στη θέση ελέγχου στην Οινόη. Το πρώτο βρίσκεται στην περίοδο βαθμονόμησης ενώ το δεύτερο στην περίοδο επαλήθευσης.

Από τα παραπάνω σχήματα μπορούμε να παρατηρήσουμε τα εξής:

- Η γενική εικόνα των διαγραμμάτων (Σχήματα 5.4 και 5.6) δείχνει ότι η εν λόγω μοντελοποίηση προσομοιώνει τις περισσότερες από τις περιόδους με έντονη ή περιορισμένη παροχή και με σχετική ποσοτική προσέγγιση των παρατηρήσεων.
- Η επίδοση των μοντέλων, η οποία παρουσιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο, αποτυπώνεται σε γενικές γραμμές στα παραπάνω σχήματα. Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 5.5 για τη Γύρα Στεφάνης είναι χαρακτηριστική η καλή προσαρμογή της προσομοιωμένης χρονοσειράς στην παρατηρημένη τόσο στην περίοδο επαλήθευσης

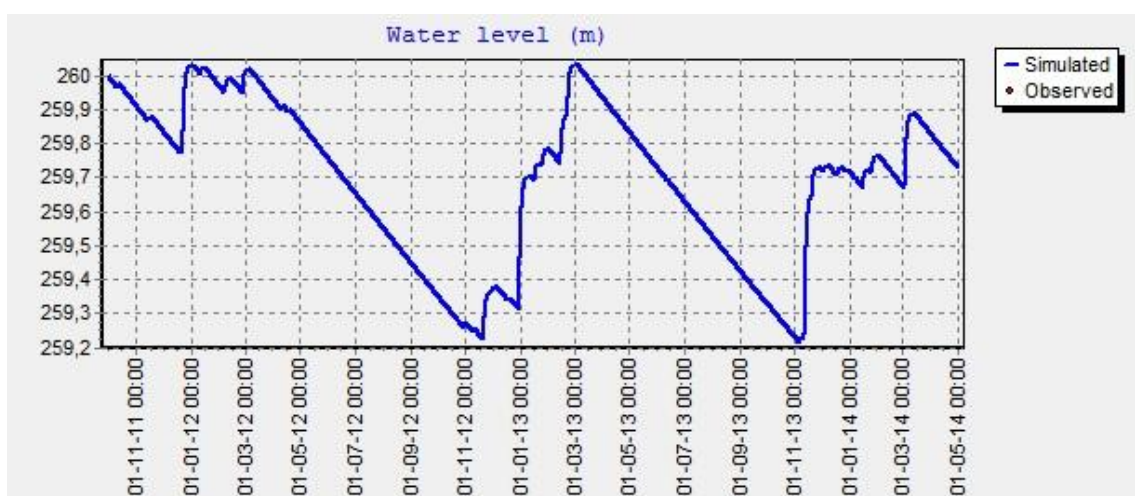
αλλά κυρίως στην περίοδο βαθμονόμησης, ενώ στο Σχήμα 5.7 για την Οινόη οι προσομοιωμένες χρονοσειρές ειδικά στην περίοδο επαλήθευσης δεν «πλησιάζουν» ικανοποιητικά τις παρατηρημένες.

- Είναι χαρακτηριστική η αδυναμία του μοντέλου να αναπαράξει τις μέγιστες παρατηρήσεις απορροής που εμφανίζονται στην περίοδο επαλήθευσης τόσο στη Γύρα Στεφάνης και ειδικά στην Οινόη. Στην περίοδο βαθμονόμησης οι μέγιστες παρατηρήσεις απορροής προσεγγίζονται σε γενικές καλύτερα αλλά τις πολλές φορές με κάποια αξιόλογη υστέρηση των προσομοιωμένων τιμών σε σχέση με τις παρατηρημένες.
- Η μορφή των υδρογραφημάτων μεμονωμένων επεισοδίων, η οποία γενικώς περιλαμβάνει έναν γραμμικό σχεδόν κατακόρυφο ανοδικό κλάδο και έναν εκθετικό καθοδικό κλάδο, προσομοιώνεται επαρκώς ανεξάρτητα από την προσέγγιση των αιχμών παροχής.

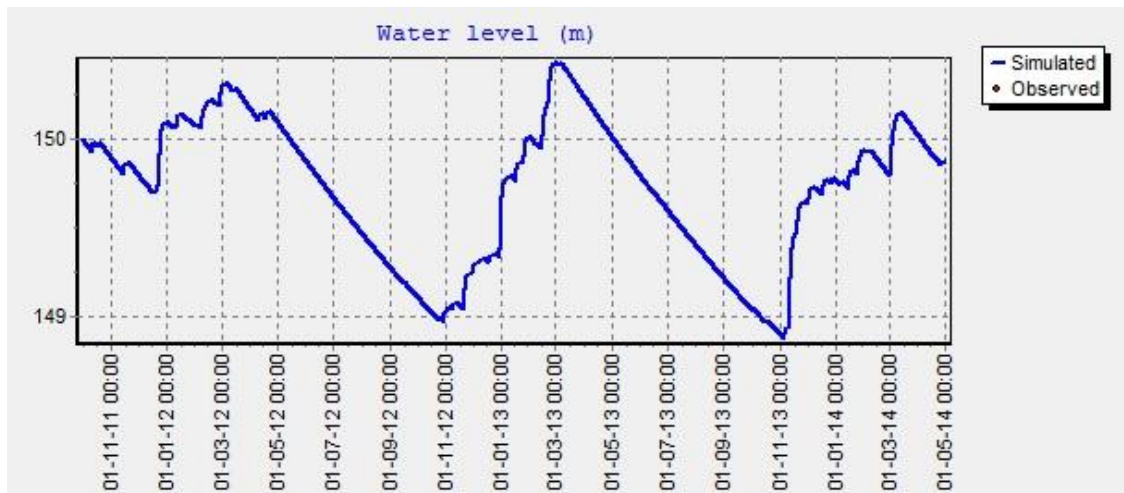
### 5.5.3 Διαγράμματα διακύμανσης στάθμης υπόγειων υδάτων

Όσον αφορά τα διαγράμματα της στάθμης των υπόγειων υδάτων, η επιθυμητή διακύμανσή της επιτεύχθηκε χάρη στην ενσωμάτωση στη στοχική συνάρτηση (βλ. 5.4.4) του μέτρου ποινής για την αναπαραγωγή της τάσης (trend penalty) στα δύο κύτταρα του υπόγειου υδροφορέα.

Η επιθυμητή (συνεπής) διακύμανση (βλ. και 5.3.4) της στάθμης των υδάτων του υπόγειου υδροφορέα είναι εποχιακή με άνοδο της στάθμης κατά τη χειμερινή περίοδο όπου συγκεντρώνονται οι περισσότερες βροχοπτώσεις και αντίστοιχη πτώση της κατά τη θερινή περίοδο. Τα παραπάνω αναπαρίστανται στα επόμενα διαγράμματα.



Σχήμα 5.9 Η διακύμανση της στάθμης στο Κύτταρο 0 (ανάτη)



**Σχήμα 5.10** Η διακύμανση της στάθμης στο Κύτταρο 1 (κατάντη)

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι η τελική στάθμη στο κύτταρο 0 είναι περίπου 259,7 m (με αρχική στάθμη 260 m) και στο κύτταρο 1 είναι 149,8 m (με αρχική στάθμη 150 m). Έτσι, συμπεραίνουμε ότι η τελική στάθμη δεν απέχει πολύ από την αρχική, γεγονός που σημαίνει ότι τηρούνται οι συνθήκες στασιμότητας (stationary conditions).

#### 5.5.4 Υδατικό ισοζύγιο λεκάνης

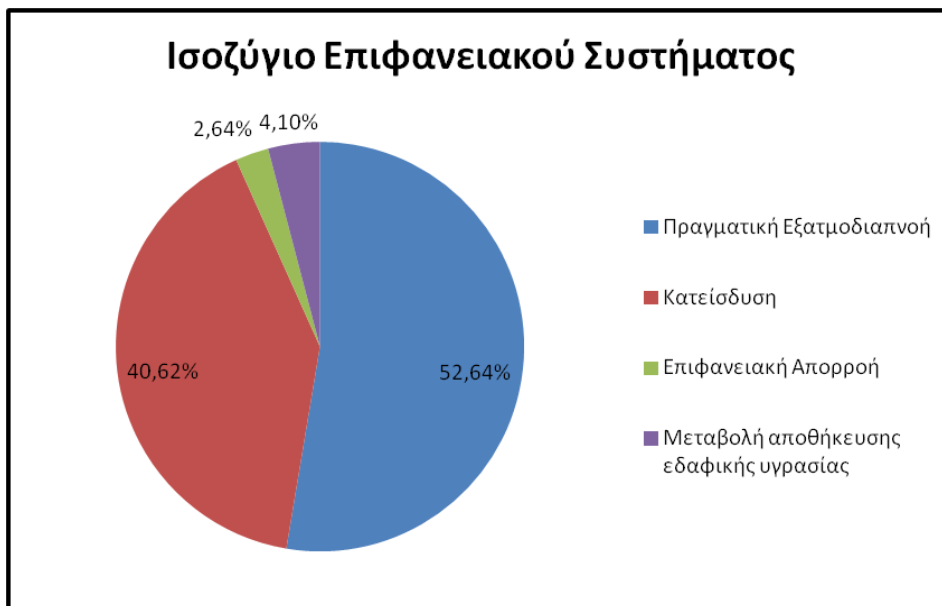
Παρακάτω παρατίθενται τόσο με τη μορφή πίνακα όσο και τη μορφή ποσοστών σε διάγραμμα «πίτα», οι συνιστώσες του συνολικού μέσου ετήσιου υδατικού ισοζυγίου της λεκάνης όπως αυτή προσομοιώθηκε με τη διαδικασία της βαθμονόμησης, καθώς και τα αντίστοιχα υδατικά ισοζύγια για το επιφανειακό και το υπόγειο σύστημα<sup>5</sup>.

**Πίνακας 5.4** Το μέσο ετήσιο υδατικό ισοζύγιο της λεκάνης όπως προέκυψε από τη διαδικασία βαθμονόμησης

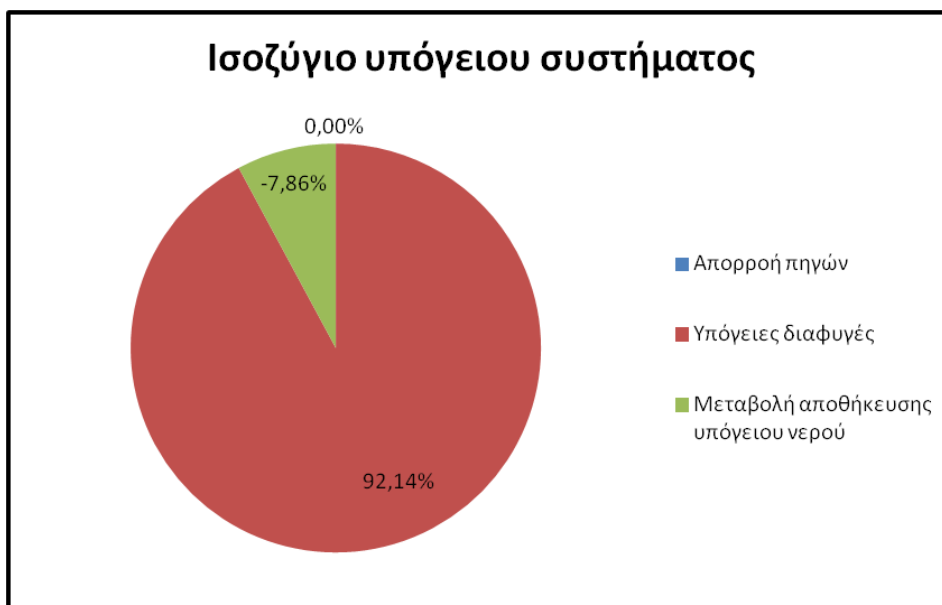
Συνιστώσα	Μέσο ετήσιο ισοδύναμο ύψος νερού (mm)	Μέσος ετήσιος όγκος νερού (hm <sup>3</sup> )
Βροχόπτωση	710,186	100,949
Πραγματική Εξατμοδιαπνοή	382,607	54,385
Κατείοδυση	295,254	41,969
Απώλειες λόγω Διήθησης	3,474	0,494
Επιφανειακή Απορροή	19,172	2,725

<sup>5</sup> Όπως αναφέρεται και στις επεξηγήσεις των διαγραμμάτων 5.11, 5.12 και 5.13 η κατανομή στο υδατικό ισοζύγιο του επιφανειακού συστήματος όπως και στο συνολικό σύστημα γίνεται ως προς τη μέση ετήσια βροχόπτωση, ενώ το αντίστοιχο του υπόγειου συστήματος ως προς το άθροισμα της κατείοδυσης από το επιφανειακό σύστημα και των απωλειών λόγω διήθησης από τα υδατορεύματα.

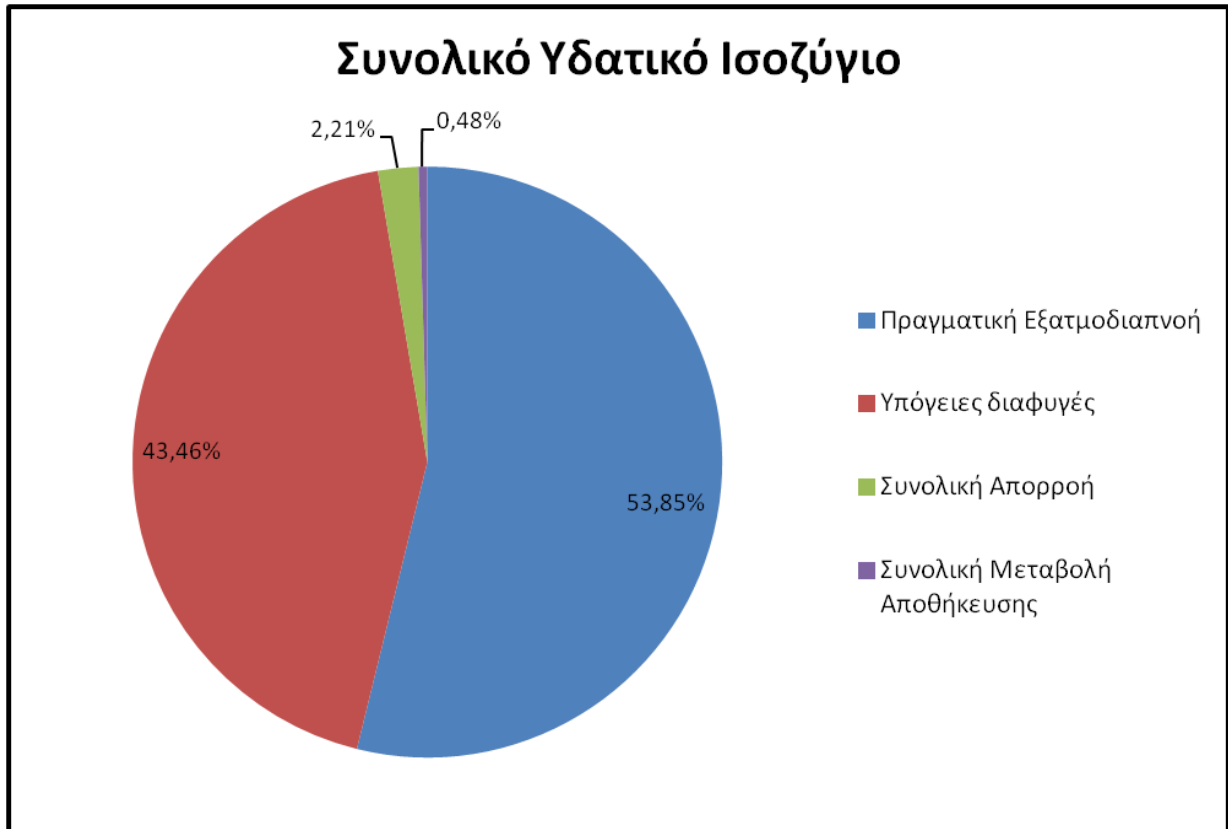
Απορροή πηγών	0,002	0
Υπόγειες διαφυγές	308,839	43,9
Μεταβολή αποθήκευσης εδαφικής υγρασίας	29,773	4,232
Μεταβολή αποθήκευσης υπόγειου νερού	-26,352	-3,746
Απορροή εξόδου	15,699	2,232



**Σχήμα 5.11** Η κατανομή της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης στο επιφανειακό σύστημα



**Σχήμα 5.12** Η κατανομή της μέσης ετήσιας κατείσδυσης και διήθησης στο υπόγειο σύστημα



**Σχήμα 5.13** Η κατανομή της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης συνολικά

Από τα παραπάνω διαγράμματα μπορούμε να συνάγουμε τα εξής:

- Το υδατικό ισοζύγιο του επιφανειακού συστήματος είναι αντίστοιχο με το συνολικό ισοζύγιο αντιστοιχίζοντας την κατείσδυση προς το υπόγειο σύστημα με τις υπόγειες διαφυγές.
- Το μεγαλύτερο μέρος του νερού που κατακρημνίζεται εξατμίζεται (53,85%)<sup>6</sup>, ενώ ένα σημαντικό κομμάτι χάνεται σε υπόγειες διαφυγές (43,46%), παρατήρηση συμβατή με τη χειμαρρική φύση της λεκάνης του Σαρανταπόταμου όπου κυριαρχούν τα ασβεστολιθικά καρστικοποιημένα πετρώματα.
- Όπως αναμένεται, ο συντελεστής απορροής είναι εξαιρετικά μικρός (2,21%), δηλαδή μόνο το 1/50 της συνολικής βροχόπτωσης καταλήγει σε επιφανειακή απορροή, ενώ η μεταβολή της αποθήκευσης ύδατος στο έδαφος αμελητέα, παρατηρήσεις επίσης συμβατές με τη φύση της εν λόγω λεκάνης. Ουσιαστικά, όλα τα εδάφη της ΜΥΑ 1 δεν παράγουν σχεδόν καθόλου επιφανειακή απορροή.

<sup>6</sup> Το μέσο ετήσιο υδατικό ισοζύγιο προκύπτει από 2,5 όχι 3 πλήρη υδρολογικά έτη, άρα η θερινή περίοδος του τρίτου έτους δε λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς. Σε περίπτωση που αυτό συνέβαινε η συμμετοχή της εξάτμισης στο μέσο υδατικό ισοζύγιο (επιφανειακό και συνολικό) θα ήταν σημαντικά μεγαλύτερη.

- Η πηγή η οποία σχηματοποιήθηκε στην έξοδο της λεκάνης αποδίδει αμελητέα παροχή νερού, άρα θα μπορούσε να παραληφθεί σε μία ενδεχόμενη μελλοντική σχηματοποίηση.

### 5.5.5 Τιμές Παραμέτρων

Στους παρακάτω πίνακες απεικονίζονται οι τελικές βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων καθώς και τα όρια (εσωτερικά και εξωτερικά, βλ. 5.4.2). Στους επόμενους πίνακες, οι τιμές Low limit και Upper limit, απεικονίζουν τα εξωτερικά όρια των παραμέτρων, οι τιμές Min. Value και Max. Value τα εσωτερικά και οι τιμές Actual Value τις τελικές βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων.

Στον πίνακα 5.5, σε κάθε παράμετρο αντιστοιχούν δύο τιμές, μία για κάθε Μονάδα Υδρολογικής Απόκρισης. Οι παράμετροι που απεικονίζονται αποδίδονται σύμφωνα με τους ορισμούς και συμβολισμούς που δόθηκαν στην παράγραφο 4.3.1 (Σχήμα 4.9).

**Πίνακας 5.5** Οι τιμές και τα όρια των παραμέτρων του επιφανειακού συστήματος

Παράμετρος	Name	Low limit	Upper limit	Min. value	Max. value	Actual value
Μέγιστη διηθητικότητα $i_0$ (m)	hru=1	0,000	1,000	0,010	0,100	0,069
Μέγιστη διηθητικότητα $i_0$ (m)	hru=2	0,000	1,000	0,010	0,200	0,120
Χωρητικότητα άνω δεξαμενής $k$ (m)	hru=1	0,000	1,000	0,000	0,700	0,150
Χωρητικότητα άνω δεξαμενής $k$ (m)	hru=2	0,000	1,000	0,000	0,700	0,562
Ποσοστό διήθησης που καταλήγει στην κατώτερη ζώνη $\beta$	hru=1	0,000	1,000	0,100	0,900	0,845
Ποσοστό διήθησης που καταλήγει στην κατώτερη ζώνη $\beta$	hru=2	0,000	1,000	0,100	0,900	0,837
Συντελεστής στείρευσης για υποδερμική ροή $\lambda$	hru=1	0,000	1,000	0,010	0,500	0,408
Συντελεστής στείρευσης για υποδερμική ροή $\lambda$	hru=2	0,000	1,000	0,010	0,200	0,120



Συντελεστής στέρειωσης για κατείσδυση $\mu$	hru=1	0,000	1,000	0,010	0,100	0,014
Συντελεστής στέρειωσης για κατείσδυση $\mu$	hru=2	0,000	1,000	0,010	0,100	0,059
Χωρητικότητα κατακράτησης $r$	hru=1	0,000	0,500	0,000	0,050	0,032
Χωρητικότητα κατακράτησης $r$	hru=2	0,000	0,500	0,000	0,050	0,015
Στάθμη παραγωγής υποδερμικής ροής $k_H$ (m)	hru=1	0,000	1,000	0,000	0,300	0,102
Στάθμη παραγωγής υποδερμικής ροής $k_H$ (m)	hru=2	0,000	1,000	0,000	0,300	0,015

Στον πίνακα 5.6, σε κάθε παράμετρο αντιστοιχούν τέσσερις τιμές, μία για κάθε ένα από τα δύο υπόγεια κύτταρα, μία για την πηγή στην έξοδο της λεκάνης και μία για το εικονικό συλλεκτήριο κύτταρο. Οι παράμετροι που απεικονίζονται είναι το πορώδες (groundwater cell porosity) και η υδραυλική αγωγιμότητα (groundwater cell conductivity).

**Πίνακας 5.6** Οι τιμές και τα όρια των παραμέτρων του υπόγειου συστήματος

Παράμετρος	Name	Low limit	Upper limit	Min. value	Max. value	Actual value
Πορώδες	Κύτταρο 0	0,000	1,000	0,050	0,300	0,147
Πορώδες	Κύτταρο 1	0,000	1,000	0,050	0,300	0,147
Πορώδες	Κύτταρο 2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Πορώδες	Πηγή 0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Υδραυλική Αγωγιμότητα	Κύτταρο 0	0,000	1,000	0,000	1,000	0,000
Υδραυλική Αγωγιμότητα	Κύτταρο 1	0,000	1,000	0,000	1,000	0,364
Υδραυλική Αγωγιμότητα	Κύτταρο 2	0,000	1,000	0,000	1,000	0,018
Υδραυλική Αγωγιμότητα	Πηγή 0	0,000	1,000	0,000	1,000	0,001

Στον πίνακα 5.7, απεικονίζονται οι παράμετροι που αναφέρονται στα υδατορεύματα και συγκεκριμένα οι συντελεστές διήθησης για κάθε κλάδο υδατορεύματος (river infiltration) και οι συντελεστές εκφόρτισης για κάθε υπολεκάνη (recession parameter). Σημειώνεται εδώ ότι οι συντελεστές εκφόρτισης λήφθηκαν ίδιοι για όλες τις υπολεκάνες ενώ δεν

βελτιστοποιήθηκαν οι συντελεστές διήθησης των υδατορευμάτων με μικρή συμβολή στην απορροή (River 2,3,4).

**Πίνακας 5.7** Οι τιμές και τα όρια των παραμέτρων που αναφέρονται στα υδατορέυματα και τις υπολεκάνες

Παράμετροι	Name	Low limit	Upper limit	Min. value	Max. value	Actual value
Συντελεστής διήθησης	River 0	0,000	1,000	0,000	0,300	0,186
Συντελεστής διήθησης	River 1	0,000	1,000	0,000	1,000	0,008
Συντελεστής διήθησης	River 2	0,000	1,000	0,000	1,000	0,000
Συντελεστής διήθησης	River 3	0,000	1,000	0,000	1,000	0,000
Συντελεστής διήθησης	River 4	0,000	1,000	0,000	1,000	0,000
Συντελεστής εκφόρτισης	Basin 0	0,000	1,000	0,010	1,000	0,485
Συντελεστής εκφόρτισης	Basin 1	0,000	1,000	0,010	1,000	0,485
Συντελεστής εκφόρτισης	Basin 2	0,000	1,000	0,010	1,000	0,485
Συντελεστής εκφόρτισης	Basin 3	0,000	1,000	0,010	1,000	0,485
Συντελεστής εκφόρτισης	Basin 4	0,000	1,000	0,010	1,000	0,485

Η γενική φυσική σημασία των παραμέτρων εξασφαλίστηκε με τον ορισμό του εύρους του εφικτού χώρου των παραμέτρων (Παπαδημητράκη, 2012), έτσι καμία από τις παραπάνω παραμέτρους δεν έχει τιμή μη συμβατή, σύμφωνα με όσα ορίστηκαν για τη φυσική σημασία και το μέγεθος των παραμέτρων στο υποκεφάλαιο 4.3. Παρόλα αυτά, οι τελικές τιμές των παραμέτρων πρέπει να εξεταστούν και σε σχέση με τη σχηματοποίηση που επιλέχθηκε στο υποκεφάλαιο 4.2, αναγκαιότητα που επιβάλλει τη σύγκριση των ίδιων παραμέτρων ανά ΜΥΑ στο επιφανειακό σύστημα και ανά κύτταρο στο υπόγειο.

Όσον αφορά το επιφανειακό σύστημα, αναμένουμε οι παράμετροι που αναφέρονται στη ΜΥΑ 1, δηλαδή στα περισσότερο περατά εδάφη, να έχουν τέτοιες τιμές σε σχέση με τις παραμέτρους που αναφέρονται στη ΜΥΑ 2, δηλαδή στα λιγότερο περατά εδάφη, ώστε να δυσχεραίνεται η παραγωγή επιφανειακή απορροής. Πιο συγκεκριμένα:

- Οι παράμετροι που αναφέρονται στην υδραυλική αγωγιμότητα του εδάφους, δηλαδή ο συντελεστής στείρευσης  $\lambda$  για την οριζόντια και ο συντελεστής στείρευσης  $\mu$  για την κατακόρυφη λαμβάνουν μεγαλύτερες τιμές στη ΜΥΑ 1, παρατήρηση συμβατή με το ότι τα εδάφη αυτά είναι περισσότερο περατά.

- Οι τιμές των παραμέτρων που αναφέρονται στην ανώτερη ακόρεστη ζώνη είναι και αυτές συμβατές με τον ορισμό των ΜΥΑ, καθώς η χωρητικότητα της άνω ακόρεστης ζώνης  $k$  είναι μεγαλύτερη στη ΜΥΑ 2, γεγονός που αυξάνει τη δυνατότητα αποθήκευσης νερού στο έδαφος ώστε να διευκολυνθεί η παραγωγή επιφανειακής απορροής λόγω κορεσμού ή λόγω υποδερμικής ροής και όχι η διήθηση σε κατώτερες ζώνες, ενώ και η στάθμη για την παραγωγή υποδερμικής ροής  $k_H$  είναι αρκετά μικρότερη στη ΜΥΑ 2, έτσι ώστε να διευκολύνεται η παραγωγή υποδερμικής ροής.
- Η κατακράτηση  $r$  λαμβάνει μεγαλύτερη, σχεδόν διπλάσια, τιμή για τη ΜΥΑ 1, γεγονός το οποίο είναι λογικό, καθώς έτσι εγκλωβίζεται στην επιφάνεια των εδαφών της ΜΥΑ 1 περισσότερο ύψος βροχόπτωσης και άρα εξατμίζεται, μειώνοντας σημαντικά τη δυνατότητα δημιουργίας αξιόλογης επιφανειακής απορροής.
- Το ποσοστό διήθησης για την κατώτερη ακόρεστη ζώνη  $\beta$  έχει ανεπαίσθητα μεγαλύτερη τιμή για την ΜΥΑ 1 σε σχέση με τη ΜΥΑ 2, ενώ θα δικαιολογούνταν μια μεγαλύτερη συγκριτικά με τη ΜΥΑ 2 τιμή.
- Αντίθετα, η παράμετρος της μέγιστης διηθητικότητας  $i_0$  που αναφέρεται στην εδαφική επιφάνεια, ενώ αναμένεται να έχει μεγαλύτερη τιμή στην ΜΥΑ 1, ώστε να περιορίζεται η άμεση απορροή προς χάριν της διήθησης, κάτι τέτοιο δε συμβαίνει.
- Σύμφωνα και με τα παραπάνω, σε γενικές γραμμές το σειτ παραμέτρων για το επιφανειακό σύστημα που λογίζεται ως βέλτιστο για την προσομοίωση της λεκάνης του Σαρανταπόταμου λαμβάνει τιμές συμβατές με τη φυσική σημασία των παραμέτρων όπως έχουν οριστεί καθώς και με τη σχηματοποίηση των ΜΥΑ, διασφαλίζοντας στο μοντέλο επαρκή προγνωστική ικανότητα αλλά και φυσική εδραίωση στα χαρακτηριστικά του φυσικού συστήματος (το μοντέλο αποφεύγεται να γίνει «μαύρο κουτί»).

Όσον αφορά το υπόγειο σύστημα, είναι συμβατές τόσο η τιμή του πορώδους με τις τιμές για το πορώδες που λαμβάνουν εδάφη από καρστικοποιημένο ασβεστόλιθο (0-40%, εδώ περίπου 15%), όσο και η τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας με τα πολύ υδατοπερατά πετρώματα όπως τα συγκεκριμένα της λεκάνης του Σαρανταπόταμου ( $\geq 0,1$  m/s, εδώ περίπου 0,36 m/s για το Κύτταρο 1). Πάντως, λόγω της αδρομερούς σχηματοποίησης του εν λόγω συστήματος δεν είναι δυνατό να αποδοθεί αναλυτική φυσική ερμηνεία των τιμών των παραμέτρων του.

### **5.5.6 Αποτελέσματα με νέα στοχική συνάρτηση**

Το βασικό μειονέκτημα της παραπάνω βαθμονόμησης είναι, όπως αναφέρθηκε, η αδυναμία αναπαραγωγής των υψηλών τιμών των απορροών, παρότι η γενική εικόνα των μέτρων καλής προσαρμογής, και ειδικά όσων εισήχθησαν στη στοχική συνάρτηση, κρίνεται ικανοποιητική. Παρόλα αυτά, σε μελέτες πλημμυρών εκείνο που ενδιαφέρει είναι οι υψηλές απορροές και μάλιστα οι μέγιστες ανά επεισόδιο, δηλαδή οι παροχές αιχμής. Έτσι, προκύπτει η ανάγκη αναπαραγωγής με καλύτερους όρους των υψηλών τιμών των παρατηρημένων παροχών, ίσως με κάποια «έκπτωση», όσον αφορά τη γενικότερη επίδοση του μοντέλου.

Η παραπάνω ανάγκη θα ικανοποιηθεί σε ένα βαθμό με τη δημιουργία μιας νέας στοχικής συνάρτησης, η οποία θα οδηγήσει στη βαθμονόμηση ενός νέου βέλτιστου σετ παραμέτρων, το οποίο θα προσομοιώνει καλύτερα τις υψηλότερες τιμές της παροχής. Η βασική διαφορά με την προηγούμενη στοχική συνάρτηση θα είναι η εισαγωγή σε αυτή της αποτελεσματικότητας υψηλών παροχών (high flow efficiency), η οποία, όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 5.3.1, αναφέρεται στις τιμές των παροχών οι οποίες είναι μεγαλύτερες του μέσου όρου τους.

Συγκεκριμένα, διαμορφώνεται μια νέα σύνθετη στοχική συνάρτηση με τις ακόλουθες συνιστώσες:

- δείκτης αποτελεσματικότητας και δείκτης αποτελεσματικότητας υψηλών παροχών στη θέση μέτρησης της παροχής στη Γύρα Στεφάνης (που συμπίπτει με την έξοδο της λεκάνης) με συντελεστή βαρύτητας 2
- δείκτης αποτελεσματικότητας και δείκτης αποτελεσματικότητας υψηλών παροχών στη θέση στη θέση μέτρησης της παροχής στην Οινόη με συντελεστή βαρύτητας 1
- μέτρα ποινής για την αναπαραγωγή τάσης (trend penalty) στα δύο υπόγεια κύτταρα με συντελεστή βαρύτητας 1

Ουσιαστικά, δεν τροποποιείται τίποτα πέρα από την προσθήκη της αποτελεσματικότητας των υψηλών παροχών. Επιπλέον, κρατούνται ίδιοι όλοι οι υπόλοιποι παράγοντες που ορίζονται από το χρήστη, δηλαδή οι χρονικές περιόδοι βαθμονόμησης και επαλήθευσης, οι αρχικές στάθμες τους εδάφους και των υπόγειων κυττάρων και τα ίδια όρια παραμέτρων (εσωτερικά και εξωτερικά), ενώ ακολουθείται και η ίδια διαδικασία βαθμονόμησης.

Η νέα στοχική συνάρτηση θα καλείται «Στοχική συνάρτηση 2» ενώ η προηγούμενη «Στοχική συνάρτηση 1». Η τελική τιμή της στοχικής συνάρτησης για τις περιόδους βαθμονόμησης και επαλήθευσης προκύπτει ίση με:

$$g(\text{calibration}) = 2,172$$

$$g(\text{validation}) = 3,682$$

Στους παρακάτω πίνακες δίδονται οι νέες τιμές όλων των κριτηρίων καλής προσαρμογής των προσομοιωμένων χρονοσειρών απορροής στις παρατηρημένες.

**Πίνακας 5.8** Βέλτιστες τιμές κριτηρίων καλής προσαρμογής των χρονοσειρών ωραίας απορροής στις θέσεις μέτρησης της παροχής για την περίοδο βαθμονόμησης με τη νέα στοχική συνάρτηση

Θέση μέτρησης	Συντελεστής βάρους	Αποτελεσματικότητα	Αποτελεσματικότητα υψηλών παροχών	Μεροληψία Μέσης Τιμής	Μεροληψία Τυπικής Απόκλισης	Μεροληψία Συντ. Μεταβλ.	Σφάλμα Μηδενικών Παροχών
Γύρα Στεφάνης	2,000	0,697	0,742	0,101	-0,097	-0,18	0,18
Οινόη	1,000	0,614	0,335	0,272	-0,254	-0,413	0,025

**Πίνακας 5.9** Βέλτιστες τιμές κριτηρίων καλής προσαρμογής των χρονοσειρών ωραίας απορροής στις θέσεις μέτρησης της παροχής για την περίοδο επαλήθευσης με τη νέα στοχική συνάρτηση

Θέση μέτρησης	Συντελεστής βάρους	Αποτελεσματικότητα	Αποτελεσματικότητα υψηλών παροχών	Μεροληψία Μέσης Τιμής	Μεροληψία Τυπικής Απόκλισης	Μεροληψία Συντ. Μεταβλ.	Σφάλμα Μηδενικών Παροχών
Γύρα Στεφάνης	2,000	0,528	0,324	-0,406	-0,389	0,029	0,060
Οινόη	1,000	0,412	0,203	0,555	-0,179	-0,472	0,023

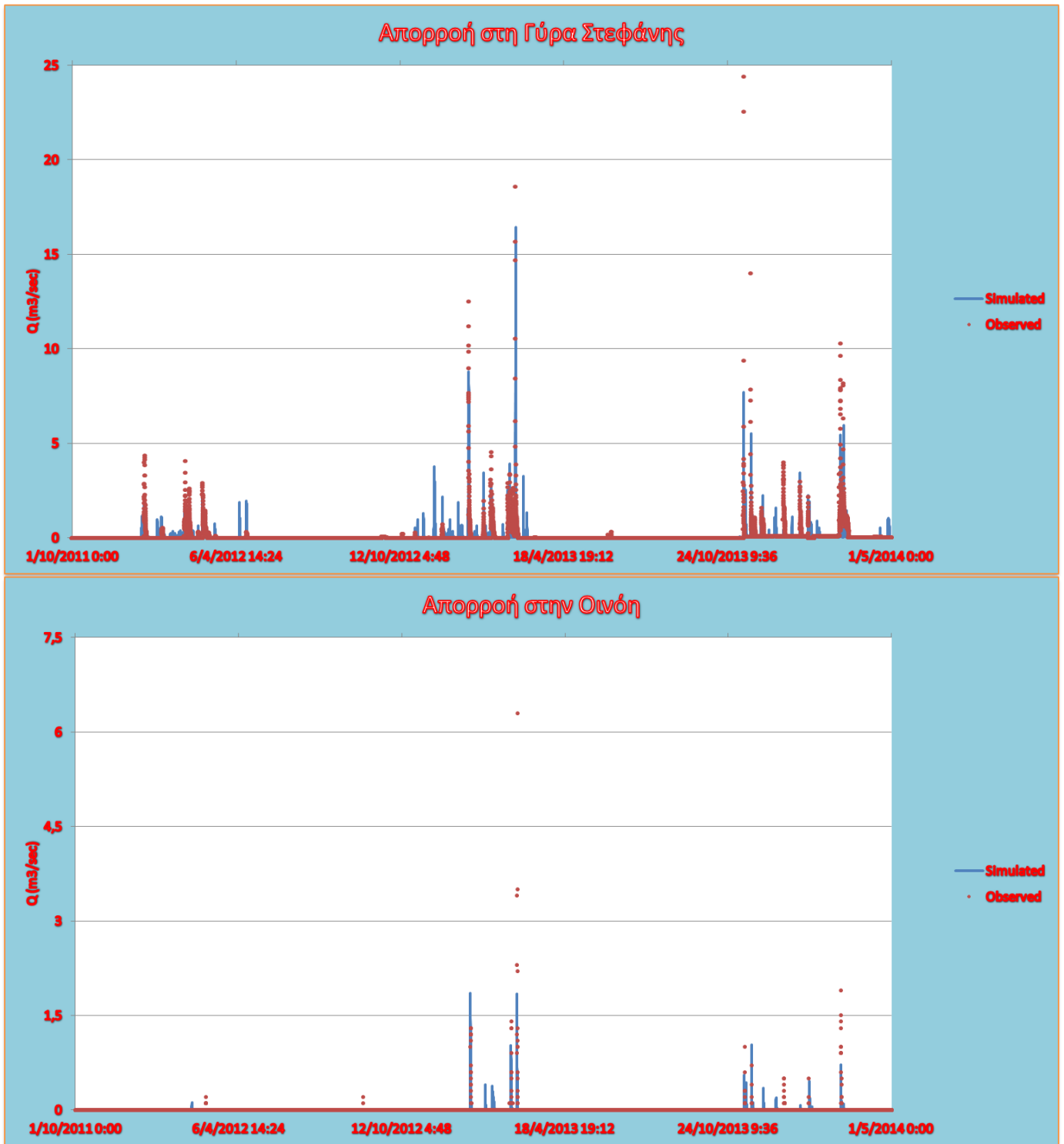
Από τους παραπάνω πίνακες και σε σύγκριση με τους Πίνακες 5.2 και 5.3 οι οποίοι αναπαριστούν τις αντίστοιχες τιμές των κριτηρίων καλής προσαρμογής για την πρώτη στοχική συνάρτηση μπορούμε να αναφέρουμε τα εξής:

- Στη Γύρα Στεφάνης ικανοποιητική είναι η αύξηση της αποτελεσματικότητας των υψηλών παροχών και στις δύο χρονικές περιόδους, αλλά ειδικά στην περίοδο

βαθμονόμησης είναι πλέον 74,2%. Η μείωση της αποτελεσματικότητας είναι σχεδόν ανεπαίσθητη.

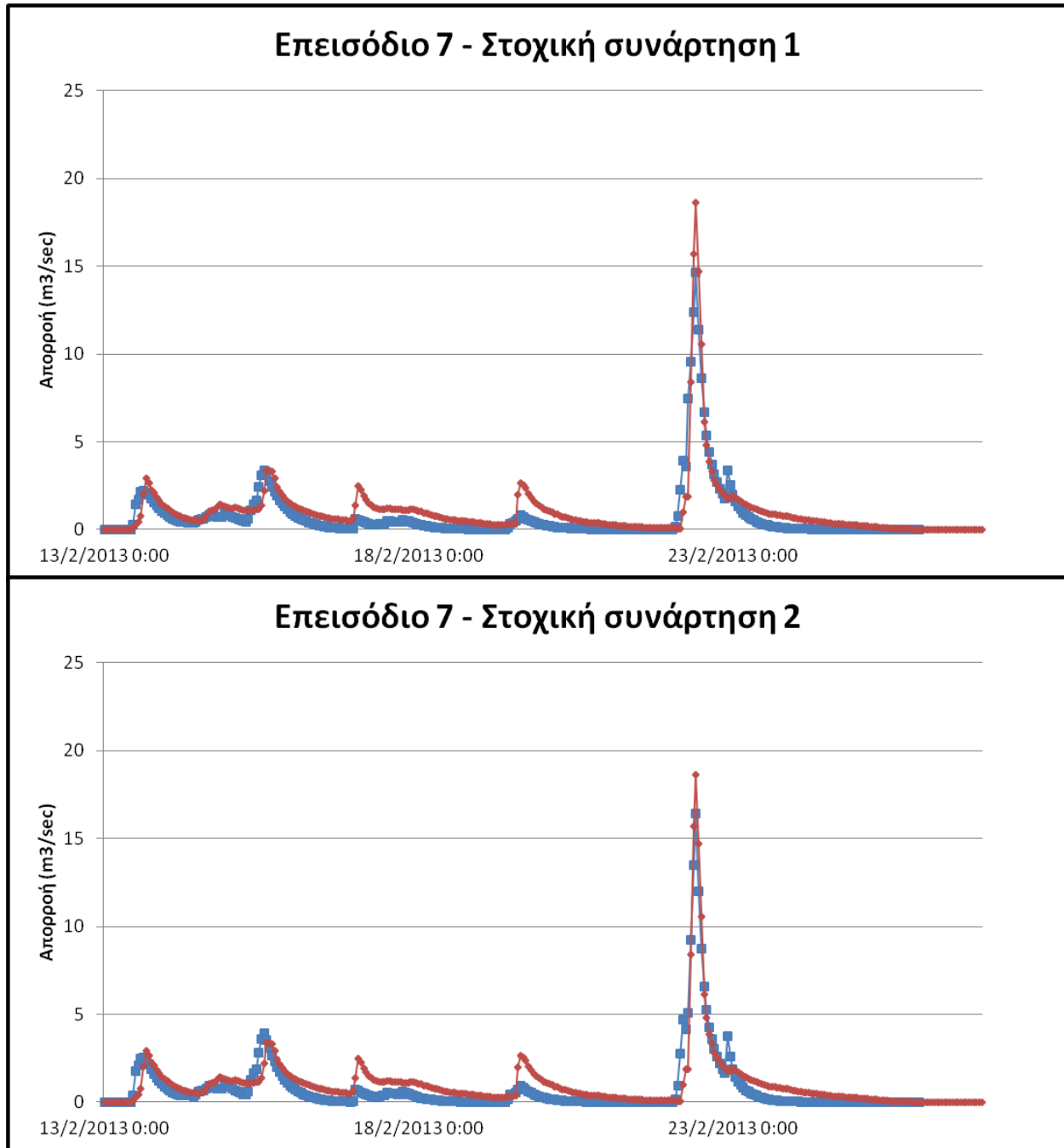
- Στην Οινόη αυξάνονται τόσο η αποτελεσματικότητα υψηλών παροχών όσο και η αποτελεσματικότητα στην περίοδο βαθμονόμησης, ενώ χειροτερεύει σε ένα βαθμό η αντίστοιχη εικόνα στην περίοδο επαλήθευσης.
- Η γενική αύξηση της αποτελεσματικότητας για τις υψηλές παροχές αναμένουμε να οδηγήσει στην μεγαλύτερη προσέγγιση των προσομοιωμένων και παρατηρημένων τιμών των πλημμυρικών επεισοδίων.
- Οι υπόλοιποι δείκτες εξακολουθούν να έχουν καλή εικόνα ενώ επιβεβαιώνεται ξανά και η εμφανώς καλύτερη προσομοίωση των τιμών στην περίοδο βαθμονόμησης σε σχέση με εκείνη στην περίοδο επαλήθευσης.

Για την εποπτική εικόνα της προσομοίωσης με τη νέα στοχική συνάρτηση παρατίθενται τα διαγράμματα των προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών για όλη την περίοδο προσομοίωσης. Επιπλέον, παρατίθεται και το αντίστοιχο διάγραμμα για το επεισόδιο 7 και σε σύγκριση με την προσομοίωση με την προηγούμενη στοχική συνάρτηση. Σημειώνεται εδώ ότι το εν λόγω επεισόδιο ως ένα με τη περισσότερη παρατηρημένη βροχόπτωση και απορροή θα χρησιμοποιηθεί για την πλημμυρική πρόγνωση στα Κεφάλαια 6 και 7.



**Σχήμα 5.14** Οι παρατηρημένες (*observed*) και οι προσομοιωμένες (*simulated*) χρονοσειρές απορροής στη Γύρα Στεφάνης και την Οινόη με βάση τη νέα στοιχική συνάρτηση

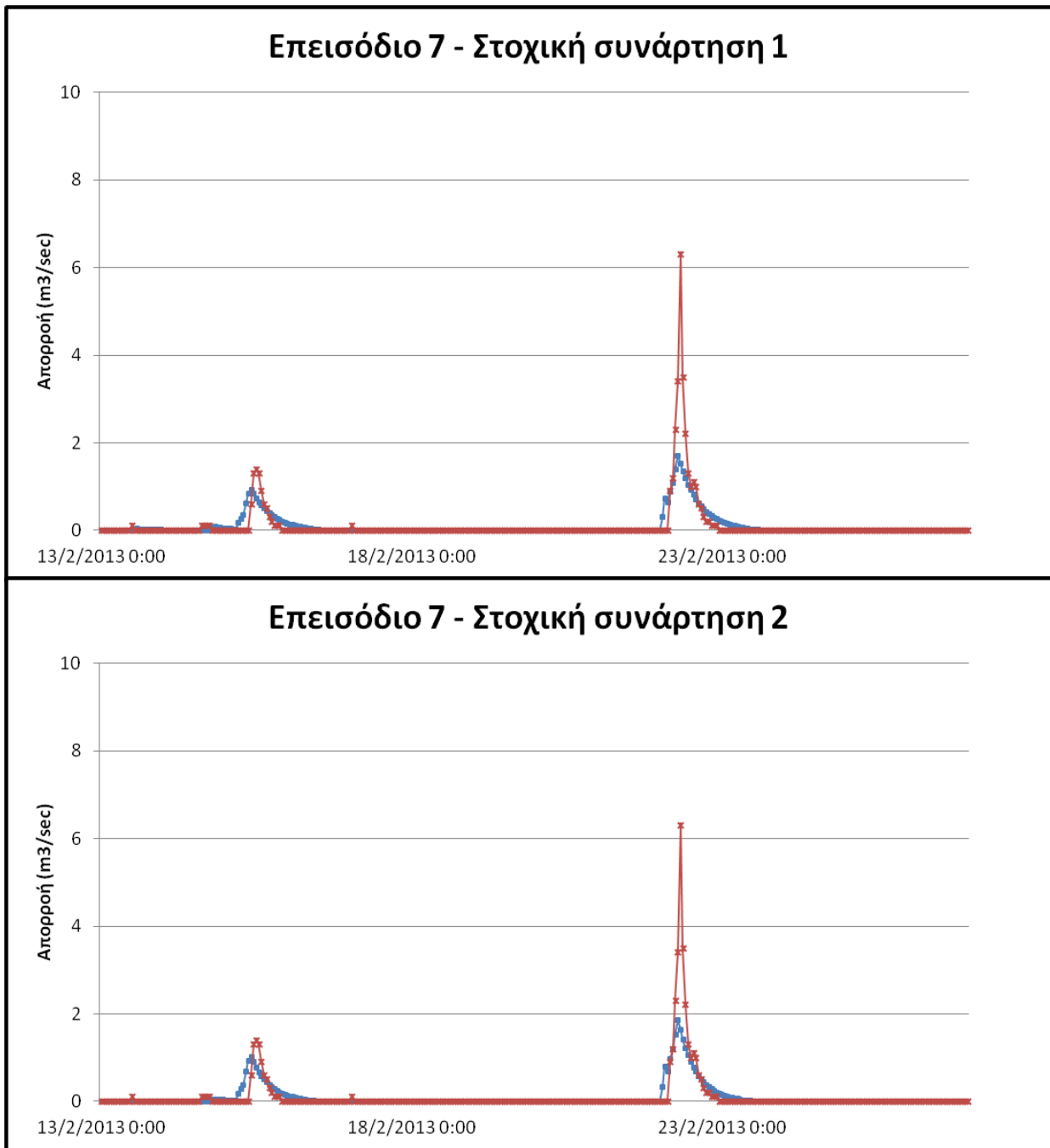
Σε γενικές γραμμές σε σύγκριση με τα αντίστοιχα διαγράμματα για τη στοιχική συνάρτηση 1 (Σχήματα 5.5 και 5.7) παρατηρείται μια γενική αύξηση των αιχμών της απορροής, γεγονός που αιτιολογεί την αύξηση της αποτελεσματικότητας για τις υψηλές παροχές.



**Σχήμα 5.15** Οι παρατηρημένες (μπλε) και οι προσομοιωμένες (κόκκινο) χρονοσειρές απορροής στη Γύρα Στεφάνης κατά τη διάρκεια του επεισοδίου 7

Με βάση το Σχήμα 2.15 παρατηρούμε ότι η μορφή της προσομοιωμένης χρονοσειράς απορροών στη Γύρα Στεφάνης δεν αλλάζει δραματικά, όμως η αιχμή στις 22/02 είναι εμφανώς μεγαλύτερη. Συγκεκριμένα από 14,665 m<sup>3</sup>/sec με τη στοχική συνάρτηση 1, η προσομοιωμένη αιχμή γίνεται 16,441 m<sup>3</sup>/sec, δηλαδή αυξάνεται κατά περίπου 12% ενώ πλέον αντιστοιχεί στο 88,4% της παρατηρημένης παροχής αιχμής.





**Σχήμα 5.16** Οι παρατηρημένες (μπλε) και οι προσομοιωμένες (κόκκινο) χρονοσειρές απορροής στην Οινόη κατά τη διάρκεια του επεισοδίου 7

Η κατάσταση στην Οινόη δε φαίνεται να βελτιώνεται εξίσου με τη νέα στοχική συνάρτηση. Ήδη η προσομοίωση και με τη στοχική συνάρτηση 1 δεν έχει αποδώσει ικανοποιητικά τις παρατηρημένες χρονοσειρές, εφόσον στην Οινόη η απορροή είναι πολύ πιο περιορισμένη από τη Γύρα Στεφάνης και άρα η αποτελεσματική προσομοίωση καθίσταται δυσχερής. Συγκεκριμένα, παρατηρείται μια πολύ μικρή αύξηση της προσομοιωμένης παροχής αιχμής στις 22/02 από 1,699 με τη στοχική συνάρτηση 1 σε 1,847 με τη στοχική συνάρτηση 2,

δηλαδή μια αύξηση περίπου 9%, που όμως αποτελεί μόλις το 30% περίπου της παρατηρημένης απορροής αιχμής.

Όσον αφορά το υδατικό ισοζύγιο, δεν παρατηρούνται ιδιαίτερες τροποποιήσεις. Ο συντελεστής απορροής παραμένει μικρός (2,31%) και οι υπόλοιπες συνιστώσες του επιφανειακού και του υπόγειου συστήματος παραμένουν σχεδόν αμετάβλητες.

Τέλος, αναφορικά με τις παραμέτρους, η εικόνα και εδώ δεν παρουσιάζει ιδιαίτερες διαφοροποιήσεις και ορισμένες φορές οι τιμές είναι ίδιες, καθώς δεν επιλέχθηκε η εκ νέου βελτιστοποίησή τους. Ορισμένες διαφοροποιήσεις που αξίζει να σχολιαστούν είναι το ότι η μέγιστη διηθητικότητα  $i_0$  παρουσιάζει πλέον μεγαλύτερη τιμή για τη ΜΥΑ 1, γεγονός που είναι συμβατό με τη σχηματοποίηση της λεκάνης, οι συντελεστές κατείδουσης  $\mu$  έχουν πλέον περίπου ίδιες τιμές, ενώ ο συντελεστής εκφόρτισης για τη διόδευση στις υπολεκάνες γίνεται 0,379 από 0,485.

Για λόγους σύγκρισης παρατίθενται στο Πίνακα 5.10 οι νέες τιμές των παραμέτρων για το επιφανειακό σύστημα μόνο, καθώς οι υπόλοιπες παράμετροι δεν παρουσιάζουν κάποια αξιολογή μεταβολή στην τιμή τους.

**Πίνακας 5.10** Οι τιμές των παραμέτρων του επιφανειακού συστήματος με τη στοχαστική συνάρτηση 2

Παράμετρος	Name	Low limit	Upper limit	Min. value	Max. value	Actual value
Μέγιστη διηθητικότητα $i_0$ (m)	hru=1	0,000	1,000	0,010	0,100	0,069
Μέγιστη διηθητικότητα $i_0$ (m)	hru=2	0,000	1,000	0,010	0,200	0,120
Χωρητικότητα άνω δεξαμενής $k$ (m)	hru=1	0,000	1,000	0,000	0,700	0,150
Χωρητικότητα άνω δεξαμενής $k$ (m)	hru=2	0,000	1,000	0,000	0,700	0,562
Ποσοστό διήθησης που καταλήγει στην κατώτερη ζώνη $\beta$	hru=1	0,000	1,000	0,100	0,900	0,845
Ποσοστό διήθησης που καταλήγει στην κατώτερη ζώνη $\beta$	hru=2	0,000	1,000	0,100	0,900	0,837
Συντελεστής στείρευσης για υποδερμική ροή $\lambda$	hru=1	0,000	1,000	0,010	0,500	0,408
Συντελεστής στείρευσης για υποδερμική ροή $\lambda$	hru=2	0,000	1,000	0,010	0,200	0,120

Συντελεστής στείρευσης για κατείδυση $\mu$	hru=1	0,000	1,000	0,010	0,100	0,014
Συντελεστής στείρευσης για κατείδυση $\mu$	hru=2	0,000	1,000	0,010	0,100	0,059
Χωρητικότητα κατακράτησης $r$	hru=1	0,000	0,500	0,000	0,050	0,032
Χωρητικότητα κατακράτησης $r$	hru=2	0,000	0,500	0,000	0,050	0,015
Στάθμη παραγωγής υποδερμικής ροής $k_H$ (m)	hru=1	0,000	1,000	0,000	0,300	0,102
Στάθμη παραγωγής υποδερμικής ροής $k_H$ (m)	hru=2	0,000	1,000	0,000	0,300	0,015

Επομένως, εφόσον η προσομοίωση με τη στοχική συνάρτηση 2 αποδίδει καλύτερα τις υψηλές τιμές της απορροής και μάλιστα τις αιχμές για το επεισόδιο 7, στο οποίο θα εξετασθεί η δυνατότητα πλημμυρικής πρόγνωσης, θα χρησιμοποιηθεί το νέο σετ παραμέτρων ως το καταλληλότερο υδρολογικό μοντέλο για την πλημμυρική πρόγνωση.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6:

### ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΠΡΟΓΝΩΣΕΩΝ

#### 6.1 Εισαγωγή. Περιγραφή του επιλεγμένου επεισοδίου

Για την πραγματοποίηση πλημμυρικών προγνώσεων χρησιμοποιούνται μετεωρολογικές προγνώσεις βροχής από το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών σύμφωνα με την παράγραφο 3.2.2. Οι προγνώσεις αυτές αναφέρονται σε ένα από τα οκτώ καταγεγραμμένα επεισόδια βροχής στη λεκάνη του Σαρανταπόταμου, από το Δίκτυο Δεδομένων ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ (<http://deucalionproject.gr>). Συγκεκριμένα, αφορούν το επεισόδιο βροχής με αύξοντα αριθμό 7 από 13/02/2013 έως και 26/02/2013 και αναλύθηκε με δεδομένα και από τους δύο υδρομετρικούς σταθμούς (Γύρα Στεφάνης, Οινόη). Τα χαρακτηριστικά του εν λόγω επεισοδίου φαίνονται στο Πίνακα 6.1<sup>1</sup>.

**Πίνακας 6.1** Η ταυτότητα του επεισοδίου

<b>Έναρξη</b>	13/2/2013 5:30
<b>Λήξη</b>	26/2/2013 5:30
<b>Συνολική Έκταση (km<sup>2</sup>)</b>	144,6
<b>Συνολική Βροχόπτωση (mm)</b>	129,26
<b>Παρατηρημένη Απορροή (mm)</b>	17,37

---

<sup>1</sup> Η έκταση που αναφέρεται στον Πίνακα 6.1 είναι η συνολική έκταση της λεκάνης του Σαρανταπόταμου. Επιπλέον, τα στοιχεία για τη βροχόπτωση και την απορροή αφορούν τις μετρήσεις και τους υπολογισμούς στην έξοδο της λεκάνης στη Γύρα Στεφάνης.

<b>Συντελεστής Απορροής</b>	0,134
<b>Μέγιστη Απορροή (m<sup>3</sup>/sec)</b>	33,136
<b>Χρονική Στιγμή Μεγίστου</b>	22/2/2013 9:15
<b>Μέγιστη Στάθμη (m)</b>	1,464

Στη Γύρα Στεφάνης, η βροχή (συνολικού ύψους 129.3 mm) πέφτει σε πέντε χρονικές υποπεριόδους: από 13/2 7:30 έως 13/2 14:15, από 14/2 3:15 έως 15/2 12:15, από 16/2 19:30 έως 17/2 14:00, από 19/2 6:00 έως 19/2 12:30 και από 21/2 11:45 έως 22/2 20:00. Οι μέγιστες τιμές αυτών καταγράφονται στις 13/02 09:00 (μέγιστη ένταση 10.26 mm/h), στις 15/02 07:45 (4.45 mm/h), στις 16/02 20:15 (4.82 mm/h), στις 19/02 11:15 (3.00 mm/h) και στις 22/02 1:15 (13.53 mm/h). Το προφίλ της απορροής ακολουθεί το προφίλ της βροχής χωρίς ωστόσο να προλαβαίνει να μηδενιστεί κάποια χρονική στιγμή και οι αιχμές της απορροής είναι οι εξής: στις 13/02 16:00 6.27 m<sup>3</sup>/s, στις 15/02 15:00 7.34 m<sup>3</sup>/s, στις 17/02 00:45 5.41 m<sup>3</sup>/s, στις 19/02 14:45 5.44 m<sup>3</sup>/s και στις 22/02 09:45 32.56 m<sup>3</sup>/s. Η εκφόρτιση της παροχής είναι αρκετά αργή και η διάρκειά της (μεγαλύτερη των 12 ωρών) ξεπερνά κατά πολύ το χρόνο συγκέντρωσης<sup>2</sup>. Η αναπαράσταση του επεισοδίου για τη Γύρα Στεφάνης φαίνεται στο Σχήμα 6.1<sup>3</sup>, ενώ στην Εικόνα 6.1 φαίνεται η θέση στη Γύρα Στεφάνης την ημέρα της μέγιστης απορροής του επεισοδίου στις 22/02.

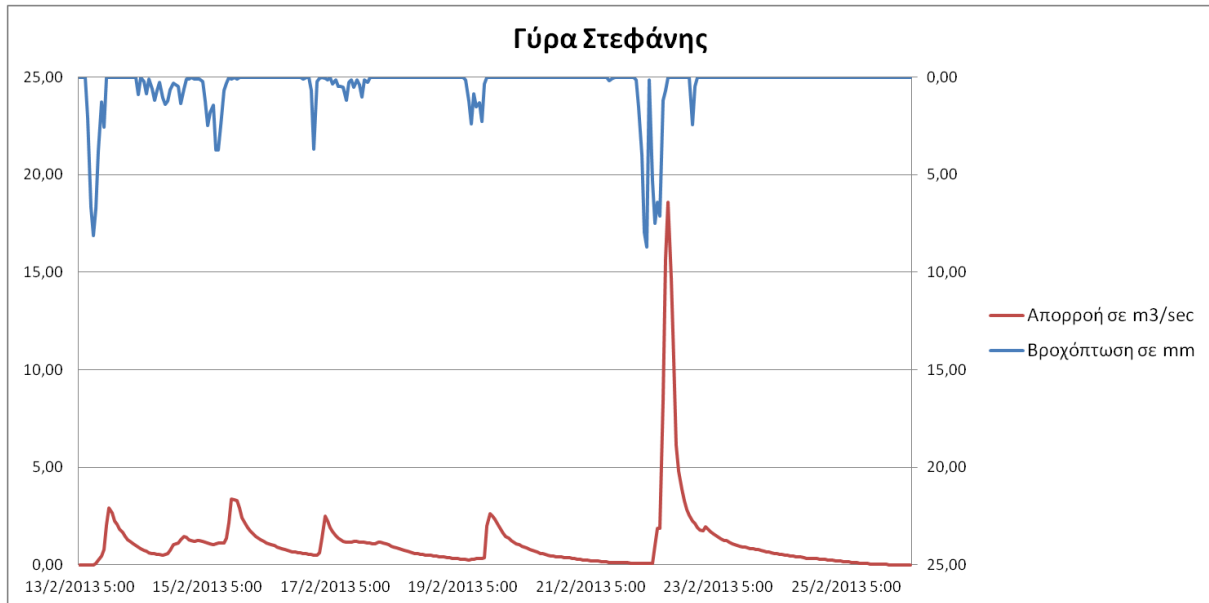
<sup>2</sup> Ο χρόνος συγκέντρωσης της λεκάνης του Σαρανταπόταμου εκτιμάται με βάση την εμπειρική σχέση Giandotti ως εξής:

$$t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1,5L}{0,8\sqrt{\Delta z}}$$

όπου  $t_c$  ο χρόνος συγκέντρωσης (h),  $A$  η επιφάνεια της λεκάνης (km<sup>2</sup>),  $L$  το μήκος της κύριας μισογάγκειας (km) και  $\Delta z$  η υψομετρική διαφορά του μέσου υψόμετρου της λεκάνης από το υψόμετρο της εξόδου της (m). Τα χαρακτηριστικά που απαιτούνται για τον υπολογισμό του  $t_c$  είναι  $A = 144,6$  km<sup>2</sup>,  $L = 30,7$  km και  $\Delta z = 283,8$  m (Μιχαηλίδη, 2013). Έτσι ο χρόνος συγκέντρωσης προκύπτει ίσος με  $t_c = 6,4$  h, που είναι σχεδόν υποδιπλάσιος από το χρόνο εκφόρτισης στο παρόν επεισόδιο.

<sup>3</sup> Η βροχόπτωση στη συνολική λεκάνη του Σαρανταπόταμου η οποία απεικονίζεται στο Σχήμα 6.1 υπολογίζεται με βάση τη μέθοδο των πολυγώνων Thiessen με συντελεστές βαρύτητας για τους μετεωρολογικούς σταθμούς σύμφωνα με τη σχέση (Μιχαηλίδη, 2013):

$$h^* = 0,5 \cdot \text{Βίλια} + 0,4 \cdot \text{Πράσινο} + 0,1 \cdot \text{Μάνδρα}$$



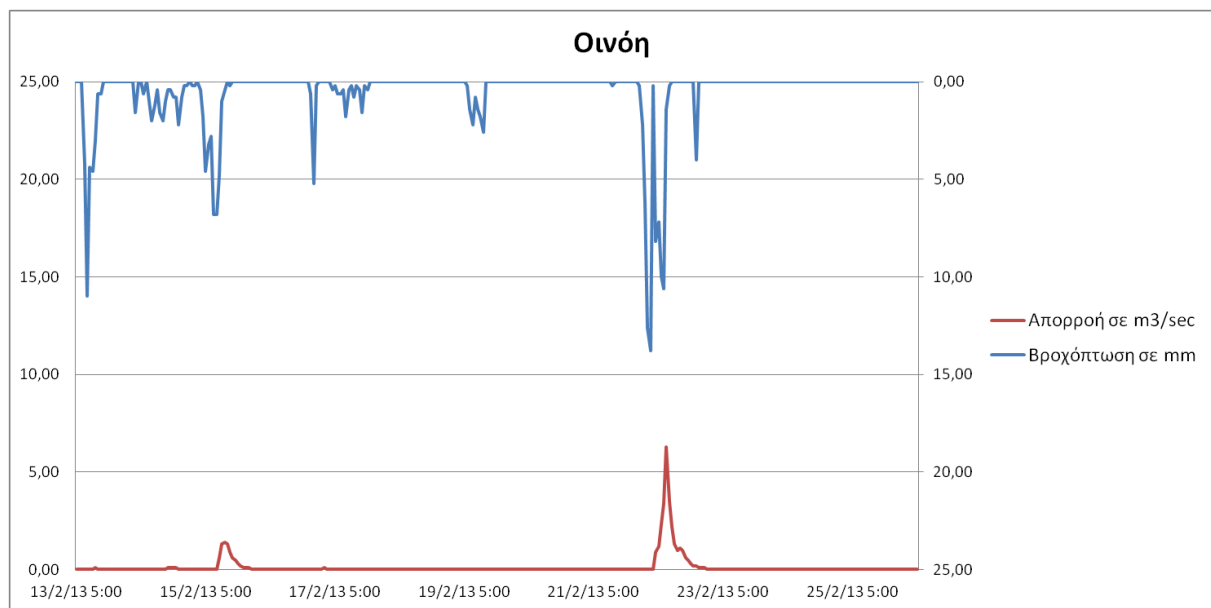
**Σχήμα 6.1** Το επεισόδιο 13/2/2013-26/2/2013 στη Γύρα Στεφάνης



**Εικόνα 6.1** Η θέση στη Γύρα Στεφάνης στις 22/02, την ημέρα μέγιστης απορροής του επεισοδίου 7. Στην εικόνα φαίνεται η αρκετά ανυψωμένη στάθμη του νερού σε σύγκριση και με την πλήρη διατομή του οχετού στην Εικόνα 3.2.

Στην Οινόη, η βροχή συνολικού ύψους 180.4 mm πέφτει σε πέντε χρονικές υποπεριόδους: από 13/2 7:30 έως 13/2 13:45, από 14/2 2:15 έως 15/2 11:30, από 16/2 19:45 έως 17/2 16:30, από 19/2 5:45 έως 19/2 12:00 και από 21/2 21:30 έως 22/2 8:15. Οι μέγιστες τιμές αυτών καταγράφονται στις 13/02 09:00 (μέγιστη ένταση 14.0 mm/h), στις 15/02 07:45 (8.0 mm/h),

στις 16/02 20:15 (7.2 mm/h), στις 19/02 10:30 (4.4 mm/h) και στις 22/02 1:15 (25.2 mm/h). Η απορροή ξεκινά απότομα 2 μέρες 1 ώρα και 30 λεπτά μετά την έναρξη της βροχής, φτάνει την τιμή 1.41 m<sup>3</sup>/s στις 15/02 12:00 και στη συνέχεια μειώνεται σταδιακά και μηδενίζεται (15/02 22:30). Έπειτα, συνεχίζει με σχεδόν μηδενικές τιμές, παρά τα καταγεγραμμένα επεισόδια βροχής, μέχρι και τις 22/02 03:30 όπου σημειώνεται το 2ο πλημμυρικό επεισόδιο, το οποίο είναι πολύ εντονότερο. Σε αυτό, φτάνει την τιμή των 6.68 m<sup>3</sup>/s στις 22/02 07:45 και στη συνέχεια μειώνεται μέχρι το μηδενισμό της στις 23/02 23:45. Η αναπαράσταση του επεισοδίου για την Οινόη φαίνεται στο Σχήμα 6.2.



**Σχήμα 6.2** Το επεισόδιο 13/2/2013-26/2/2013 στην Οινόη

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας και τη σύγκριση με τις μετεωρολογικές προγνώσεις θα χρησιμοποιηθεί ένα χρονικό διάστημα το οποίο θα περιλαμβάνει σχεδόν όλη την πέμπτη χρονική υποπερίοδο και συγκεκριμένα το χρονικό διάστημα από 20/2/2013 00:00 έως 22/2/2013 12:00, όπου παρατηρείται και το μεγαλύτερο μέρος της απορροής.

## 6.2 Σημειακή ανάλυση των προγνώσεων βροχόπτωσης με βάση τους μετεωρολογικούς σταθμούς

### 6.2.1 Εισαγωγή

Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 3, οι μετεωρολογικές προγνώσεις που διαθέτουμε αφορούν διακριτά σημεία (*grid points*) της ευρύτερης περιοχής της Αττικής, με ωριαία πρόγνωση της βροχόπτωσης από τις 20/2/2013 0000 UTC έως και 22/2/2013 1200 UTC,

δηλαδή εντός του μεγαλύτερου διαστήματος της πέμπτης χρονικής υποπεριόδου του επιλεγμένου επεισοδίου. Οι προγνώσεις (προσομοιώσεις με βάση το μοντέλο WRF, βλ. 3.2.2) διατίθενται ανά έξι ώρες από τις 20/2/2013 00:00 έως και 21/2/2013 18:00 και συμβολίζονται για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας με βάση τη χρονική στιγμή διεξαγωγής τους ως εξής:

- 200213\_00 για την πρόγνωση που διεξάγεται στις 20/2/2013 0000 UTC
- 200213\_06 για την πρόγνωση που διεξάγεται στις 20/2/2013 0060 UTC
- 200213\_12 για την πρόγνωση που διεξάγεται στις 20/2/2013 1200 UTC
- 200213\_18 για την πρόγνωση που διεξάγεται στις 20/2/2013 1800 UTC
- 210213\_00 για την πρόγνωση που διεξάγεται στις 21/2/2013 0000 UTC
- 210213\_06 για την πρόγνωση που διεξάγεται στις 21/2/2013 0060 UTC
- 210213\_12 για την πρόγνωση που διεξάγεται στις 21/2/2013 1200 UTC
- 210213\_18 για την πρόγνωση που διεξάγεται στις 21/2/2013 1800 UTC

Επιπλέον, διαθέτουμε τις παρατηρημένες χρονοσειρές βροχόπτωσης για το ίδιο χρονικό διάστημα από τους μετεωρολογικούς σταθμούς στα Βίλια και τη Μάνδρα. Ο μετεωρολογικός σταθμός στο Πράσινο δε διαθέτει καθόλου μετρήσεις βροχόπτωσης για το χρονικό διάστημα του επεισοδίου, γεγονός που αποδίδεται σε τεχνικό σφάλμα. Εφόσον όμως η μοντελοποίηση της υδρολογικής λεκάνης έγινε με βάση και τα δεδομένα του σταθμού στο Πράσινο, για την πραγματοποίηση της πλημμυρικής πρόγνωσης στο εν λόγω επεισόδιο βροχής είναι απαραίτητη η εισαγωγή δεδομένων και από αυτόν το σταθμό. Εν προκειμένω, το τμήμα της χρονοσειράς παρατηρημένης βροχόπτωσης στο Πράσινο χωρίς δεδομένα, συμπληρώνεται με βάση τα βροχομετρικά δεδομένα σε Βίλια και Μάνδρα μέσω κατάλληλης εφαρμογής του ΥΔΡΟΓΝΩΜΩΝΑ.

Τα *grid points*, όπως είναι λογικό, δε συμπίπτουν απόλυτα με τις θέσεις των μετεωρολογικών σταθμών. Έτσι, ως δεδομένα πρόγνωσης βροχής ανά σταθμό θα χρησιμοποιηθούν οι προγνώσεις των κοντινότερων *grid points* σε κάθε σταθμό. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται 6 γειτονικά σημεία στα Βίλια και το Πράσινο και 4 γειτονικά σημεία στη Μάνδρα. Οι συντεταγμένες των χρησιμοποιούμενων σημείων σε WGS84 αλλά και των σταθμών φαίνονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 6.2 και οι θέσεις τους στο Σχήμα 6.3.

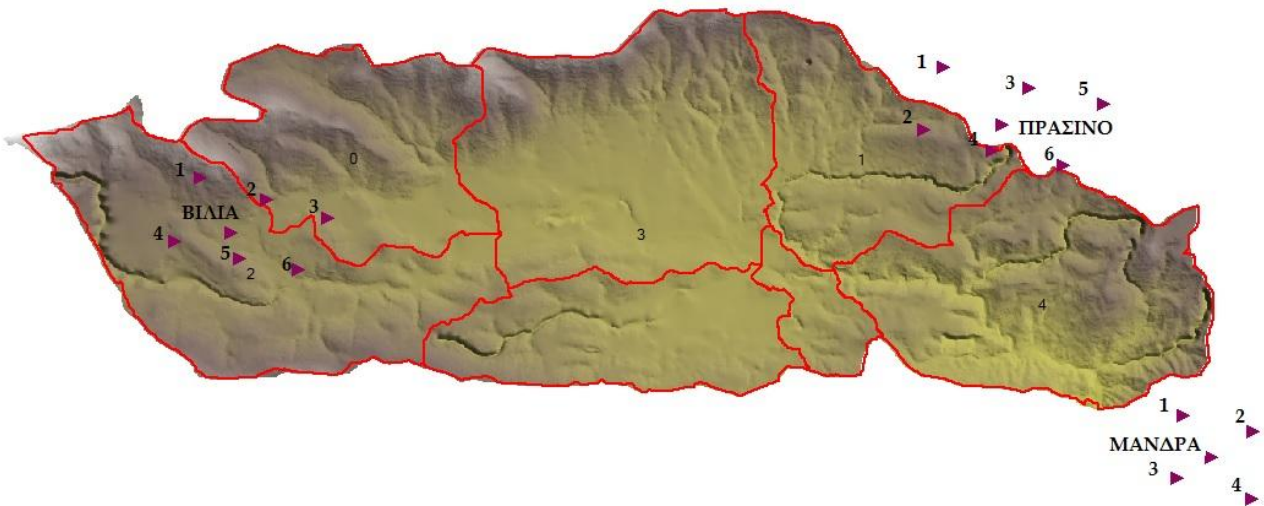
Η πρόγνωση βροχόπτωσης με βάση έναν μετεωρολογικό σταθμό θα υπολογιστεί ως μέσος όρος των τιμών των γειτονικών διακριτών σημείων του (6.2.2), με βελτιστοποίηση της συμμετοχής των γειτονικών του διακριτών σημείων (6.2.3) καθώς και με υπολογισμό του



μέσου όρου μιας πρόγνωσης (με βάση τις προηγούμενες μεθόδους) με όλες τις προηγούμενές της (6.2.4).

**Πίνακας 6.2** Οι γεωγραφικές συντεταγμένες μετεωρολογικών σταθμών (με α/α 0) και των χρησιμοποιούμενων γειτονικών τους σημείων στο σύστημα WGS84

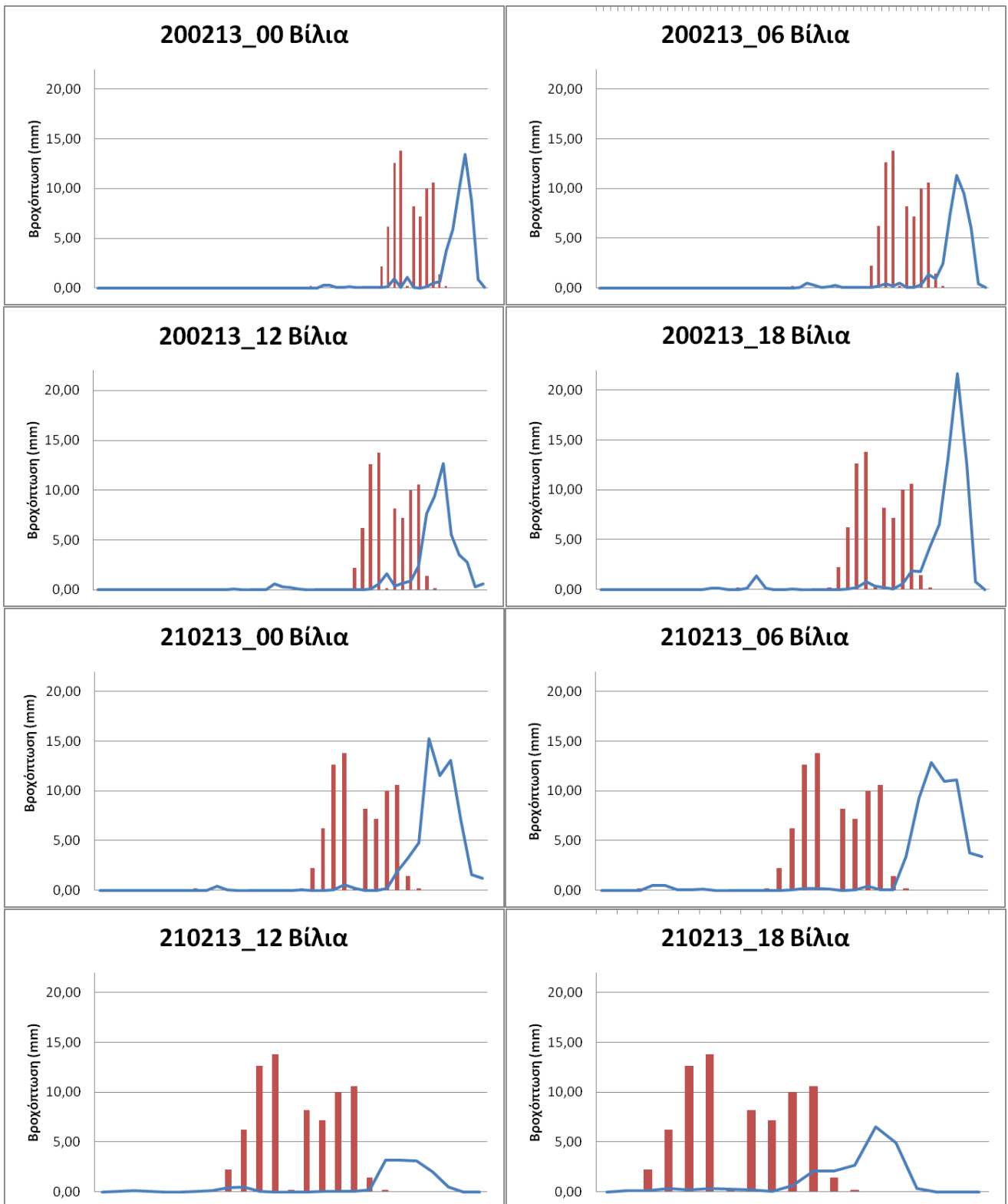
Βίλια			Πράσινο			Μάνδρα		
α/α	φ	λ	α/α	φ	λ	α/α	φ	λ
0	38,165	23,399	0	39,186	23,513	0	38,123	23,564
1	38,172	23,302	1	38,185	23,375	1	38,134	23,557
2	38,154	23,300	2	38,167	23,372	2	38,115	23,555
3	38,170	23,326	3	38,163	23,398	3	38,132	23,58
4	38,152	23,323	4	38,165	23,396	4	38,114	23,578
5	38,150	23,347	5	38,181	23,421			
6	38,168	23,349	6	38,163	23,419			



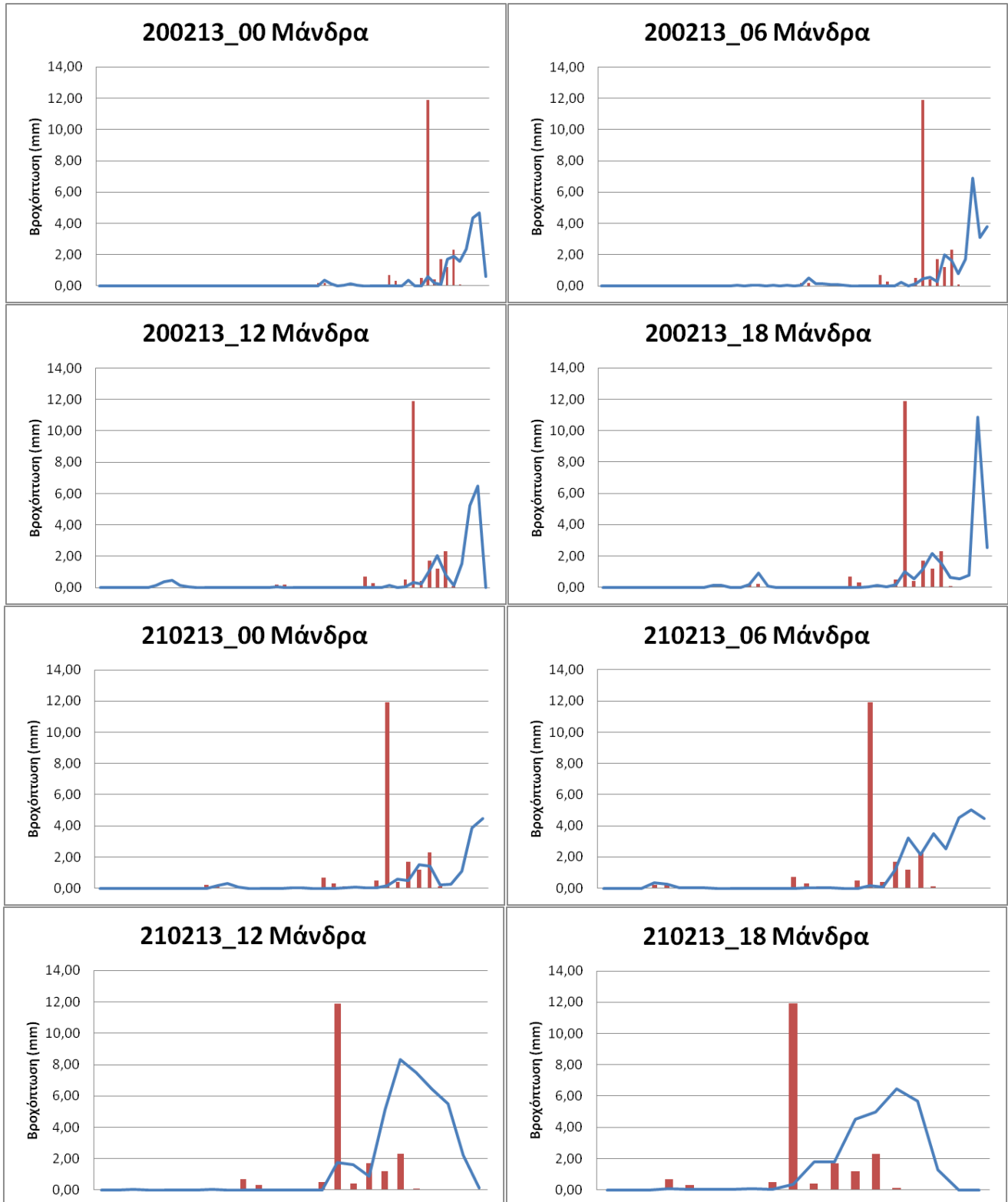
**Σχήμα 6.3** Οι θέσεις των λαμβανόμενων γειτονικών διακριτών σημείων στους μετεωρολογικούς σταθμούς

### 6.2.2 Ανάλυση με μέσο όρο των γειτονικών διακριτών σημείων

Αρχικά επιλέγεται να λογιστούν ως προγνώσεις βροχόπτωσης για τα σημεία των τριών μετεωρολογικών σταθμών οι μέσοι όροι των γειτονικών διακριτών του σημείων, όπως αυτά απεικονίζονται στον Πίνακα 6.2. Στα Σχήματα 6.4 και 6.5 απεικονίζεται η εξέλιξη της πρόγνωσης με βάση αυτή τη μεθοδολογία τόσο για τα Βίλια όσο και για τη Μάνδρα (με μπλε συνεχή γραμμή) σε σύγκριση με τις αντίστοιχες παρατηρημένες τιμές (με κόκκινες ράβδους). Τα αποτελέσματα για το Πράσινο δεν παρατίθενται εφόσον όπως επισημάνθηκε δεν υπάρχουν παρατηρημένες τιμές βροχόπτωσης αλλά αυτές έχουν συμπληρωθεί.



**Σχήμα 6.4** Η εξέλιξη της πρόγνωσης στο σταθμό Βίλια με ΜΟ των γειτονικών διακριτών σημείων. Με κόκκινο χρώμα και ραβδώσεις απεικονίζεται η παρατηρημένη βροχόπτωση ενώ με συνεχή μπλε γραμμή η πρόγνωση με βάση το μέσο όρο των προγνώσεων των γειτονικών διακριτών σημείων

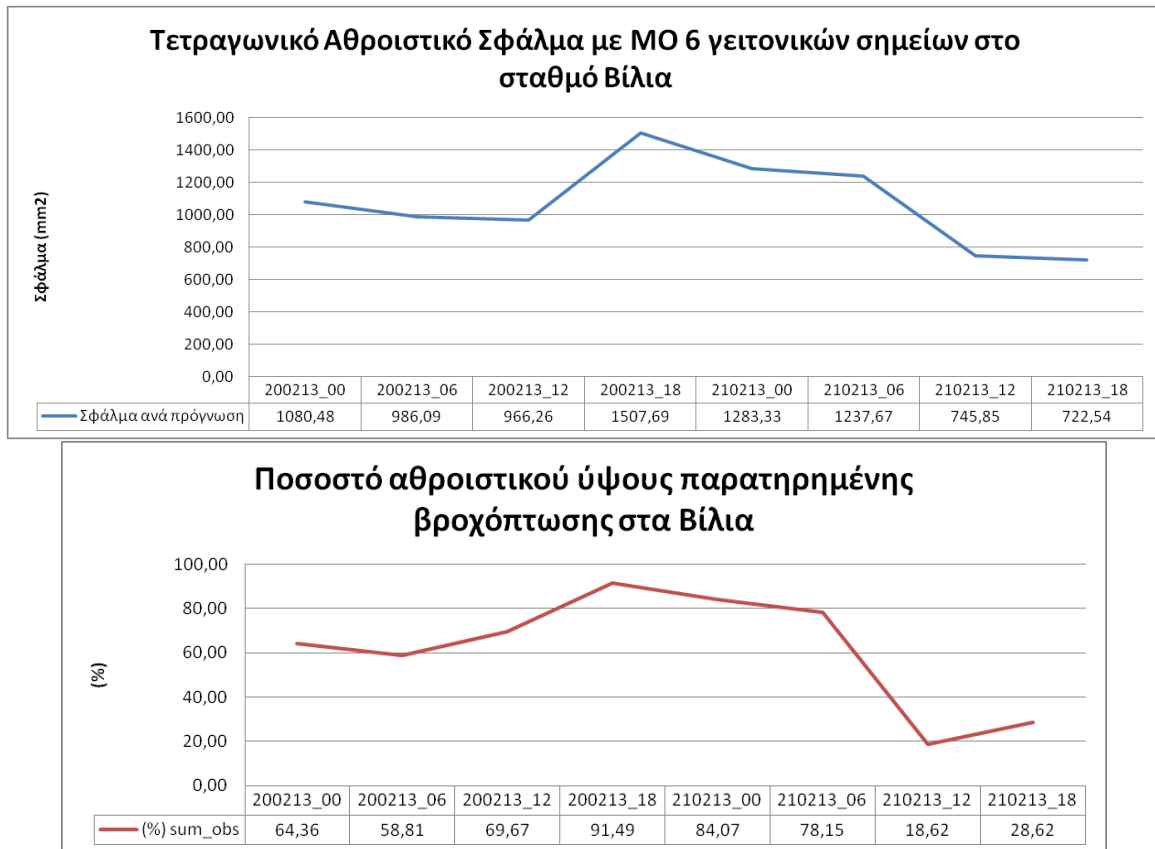


**Σχήμα 6.5** Η εξέλιξη της πρόγνωσης στο σταθμό Μάνδρα με ΜΟ των γειτονικών διακριτών σημείων. Με κόκκινο χρώμα και ραβδώσεις απεικονίζεται η παρατηρημένη βροχόπτωση ενώ με συνεχή μπλε γραμμή η πρόγνωση με βάση το μέσο όρο των προγνώσεων των γειτονικών διακριτών σημείων

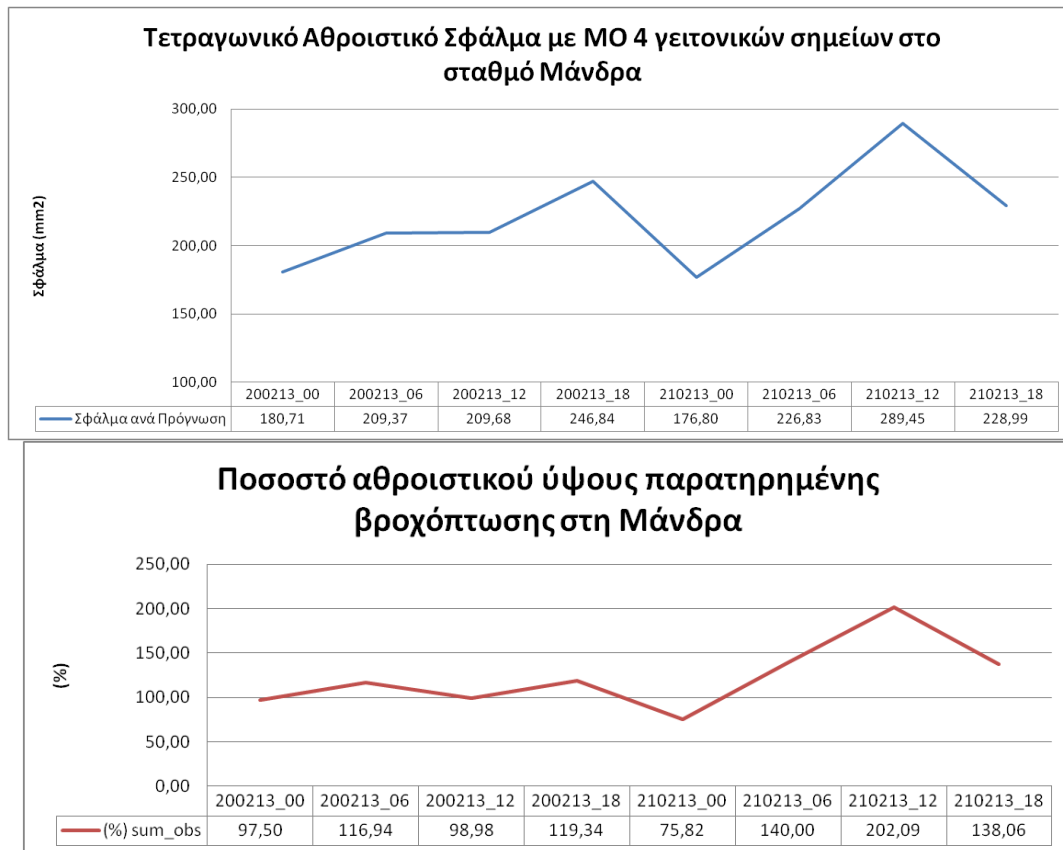
Από τα παραπάνω διαδοχικά διαγράμματα μπορούμε να σχολιάσουμε τα εξής:

- Στα Βίλια εμφανίζεται μία σημαντική χρονική υστέρηση της πρόγνωσης σε σχέση με την παρατηρημένη βροχόπτωση, περίπου 8 ωρών μετά. Η αιχμή της παρατηρημένης βροχόπτωσης προσεγγίζεται από τις αιχμές των προγνώσεων των 6 πρώτων προσομοιώσεων, ενώ παρόλο που η παρατηρημένη πρόγνωση εμφανίζει 2 διαδοχικές αιχμές με αντίστοιχους διαδοχικούς ανοδικούς και καθοδικούς κλάδους, η μορφή όλων των προγνώσεων έχει μόνον μία αιχμή.
- Στη Μάνδρα εμφανίζεται επίσης μια αντίστοιχη κυμαινόμενη ανά προσομοίωση χρονική υστέρηση αλλά πάλι της τάξης των 8 ωρών. Η αιχμή της παρατηρημένης πρόγνωσης υπερβαίνει κατά πολύ σε ορισμένες προσομοιώσεις την αντίστοιχη των προγνώσεων.

Τα παραπάνω ποσοτικοποιούνται κατά κάποιο τρόπο με τα παρακάτω διαγράμματα τα οποία αναπαριστούν το αθροιστικό τετραγωνικό σφάλμα της ωριαίας πρόγνωσης ανά προσομοίωση και για τους δύο σταθμούς και τι ποσοστό του παρατηρημένου αθροιστικού ύψους βροχόπτωσης αποτελούν τα υπολογισμένα αθροιστικά ύψη βροχόπτωσης ανά προσομοίωση.



**Σχήμα 6.6** Σφάλματα πρόγνωσης στο μετεωρολογικό σταθμό Βίλια με MO των γειτονικών σημείων



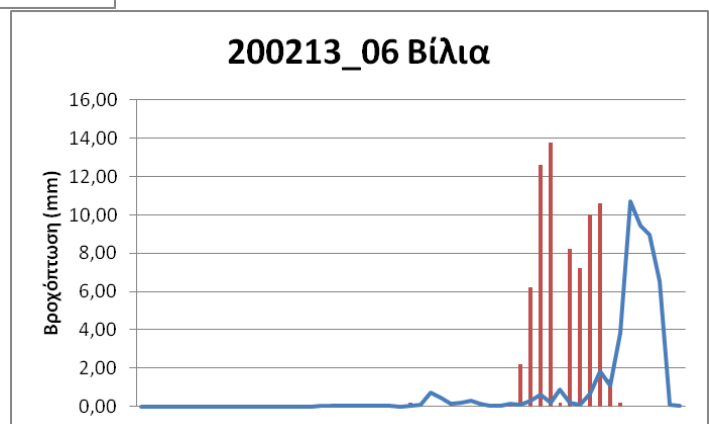
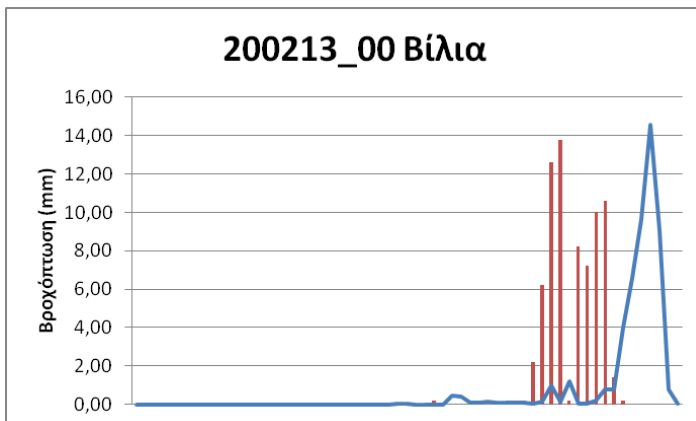
**Σχήμα 6.7** Σφάλματα πρόγνωσης στο μετεωρολογικό σταθμό Μάνδρα με ΜΟ των γειτονικών σημείων

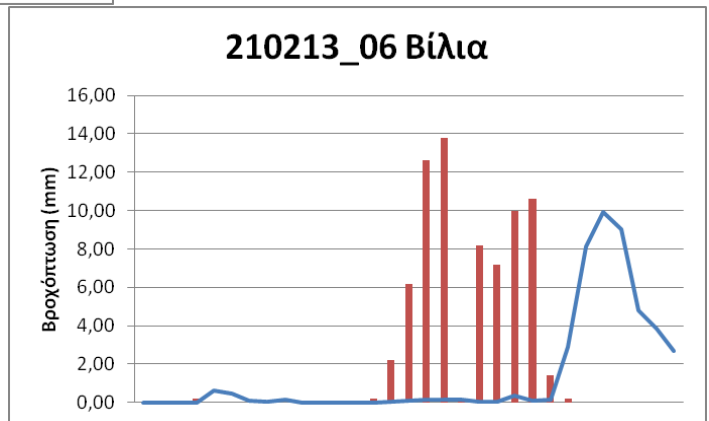
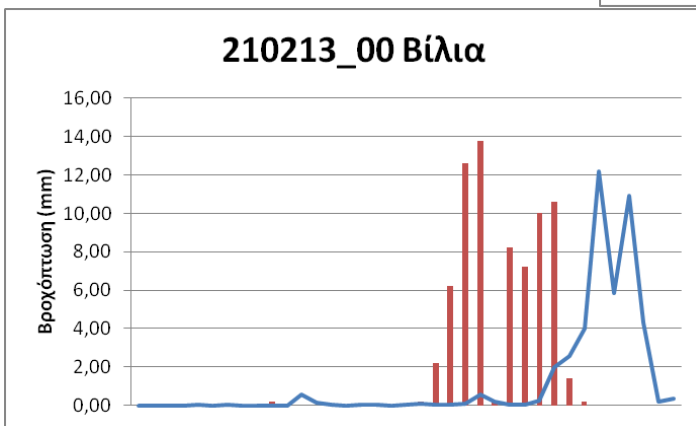
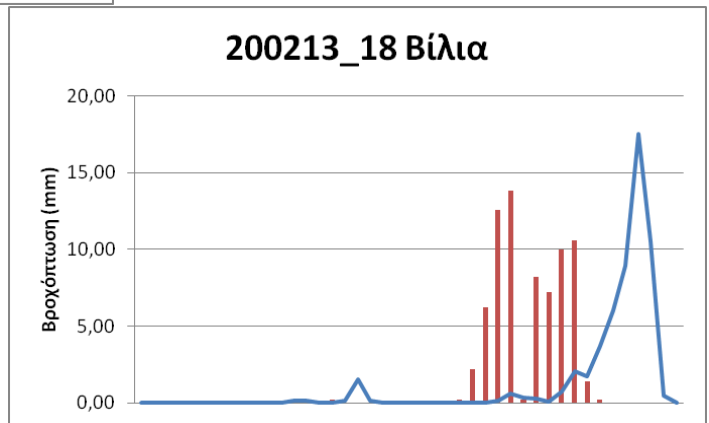
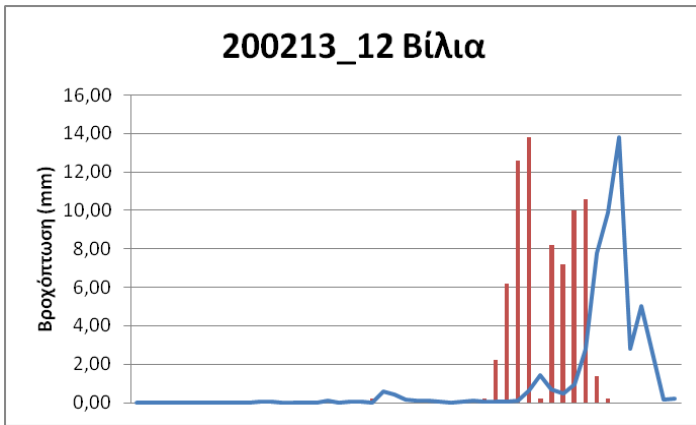
Με βάση τα Σχήματα 6.6 και 6.7 οφείλουμε να σημειώσουμε τα εξής:

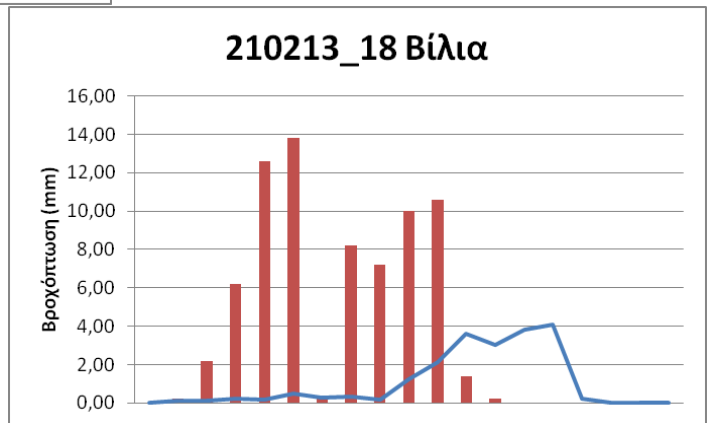
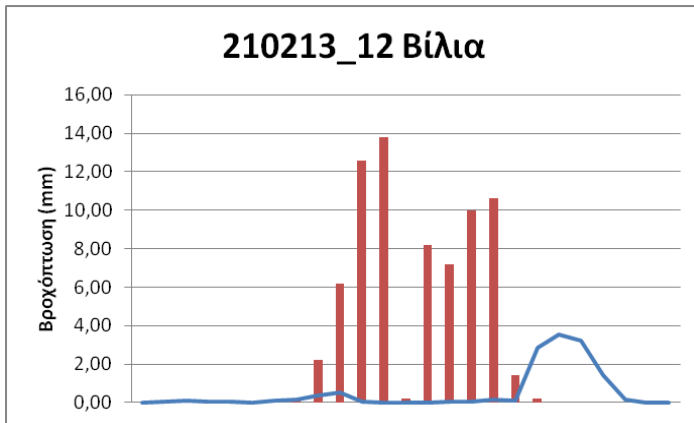
- Στα Βίλια η καλύτερη προσομοίωση όσον αφορά το τετραγωνικό αθροιστικό σφάλμα της ωριαίας πρόγνωσης, δηλαδή το πόσο αποτελεσματικά υπολογίζεται η βροχόπτωση ανά καθόλη τη διάρκεια του επεισοδίου είναι εκείνη που διεξάγεται δύο ημέρες πριν το επεισόδιο δηλαδή η 200213\_12. Όσον αφορά το ποσοστό του παρατηρημένου ύψους βροχόπτωσης του επεισοδίου, η καλύτερη προσομοίωση είναι η επόμενη δηλαδή η 200213\_18, όπου το ύψος βροχόπτωσης της πρόγνωσης φτάνει στο 91,5% του παρατηρημένου. Επιπλέον, φαίνεται ότι οι δύο τελευταίες προσομοιώσεις (210213\_12 και 210213\_18) αστοχούν εντελώς από το να προγνώσουν την επικείμενη βροχόπτωση αφού τα αθροιστικά ύψη που προβλέπουν είναι πολύ χαμηλότερα του παρατηρημένου.
- Στη Μάνδρα η καλύτερη προσομοίωση όσον αφορά το τετραγωνικό αθροιστικό σφάλμα της ωριαίας πρόγνωσης είναι η 210213\_00. Όσον αφορά το ποσοστό του παρατηρημένου ύψους βροχόπτωσης του επεισοδίου, οι καλύτερες προσομοιώσεις είναι οι 200213\_00 και 200213\_12, όπου το ύψος βροχόπτωσης της πρόγνωσης φτάνει στο 97,5% και 99% αντίστοιχα του παρατηρημένου. Στις τρεις τελευταίες προσομοιώσεις το αθροιστικό ύψος βροχόπτωσης υπερεκτιμάται σημαντικά.

### 6.2.3 Ανάλυση με βελτιστοποίηση της συμμετοχής των γειτονικών διακριτών σημείων

Οι προγνώσεις βροχόπτωσης για τους μετεωρολογικούς σταθμούς εκτιμώνται στη συνέχεια με βελτιστοποίηση της συμμετοχής στην εκτιμώμενη πρόγνωση των γειτονικών τους διακριτών σημείων όπως φαίνονται στον Πίνακα 6.2. Η βελτιστοποίηση γίνεται με κριτήριο την ελαχιστοποίηση του αθροίσματος του αθροιστικού τετραγωνικού σφάλματος και των 8 προσομοιώσεων ώστε να προκύψουν οι κατάλληλοι συντελεστές ανά σημείο που θα βελτιώσουν τις προγνώσεις όλων των προσομοιώσεων. Η εν λόγω διαδικασία γίνεται με χρήση του *Microsoft Excel Solver*. Οι συντελεστές ανά σημείο όπως προέκυψαν και για τους τρεις σταθμούς φαίνονται στον Πίνακα 6.3, ενώ στα Σχήματα 6.8 και 6.9 παρατίθεται η εξέλιξη της πρόγνωσης για τα Βίλια και για τη Μάνδρα (με μπλε συνεχή γραμμή) σε σύγκριση με τις αντίστοιχες παρατηρημένες τιμές (με κόκκινες ραβδούς). Τα αντίστοιχα διαγράμματα για το Πράσινο δε παρατίθενται επίσης, για τους λόγους που εξηγήθηκαν στην παράγραφο 6.2.2.

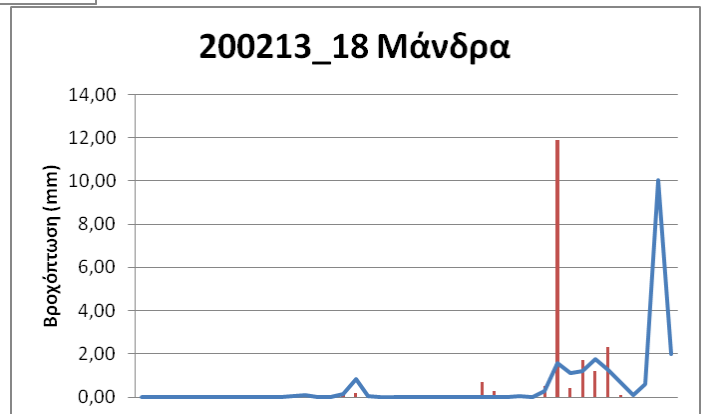
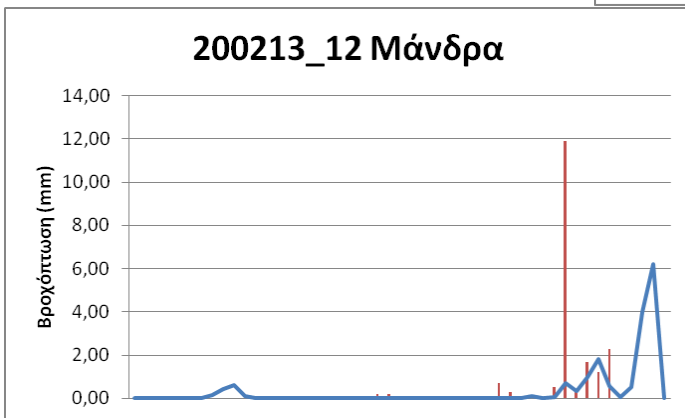
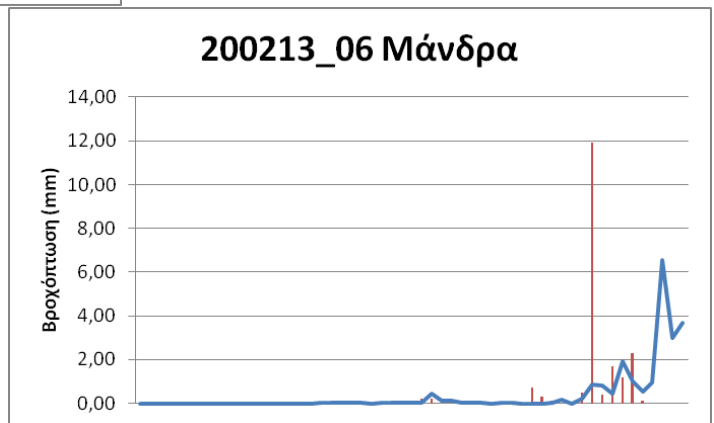
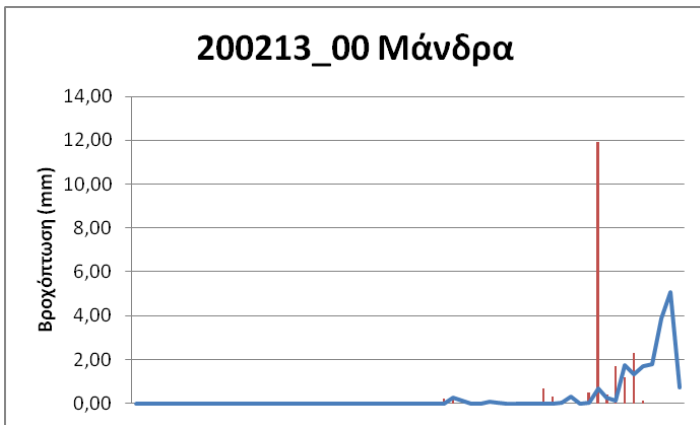


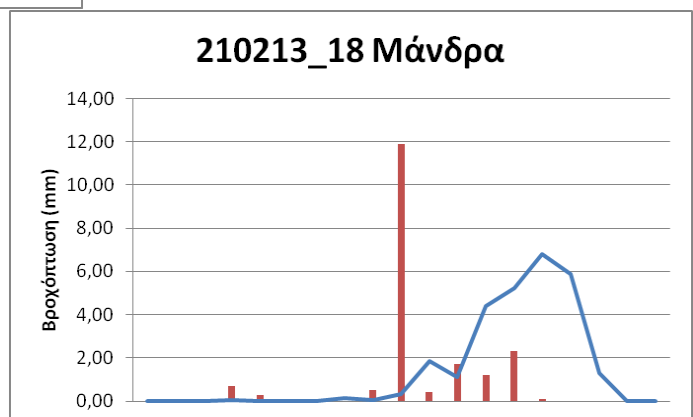
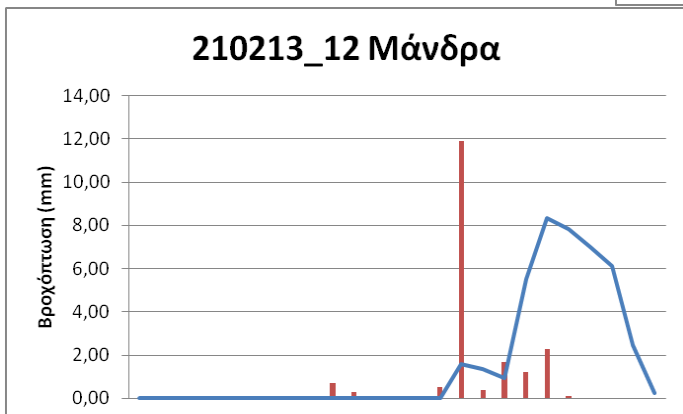
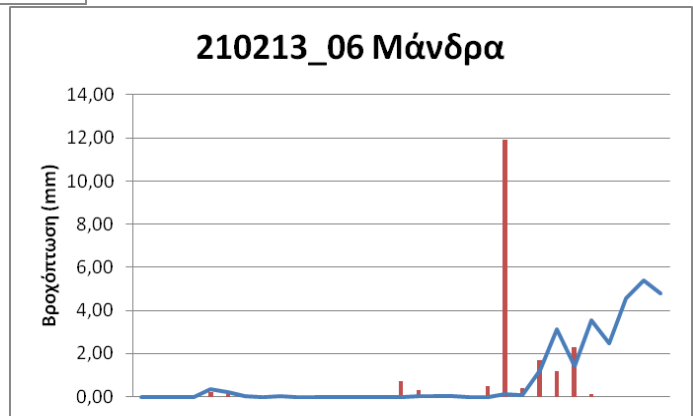
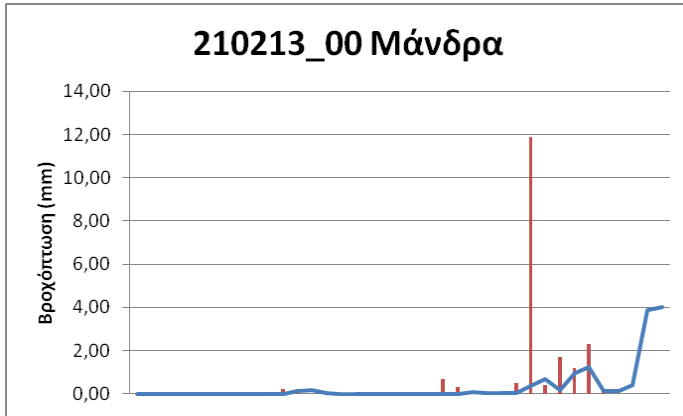




**Σχήμα 6.8** Η εξέλιξη της πρόγνωσης στο σταθμό Βίλια με βελτιστοποίηση της συμμετοχής των γειτονικών διακριτών σημείων. Με κόκκινο χρώμα και ραβδώσεις απεικονίζεται η παρατηρημένη βροχόπτωση ενώ με συνεχή μπλε γραμμή η πρόγνωση με βάση το μέσο όρο των προγνώσεων των γειτονικών διακριτών σημείων







**Σχήμα 6.9** Η εξέλιξη της πρόγνωσης στο σταθμό Μάνδρα με βελτιστοποίηση της συμμετοχής των γειτονικών διακριτών σημείων. Με κόκκινο χρώμα και ραβδώσεις απεικονίζεται η παρατηρημένη βροχόπτωση ενώ με συνεχή μπλε γραμμή η πρόγνωση με βάση το μέσο όρο των προγνώσεων των γειτονικών διακριτών σημείων

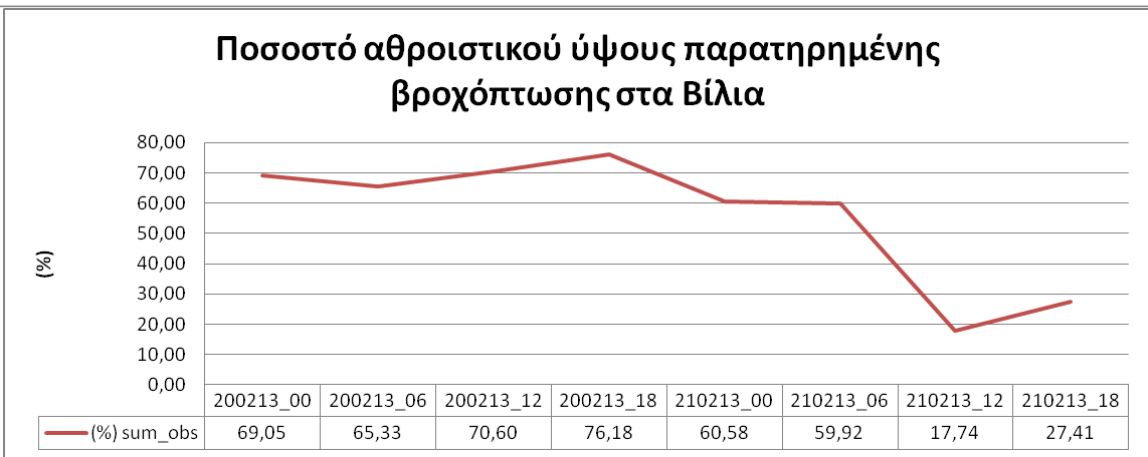
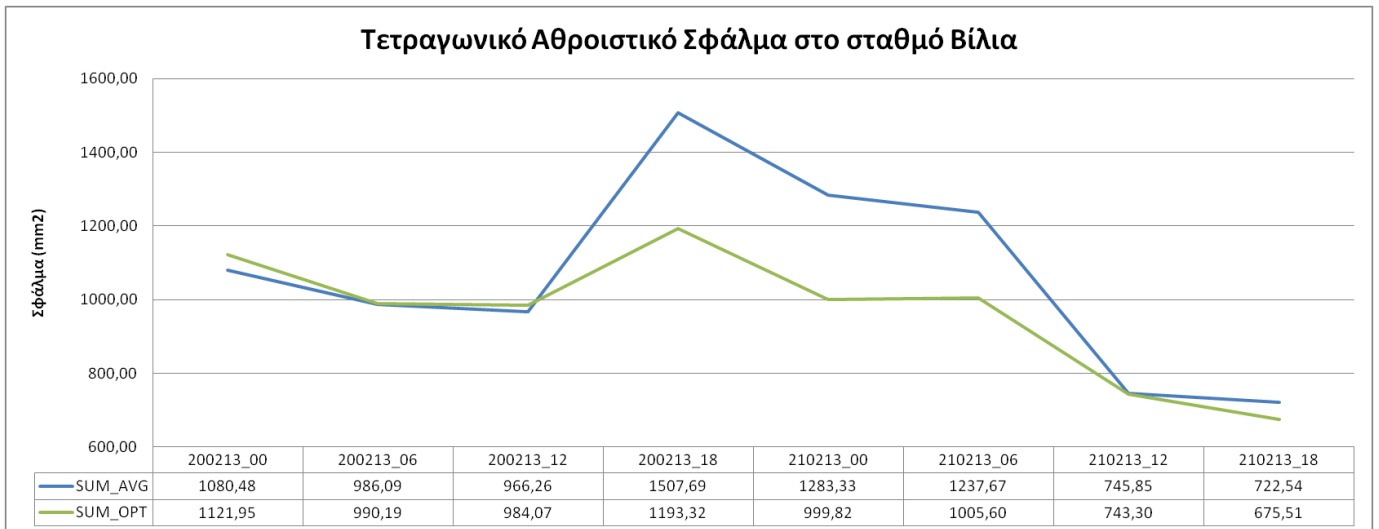
**Πίνακας 6.3** Οι συντελεστές συμμετοχής των προγνώσεων των γειτονικών διακριτών σημείων στη διαμόρφωση των προγνώσεων ανά μετεωρολογικό σταθμό με βάση τα σημεία του Πίνακα 6.2

<b>Βίλια</b>		<b>Πράσινο</b>		<b>Μάνδρα</b>	
a/a	κί	a/a	κί	a/a	κί
1	1,000	1	0,000	1	0,000
2	0,000	2	0,000	2	0,507
3	0,000	3	0,000	3	0,000
4	0,000	4	0,399	4	0,493
5	0,000	5	0,601		
6	0,000	6	0,000		

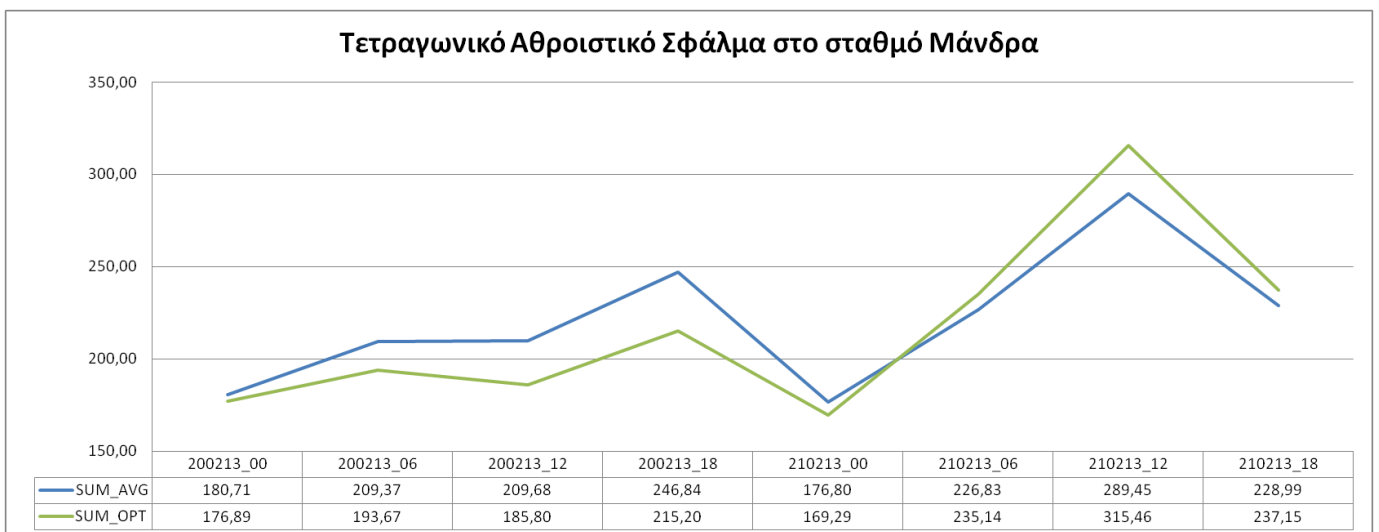
Από τα παραπάνω σχήματα και τον Πίνακα 6.3 μπορούμε να σχολιάσουμε τα εξής:

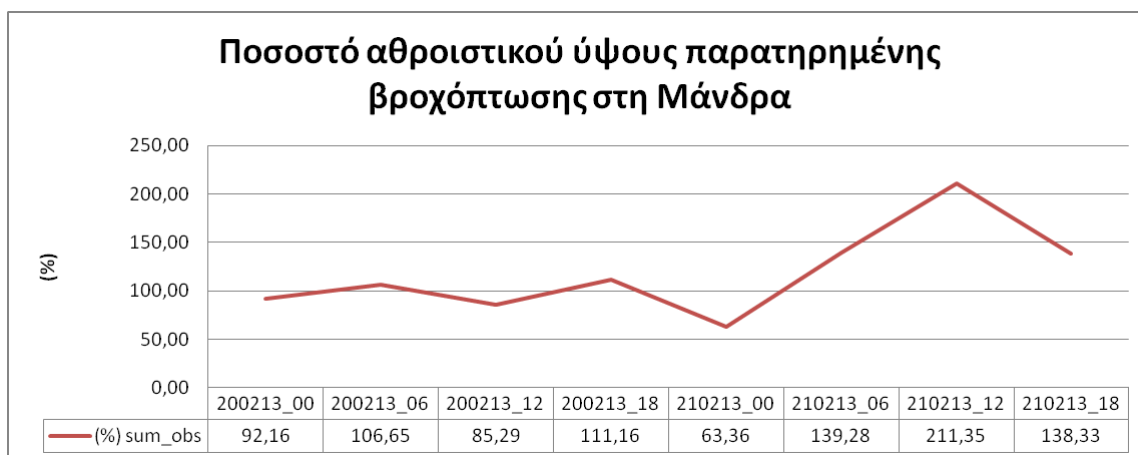
- Γενικώς, η συμμετοχή των γειτονικών διακριτών γειτονικών σημείων δεν είναι καθόλου ισοκατανεμημένη και αυτό τόσο οφείλεται στις διαφορετικές αποστάσεις τους από τον εκάστοτε σταθμό όσο και στις πιθανές τοπογραφικές ανωμαλίες στα εδάφη ενδιάμεσως των διακριτών σημείων και των σταθμών. Για το λόγο αυτό δεν τοποθετήθηκαν περιορισμοί στους συντελεστές και τα όρια τους κυμάνθηκαν ανεξαιρέτως από 0 έως 1.
- Στα Βίλια η γενική εικόνα των προγνώσεων σε σχέση με την παρατηρημένη βροχόπτωση δε διαφέρει σημαντικά από εκείνη των προγνώσεων που υπολογίστηκαν με το μέσο όρο των γειτονικών διακριτών σημείων. Η πρόγνωση εμφανίζει επίσης μια υστέρηση 8 ωρών καθώς ενώ η αιχμή της παρατηρημένης βροχόπτωσης εμφανίζεται στις 23:00 21/02/2013, η αιχμή της πρόγνωσης παρατηρείται γενικώς στις 07:00 της ίδια ημέρας. Η αιχμή της παρατήρησης προσεγγίζεται ικανοποιητικά από τις 6 πρώτες προσομοιώσεις, υποεκτιμώντας την σε όλες εκτός από τις 200213\_00 και 200213\_18. Τέλος, θετικό είναι ότι στην προσομοίωση 210213\_00 προσομοιώνονται ως ένα βαθμό με δεδομένη την υστέρηση οι διαδοχικοί ανοδικοί και καθοδικοί κλάδοι της παρατηρημένης βροχόπτωσης.
- Στη Μάνδρα η εικόνα δε διαφέρει από την αντίστοιχη των προσομοιώσεων με την προηγούμενη μέθοδο. Παρατηρείται δωρη χρονική υστέρηση (στις 03:00 22/02 η αιχμή της παρατηρημένης, γενικώς στις 11:00 22/02 η προσομοιωμένη), ενώ παρότι η αιχμή της παρατηρημένης βροχόπτωσης υπερβαίνει την εκτιμώμενη πρόγνωση, οι δύο αυτές τιμές δείχνουν να συγκλίνουν σε σύγκριση με προηγούμενως.

Όλα τα παραπάνω ποσοτικοποιούνται με τα Σχήματα 6.10 και 6.11 τα οποία αποτελούν τα αντίστοιχα σχήματα με τα 6.6 και 6.7 για τη καινούρια μεθοδολογία υπολογισμού των προγνώσεων.



**Σχήμα 6.10** Σφάλματα πρόγνωσης στο μετεωρολογικό σταθμό Βίλια με βελτιστοποίηση της συμμετοχής των γειτονικών διακριτών σημείων. Στο πάνω διάγραμμα απεικονίζεται το αθροιστικό τετραγωνικό σφάλμα της ωριαίας πρόγνωσης ανά προσομοίωση με μπλε (SUM\_AVG) για τη προηγούμενη μέθοδο και με πράσινο (SUM\_OPT) για τη βελτιστοποίηση. Στο κάτω διάγραμμα απεικονίζεται το ποσοστό του υπολογισμένου αθροιστικού ύψους βροχόπτωσης ανά προσομοίωση ως προς το παρατηρημένο.





**Σχήμα 6.11** Σφάλματα πρόγνωσης στο μετεωρολογικό σταθμό Μάνδρα με βελτιστοποίηση της συμμετοχής των γειτονικών διακριτών σημείων. Στο πάνω διάγραμμα απεικονίζεται το αθροιστικό τετραγωνικό σφάλμα της ωριαίας πρόγνωσης ανά προσομοίωση με μπλε (SUM\_AVG) για τη προηγούμενη μέθοδο και με πράσινο (SUM\_OPT) για τη βελτιστοποίηση. Στο κάτω διάγραμμα απεικονίζεται το ποσοστό του υπολογισμένου αθροιστικού ύψους βροχόπτωσης ανά προσομοίωση ως προς το παρατηρημένο.

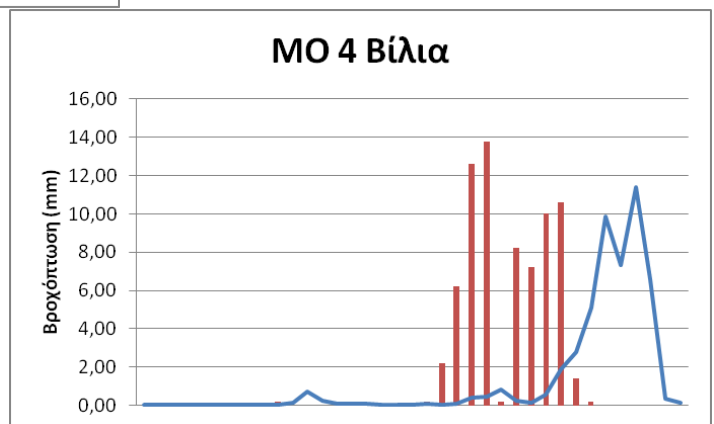
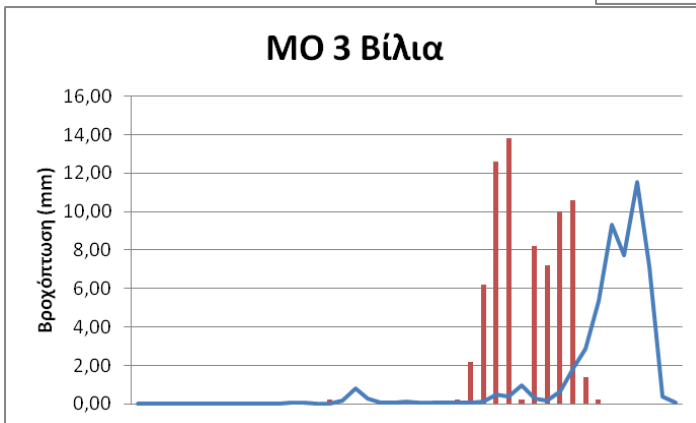
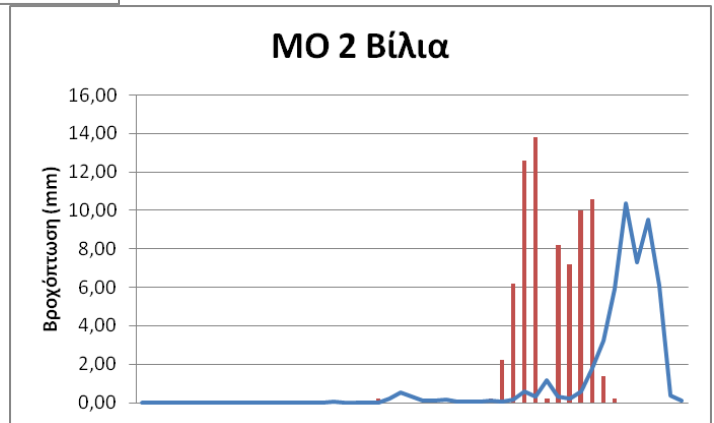
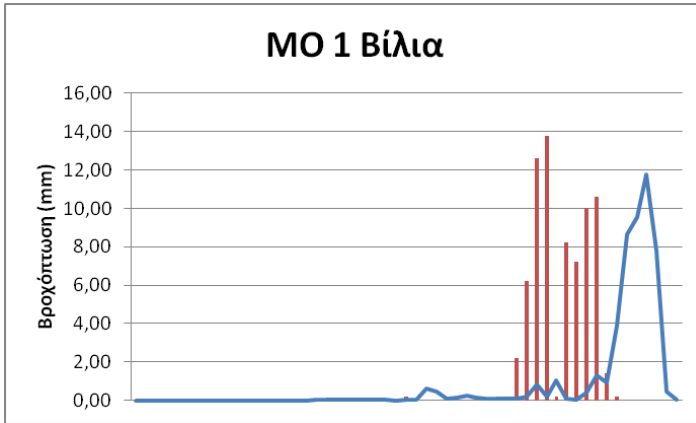
Με βάση τα Σχήματα 6.10 και 6.11 οφείλουμε να σημειώσουμε τα εξής:

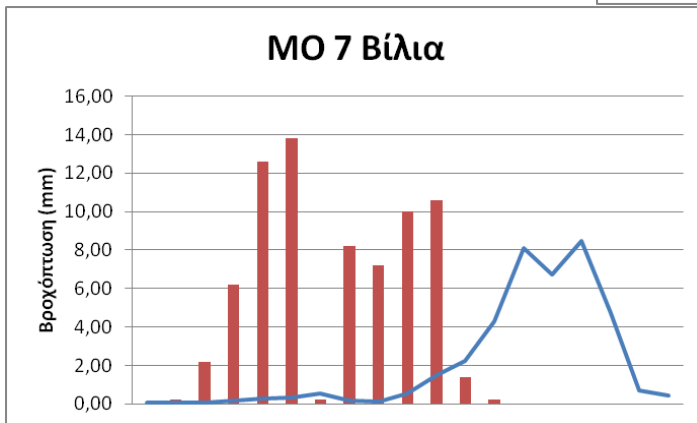
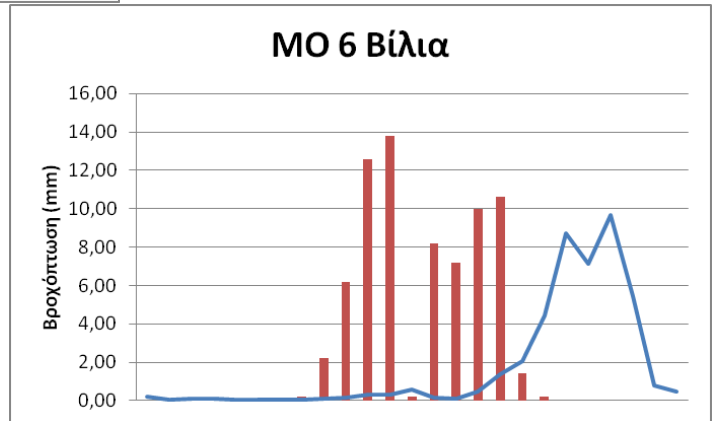
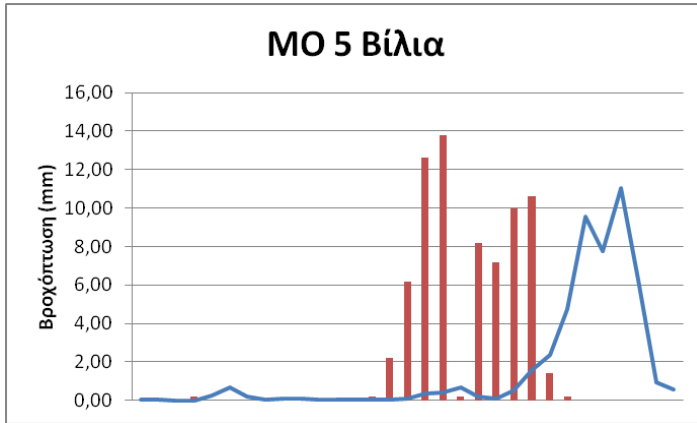
- Στα Βίλια η καλύτερη προσομοίωση όσον αφορά το τετραγωνικό αθροιστικό σφάλμα της ωριαίας πρόγνωσης είναι όπως και με την προηγούμενη μεθοδολογία εκείνη που διεξάγεται δύο ημέρες πριν το επεισόδιο δηλαδή η 200213\_12 (το μικρότερο σφάλμα των δύο τελευταίων προσομοιώσεων οφείλεται στη μεγάλη υποεκτίμηση της παρατηρημένης βροχόπτωσης). Όσον αφορά το ποσοστό του παρατηρημένου ύψους βροχόπτωσης του επεισοδίου όλες οι προσομοιώσεις το υποεκτιμούν κατά περίπου 30%, εκτός από τις δύο τελευταίες προσομοιώσεις (210213\_12 και 210213\_18) οι οποίες και εδώ αστοχούν εντελώς από το να προγνώσουν την επικείμενη βροχόπτωση.
- Στη Μάνδρα η καλύτερη προσομοίωση όσον αφορά το τετραγωνικό αθροιστικό σφάλμα της ωριαίας πρόγνωσης είναι η 210213\_00. Όσον αφορά το ποσοστό του παρατηρημένου ύψους βροχόπτωσης του επεισοδίου, οι καλύτερες προσομοιώσεις είναι οι 200213\_00 και 200213\_12, όπου το ύψος βροχόπτωσης της πρόγνωσης φτάνει στο 92% και 85% αντίστοιχα του παρατηρημένου ενώ και εδώ στις τρεις τελευταίες προσομοιώσεις το αθροιστικό ύψος βροχόπτωσης υπερεκτιμάται σημαντικά.
- Είναι φανερή μία σχετική βελτίωση των τετραγωνικών αθροιστικών σφαλμάτων σε σχέση με την προηγούμενη μεθοδολογία, ειδικά στην πρόγνωση για τον μετεωρολογικό σταθμό στα Βίλια. Συγκεκριμένα, το συνολικό τετραγωνικό αθροιστικό σφάλμα μειώνεται στα Βίλια κατά περίπου 10% ενώ στη Μάνδρα κατά 2%.

Με βάση την τελευταία παρατήρηση η μεθοδολογία βελτιστοποίησης της συμμετοχής των γειτονικών διακριτών σημείων προκρίνεται σε σχέση με εκείνη του μέσου όρου τους, για τον υπολογισμό της πρόγνωσης βροχόπτωσης, η οποία θα εισαχθεί στο υδρολογικό μοντέλο ως τμήμα της χρονοσειράς βροχόπτωσης για την εκτίμηση της απορροής.

#### 6.2.4 Ανάλυση με διαδοχικούς μέσους όρους των υπολογισμένων προγνώσεων

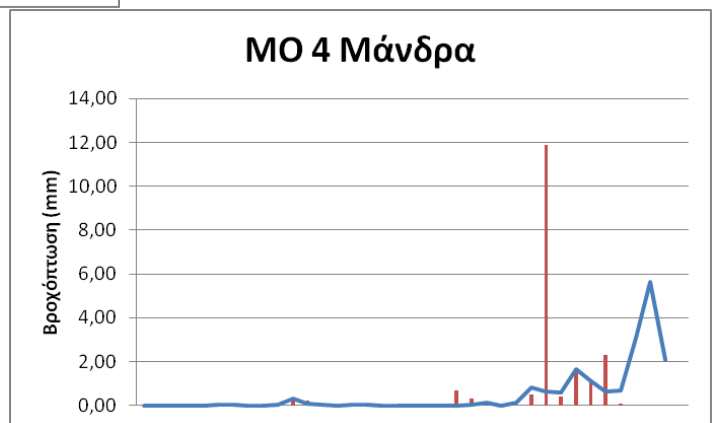
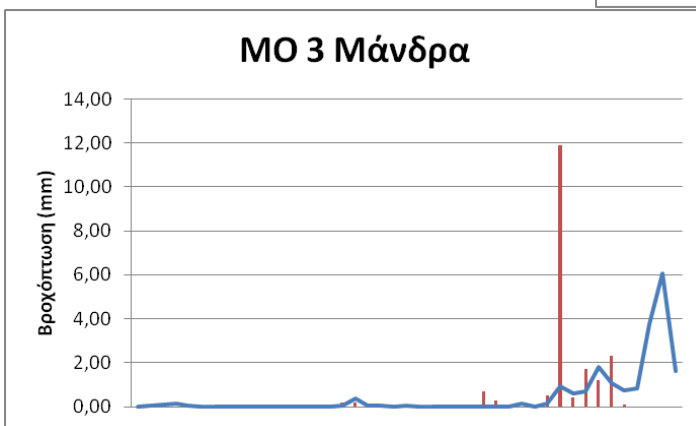
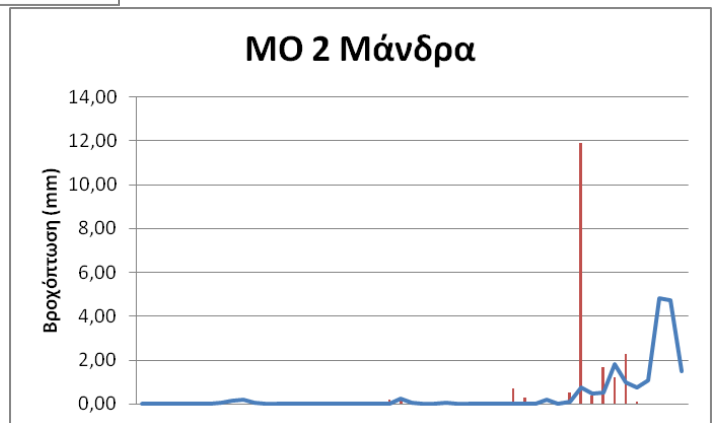
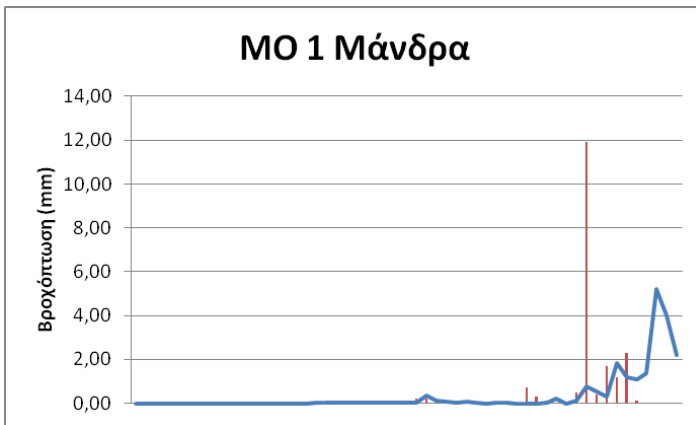
Με βάση τα παραπάνω η διερεύνηση της πλημμυρικής πρόγνωσης θα πραγματοποιηθεί με 8 σενάρια βροχόπτωσης, ένα για κάθε προσομοίωση σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφηκε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο. Με σκοπό τη διερεύνηση περισσότερων σεναρίων, επιλέγεται η δημιουργία ακόμα 7 χρησιμοποιώντας τις ήδη υπολογισμένες προγνώσεις και συγκεκριμένα εκείνες που προέκυψαν με τη μεθοδολογία της βελτιστοποίησης. Συγκεκριμένα, σε κάθε προσομοίωση υπολογίζεται ο μέσος όρος των προγνώσεων που έχουν προέλθει από προσομοιώσεις με νωρίτερο χρόνο έναρξης μαζί με τις προγνώσεις της παρούσας προσομοίωσης, δημιουργώντας 7 νέα σενάρια (για τη πρώτη προσομοίωση η διαδικασία αυτή δε δημιουργεί καινούριες τιμές προγνώσεων αφού δεν διατίθεται προγενέστερες προγνώσεις του χρόνου έναρξής της). Τα διαγράμματα των εν λόγω σεναρίων παρατίθενται στα Σχήματα 6.12 και 6.13 για τα Βίλια και τη Μάνδρα αντίστοιχα. Σημειώνεται εδώ ότι το κάθε ένα σενάριο συμβολίζεται με το πρόθεμα «ΜΟ» και έναν αύξοντα αριθμό, που αρχίζει από το 1.

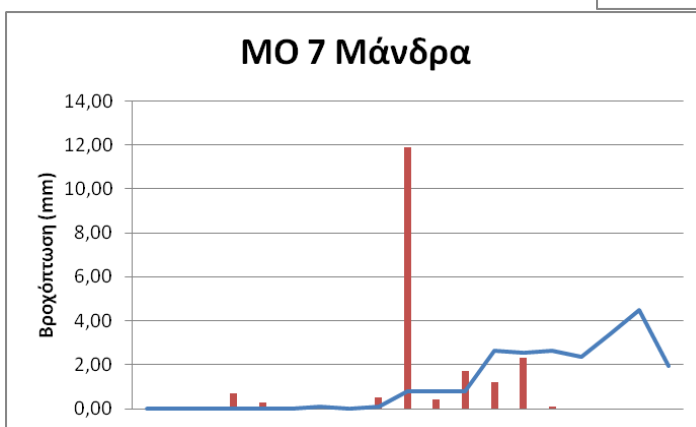
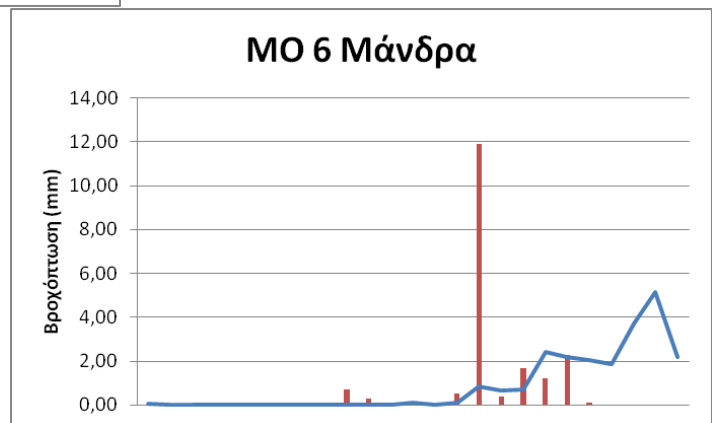
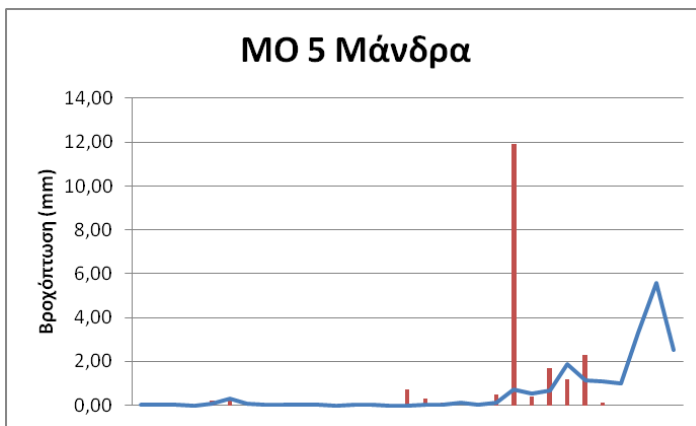




**Σχήμα 6.11** Η εξέλιξη της πρόγνωσης στο σταθμό Βίλια ως διαδοχικοί μέσοι όροι των προγενέστερων προγνώσεων και της παρούσας πρόγνωσης. Με κόκκινο χρώμα και ραβδώσεις απεικονίζεται η παρατηρημένη βροχόπτωση ενώ με συνεχή μπλε γραμμή η πρόγνωση με βάση το μέσο όρο των προγνώσεων των γειτονικών διακριτών σημείων.







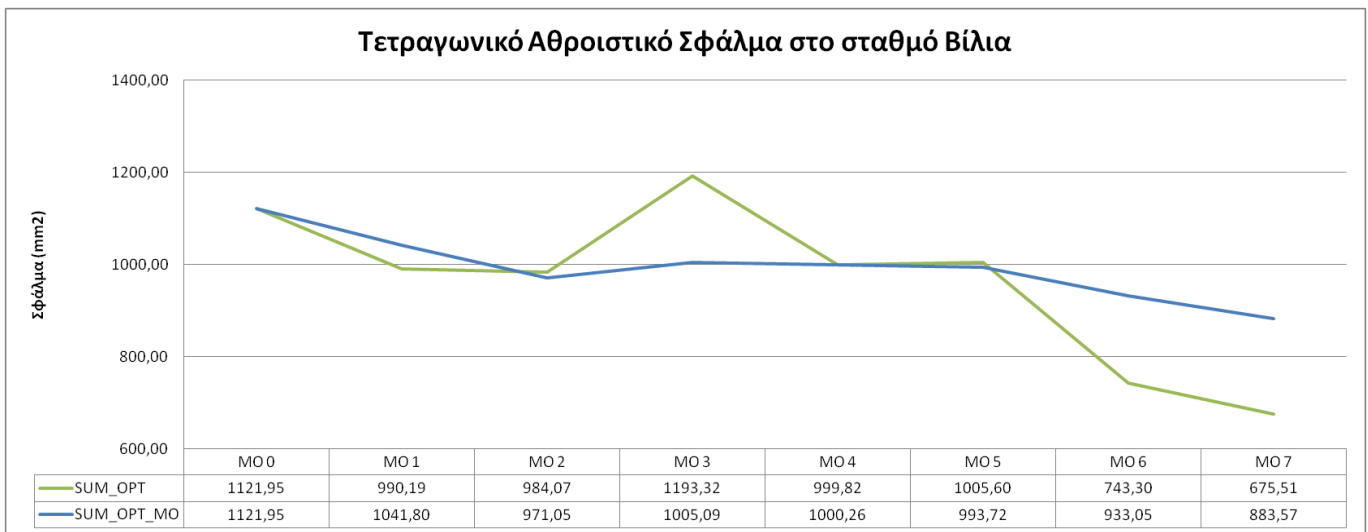
**Σχήμα 6.12** Η εξέλιξη της πρόγνωσης στο σταθμό Μάνδρα ως διαδοχικοί μέσοι όροι των προγενέστερων προγνώσεων και της παρούσας πρόγνωσης. Με κόκκινο χρώμα και ραβδώσεις απεικονίζεται η παρατηρημένη βροχόπτωση ενώ με συνεχή μπλε γραμμή η πρόγνωση με βάση το μέσο όρο των προγνώσεων των γειτονικών διακριτών σημείων.

Από τα παραπάνω διαγράμματα φαίνονται τα εξής:

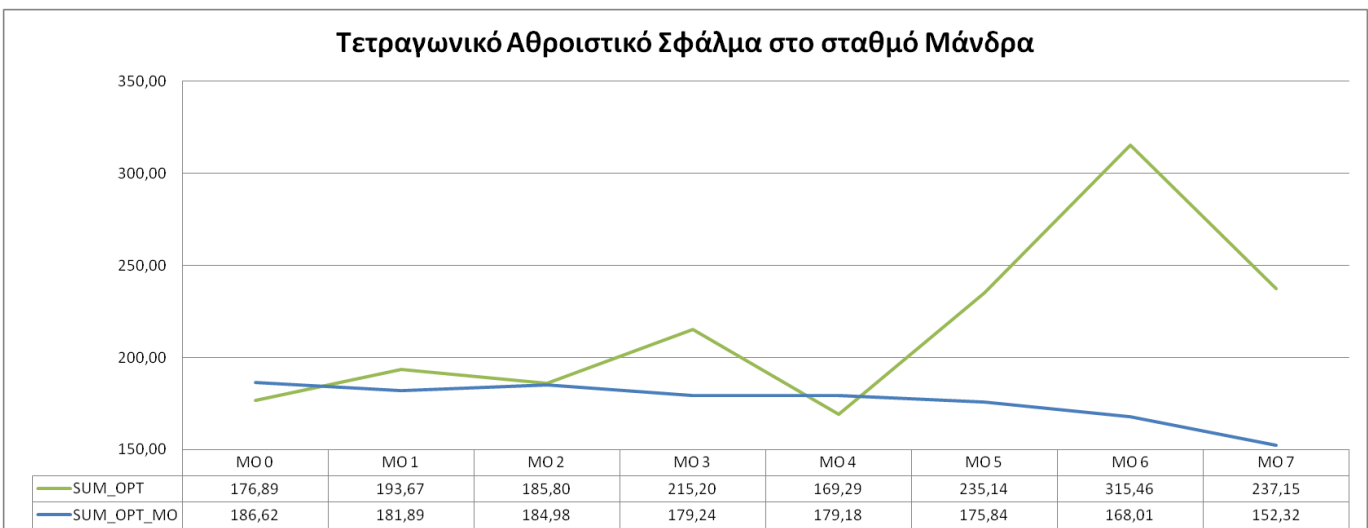
- Στα Βίλια, η εικόνα είναι σε γενικές γραμμές ίδια με την προηγούμενη μεθοδολογία με τη διαφορά ότι τα σενάρια MO 6 και MO 7 που αντιστοιχούν στους χρόνους έναρξης των προσομοιώσεων 210213\_12 και 210213\_18, αποτυπώνουν καλύτερα από εκείνες τις αιχμές της παρατηρημένης βροχόπτωσης, εφόσον συνυπολογίζονται και οι προηγούμενες προγνώσεις.

- Στη Μάνδρα, η εικόνα παραμένει η ίδια χωρίς να βελτιώνεται, ενώ μάλιστα στα δύο τελευταία σενάρια η υπολογισμένη αιχμή μειώνεται εφόσον σε αντίθεση με τα Βίλια, οι προηγούμενες προγνώσεις έχουν γενικώς μικρότερες αιχμές.

Παρακάτω απεικονίζονται και τα διαγράμματα του τετραγωνικού αθροιστικού σφάλματος αντιστοιχίζοντας τα προηγούμενα με τα τωρινά σενάρια με βάση το χρόνο έναρξης της πρόγνωσης.



**Σχήμα 6.13** Το αθροιστικό τετραγωνικό σφάλμα της ωριαίας πρόγνωσης ανά προσομοίωση στο σταθμό Βίλια. Με πράσινο (SUM\_OPT) το σφάλμα με τη μέθοδο της 6.2.3 και με μπλε (SUM\_ORT\_MO) με τη μέθοδο της 6.2.4.



**Σχήμα 6.14** Το αθροιστικό τετραγωνικό σφάλμα της ωριαίας πρόγνωσης ανά προσομοίωση στο σταθμό Μάνδρα. Με πράσινο (SUM\_OPT) το σφάλμα με τη μέθοδο της 6.2.3 και με μπλε (SUM\_ORT\_MO) με τη μέθοδο της 6.2.4.

Με βάση τα παραπάνω διαγράμματα σημειώνουμε τα εξής:

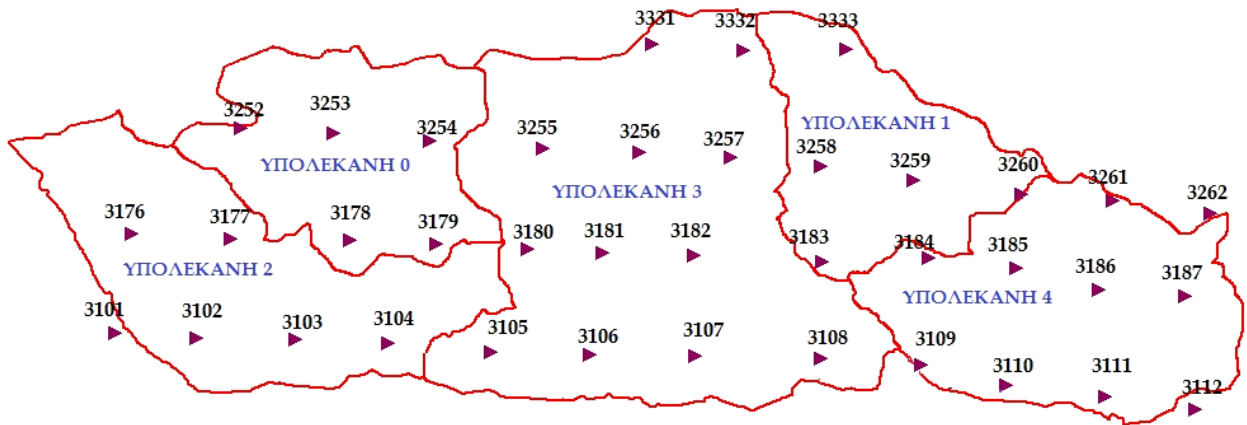
- Είναι λογικό το τετραγωνικό σφάλμα με βάση τους διαδοχικούς μέσους όρους να μην έχει μεγάλες αποκλίσεις ανά προσομοίωση, εφόσον η κάθε τιμή πρόγνωσης υπολογίζεται και με βάση τις προηγούμενες.
- Ενώ στα Βίλια το συνολικό αθροιστικό τετραγωνικό σφάλμα αυξάνεται κατά 3% στη Μάνδρα μειώνεται κατά περίπου 20%, όπως είναι εμφανές και από το Σχήμα 6.14.

Συμπερασματικά, θα τοποθετηθούν ως εισοδοί στο υδρολογικό μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ με βάση το σετ παραμέτρων της στοχικής συνάρτησης 2 για τη λεκάνη του Σαρανταπόταμου, οι προγνώσεις βροχόπτωσης όπως προέκυψαν από τις παραγράφους 6.2.3 και 6.2.4. Τα αποτελέσματα για την απορροή βάση αυτών των σεναρίων παρουσιάζονται στο υποκεφάλαιο 7.2.

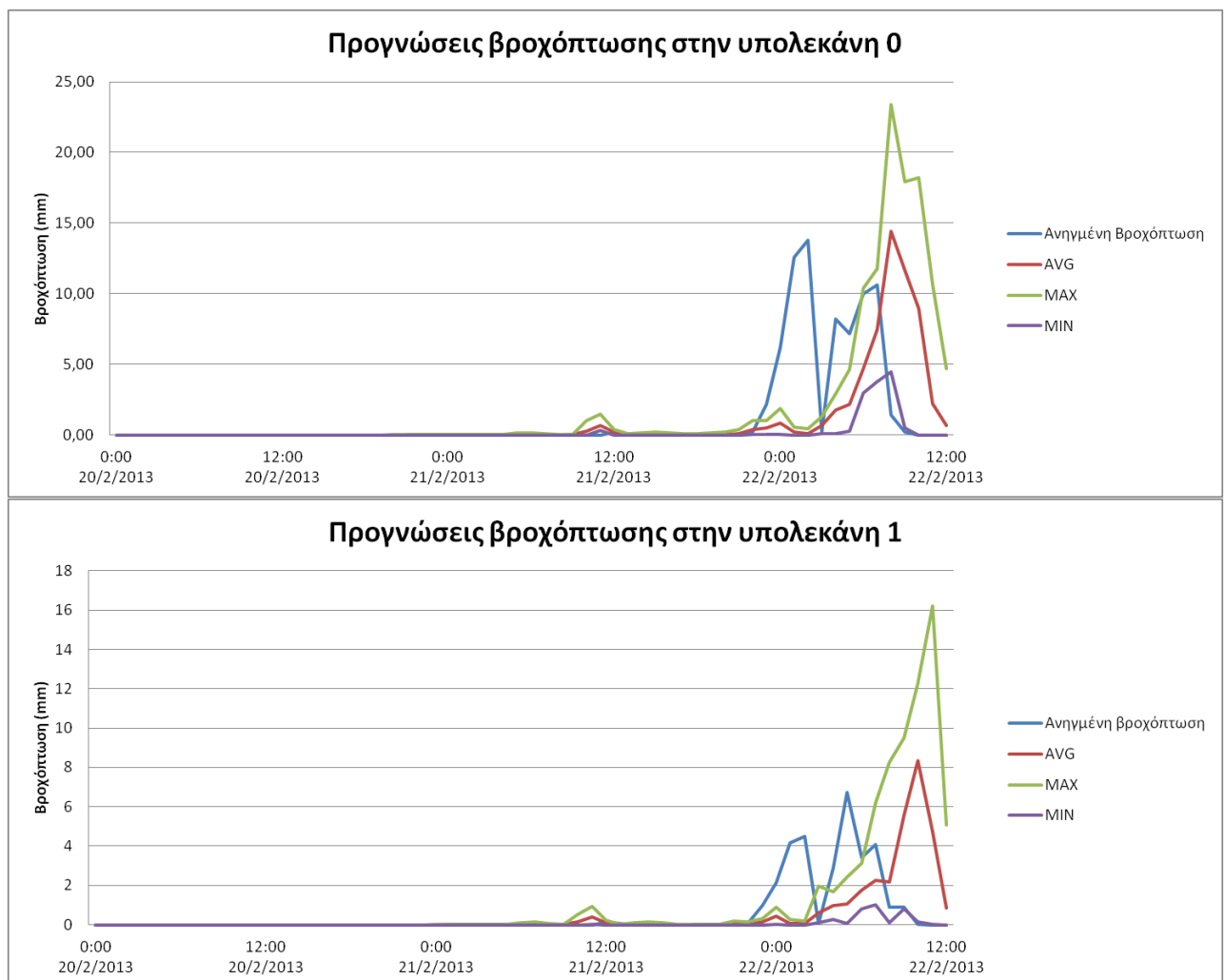
### 6.3 Επιφανειακή ανάλυση των προγνώσεων βροχόπτωσης με βάση όλα τα διακριτά σημεία της περιοχής μελέτης

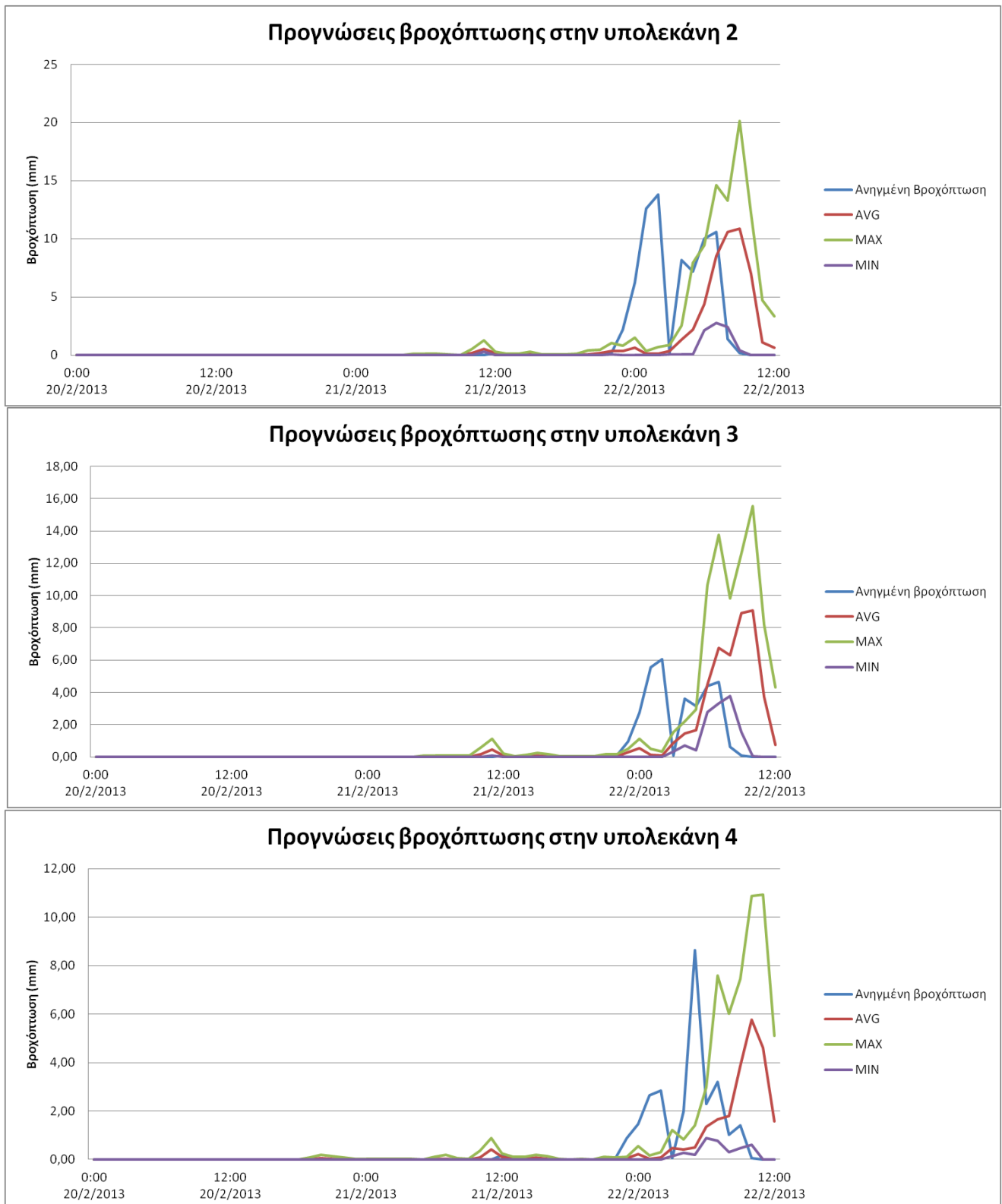
Για την επιφανειακή ολοκλήρωση των προγνώσεων βροχόπτωσης χρησιμοποιούνται όλα τα διακριτά σημεία του πλέγματος που βρίσκονται εντός της περιοχής μελέτης και ορισμένα εξαιρετικά κοντινά της. Οι προγνώσεις βροχόπτωσης υπολογίζονται ανά υπολεκάνη ως ο μέσος όρος των προγνώσεων των διακριτών σημείων εντός της υπολεκάνης, με βάση τις 5 υπολεκάνες όπως αυτές σχηματοποιήθηκαν στην παράγραφο 4.2.2. Δημιουργούμε και σε αυτή την περίπτωση 15 σενάρια προγνώσεων, 8 για κάθε μία από τις προσομοιώσεις και 7 με βάση τους διαδοχικούς μέσους όρους τους, όπως εξηγήθηκε στην παράγραφο 6.2.4, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν ως εισοδοί στο υδρολογικό μοντέλο. Η διαδικασία αυτή ουσιαστικά αποτελεί μία περίπτωση της μεθόδου με τα πολύγωνα Thiessen, εφόσον όμως οι αποστάσεις των διακριτών σημείων είναι σταθερές, τα πολύγωνα που αναπτύσσονται έχουν την ίδια έκταση εντός της εκάστοτε υπολεκάνης (συγκεκριμένα  $2 \times 2 = 4 \text{ km}^2$ ) άρα και την ίδια συμμετοχή στη διαμόρφωση της βροχόπτωσης για την υπολεκάνη. Τα διακριτά σημεία που χρησιμοποιούνται φαίνονται στο Σχήμα 6.15, ενώ στο Σχήμα 6.16 φαίνονται η μέση, η μέγιστη και η ελάχιστη πρόγνωση ανά υπολεκάνη όπως προέκυψαν από την επιφανειακή ολοκλήρωση των προγνώσεων βροχόπτωσης. Σημειώνεται εδώ ότι δεν επιλέγεται η παράθεση όλων των σεναρίων πρόγνωσης ανά υπολεκάνη καθώς δεν υπάρχουν αντίστοιχα παρατηρημένα δεδομένα βροχόπτωσης, ενώ

στο Σχήμα 6.16 η σύγκριση γίνεται με την ανηγμένη βροχόπτωση ανά υπολεκάνη με βάση τα πολύγωνα Thiessen των μετεωρολογικών σταθμών (βλ. 4.3.4).



**Σχήμα 6.15** Τα διακριτά σημεία (grid points) και ο αύξων αριθμός τους που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή των δεδομένων πρόγνωσης ανά υπολεκάνη





**Σχήμα 6.16** Η μέση (AVG), η μέγιστη (MAX) και η ελάχιστη (MIN) πρόγνωση των σεναρίων πρόγνωσης βροχόπτωσης με επιφανειακή ολοκλήρωσή τους ανά υπολεκάνη. Η σύγκριση γίνεται με βάση την ανηγμένη βροχόπτωση ανά υπολεκάνη.

Από το Σχήμα 6.16 και με βάση το Σχήμα 4.11 όπου απεικονίζονται οι συντελεστές Thiessen με βάση τους μετεωρολογικούς σταθμούς παρατηρούμε τα εξής:

- Η αιχμή της βροχόπτωσης σε όλες τις υπολεκάνες παρουσιάζεται όπως προηγουμένως στις 22/02/2013 12:00 ενώ η ανηγμένη αιχμή παρατηρείται επίσης 6 ώρες νωρίτερα.
- Στις υπολεκάνες όπου η ανηγμένη βροχόπτωση σχετίζεται με την παρατήρηση του μετεωρολογικού σταθμού στα Βίλια (εξ ολοκλήρου στις υπολεκάνες 0 και 2 και σε ποσοστό 44% στην υπολεκάνη 3), η μέση πρόγνωση των σεναρίων προσεγγίζει ικανοποιητικά τις αιχμές, ενώ δεν προσομοιώνει όπως και προηγουμένως τους δύο διαδοχικούς ανοδικούς και καθοδικούς κλάδους της.
- Στην υπολεκάνη 1, όπου η ανηγμένη βροχόπτωση σχετίζεται εξ ολοκλήρου με την παρατήρηση (εδώ συμπλήρωση) στο Πράσινο, παρατηρούνται επίσης δύο διαδοχικοί ανοδικοί και καθοδικοί κλάδοι της ανηγμένης βροχόπτωσης οι οποίοι δεν προσομοιώνονται από τη μέση πρόγνωση, ενώ η αιχμή της μέσης πρόγνωσης είναι αισθητά μεγαλύτερη από εκείνη της ανηγμένης.
- Τέλος, στην υπολεκάνη 4, όπου η ανηγμένη βροχόπτωση σχετίζεται με τις παρατηρήσεις σε Μάνδρα αλλά κυρίως σε Πράσινο, η αιχμή της μέσης πρόγνωσης υπολείπεται αρκετά εκείνης της ανηγμένης βροχόπτωσης.

Συμπερασματικά, δημιουργούνται ακόμα 15 σεναρία προγνώσεων με βάση την επιφανειακή ολοκλήρωση, τα οποία θα τοποθετηθούν επίσης ως εισοδοί στο υδρολογικό μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ, με βάση το σετ παραμέτρων της στοχικής συνάρτησης 2, η οποία όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 5.5.6, προσεγγίζει καλύτερα τις αιχμές των παροχών για το επιλεγμένο επεισόδιο. Τα αποτελέσματα για την απορροή βάση αυτών των σεναρίων παρουσιάζονται στο υποκεφάλαιο 7.2.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7:** **ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΗΣ ΠΡΟΓΝΩΣΗΣ**

### **7.1 Εισαγωγή. Δημιουργία χρονοσειρών πρόγνωσης**

Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 6.2.4, με βάση τις σημειακές αναλύσεις πρόγνωσης για τη βροχόπτωση που έχουν πραγματοποιηθεί, για την πλημμυρική πρόγνωση θα χρησιμοποιηθούν οι 8 σενάρια προγνώσεων με βάση τις 8 προσομοιώσεις με τη βελτιστοποίηση της συμμετοχής των διακριτών σημείων καθώς και οι 7 σενάρια προγνώσεων με τους διαδοχικούς μέσους όρους των προηγούμενων προγνώσεων, δηλαδή συνολικά 15 σενάρια προγνώσεων. Οι αντίστοιχες προγνώσεις (8 προσομοιώσεις και 7 διαδοχικοί μέσοι όροι) θα χρησιμοποιηθούν και για την επιφανειακή ανάλυση των προγνώσεων.

Αντίστοιχα θα πρέπει να αναπτυχθούν 15 σετ χρονοσειρών για τη σημειακή και άλλα 15 για την επιφανειακή ανάλυση των προγνώσεων στις οποίες **το τμήμα που αντιστοιχεί στο χρονικό διάστημα το οποίο έχει προσομοιωθεί και αναλυθεί ώστε να προκύψουν προγνώσεις βροχόπτωσης θα αντικατασταθεί από αυτές.** Η διαδικασία αυτή γίνεται μέσω του ΥΔΡΟΓΝΩΜΩΝΑ και για κάθε σενάριο πρόγνωσης παράγονται 5 χρονοσειρές βροχόπτωσης μία για κάθε υπολεκάνη που προέκυψε από τη σχηματοποίηση της λεκάνης του Σαρανταπόταμου. Οι χρονοσειρές εξατμοδιαπνοής δεν αλλάζουν εφόσον δε διαθέτουμε αντίστοιχα δεδομένα για την πρόγνωση της θερμοκρασίας.

Για τη σημειακή ανάλυση των προγνώσεων ακολουθείται η ίδια μεθοδολογία με τις χρονοσειρές που εισήχθησαν στην ΥΔΡΟΓΕΙΟ για τη βαθμονόμηση της λεκάνης του



Σαρανταπόταμου (βλ. 4.3.4), δηλαδή μέσω πολυγώνων Thiessen για τις υπολεκάνες με βάση τους τρεις μετεωρολογικούς σταθμούς. Οι συντελεστές Thiessen που χρησιμοποιούνται φαίνονται στο Σχήμα 4.11.

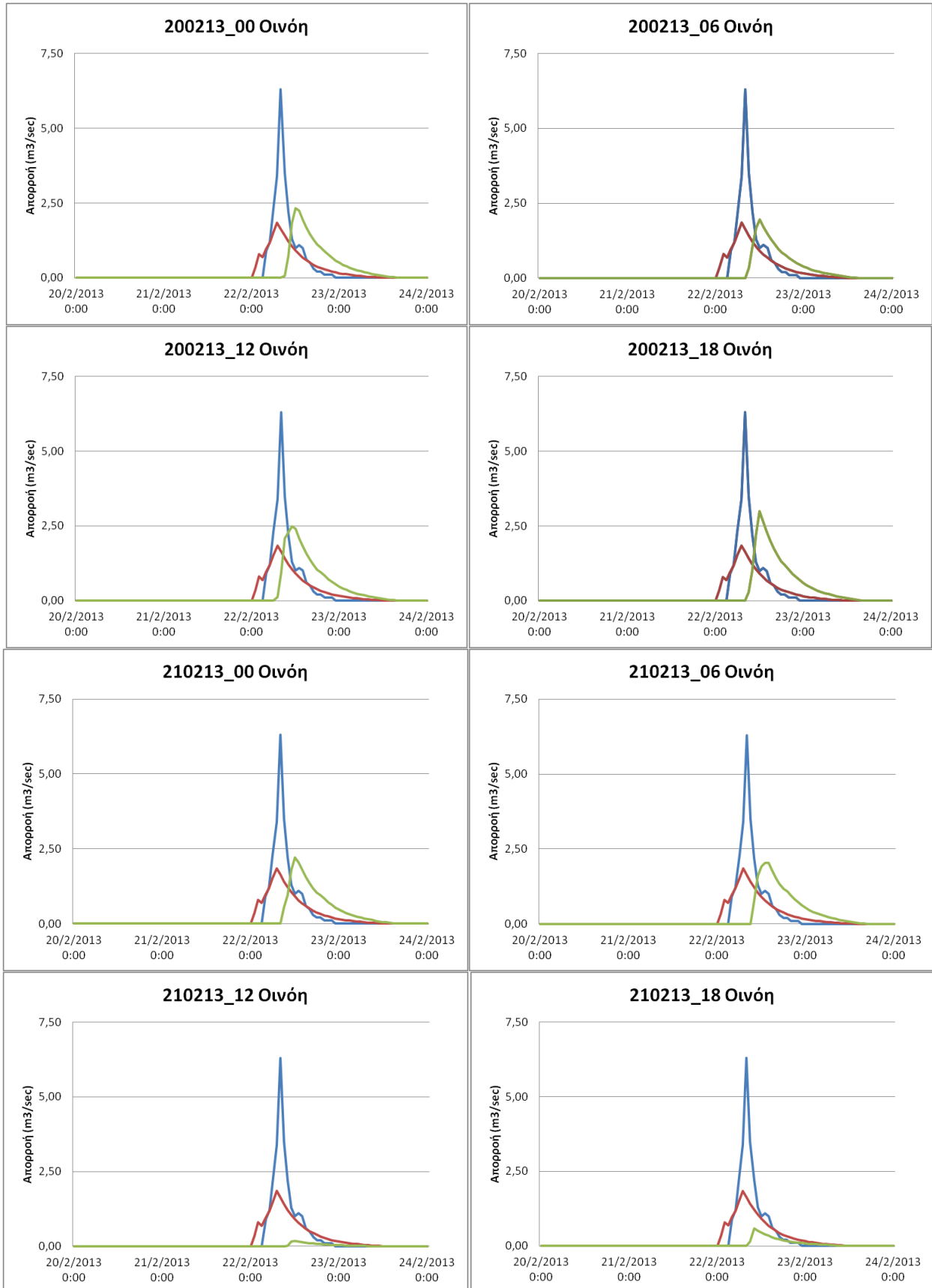
Για την επιφανειακή ανάλυση των προγνώσεων, η πρόγνωση της βροχόπτωσης ανά υπολεκάνη έχει υπολογιστεί ήδη στο υποκεφάλαιο 6.3 άρα αντικαθιστούν άμεσα τα ανάλογα τμήματα στις αντίστοιχες χρονοσειρές βροχόπτωσης ανά υπολεκάνη, που έχουν ήδη προκύψει από τα πολύγωνα Thiessen.

Σημειώνεται εδώ ότι με την παραγωγή των 15 αυτών σεναρίων, όπου έχουν προκύψει από διαφορετικές αρχικές συνθήκες (οι 8 προσημειώσεις), ή από σύνθεση διαφορετικών αρχικών συνθηκών (οι 7 διαδοχικοί μέσοι όροι), **πραγματοποιείται ένα είδος *ensemble* πρόγνωσης** (βλ. 2.3.3), το οποίο επιτρέπει την εξαγωγή ισάριθμων σετ αποτελεσμάτων απορροής που θα αναλυθούν και θα συγκριθούν μεταξύ τους και με την παρατηρημένη απορροή.

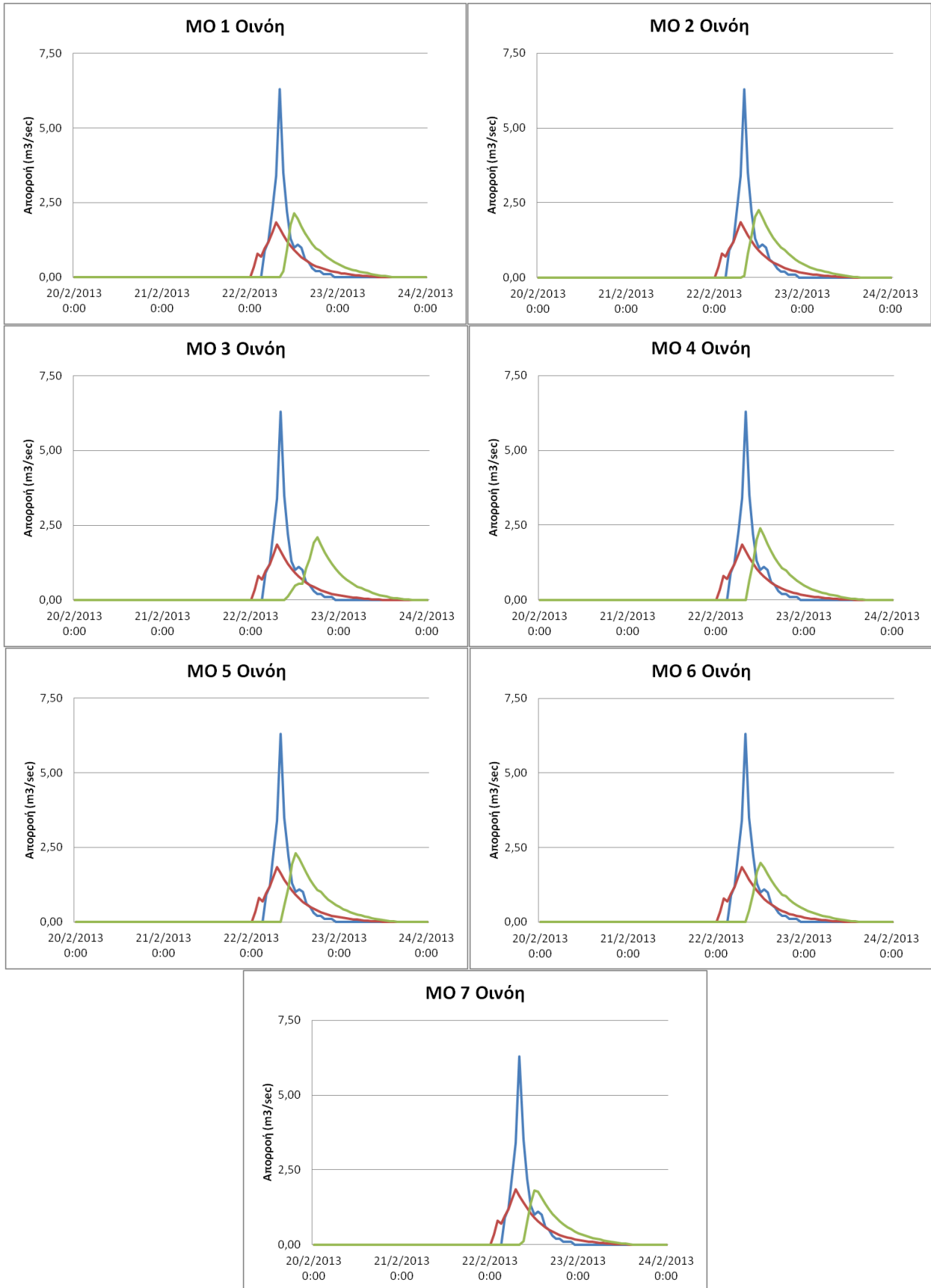
Οι χρονοσειρές που προκύπτουν εισάγονται στην ΥΔΡΟΓΕΙΟ στη θέση των παρατηρημένων χρονοσειρών βροχόπτωσης με βάση το υδρολογικό μοντέλο που έχει αναπτυχθεί με τη στοχική συνάρτηση 2 (βλ. 5.5.6), η οποία προσομοιώνει καλύτερα τις υψηλές άρα και τις πλημμυρικές τιμές των απορροών. Τα αποτελέσματα για την απορροή παρατίθενται στα επόμενα υποκεφάλαια τόσο για τη σημειακή (7.2) όσο και για την επιφανειακή ολοκλήρωση (7.3) και για τις δύο θέσεις μέτρησης της απορροής.

## 7.2 Αποτελέσματα απορροής με τη σημειακή ολοκλήρωση των προγνώσεων

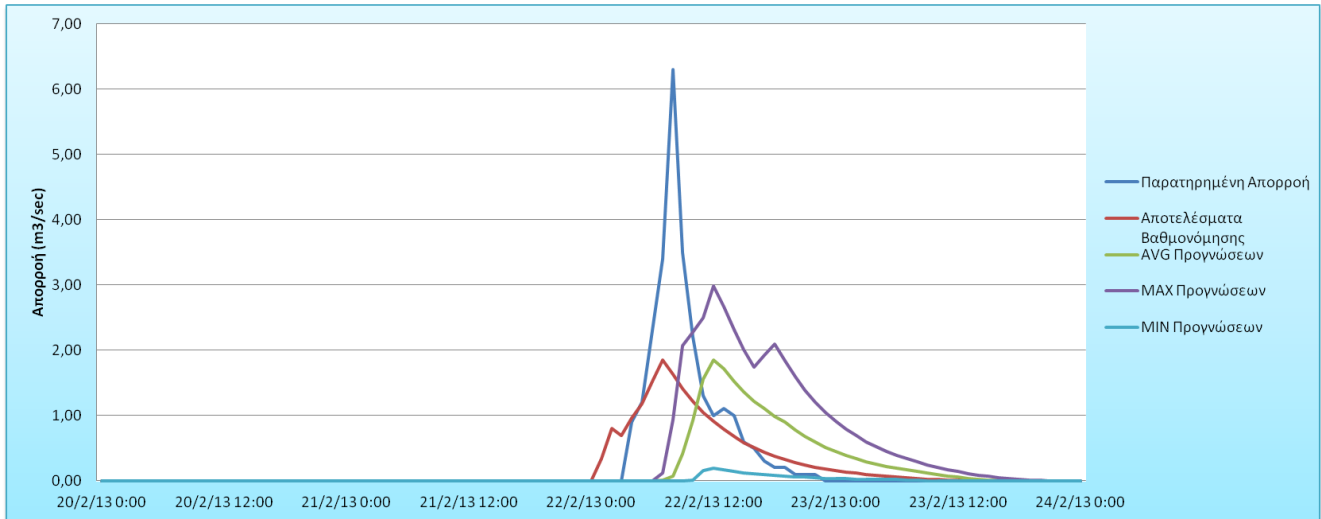
Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα για την απορροή, όπως προσομοιώθηκαν από το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ με βάση τα αποτελέσματα των 15 σεναρίων με σημειακή ολοκλήρωση της πρόγνωσης της βροχόπτωσης για το σετ παραμέτρων της στοχικής συνάρτησης 2. Η απορροή απεικονίζεται για τις δύο θέσεις μέτρησης της παροχής στην Οινόη και τη Γύρα Στεφάνης. Για σύγκριση παρατίθενται και οι αντίστοιχες παρατηρημένες τιμές απορροής και η απορροή με βάση τη βαθμονόμηση με τη στοχική συνάρτηση 2. Το διάστημα που επιλέγεται να παρουσιαστεί σε κάθε σταθμό έχει κοινή αρχή το χρόνο έναρξης της 1<sup>ης</sup> προσομοίωσης, δηλαδή 20/02/2013 00:00, και χρόνο λήξης ανάλογα με την εκφόρτιση της απορροής και συγκεκριμένα είναι 24/02/2013 για την Οινόη και 25/02/2013 για τη Γύρα Στεφάνης.



**Σχήμα 7.1** Η πρόγνωση της απορροής στην Οινόη (πράσινο) με βάση τις προγνώσεις βροχόπτωσης με βελτιστοποίηση συμμετοχής των γειτονικών διακριτών σημείων για τις 8 προσομοιώσεις, σε σύγκριση με την παρατηρημένη απορροή (μπλε) και την απορροή από τη βαθμονόμηση (κόκκινο).



**Σχήμα 7.2** Η πρόγνωση της απορροής στην Οινόη (πράσινο) με βάση τους 7 διαδοχικούς μέσους όρους των προγνώσεων μέσω βελτιστοποίησης, σε σύγκριση με την παρατηρημένη απορροή (μπλε) και την απορροή όπως προέκυψε από τη βαθμονόμηση (κόκκινο).



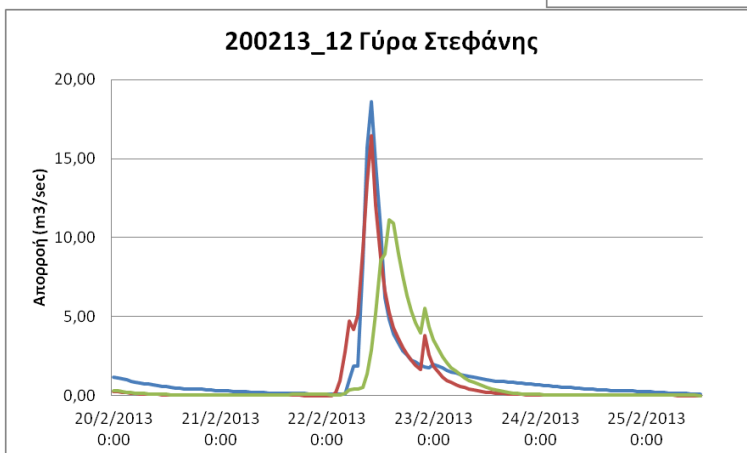
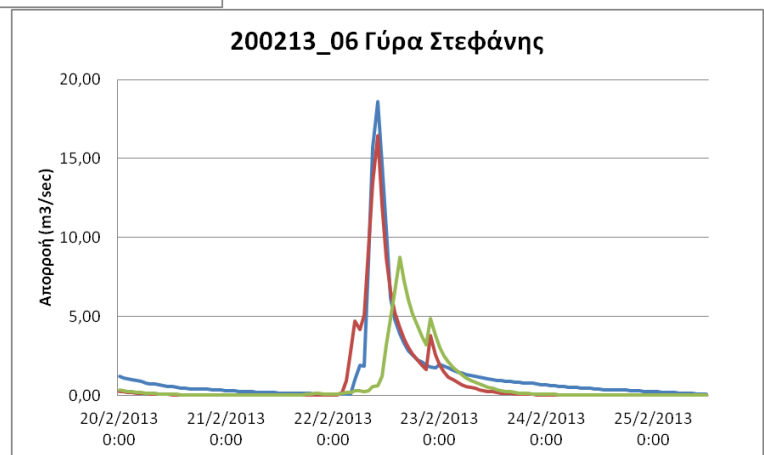
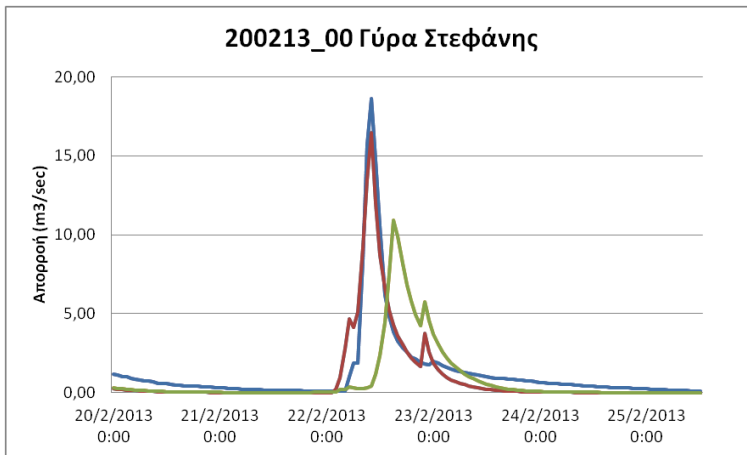
**Σχήμα 7.3** Η μέση (AVG), η μέγιστη (MAX) και η ελάχιστη (MIN) πρόγνωση της απορροής στην Οινόη με βάση τα 15 σενάρια πρόγνωσης βροχοπτώσεως που αναπτύχθηκαν με σημειακή ολοκλήρωση των προγνώσεων με βάση τους μετεωρολογικούς σταθμούς και βελτιστοποίηση της συμμετοχής της πρόγνωσης των γειτονικών στους σταθμούς διακριτών σημείων

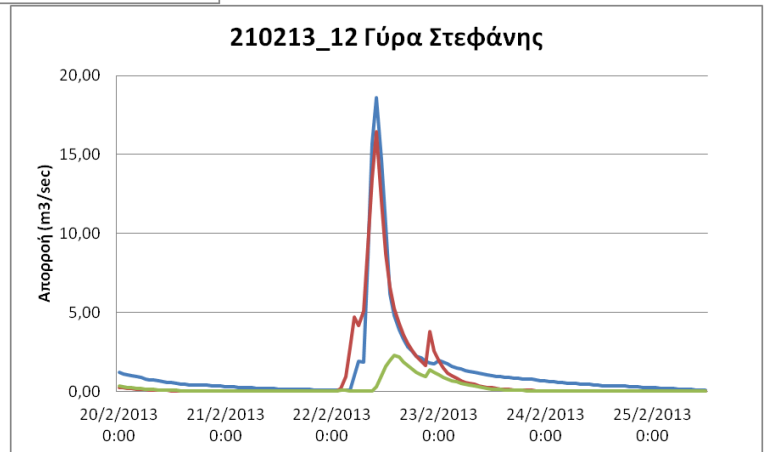
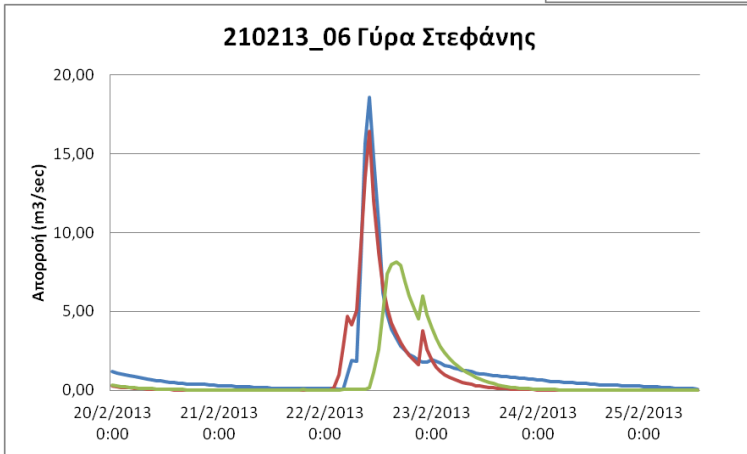
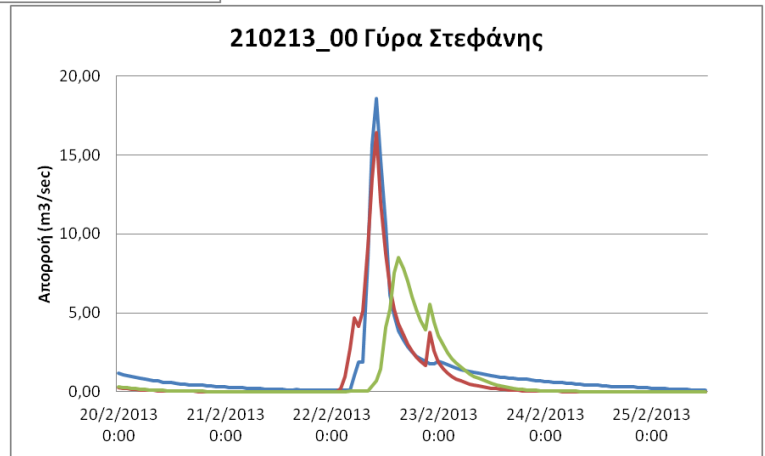
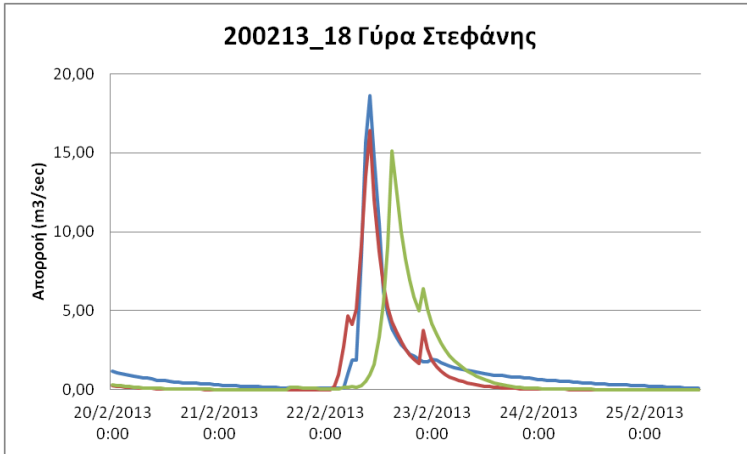
Με βάση τα παραπάνω διαγράμματα για την Οινόη παρατηρούμε τα εξής:

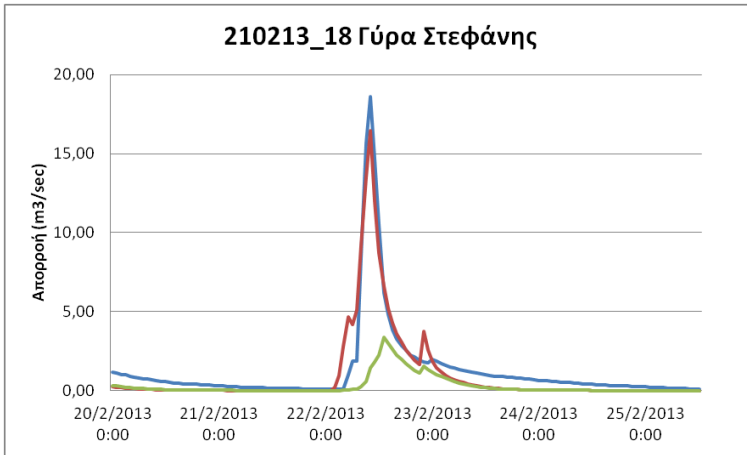
- Καμία από τις προγνώσεις για την απορροή δε προσεγγίζει την μέγιστη απορροή στην Οινόη κατά τη διάρκεια του επεισοδίου. Συγκεκριμένα, η παρατηρημένη αιχμή της απορροής είναι 6,3 m<sup>3</sup>/sec ενώ η μέγιστη πρόγνωση φτάνει τα 2,99 m<sup>3</sup>/sec (για το σενάριο βροχοπτώσεως 200213\_18), δηλαδή λιγότερο από το 50% της παρατηρημένης απορροής. Παρατηρούμε ότι αυτό οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στην απόκλιση που παρουσιάζεται ήδη από την βαθμονόμηση, όπου όπως εξηγήθηκε και στο Κεφάλαιο 5, η δυσκολία αποτελεσματικής προσομοίωσης λεκανών με κυριαρχία μηδενικών παροχών είναι ιδιαίτερα σημαντική, πόσο μάλλον στη θέση μέτρησης στην Οινόη όπου η απορροή είναι ιδιαίτερος περιορισμένη.
- Η υστέρηση των περίπου 8 ωρών που είχε παρατηρηθεί για τις προγνώσεις των βροχοπτώσεων με βάση τον μετεωρολογικό σταθμό των Βιλίων, που επηρεάζει άμεσα τη θέση στην Οινόη, δεν επιβεβαιώνεται και για τις απορροές καθώς η αντίστοιχη υστέρηση είναι γενικώς 5 ώρες και συγκεκριμένα ενώ η αιχμή της παρατηρημένης απορροής είναι στις 22/02 08:00, γενικώς η αιχμή των προσομοιώσεων εντοπίζεται στις 22/02 13:00. Το γεγονός αυτό εξηγείται εφόσον η πραγματική βροχοπτώση στα Βίλια, όπως φάνηκε στα διαγράμματα του προηγούμενου κεφαλαίου, διαθέτει δύο αιχμές, άρα η μέγιστη απορροή θα παρατηρηθεί όταν θα συμβάλλουν και οι δύο κλάδοι της βροχοπτώσεως, δηλαδή αργότερα από την αντίστοιχη χρονική στιγμή αν υπήρχε μόνο ο πρώτος κλάδος.

Υπενθυμίζεται ότι η αιχμή της πρόγνωσης βροχόπτωσης στα Βίλια εμφανίζεται στις 22/02 07:00, δηλαδή 6 ώρες νωρίτερα της μέγιστης απορροής.

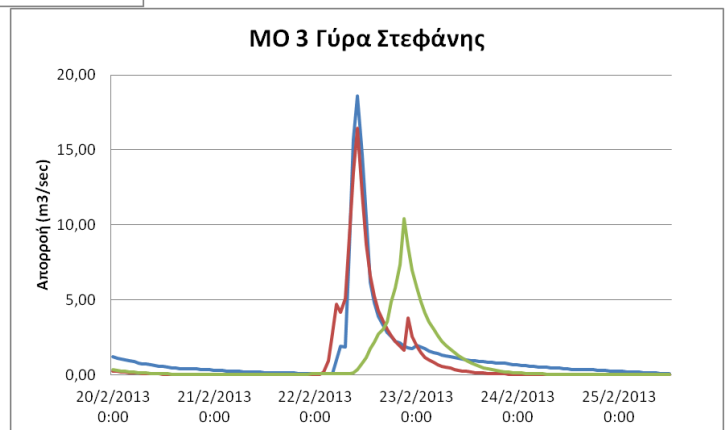
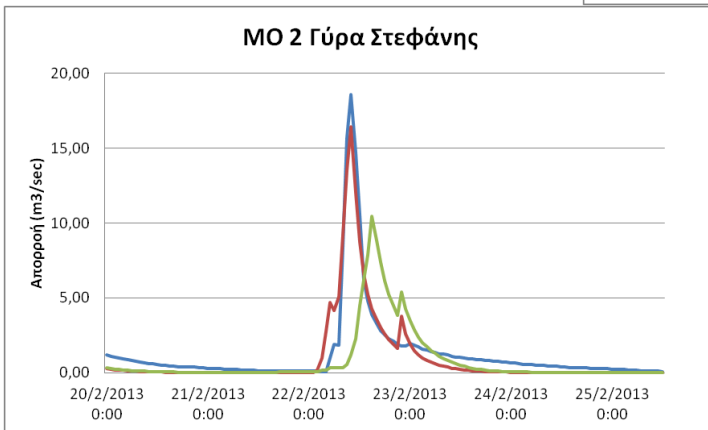
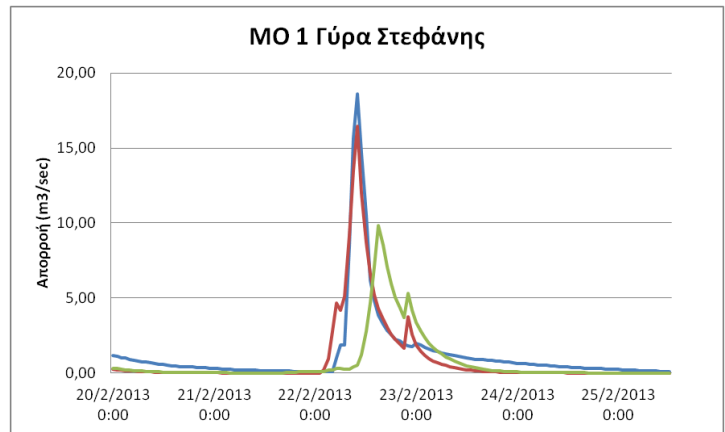
- Η αποτελεσματικότερη πρόγνωση είναι η 200213\_18, ενώ οι 210213\_12 και 210213\_18 δεν προσομοιώνουν καθόλου ικανοποιητικά την παρατηρημένη απορροή, γεγονός που συνδέεται και με την αστοχία των αντίστοιχων προγνώσεών τους.

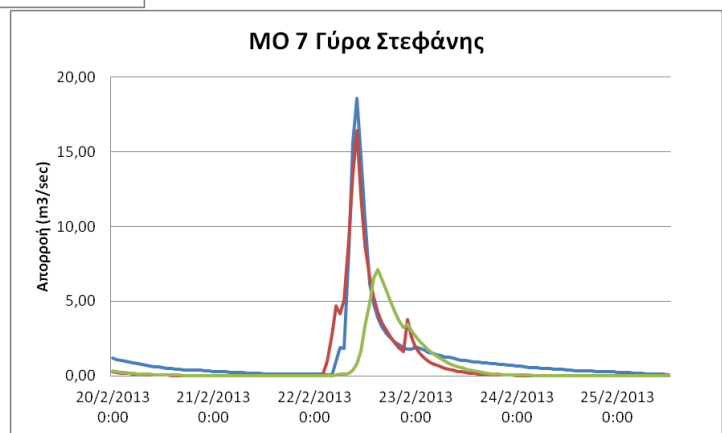
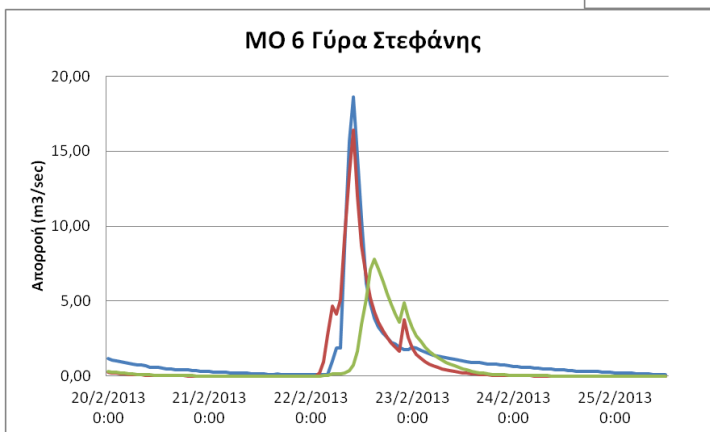
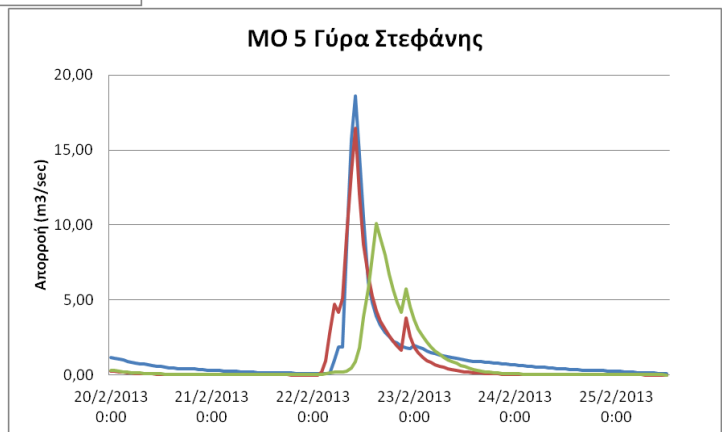
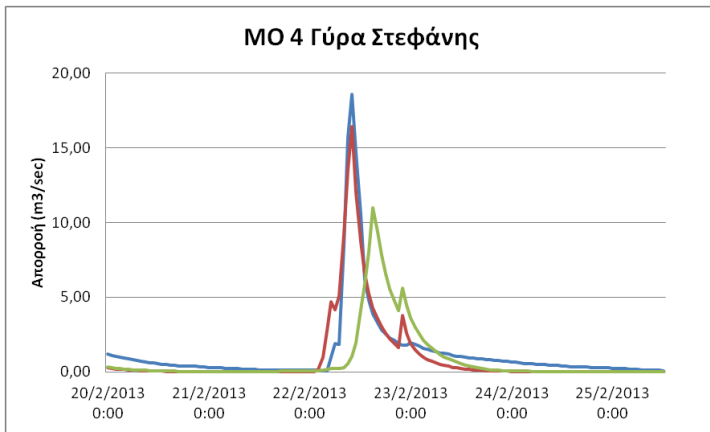






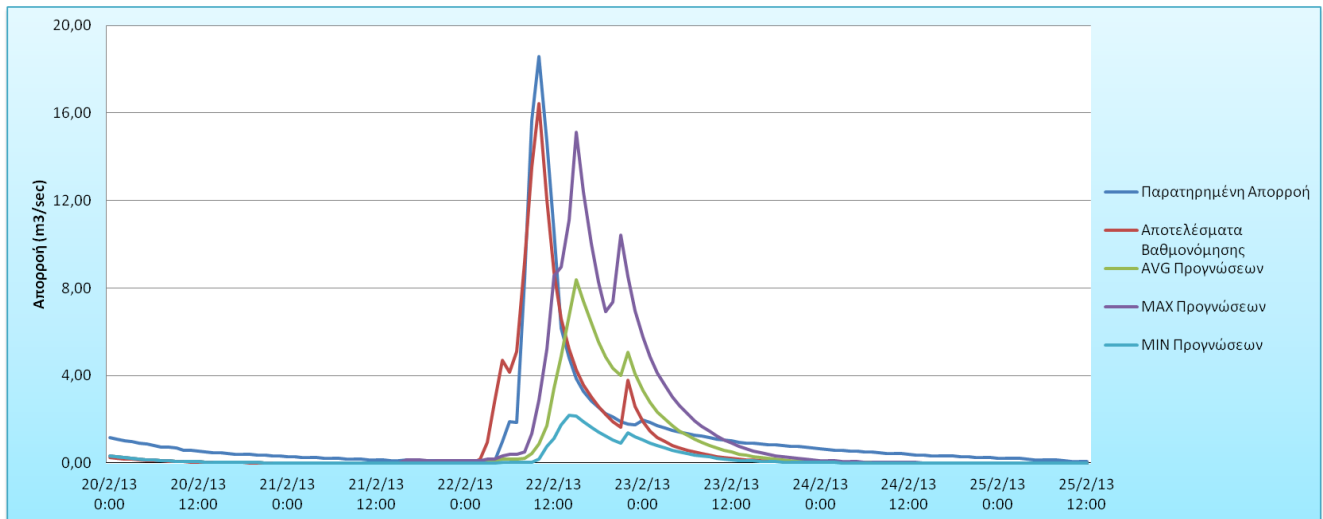
**Σχήμα 7.4** Η πρόγνωση απορροής στη Γύρα Στεφάνης (πράσινο) για τις προγνώσεις βροχόπτωσης με βελτιστοποίηση συμμετοχής των γειτονικών διακριτών σημείων για τις 8 προσομοιώσεις, σε σύγκριση με την παρατηρημένη απορροή (μπλε) και την απορροή από τη βαθμονόμηση (κόκκινο).





**Σχήμα 7.5** Η πρόγνωση της απορροής στη Γύρα Στεφάνης (πράσινο) με βάση τους 7 διαδοχικούς μέσους όρους των προγνώσεων μέσω βελτιστοποίησης, σε σύγκριση με την παρατηρημένη απορροή (μπλε) και την απορροή όπως προέκυψε από τη βαθμονόμηση (κόκκινο).



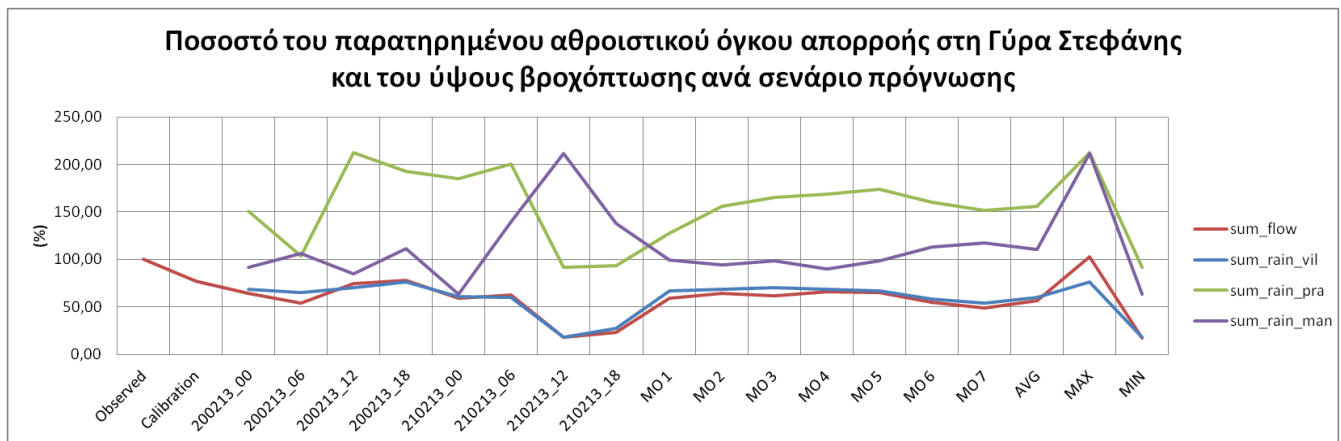


**Σχήμα 7.6** Η μέση (AVG), η μέγιστη (MAX) και η ελάχιστη (MIN) πρόγνωση της απορροής στη Γύρα Στεφάνης με βάση τα 15 σενάρια πρόγνωσης βροχοπτώσης που αναπτύχθηκαν με σημειακή ολοκλήρωση των προγνώσεων με βάση τους μετεωρολογικούς σταθμούς και βελτιστοποίηση της συμμετοχής της πρόγνωσης των γειτονικών στους σταθμούς διακριτών σημείων

Από τα παραπάνω διαγράμματα για τη Γύρα Στεφάνης παρατηρούμε:

- Η αιχμή της παρατηρημένης απορροής προσεγγίζεται ικανοποιητικά από αρκετά σενάρια πρόγνωσης. Συγκεκριμένα, η μέγιστη παρατηρημένη απορροή είναι 18,6 m<sup>3</sup>/sec, ενώ η μέση αιχμή των 15 σεναρίων είναι 8,4 m<sup>3</sup>/sec και η μέγιστη που εμφανίζεται για το σενάριο 200213\_18 είναι 15,11 m<sup>3</sup>/sec, δηλαδή το περίπου 45% και 80% της μέγιστης παρατηρημένης απορροής, ποσοστά εμφανώς βελτιωμένα σε σχέση με τη θέση μέτρησης στην Οινόη, αλλά και ικανοποιητικά ως προς την προγνωστική ικανότητα του μοντέλου. Εφόσον η βαθμονόμηση έχει προσομοιώσει ικανοποιητικά τη μέγιστη απορροή, η απόκλιση που παρατηρείται οφείλεται στις προγνώσεις για τη βροχοπτώση.
- Η υστέρηση μεταξύ της παρατηρημένης και της προσομοιωμένης χρονοσειράς είναι και στη Γύρα Στεφάνης 5 ώρες και όχι 8 όπως η αντίστοιχη υστέρηση των αιχμών των προγνώσεων βροχοπτώσης, γεγονός που εξηγήθηκε κατά τον σχολιασμό των αντίστοιχων διαγραμμάτων για την Οινόη. Συγκεκριμένα, η αιχμή της παρατηρημένης απορροής εμφανίζεται στις 22/02 10:00 ενώ η αντίστοιχη των προγνώσεων στις 22/02 15:00 και η αιχμή των προγνώσεων βροχοπτώσης ήταν στις 22/02 στις 07:00 για τα Βίλια και το Πράσινο και στις 11:00 για τη Μάνδρα. Βέβαια, στο σενάριο MO 3 η αντίστοιχη υστέρηση παρατηρούμε ότι είναι μεγαλύτερη καθώς η μέγιστη απορροή εμφανίζεται στις 22/02 21:00, γεγονός που αποτελεί αστοχία του υδρολογικού μοντέλου.

- Η αποτελεσματικότερη πρόγνωση είναι επίσης η 200213\_18, ενώ οι 210213\_12 και 210213\_18 δεν προσομοιώνουν επίσης καθόλου ικανοποιητικά την παρατηρημένη απορροή.

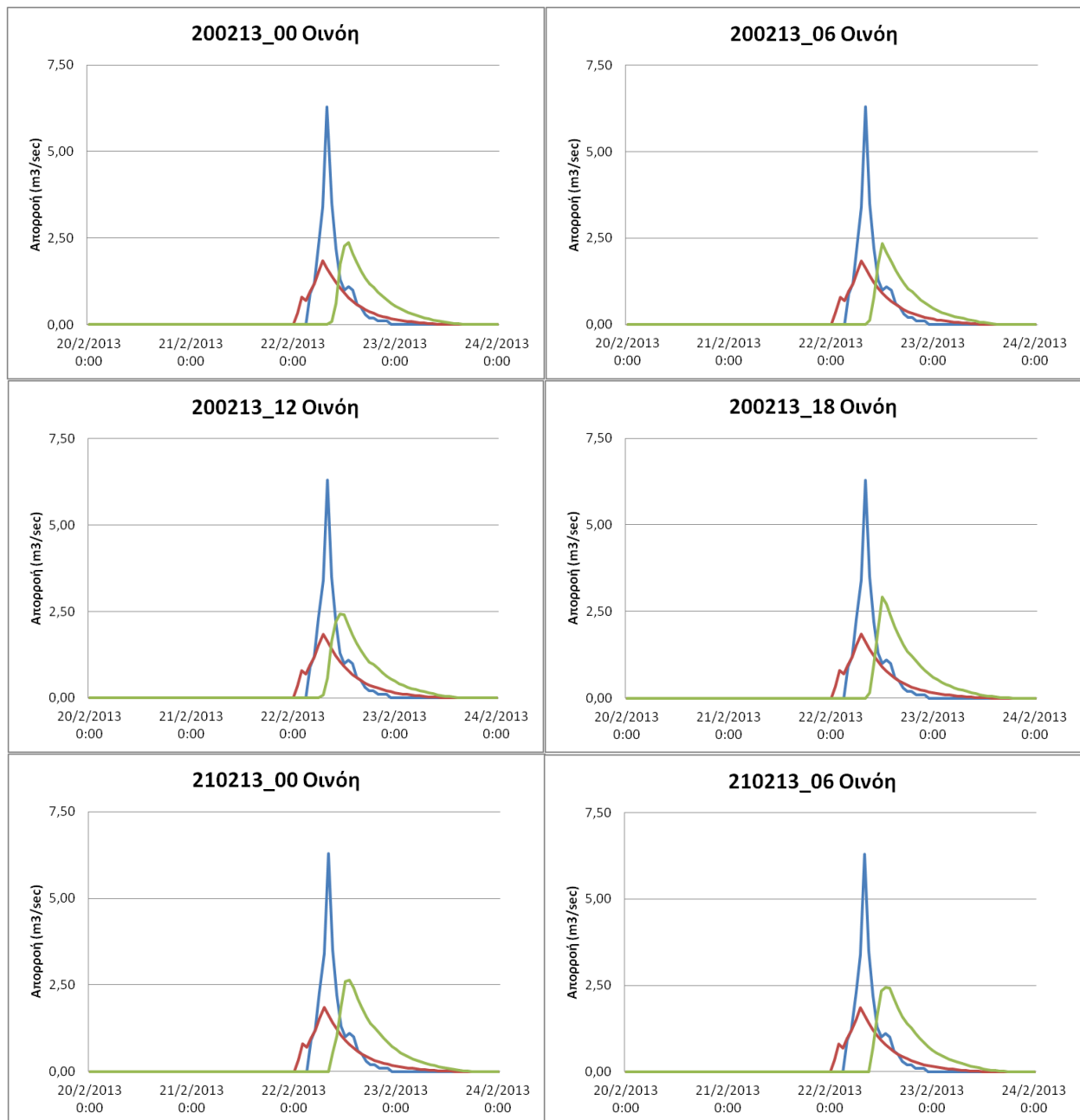


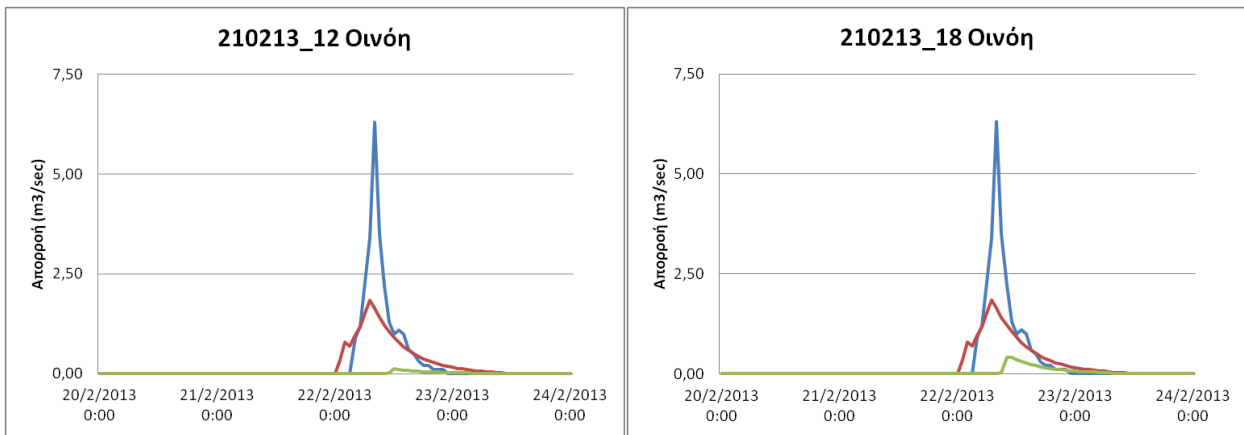
**Σχήμα 7.7** Το ποσοστό του παρατηρημένου αθροιστικού όγκου απορροής στη Γύρα Στεφάνης (*sum\_flow*) σε σύγκριση με το αντίστοιχο ποσοστό για τα ύψη βροχόπτωσης στα Βίλια (*sum\_rain\_vil*) στο Πράσινο (*sum\_rain\_pra*) και στη Μάνδρα (*sum\_rain\_man*) ανά σενάριο πρόγνωσης.

Από το Σχήμα 7.7, ενδιαφέρον έχει η παρατήρηση ότι το ποσοστό του παρατηρημένου όγκου απορροής που αποτελούν τα αποτελέσματα για την απορροή ανά σενάριο πρόγνωσης, οριακά ταυτίζεται με το αντίστοιχο ποσοστό του παρατηρημένου ύψους βροχόπτωσης στα Βίλια. Η συσχέτιση των δύο ποσοστών ανά σενάριο πρόγνωσης φτάνει το 0,975, δηλαδή είναι δύο πλήρως συσχετισμένα μεγέθη. Αυτό αποδεικνύει ότι η απορροή στην έξοδο της λεκάνης, στη Γύρα Στεφάνης, εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από τη βροχόπτωση στα Βίλια που είναι ο πιο απομακρυσμένος ανάντη της εξόδου μετεωρολογικός σταθμός, όπου παρατηρούνται και τα μεγαλύτερα ύψη βροχόπτωσης (βλ. Σχήματα 6.7 και 6.8). Οι αντίστοιχες συσχετίσεις για τους υπόλοιπους μετεωρολογικούς σταθμούς είναι μόλις 0,434 για το Πράσινο, ενώ για τη Μάνδρα είναι αρνητική στο -0,669, γεγονός που σημαίνει ότι η βροχόπτωση στη Μάνδρα δε συνδέεται γραμμικά ή σχεδόν γραμμικά με την απορροή στη λεκάνη του Σαρανταπόταμου αλλά πιθανότατα με την απορροή σε κάποια άλλη κατάντη λεκάνη. Επιπλέον, ο μέσος προσομοιωμένος αθροιστικός όγκος απορροής με βάση όλα τα σενάρια πρόγνωσης αποτελεί το 57% του αντίστοιχου παρατηρημένου.

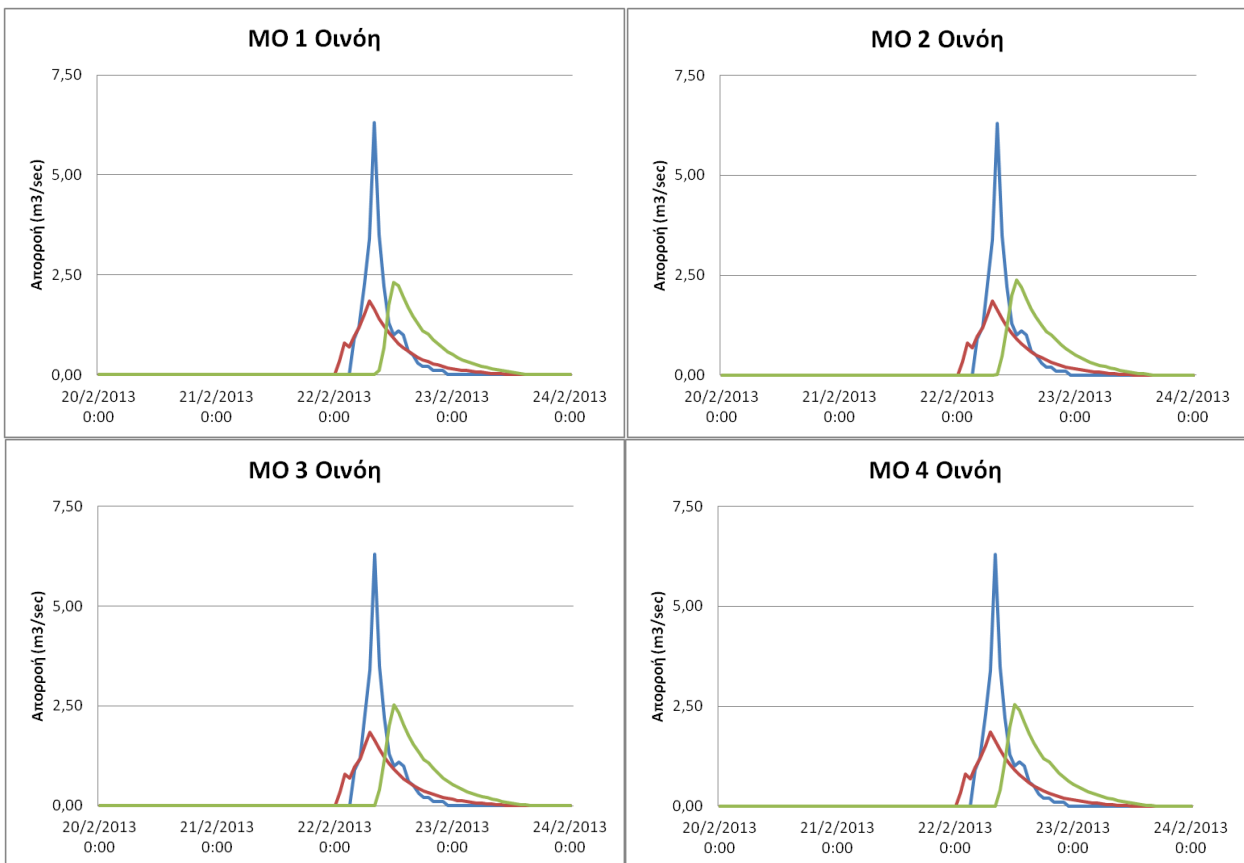
### 7.3 Αποτελέσματα απορροής με την επιφανειακή ολοκλήρωση των προγνώσεων

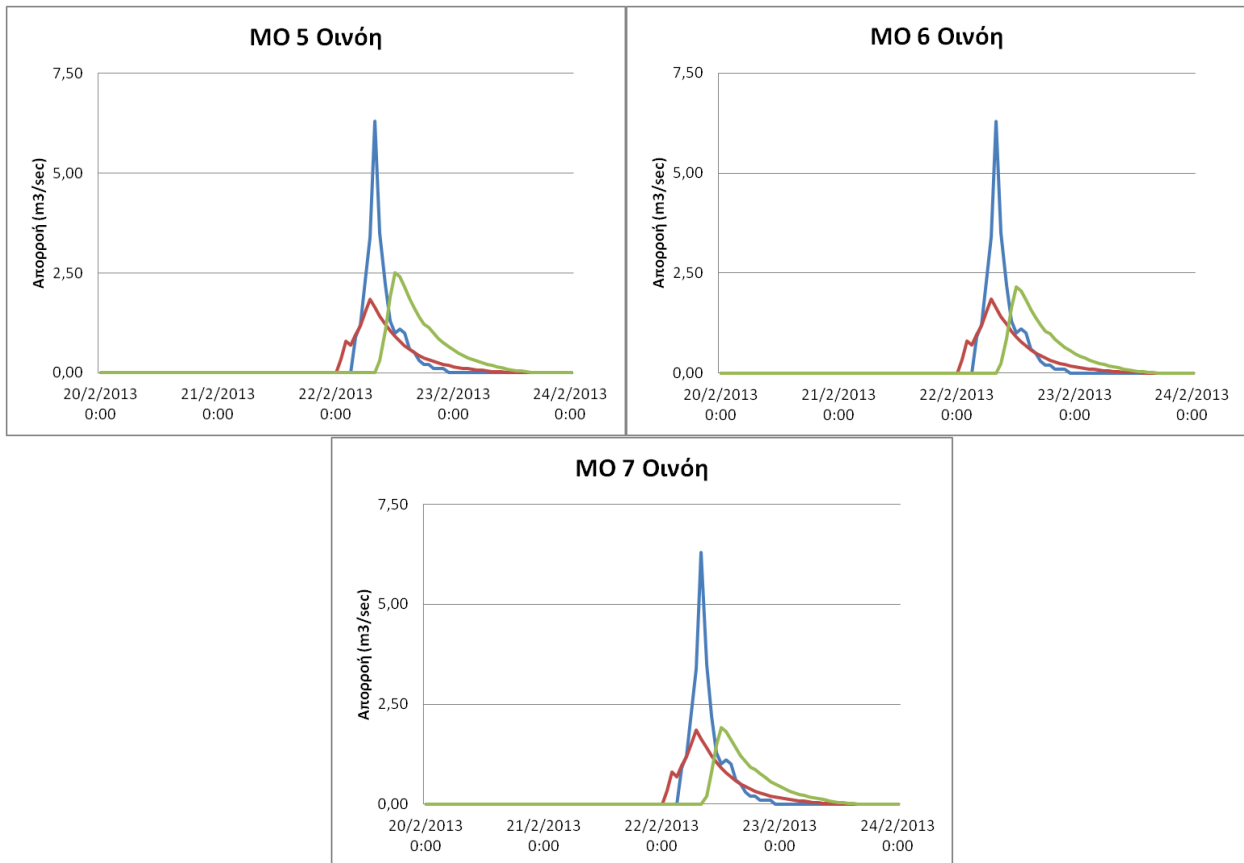
Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα για την απορροή, όπως προσομοιώθηκαν από το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ με βάση τα αποτελέσματα των 15 σεναρίων με επιφανειακή ολοκλήρωση της πρόγνωσης της βροχοπτώσης ανά υπολεκάνη για το σετ παραμέτρων της στοχικής συνάρτησης 2. Το διάστημα που επιλέγεται να παρουσιαστεί είναι το ίδιο με αυτό της παραγράφου 7.2 και για την Οινόη και για τη Γύρα Στεφάνης.



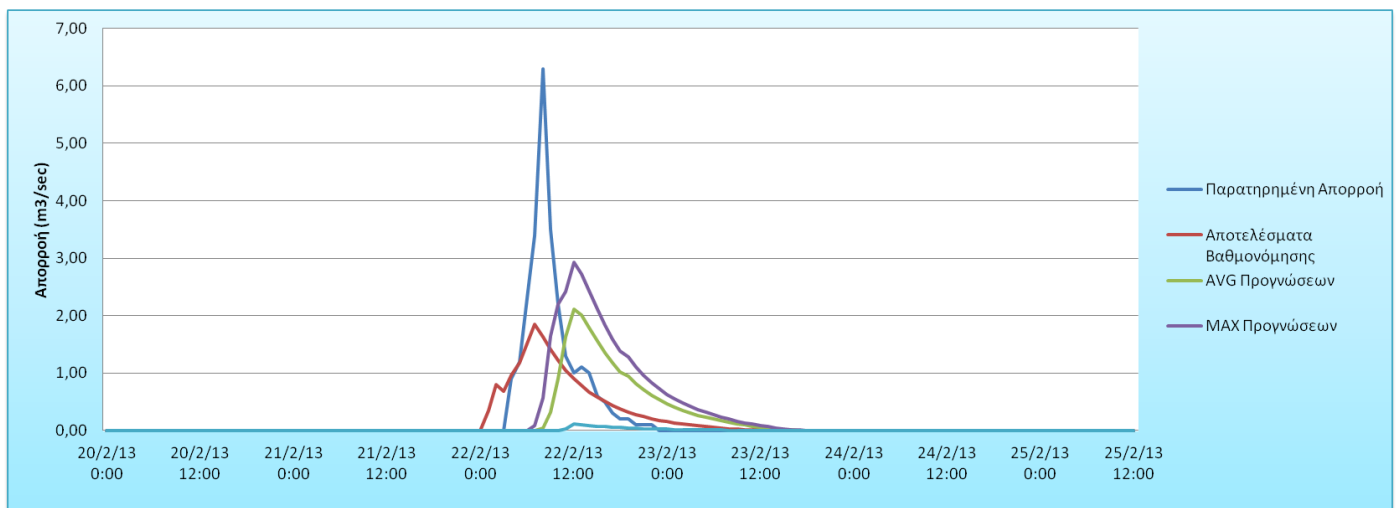


**Σχήμα 7.8** Η πρόγνωση της απορροής στην Οινόη (πράσινο) με βάση το μέσο όρο των προγνώσεων των διακριτών σημείων ανά υπολεκάνη (επιφανειακή ολοκλήρωση) για τις 8 προσομοιώσεις, σε σύγκριση με την παρατηρημένη απορροή (μπλε) και την απορροή όπως προέκυψε από τη βαθμονόμηση (κόκκινο).





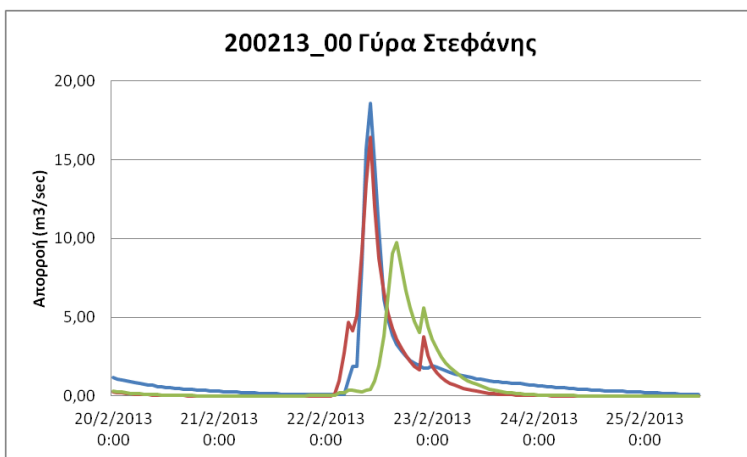
**Σχήμα 7.9** Η πρόγνωση της απορροής στην Οινόη (πράσινο) με βάση τους 7 διαδοχικούς μέσους όρους των 8 προσομοιώσεων με επιφανειακή ολοκλήρωση των προγνώσεων ανά υπολεκάνη σε σύγκριση με την παρατηρημένη απορροή (μπλε) και την απορροή όπως προέκυψε από τη βαθμονόμηση (κόκκινο).

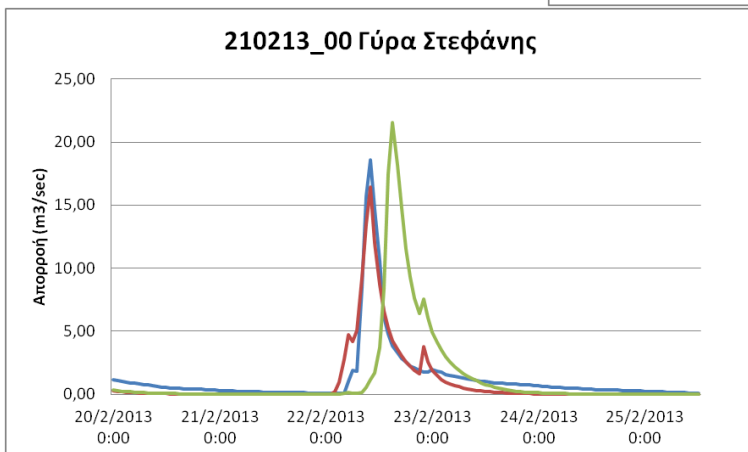
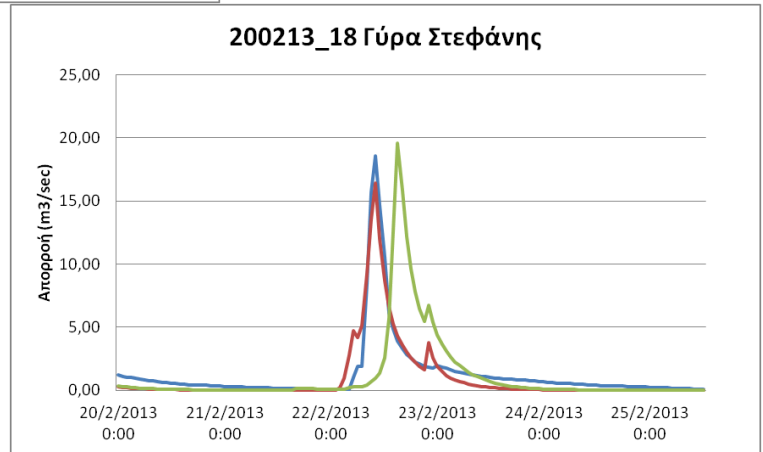
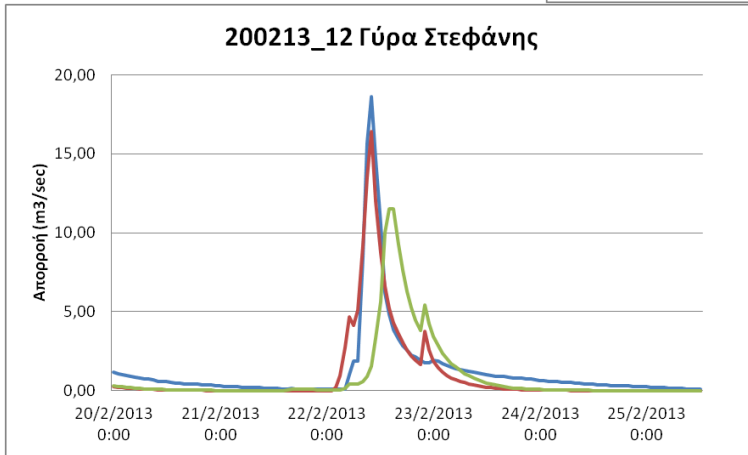
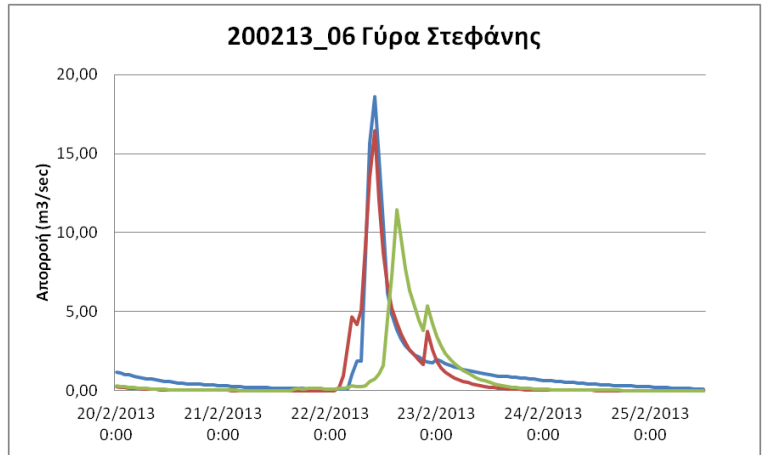


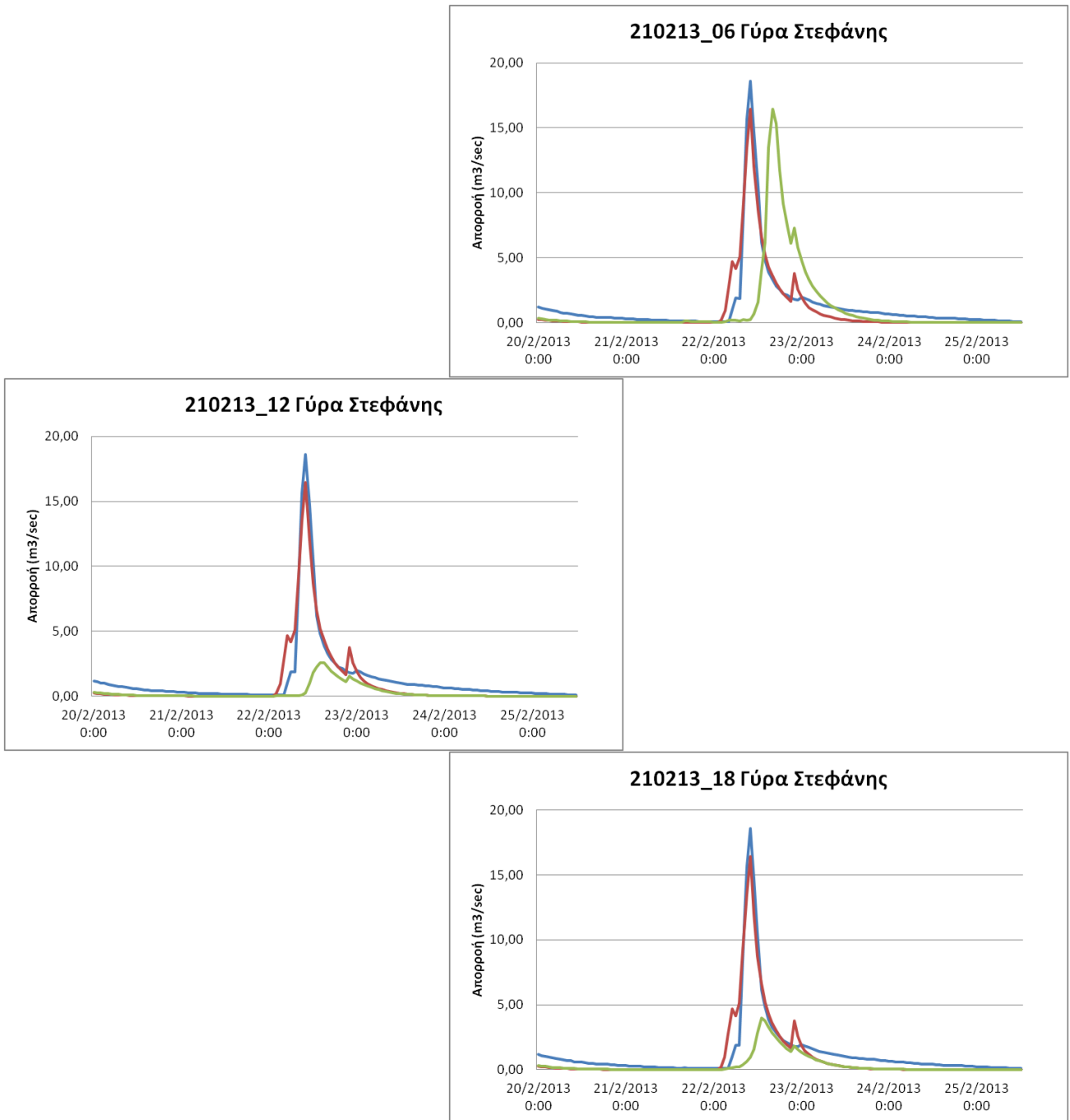
**Σχήμα 7.10** Η μέση (AVG), η μέγιστη (MAX) και η ελάχιστη (MIN) πρόγνωση της απορροής στην Οινόη με βάση τα 15 σενάρια πρόγνωσης βροχόπτωσης που αναπτύχθηκαν με επιφανειακή ολοκλήρωση των προγνώσεων βροχόπτωσης ανά υπολεκάνη

Από τα παραπάνω διαγράμματα για την Οινόη συμπεραίνουμε τα εξής:

- Καμία από τις προγνώσεις για την απορροή δε προσεγγίζει την μέγιστη απορροή στην Οινόη κατά τη διάρκεια του επεισοδίου, όπως και για τη σημειακή ανάλυση. Συγκεκριμένα, η παρατηρημένη αιχμή της απορροής είναι 6,3 m<sup>3</sup>/sec ενώ η μέγιστη πρόγνωση φτάνει τα 2,93 m<sup>3</sup>/sec (για το σενάριο βροχόπτωσης 200213\_18), δηλαδή λιγότερο από το 50% της παρατηρημένης απορροής, όπως και προηγουμένως, γεγονός που όπως εξηγήθηκε οφείλεται κατά κύριο λόγο στην απόκλιση προσέγγισης της αιχμής ήδη από τη βαθμονόμηση.
- Η υστέρηση των περίπου 8 ωρών που είχε παρατηρηθεί για τις προγνώσεις των βροχοπτώσεων με βάση τον μετεωρολογικό σταθμό των Βιλιών, που επηρεάζει άμεσα τη θέση στην Οινόη, δεν επιβεβαιώνεται και εδώ για τις απορροές καθώς η αντίστοιχη υστέρηση είναι γενικώς 4 ώρες και συγκεκριμένα ενώ η αιχμή της παρατηρημένης απορροής είναι στις 22/02 08:00, γενικώς η αιχμή των προσομοιώσεων εντοπίζεται στις 22/02 12:00. Αυτό εξηγείται όπως και προηγουμένως λόγω των δύο κλάδων της παρατηρημένης βροχόπτωσης στα Βίλια.
- Όπως φαίνεται και από την ταύτιση γενικώς των εξαγόμενων συμπερασμάτων, η επιφανειακή ανάλυση των προγνώσεων βροχόπτωσης ανά υπολεκάνη δε διαφοροποιεί σημαντικά την εικόνα για την πρόγνωση απορροής σε σχέση με τη σημειακή ανάλυση των προγνώσεων με βάση τους μετεωρολογικούς σταθμούς.

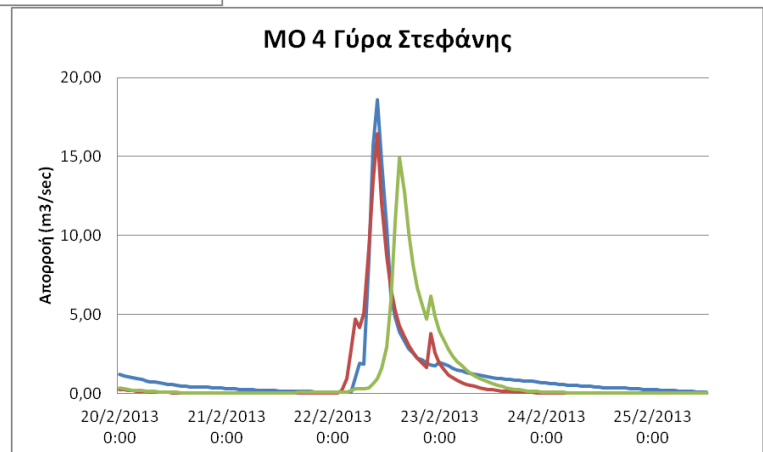
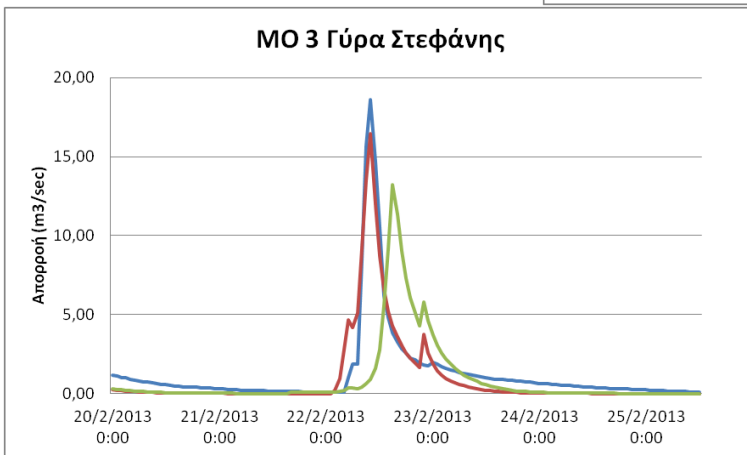
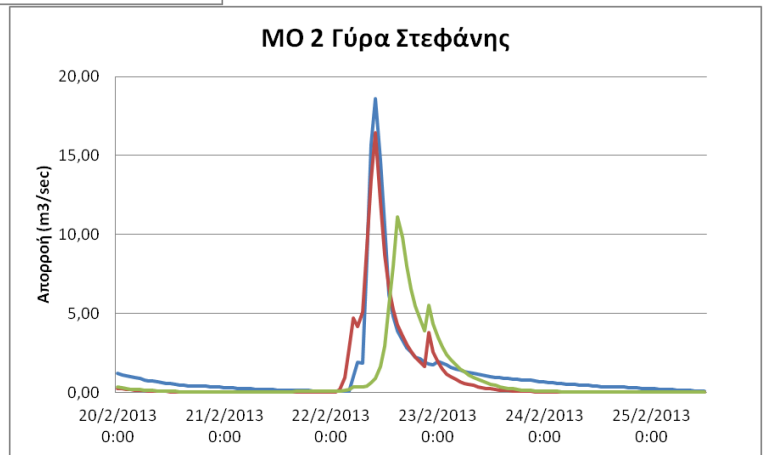
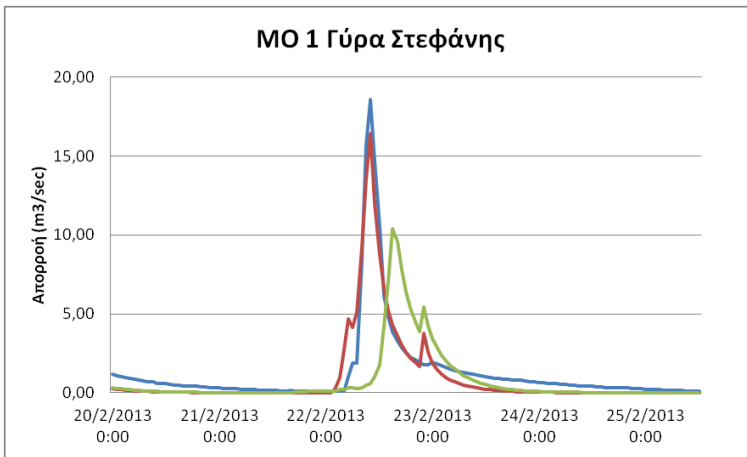


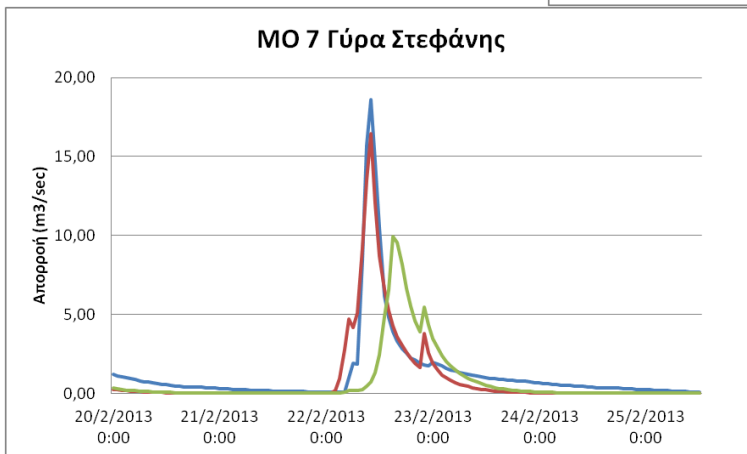
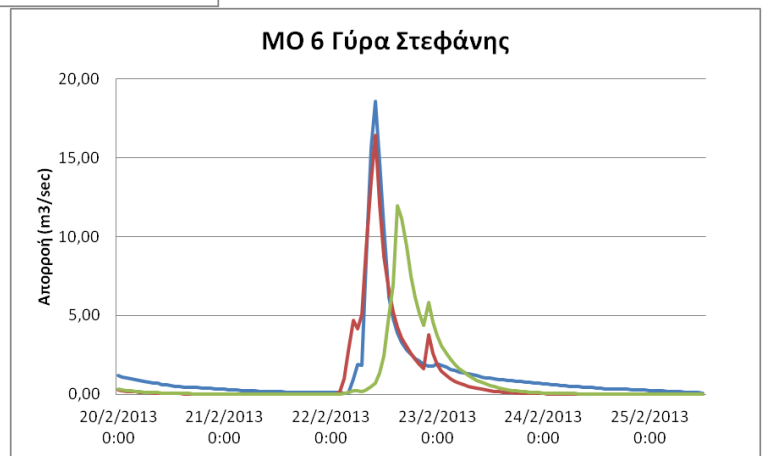
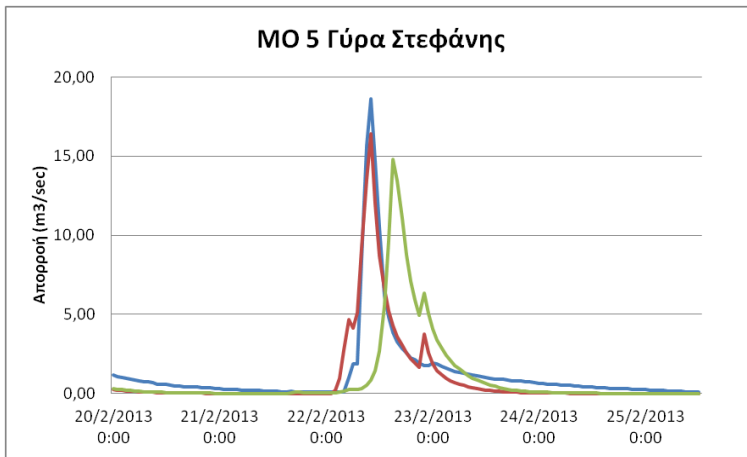




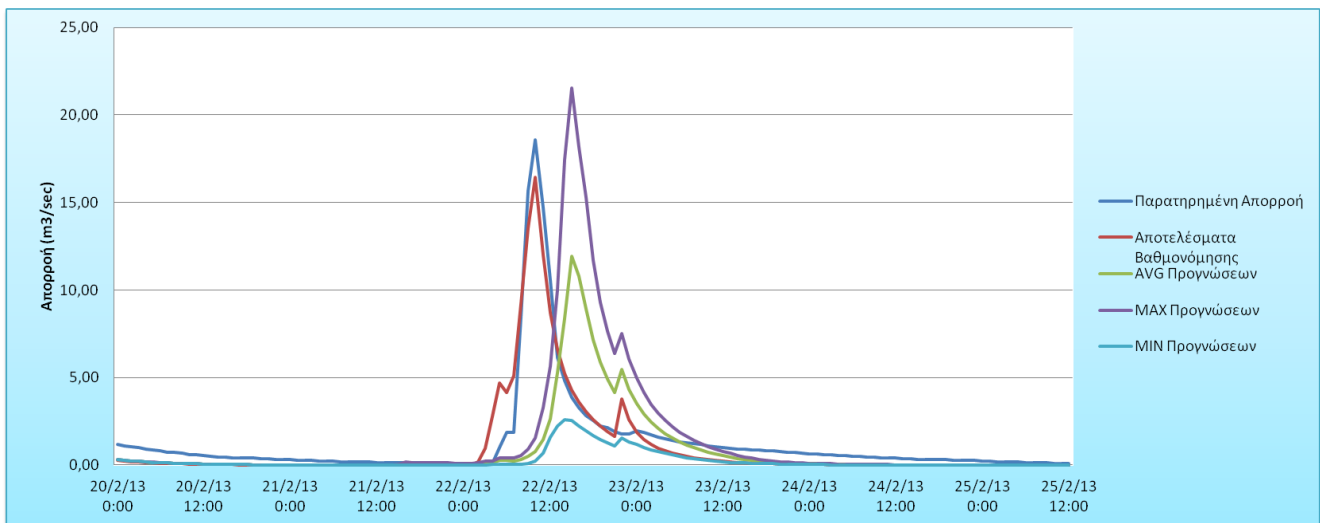
**Σχήμα 7.11** Η πρόγνωση της απορροής στη Γύρα Στεφάνης (πράσινο) με βάση το μέσο όρο των προγνώσεων των διακριτών σημείων ανά υπολεκάνη (επιφανειακή ολοκλήρωση) για τις 8 προσομοιώσεις, σε σύγκριση με την παρατηρημένη απορροή (μπλε) και την απορροή όπως προέκυψε από τη βαθμονόμηση (κόκκινο).







**Σχήμα 7.12** Η πρόγνωση της απορροής στη Γύρα Στεφάνης (πράσινο) με βάση τους 7 διαδοχικούς μέσους όρους των 8 προσομοιώσεων με επιφανειακή ολοκλήρωση των προγνώσεων ανά υπολεκάνη σε σύγκριση με την παρατηρημένη απορροή (μπλε) και την απορροή όπως προέκυψε από τη βαθμονόμηση (κόκκινο).

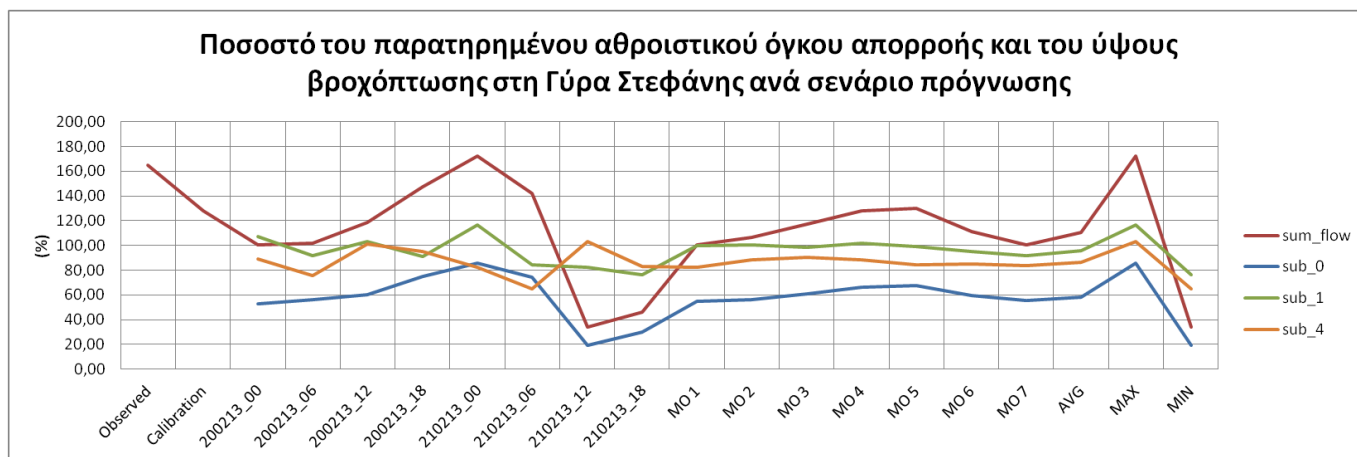


**Σχήμα 7.13** Η μέση (AVG), η μέγιστη (MAX) και η ελάχιστη (MIN) πρόγνωση της απορροής στη Γύρα Στεφάνης με βάση τα 15 σενάρια πρόγνωσης βροχόπτωσης που αναπτύχθηκαν με επιφανειακή ολοκλήρωση των προγνώσεων βροχόπτωσης ανά υπολεκάνη

Με βάση τα παραπάνω διαγράμματα για τη Γύρα Στεφάνης παρατηρούμε τα εξής:

- Η αιχμή της παρατηρημένης απορροής προσεγγίζεται επαρκώς από τα περισσότερα σενάρια πρόγνωσης και σε δύο περιπτώσεις (200213\_18 και 210213\_00) υπερεκτιμάται ελαφρώς, γεγονός που είναι αρκετά ενθαρρυντικό για την πλημμυρική πρόγνωση και προστασία. Συγκεκριμένα, η μέγιστη παρατηρημένη απορροή είναι 18,6 m<sup>3</sup>/sec, ενώ η μέση αιχμή των 15 σεναρίων είναι 11,92 m<sup>3</sup>/sec δηλαδή το 64% της μέγιστης παρατηρημένης απορροής, ποσοστό αντίστοιχο για τη σημειακή ανάλυση (45%), αλλά και αρκετά ικανοποιητικό ως προς την προγνωστική ικανότητα του μοντέλου. Οι μέγιστες αιχμές της προσομοιωμένης απορροής είναι 19,57 m<sup>3</sup>/sec για την 200213\_18, 21,53 m<sup>3</sup>/sec για την 210213\_00 και 16,44 m<sup>3</sup>/sec για την 210213\_06, δηλαδή το 105%, το 116% και το 88% της παρατηρημένης αιχμής.
- Η υστέρηση μεταξύ της παρατηρημένης και της προσομοιωμένης χρονοσειράς είναι όπως και τη σημειακή ανάλυση στη Γύρα Στεφάνης 5 ώρες και όχι 8 όπως η αντίστοιχη υστέρηση των αιχμών των προγνώσεων βροχόπτωσης, γεγονός που οφείλεται στους ίδιους λόγους με προηγουμένως. Συγκεκριμένα, η αιχμή της παρατηρημένης απορροής εμφανίζεται στις 22/02 10:00 ενώ η αντίστοιχη των προγνώσεων είναι γενικά στις 22/02 15:00 και η αιχμή των προγνώσεων βροχόπτωσης ήταν στις 22/02 στις 07:00 για τα Βίλια και το Πράσινο και στις 11:00 για τη Μάνδρα.

- Η αποτελεσματικότερη πρόγνωση εξακολουθεί να είναι η 200213\_18, ενώ οι 210213\_12 και 210213\_18 δεν προσομοιώνουν για μία ακόμη φορά καθόλου ικανοποιητικά την παρατηρημένη απορροή.



**Σχήμα 7.14** Το ποσοστό του παρατηρημένου αθροιστικού όγκου απορροής στη Γύρα Στεφάνης (*sum\_flow*) σε σύγκριση με το αντίστοιχο ποσοστό για τα ύψη βροχόπτωσης στην υπολεκάνη 0 (*sub\_0*), στην υπολεκάνη 1 (*sub\_1*) και στην υπολεκάνη 4 (*sub\_4*) ανά σενάριο πρόγνωσης.

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε το ποσοστό του παρατηρημένου όγκου απορροής που αποτελούν τα αποτελέσματα για την απορροή ανά σενάριο πρόγνωσης, παρουσιάζει την ίδια διακύμανση με το αντίστοιχο ποσοστό του παρατηρημένου ύψους βροχόπτωσης στην υπολεκάνη 0. Ο βαθμός συσχέτισης φτάνει 0,984, ενώ και για την υπολεκάνη 2 (που δεν απεικονίζεται) είναι ιδιαίτερα υψηλός στο 0,911. Αυτό σημαίνει ότι η απορροή εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη βροχόπτωση στις ανάντη υπολεκάνες όπου παρατηρούνται για το εν λόγω επεισόδιο και τα μεγαλύτερα ύψη βροχόπτωσης (βλ. Σχήμα 6.16) και είναι συμβατή με την προηγούμενη παρατήρηση στο αντίστοιχο Σχήμα 7.7 για τη σημειακή ανάλυση. Οι βαθμοί συσχέτισης για την υπολεκάνη 1 είναι 0,621 ενώ για την ακριβώς ανάντη της Γύρας Στεφάνης υπολεκάνη 4 είναι στο -0,137. Τέλος, ο μέσος προσομοιωμένος αθροιστικός όγκος απορροής με βάση όλα τα σενάρια πρόγνωσης αποτελεί το 67% του αντίστοιχου παρατηρημένου, ποσοστό βελτιωμένο κατά 10% σε σχέση με τη σημειακή ανάλυση.

## 7.4 Ανακεφαλαίωση. Υπόδειξη μεθοδολογίας πλημμυρικής πρόγνωσης

Με βάση τη σύγκριση όλων των παραπάνω αποτελεσμάτων εξαγονται τα κάτωθι συμπεράσματα:

- Η επιφανειακή ανάλυση των προγνώσεων βροχόπτωσης έδωσε εμφανώς καλύτερα αποτελέσματα από τη σημειακή ανάλυση στην πρόγνωση της απορροής στην έξοδο της λεκάνης στη Γύρα Στεφάνης. Στην ενδιάμεση θέση στην Οινόη τα αποτελέσματα έχουν την ίδια περιορισμένη αποτελεσματικότητα.
- Το σενάριο 200213\_18, δηλαδή η πρόγνωση βροχόπτωσης με αρχικές συνθήκες στις 20/02/13 18:00, περίπου 36 ώρες πριν την έναρξη του επεισοδίου και 42 ώρες από τη λήξη του χρόνου προγνώσεων, υπερέχει όλων των υπόλοιπων σεναρίων τόσο στην πρόγνωση της βροχόπτωσης όσο και στην πρόγνωση της απορροής με όλες τις μεθοδολογίες που ακολουθήθηκαν. Τα αμέσως βέλτιστα σενάρια είναι τα 200213\_12 και 210213\_00, δηλαδή το προηγούμενο και το επόμενο του βέλτιστου σεναρίου, αλλά και το 210213\_06 όπως και οι αντίστοιχοι διαδοχικοί μέσοι όροι τους (MO 3, MO 4, MO 5, MO 6).
- Αντίθετα, τα σενάρια 210213\_12 και 210213\_18, δηλαδή οι προσομοιώσεις με αρχικές συνθήκες στις 21/02/13 12:00 και 18:00, 18 και 12 ώρες πριν την έναρξη του επεισοδίου, απέτυχαν εντελώς από το να προσομοιώσουν τόσο τη βροχόπτωση όσο και την απορροή.
- Κανένα από τα παραπάνω σενάρια δεν αντιμετωπίζει τη σημαντική υστέρηση των 8 ωρών μετά της πρόγνωσης βροχόπτωσης από την παρατηρήσιμη, που μεταφέρεται γενικώς σε αντίστοιχη υστέρηση 5 ωρών στην απορροή.

Με βάση τα παραπάνω μπορεί να υποδειχθεί η ακόλουθη **μεθοδολογία πλημμυρικής πρόγνωσης σε σχεδόν πραγματικό χρόνο** για την ανάντη λεκάνη του Σαρανταπόταμου:

- (1) Λήψη δεδομένων βροχόπτωσης και απορροής από τους μετεωρολογικούς σταθμούς σε Βίλια, Πράσινο και Μάνδρα και τους υδρομετρικούς σταθμούς σε Οινόη και Γύρα Στεφάνης ανά επίσης 6 ώρες. Συνεχής προσομοίωση της απορροής μέσω του υδρολογικού μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ με το βέλτιστο σετ παραμέτρων το οποίο μπορεί να αναθεωρείται με νέες βαθμονομήσεις ανά τακτά χρονικά διαστήματα ώστε να προσομοιώνει αποτελεσματικότερα την απορροή και κυρίως τα πλημμυρικά επεισόδια.
- (2) Παραγωγή δεδομένων πρόγνωσης βροχής μέσω διαδοχικών προσομοιώσεων με το αριθμητικό μοντέλο WRF και χωρική ανάλυση 2x2 km με χρήση του πλέγματος 3 το οποίο καλύπτει τη λεκάνη του Σαρανταπόταμου. Η παραγωγή δεδομένων θα πραγματοποιείται ανά 6 ώρες με χρόνο έναρξης τον πραγματικό χρόνο εκτέλεσης της πρόγνωσης και χρόνο λήξης 48, 42, 36 και 30 ώρες μετά το χρόνο έναρξης.

- (3) Συγκέντρωση ανά 6 ώρες των προγνώσεων με ίδιο χρόνο λήξης και διενέργεια *ensemble* προγνώσεων μέσω των ίδιων των προσομοιώσεων και των διαδοχικών μέσων όρων τους. Μια ολοκληρωμένη διενέργεια *ensemble* πρόγνωσης για μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή θα έχει διάρκεια 24 ώρες και θα περιλαμβάνει 7 σενάρια πρόγνωσης βροχόπτωσης, τέσσερα των ίδιων των προσομοιώσεων με αρχικές συνθήκες 48, 42, 36 και 30 ώρες πριν τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή και τρία μέσω των διαδοχικών μέσων όρων τους.
- (4) Παραγωγή προγνώσεων βροχόπτωσης για κάθε μία από τις 5 υπολεκάνες της ανάντη λεκάνης του Σαρανταπόταμου, όπως αυτή σχηματοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, μέσω μέσου όρου των προγνώσεων των διακριτών σημείων εντός της κάθε υπολεκάνης και για τα 7 σενάρια πρόγνωσης.
- (5) Διόρθωση των δεδομένων πρόγνωσης βροχής σε περίπτωση όπου παρατηρούνται συστηματικά σφάλματα για συνεχόμενες προσομοιώσεις (για παράδειγμα για 5 και άνω προσομοιώσεις) σε σχέση με τις παρατηρημένες. Τα σφάλματα μπορεί να αφορούν είτε χρονική απόκλιση του χρόνου έναρξης της βροχόπτωσης σε σχέση με αυτόν που προβλέπει η πρόγνωση, είτε απόκλιση του μέγιστου ή του αθροιστικού ύψους βροχόπτωσης.
- (6) Εισαγωγή των 7 τελικών (διορθωμένων ή μη) σεναρίων πρόγνωσης βροχόπτωσης στο υδρολογικό μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ με βάση το αναθεωρημένο βέλτιστο σετ παραμέτρων, ως συνέχεια των σε πραγματικό χρόνο παρατηρημένων χρονοσειρών βροχόπτωσης. Εξαγωγή των δεδομένων πρόγνωσης απορροής για το χρονικό διάστημα προσομοίωσης.
- (7) Σε περίπτωση όπου η πρόγνωση για την απορροή υπερβαίνει ορισμένα κρίσιμα όρια πλημμυρικής επικινδυνότητας (τα οποία δεν έχουν καθοριστεί λόγω και της καθυστέρησης της εφαρμογής της Οδηγίας Πλαίσιο 2007/60/ΕΚ για τις Πλημμύρες) για την πλειοψηφία των σεναρίων πρόγνωσης ενημέρωση των αρμόδιων υπηρεσιών πολιτικής προστασίας.
- (8) Σε περίπτωση επίσης όπου οι προγνώσεις βροχόπτωσης είναι για συνεχόμενες προσομοιώσεις μηδενικές ή πολύ μικρές μη εκτέλεση των βημάτων (3) έως (7).

Η παραπάνω μεθοδολογία με βάση τη διαδικασία πλημμυρικής πρόγνωσης που ακολουθήθηκε στην παρούσα εργασία λαμβάνει υπόψη της τα εξής:

- Χρησιμοποιεί τα βέλτιστα σενάρια πρόγνωσης όπως προέκυψαν από τα αποτελέσματα για την απορροή, δηλαδή ουσιαστικά τα 200213\_12, 200213\_18,

210213\_00 και 210213\_06 (δηλαδή αυτά με χρόνο έναρξης πρόγνωσης 48, 42, 36 και 30 ώρες νωρίτερα από το χρόνο λήξης) και τους εξαγόμενους από αυτά διαδοχικούς μέσους όρους. Αντιθέτως, δε χρησιμοποιεί τα σενάρια που έδωσαν μέτριες (κατ' αντιστοιχία τα 200213\_00 και 200213\_06) ή εντελώς άστοχες προγνώσεις (210213\_12 και 210213\_18).

- Ανάγει τις προγνώσεις βροχόπτωσης με βάση όλα τα διακριτά σημεία ανά υπολεκάνη (επιφανειακή ανάλυση), μεθοδολογία που έδωσε γενικώς καλύτερα αποτελέσματα από τη σημειακή ανάλυση με βάση τους μετεωρολογικούς σταθμούς.
- Επιχειρεί να επιλύσει το πρόβλημα της συστηματικής υστέρησης των 8 ωρών μετά που παρατηρήθηκε στο χρόνο έναρξης όλων των προσομοιώσεων για τη βροχόπτωση.

Βέβαια, είναι δεδομένο ότι η εφαρμογή μιας τέτοιας μεθοδολογίας πέρα από περαιτέρω διερεύνηση απαιτεί πρώτα από όλα τη δημιουργία ενός φορέα εκτέλεσης πλημμυρικών προγνώσεων σε μικρή ή μεγαλύτερη κλίμακα, με την αγκαστή συνεργασία των μετεωρολογικών και υδρολογικών υπηρεσιών, αλλά και την εξέλιξη όσον αφορά την άμεση μετάδοση των μετεωρολογικών και υδρομετρικών παρατηρήσεων αλλά και την εκτέλεση των υπολογισμών σε σχεδόν (εφόσον η υπολογιστική διαδικασία δεν μπορεί να αυτοματοποιηθεί πλήρως και να εκμηδενιστεί χρονικά) πραγματικό χρόνο, που απαιτεί σημαντικό υπολογιστικό φόρτο (για τα συστήματα πλημμυρικής πρόγνωσης βλ. 2.6).

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8:** **ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

### **8.1 Συμπεράσματα**

Τα γενικά συμπεράσματα της παρούσας εργασίας είναι τα ακόλουθα:

- Η κατάσταση στην Ελλάδα σε σχέση με την προσομοίωση των λεκανών απορροής της και άρα τη δυνατότητα ανάπτυξης κατάλληλων υδρολογικών μοντέλων και εν συνεχεία, συστημάτων πλημμυρικής πρόγνωσης, υστερεί αρκετά σε σχέση με τα αντίστοιχα επιτεύγματα σε ευρωπαϊκό επίπεδο. Οι μετεωρολογικές αλλά κυρίως οι υδρομετρικές δομές εκλείπουν στην ελληνική επικράτεια, ενώ απουσιάζει η απαραίτητη συνεργασία των υδρολογικών και μετεωρολογικών υπηρεσιών σε εθνικό επίπεδο.
- Η ύπαρξη υδρομετρικών σταθμών, όχι μόνο στην έξοδο κάθε λεκάνης αλλά και σε ανάντη θέσεις, όπως εν προκειμένω στην Οινόη επιτρέπει, την καλύτερη κατανόηση των μηχανισμών γέννησης της απορροής, που διαφοροποιούνται σημαντικά λόγω της έντονης χωρικής ανομοιογένειας των φυσιογραφικών χαρακτηριστικών εντός των λεκανών. Η ανάγκη αυτή επιτάσσεται από την παρατήρηση ότι δεν ισχύει σε καμία περίπτωση ότι στο X% της λεκάνης παράγεται το X% της απορροής ειδικά σε λεκάνες εφήμερης ροής (η ανάντη λεκάνη της Οινόης αποτελεί το 1/3 της συνολικής λεκάνης του Σαρανταπόταμου όμως παράγει περίπου το 10% της συνολικής απορροής).
- Ο συντελεστής απορροής σε λεκάνες χειμαρρικής διαίτας όπως του Σαρανταπόταμου, είναι της τάξης του 2-3% και το μεγαλύτερο μέρος της



βροχόπτωσης είτε εξατμίζεται είτε διαφεύγει μέσω του υπόγειου υδροφορέα, διαδικασία που υποβοηθείται από την ύπαρξη έντονα καρστικοποιημένων ασβεστολιθικών πετρωμάτων που επιτείνουν τη διήθηση και κατείσδυση του νερού.

- Η μορφή των υδρογραφημάτων σε χειμαρρικές λεκάνες παρουσιάζει σε γενικές γραμμές έναν σχεδόν κατακόρυφο ανοδικό κλάδο και έναν εκθετικό καθοδικό κλάδο με χρόνο εκφόρτισης πολύ μεγαλύτερο από το χρόνο συγκέντρωσης κατά Giandotti.

Όσον αφορά τα συμπεράσματα από τη μοντελοποίηση της χειμαρρικής λεκάνης του Σαρανταπόταμου αυτά είναι:

- Η επίδοση του υδρολογικού μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ σε μία λεκάνη χειμαρρικής διαίτας, όπως αυτή του Σαρανταπόταμου, αν και υστερεί σε σχέση με αντίστοιχες επιδόσεις του εν λόγω μοντέλου σε λεκάνες με μόνιμη απορροή, εντούτοις κρίνεται αρκετά ικανοποιητική αν συνυπολογιστεί και η χρήση ενός μικρού δείγματος πραγματικών δεδομένων για τη βαθμονόμηση των παραμέτρων, δεδομένου ότι προσομοιώνει επαρκώς τα περισσότερα πλημμυρικά επεισόδια.
- Η σχηματοποίηση του πεδίου εφαρμογής για την ανάπτυξη υδρολογικών μοντέλων πρέπει να διακρίνεται από τη μέγιστη δυνατή φειδωλότητα τόσο στη χωρική διακριτοποίηση του επιφανειακού συστήματος, των ΜΥΑ και του υπόγειου συστήματος όσο και στην επιλογή παραμέτρων, ώστε αφενός να μειώνεται ο υπολογιστικός φόρτος και αφετέρου να αποφεύγεται ο κίνδυνος υπερπροσαρμογής του μοντέλου με συνέπεια να λάβει χαρακτηριστικά μοντέλου «μαύρου κουτιού».
- Η φυσική σημασία των επιλεγμένων παραμέτρων του επιφανειακού συστήματος αποδίδεται σε μεγάλο βαθμό από τις τιμές του βέλτιστου σετ παραμέτρων. Αυτό αποδεικνύει τόσο την αποτελεσματική προσομοίωση του μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ ως εννοιολογικού μοντέλου με προσέγγιση φυσικής βάσης, όσο και τον επιτυχημένο ορισμό των Μονάδων Υδρολογικής Απόκρισης μέσω του συντελεστή καμπύλης απορροής CN, της μεθόδου SCS-CN.

Τέλος, τα συμπεράσματα από τη διερεύνηση της υδρομετεωρολογικής πρόγνωσης είναι:

- Το μέγεθος του ύψους βροχόπτωσης συνδέεται σε σημαντικό βαθμό με το μέγεθος του όγκου απορροής κατά την προσομοίωση με το υδρολογικό μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ, γεγονός που «μεταφέρει» σε ένα βαθμό την όποια αβεβαιότητα της πρόγνωσης βροχόπτωσης σε μέγεθος, χρόνο έναρξης και χρονική διάρκεια και στα αντίστοιχα στοιχεία της πλημμυρικής πρόγνωσης.
- Το αριθμητικό μοντέλο πρόγνωσης καιρού WRF, προβλέπει ικανοποιητικά το ύψος βροχόπτωσης, ενδέχεται όμως να περιλαμβάνει σημαντικές αποκλίσεις ως προς τον χρόνο έναρξης των επεισοδίων βροχής.
- Οι προγνώσεις βροχόπτωσης πολύ μικρής κλίμακας (12 ή 18 ώρες πριν το επεισόδιο βροχόπτωσης) προβλέπουν ανεπαρκώς το ύψος βροχόπτωσης. Αντίθετα, προγνώσεις μεγαλύτερης κλίμακας (1,5 με 2 ημέρες πριν το επεισόδιο βροχόπτωσης) μπορούν να προσεγγίσουν ικανοποιητικά τα παρατηρούμενα ύψη βροχόπτωσης.
- Η πρόγνωση βροχόπτωσης και συνεκδοχικά και η πρόγνωση απορροής για μία συγκεκριμένη περιοχή είναι περισσότερο επιτυχημένες όταν λαμβάνουν υπόψη τους τις προγνώσεις βροχόπτωσης για όλα τα διακριτά σημεία εντός της περιοχής αυτής (επιφανειακή ανάλυση), από όταν χρησιμοποιούν μόνο τις προγνώσεις βροχόπτωσης από τα γειτονικά στους εγκατεστημένους μετεωρολογικούς σταθμούς διακριτά σημεία (σημειακή ανάλυση).

## **8.2 Προτάσεις**

Ορισμένες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα θα μπορούσαν να είναι οι εξής:

- Η επανάληψη των διαδικασιών προσομοίωσης με μεγαλύτερες χρονοσειρές πρωτογενών δεδομένων για την αποτελεσματικότερη βαθμονόμηση των παραμέτρων αλλά και για να πραγματοποιηθεί με καλύτερο τρόπο η επαλήθευση των αναπτυσσόμενων μοντέλων.
- Η σύνδεση του υδρολογικού μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ με την παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών βροχόπτωσης μεγάλου μήκους μέσω κατάλληλου στοχαστικού μοντέλου, για τη βέλτιστη βαθμονόμηση των παραμέτρων του μοντέλου και την αποτελεσματικότερη προσομοίωση σε κλίμακα περιόδων επαναφοράς σχεδιασμού, γεγονός που θα βοηθήσει τον υδρολογικό σχεδιασμό.

- Η διερεύνηση και ανάπτυξη της επιχειρησιακής χρήσης του υδρολογικού μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ, ως πλήρους μοντέλου υδρομετεωρολογικής πρόγνωσης για τη λεκάνη του Σαρανταπόταμου, ή για άλλες ελληνικές λεκάνες με παρόμοια φυσιογραφικά χαρακτηριστικά, με τη συνεχή τροφοδοσία του με σενάρια βροχόπτωσης σε σχεδόν πραγματικό χρόνο. Η εξέταση των οικονομικών, τεχνικών και λειτουργικών απαιτήσεων μιας τέτοιας ενέργειας για την αποτελεσματική πλημμυρική πρόγνωση και προειδοποίηση.
- Η χρήση των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας για την υποβοήθηση της εκτέλεσης της Οδηγίας 2007/60/ΕΚ για την εκτίμηση και τη διαχείριση της πλημμυρικής διακινδύνευσης με στόχο τη μείωση των κινδύνων από τις πλημμύρες και των συνεπειών τους, η οποία έχει εκδοθεί από το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο. Η ολοκληρωμένη υδραυλική προσομοίωση της λεκάνης του Σαρανταπόταμου, θα μπορούσε να οδηγήσει στην κατασκευή των χαρτών επικινδυνότητας πλημμύρας (flood hazard maps) και των χαρτών κινδύνων πλημμύρας (flood risk maps) ώστε να επιτευχθούν οι στόχοι για την πλημμυρική προστασία των περιοχών.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ**

- Ευρωπαϊκή Επιτροπή, *Οδηγία 2007/60/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23<sup>ης</sup> Οκτωβρίου 2007 για την αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας*, Επίσημη Εφημερίδα των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων, 8 σελίδες, ΕΛ, 6/11/2007: L288/27-L288/34
- Ευστρατιάδης, Α., *Μη γραμμικές μέθοδοι σε πολυκριτηριακά προβλήματα βελτιστοποίησης υδατικών πόρων, με έμφαση στη βαθμονόμηση υδρολογικών μοντέλων*, Διδακτορική Διατριβή, 391 σελίδες, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, Αθήνα, 2008
- Ευστρατιάδης, Α., Α. Κουκουβίνος, Π. Δημητριάδης, Π. Κοσσιέρης, και Α. Κούσης, *Ανάπτυξη φυσικά εδραιωμένων εργαλείων υδρολογίας πλημμύρων*, ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ – Εκτίμηση πλημμυρικών ροών στην Ελλάδα σε συνθήκες υδροκλιματικής μεταβλητότητας: Ανάπτυξη φυσικά εδραιωμένου εννοιολογικού-πιθανολογικού πλαισίου και υπολογιστικών εργαλείων, Ανάδοχοι: Γραφείο Μελετών ΕΤΜΕ – Αντωνίου – Πέππας και Συνεργάτες, Γραφείο Μαχαίρα, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, Αθήνα, 2014 (εκκρεμεί)
- Ευστρατιάδης, Α., Α. Κουκουβίνος, Ν. Μαμάσης και Δ. Κουτσογιάννης, *Μεθοδολογία εκτίμησης πλημμυρογραφημάτων σχεδιασμού*, 13 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Μάιος 2014
- Ευστρατιάδης, Α., Δ. Κουτσογιάννης, Ν. Μαμάσης, Π. Δημητριάδης, και Α. Μαχαίρας, *Βιβλιογραφική επισκόπηση υδρολογίας πλημμυρών και συναφών εργαλείων*, ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ – Εκτίμηση πλημμυρικών ροών στην Ελλάδα σε συνθήκες υδροκλιματικής μεταβλητότητας: Ανάπτυξη φυσικά εδραιωμένου εννοιολογικού-πιθανοτικού πλαισίου και υπολογιστικών εργαλείων, Ανάδοχοι: ΕΤΜΕ: Πέππας & Συν/τες Ε.Ε., Γραφείο Μαχαίρα, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, 115 σελίδες, Οκτώβριος 2012, Αθήνα
- Ευστρατιάδης, Α., και Μαμάσης, *Η Οδηγία πλαίσιο 2007/60 για την εκτίμηση και διαχείριση της πλημμυρικής διακινδύνευσης*, Παρουσίαση για το μάθημα «Διαχείριση Υδατικών

Πόρων» του μεταπτυχιακού προγράμματος ΔΠΜΣ Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων, 17 σελίδες, Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2011

- Ευστρατιάδης, Α., Ε. Ρόζος, και Α. Κουκουβίνος, *Υδρόγειος: Μοντέλο υδρολογικής και υδρογεωλογικής προσομοίωσης – Θεωρητική Τεκμηρίωση*, 139 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2009
- Ζύγουρα, Α., *Ο ρόλος των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών του υδρογραφικού δικτύου του Σαρανταπόταμου στον πλημμυρικό κίνδυνο του Θριάσιου Πεδίου*, Μεταπτυχιακή Εργασία, 105 σελίδες, Τμήμα Γεωγραφίας – Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Αθήνα, Ιούλιος 2011
- Ζωγάκης, Χ., *Σύγκριση Μοντέλων Γεγονότος και Συνεχούς Προσομοίωσης για την εκτίμηση πλημμυρικών μεγεθών: Εφαρμογή στη λεκάνη του Νέδοντα*, Μεταπτυχιακή Εργασία, 190 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Μάρτιος 2013
- Κοτρώνη, Β., *Εισαγωγή στην Αριθμητική Πρόγνωση Καιρού – Μετεωρολογικά Μοντέλα*, Παρουσίαση για το μάθημα «Υδρομετεωρολογία» του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων», 55 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2010
- Κοτρώνη, Β., Κωλέτσης Ι., Λαγουβάρδος Κ., *Τεχνική έκθεση θεωρητικής τεκμηρίωσης μοντέλων πρόγνωσης καταιγίδων, ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ – Εκτίμηση πλημμυρικών ροών στην Ελλάδα σε συνθήκες υδροκλιματικής μεταβλητότητας: Ανάπτυξη φυσικά εδραιωμένου εννοιολογικού-πιθανολογικού πλαισίου και υπολογιστικών εργαλείων*, Ανάδοχοι: Γραφείο Μελετών ΕΤΜΕ – Αντωνίου – Πέππας και Συνεργάτες, Γραφείο Μαχαίρα, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, 16 σελίδες, Ιούλιος 2014 (εκκρεμεί)
- Κουκουβίνος, Α., *Γεωγραφικά δεδομένα και επεξεργασίες, ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ – Εκτίμηση πλημμυρικών ροών στην Ελλάδα σε συνθήκες υδροκλιματικής μεταβλητότητας: Ανάπτυξη φυσικά εδραιωμένου εννοιολογικού-πιθανολογικού πλαισίου και υπολογιστικών εργαλείων*, Ανάδοχοι: Γραφείο Μελετών ΕΤΜΕ – Αντωνίου – Πέππας

και Συνεργάτες, Γραφείο Μαχαίρα, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, 36 σελίδες, Μάρτιος 2012

- Κούσης, Α. Δ., Σ. Λυκούδης και Γ. Καραβοκυρός, *Τεχνική έκθεση περιγραφής μετρητικού συστήματος τηλεμετάδοσης - επεξεργασίας δεδομένων, ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ - Εκτίμηση πλημμυρικών ροών στην Ελλάδα σε συνθήκες υδροκλιματικής μεταβλητότητας: Ανάπτυξη φυσικά εδραιωμένου εννοιολογικού-πιθανολογικού πλαισίου και υπολογιστικών εργαλείων*, Ανάδοχοι: Γραφείο Μελετών ΕΤΜΕ - Αντωνίου - Πέππας και Συνεργάτες, Γραφείο Μαχαίρα, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, 77 σελίδες, Μάρτιος 2012
- Κουτσογιάννης, Δ., και Μαμάσης Ν., *Υδρολογική διερεύνηση ισχυρών βροχοπτώσεων και στερεοαπορροών του Θριασίου Πεδίου*, 21 σελίδες, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2001
- Κουτσογιάννης, Δ., και Ξανθόπουλος, Θ., *Τεχνική Υδρολογία*, Έκδοση 3, 418 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1999
- Μαμάσης, Ν., και Δ. Κουτσογιάννης, *Σημειώσεις Υδρομετεωρολογίας - Μέρος 2*, Έκδοση 2, 176 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2000
- Μαρίνος, Π., *Κεφάλαια Γεωλογίας Μηχανικού II*, 167 σελίδες, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1993
- Μιχαηλίδη, Ε., *Διερεύνηση προσομοίωσης πλημμύρας για το σχεδιασμό σε λεκάνες χειμαρρικής δάιατας - Εφαρμογή στη λεκάνη του Σαρανταπόταμου*, Διπλωματική εργασία, 140 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Δεκέμβριος 2013
- Παπαδημητράκη, Α., *Η επίδραση της χωρικής μεταβλητότητας της βροχόπτωσης στην προσαρμογή υδρολογικών μοντέλων: Εφαρμογή στη λεκάνη του Σπερχειού*, Διπλωματική Εργασία, 130 σελίδες, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιούλιος 2012

- Τουτζιάρη, Μ., Υλοποίηση μεθοδολογικού πλαισίου για την κατάρτιση χαρτών πλημμύρας, Μεταπτυχιακή εργασία, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 129 σελίδες, Μάρτιος 2012
- Φαρμακάκη, Αι., Κλιματικός Άτλας της Ελλάδας, Μεταπτυχιακής εργασία, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 75 σελίδες, Μάρτιος 2012
  
- Bartholmes J. C., Thielen J., Ramos M. H., and Gentilini S., *The european flood alert system EFAS – Part 2: Statistical skill assessment of probabilistic and deterministic operational forecasts*, Hydrology and Earth System Sciences, 13, 141-153, 2009
- Boyle, D. P., H. V. Gupta, and S. Sorooshian, *Toward improved calibration of hydrologic models: Combining the strengths of manual and automatic methods*, Water Resources Research, 36(12), 3663-3674, 2000
- Buizza, R., Hollingsworth, A., Lalaurette F., and Ghelli A., *Probabilistic Predictions of Precipitation Using the ECMWF Ensemble Prediction System*, Weather and Forecasting, 14, 168-189, 1999
- Doocy S., Daniels A., Murray S., and Kirsch T.D., *The Human Impact of Floods: a Historical Review of Events 1980-2009 and Systematic Literature Review*, PLOS Currents Disasters, 2013
- Efstratiadis, A., and D. Koutsoyiannis, *One decade of multi-objective calibration approaches in hydrological modeling: a review*, Hydrological Sciences Journal, 55(1), 58-78, 2010
- EXCIMAP, *Handbook on good practices for flood mapping in Europe*, 2007
- Garambois, P.A., H. Roux, K. Larnier, W. Castaings, and D. Dartus, *Characterization of process-oriented hydrologic model behavior with temporal sensitivity analysis for flash floods in Mediterranean catchments*, Hydrology and Earth System Sciences, 17, 2305-2322, 2013
- Koutsoyiannis, D., N. Mamassis, A. Efstratiadis, N. Zarkadoulas, and Y. Markonis, *Floods in Greece*, Changes of Flood Risk in Europe, edited by Z. W.

Kundzewicz, Chapter 12, 238–256, IAHS Press, Wallingford – International Association of Hydrological Sciences, 2012.

- Lorenz, E., *Deterministic Nonperiodic Flow*, Journal of Atmospheric Sciences, 20(2), 130-141, 1963
- Meon, G., *Past and Present Challenges in flood forecasting*, Presentation in the International Workshop on Flash Flood Forecasting, Costa Rica, 2006
- Mroczkowski, M., G. P. Raper, and G. Kuczera, *The quest for more powerful validation of conceptual catchment models*, Water Resources Research, 33(10), 2325-2335, 1997
- Norbiato, D., B. Morga, and R. Dinale, *Flash flood warning in ungauged basins by use of the flash flood guidance and model-based runoff thresholds*, Meteorological Applications, 16, 65-75, 2009
- Roux, H., D. Labat, P.-A. Garambois, M.-M. Maubourguet, J. Chorda, and D. Dartus, *A physically-based parsimonious hydrological model for flash floods in Mediterranean catchments*, Natural Hazards and Earth System Sciences, 11, 2567–2582, 2011
- Serban, P. and A.J. Askew, *Hydrological forecasting and updating procedures*, IAHS Publ., 201: 357–369, 1991
- Tegos, A., Efstratiadis A., and Koutsoyiannis D., *A parametric model for potential evapotranspiration estimation based on a simplified formulation of the Penman-Monteith equation*, Evapotranspiration: An Overview, edited by S.G. Alexandris, 143-166, InTech, 2013
- Thielen J., Bartholmes J., Ramos M. H., and De Roo A., *The European Flood Alert System – Part 1: Concept and development*, Hydrology and Earth System Sciences 13, 125-140, 2009
- Thiemig, V., B. Bisselink, F. Pappenberger, and J. Thielen, *A pan-African Flood Forecasting System*, Hydrology and Earth System Sciences Discussion, 11, 5559-5597, 2014
- Van der Knijff, J. M., Younis, J., and de Roo, A. P. J., *LISFLOOD: a GIS-based distributed model for river basin scale water balance and flood simulation*, Int. J. Geographical Information Science, 2008



- Wagener, T., D. P. Boyle, M. J. Lees, H. S. Wheater, H. V. Gupta, and S. Sorooshian, *A framework for development and application of hydrological models*, *Hydrology and Earth System Sciences*, 5(1), 13–26, 2001
- Wetterhall, F., F. Pappenberger, L. Alfieri, H. L. Cloke, J. Thielen-del Pozo, S. Balabanova, J. Daňhelka, A. Vogelbacher, P. Salamon, I. Carrasco, A. J. Cabrera-Tordera, M. Corzo-Toscano, M. Garcia-Padilla, R. J. Garcia-Sanchez, C. Ardilouze, S. Jurela, B. Terek, A. Csik, J. Casey, G. Stankūnavičius, V. Ceres, E. Sprokkereef, J. Stam, E. Anghel, D. Vladikovic, C. Alionte Eklund, N. Hjerdt, H. Djerv, F. Holmberg, J. Nilsson, K. Nyström, M. Sušnik, M. Hazlinger, and M. Holubecka, *Forecaster priorities for improving probabilistic flood forecasts*, *Hydrology and Earth System Sciences*, 17, 4389–4399, 2013
- World Meteorological Organisation, *International Glossary of Hydrology*, No. 385, 2012
- World Meteorological Organisation, *Manual on Flood Forecasting and Warning*, No. 1072, 2011

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α:** **ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΜΟΝΑΔΩΝ** **ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ** **ΜΕΘΟΔΟΥ SCS-CN**

### **1. Εισαγωγή**

Η μέθοδος SCS-CN (μέθοδος της Soil Conservation Service) χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της ενεργού βροχόπτωσης, με διαχωρισμό των υδρολογικών ελλειμμάτων από το συνολικό υετογράφημα σχεδιασμού. Η μέθοδος θεωρεί δύο παραμέτρους: τη μέγιστη δυνατή κατακράτηση  $S$  και το αρχικό έλλειμμα  $h_{a0}$ , που εκφράζεται ως ποσοστό του  $S$  ήτοι  $h_{a0} = a \cdot S$ . Αν  $h$  είναι το ολικό ύψος βροχής στη διάρκεια του επεισοδίου, τότε το ενεργό ύψος εκτιμάται από τη σχέση:

$$h_e = \begin{cases} 0 & h \leq h_{a0} \\ \frac{(h - h_{a0})^2}{(h - h_{a0} + S)} & h > h_{a0} \end{cases} \quad (1)$$

Η παράμετρος  $S$  (σε mm) συνδέεται με ένα χαρακτηριστικό μέγεθος, που ονομάζεται αριθμός καμπύλης απορροής (curve number, CN), και συμπυκνώνει τα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά της λεκάνης σε μία μοναδική αντιπροσωπευτική τιμή, που κυμαίνεται από 0 έως 100. Τα δύο μεγέθη συνδέονται με τη σχέση:

$$S = 254(100 / CN - 1) \quad (2)$$

Το ολικό ύψος  $h$  λαμβάνεται συναρτήσει της περιόδου επαναφοράς σχεδιασμού πλημμύρας  $T$ , η οποία λαμβάνεται ίση με αυτή της βροχόπτωσης για τη διάρκεια της βροχής

σχεδιασμού και της διάρκειας του υετογραφήματος σχεδιασμού, η οποία επιλέγεται ίση με το τριπλάσιο του χρόνου συγκέντρωσης κατά Giandotti (βλ. και 6.1).

Η μέθοδος εφαρμόζεται για δεδομένο ποσοστό αρχικών απωλειών και για τρεις καταστάσεις αρχικής υγρασίας του εδάφους (I: ξηρές, II: μέσες, III: υγρές). Οι καταστάσεις αυτές έχουν οριστεί από την Soil Conservation Service με βάση την αθροιστική βροχόπτωση των προηγούμενων πέντε ημερών (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 1999):

Τύπος I: Ξηρές συνθήκες (εδάφη ξηρά, αλλά πάνω από το σημείο μαρασμού), που αντιστοιχούν στην περίπτωση που η βροχόπτωση των προηγούμενων 5 ημερών είναι μικρότερη από 13 mm (ή μικρότερη των 35 mm, για φυτοκάλυψη σε συνθήκες ανάπτυξης).

Τύπος II: Μέσες συνθήκες, που αντιστοιχούν σε βροχόπτωση των προηγούμενων 5 ημερών μεταξύ 13 και 38 mm (ή μεταξύ 35 και 53 mm, για φυτοκάλυψη σε συνθήκες ανάπτυξης).

Τύπος III: Υγρές συνθήκες (εδάφη σχεδόν κορεσμένα), που αντιστοιχούν σε βροχόπτωση των προηγούμενων 5 ημερών μεγαλύτερη των 38 mm (ή μεγαλύτερη των 53 mm, για φυτοκάλυψη σε συνθήκες ανάπτυξης).

Σημειώνεται εδώ ότι η εφαρμογή της μεθόδου προϋποθέτει κατάλληλη σχηματοποίηση του υδρογραφικού δικτύου της περιοχής μελέτης με βάση τη δημιουργία όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφων ως προς τα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά υπολεκανών (βλ. υποκεφάλαιο 2). Η σχηματοποίηση αυτή επιτυγχάνεται με τη χρήση Συστημάτων Γεωγραφικής Πληροφορίας (ΣΓΠ), χρησιμοποιώντας ένα ψηφιακό μοντέλων υψομέτρων (ΨΜΥ) της περιοχής μελέτης και ορίζοντας μία ελάχιστη έκταση για την συγκέντρωση της απορροής.

## **2. Κατηγοριοποίηση φυσιογραφικών χαρακτηριστικών υπολεκανών**

Για τον υπολογισμό του αριθμού καμπύλης απορροής CN είναι απαραίτητη η σχηματοποίηση της περιοχής μελέτης με βάση φυσιογραφικά χαρακτηριστικά της. Η σχηματοποίηση επιτυγχάνεται με βάση τη δημιουργία κλάσεων ανά φυσιογραφικό χαρακτηριστικό που αποτυπώνουν ποιοτικά την ένταση κάθε χαρακτηριστικού. Τα χαρακτηριστικά που αποτυπώνονται στον αριθμό CN είναι η υδατοπερατότητα, η βλάστηση και η αποστραγγιστική ικανότητα του εδάφους.

## 2.1 Υδατοπερατότητα

Σε φυσικές λεκάνες η κατηγοριοποίηση σε κλάσεις υδατοπερατότητας αφορά στα χαρακτηριστικά που σχετίζονται με τις μηχανικές ιδιότητες του εδάφους και της ακόρεστης ζώνης (διηθητικότητα, οριζόντια και κατακόρυφη υδραυλική αγωγιμότητα) και επηρεάζουν τους μηχανισμούς διήθησης. Αντίθετα, σε αστικές λεκάνες, η αντίστοιχη κατηγοριοποίηση ορίζεται με βάση την πυκνότητα της δόμησης και την ανάπτυξη ελεύθερων χώρων. Οι κλάσεις περατότητας αναπαριστώνται στον Πίνακα 1.

**Πίνακας 1** Κλάσεις υδατοπερατότητας με βάση τα εδαφικά και γεωλογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης και τον κυρίαρχο τύπο δόμησης (Ευστρατιάδης κ.α. 2014)

Κλάση περατότητας	Εδαφικά χαρακτηριστικά	Γεωλογικά ή υδρολιθολογικά χαρακτηριστικά	Χαρακτηριστικά δόμησης
Πολύ υψηλή	Πολύ ελαφριά και καλά αποστραγγιζόμενα εδάφη	Ανθρακικοί σχηματισμοί έντονα καρστικοποιημένοι, εκτεταμένης ανάπτυξης (κατακερματισμένοι ασβεστόλιθοι, δολομίτες, μάρμαρα)	
Υψηλή	Αμμώδη και χαλικώδη εδάφη, με μικρό ποσοστό ιλύος και αργίλου	Ποτάμιες αποθέσεις, μη συνεκτικά κροκαλοπαγή, τριαδικά λατυποπαγή	Πολύ μικροί οικισμοί
Μέτρια	Αμμώδη παχιά εδάφη, ίλυες και ιλυώδη εδάφη, αμμώδης πηλός	Κοκκώδεις προσχωματικές αποθέσεις, σχιστόλιθοι, συνεκτικά κροκαλοπαγή, πλακώδεις ή λεπτοπλακώδεις ασβεστόλιθοι σε εναλλαγές με σχιστολιθικούς σχηματισμούς	Περιοχές αραιής δόμησης, σημαντική ανάπτυξη κήπων, αστικά πάρκα
Χαμηλή	Λεπτόκοκκα αργιλικά εδάφη, εδάφη από αργιλοπηλό, εδάφη φτωχά σε οργανικό υλικό	Φλύσχης, μεταμορφωμένα, πλουτώνια και ηφαιστειακά πετρώματα, κοκκώδεις μη προσχωματικές αποθέσεις (εναλλαγές άμμων, μαργών, αργίλων, κροκαλοπαγών, μαργαϊκών ασβεστολίθων, ψαμμιτών), κοκκώδεις μολασσικές αποθέσεις	Περιοχές μεσαίας δόμησης, με πρασιές και μικρούς κήπους

Πολύ χαμηλή	Εδάφη μικρού βάθους που διογκώνονται όταν διαβραχούν, πλαστικές άργιλοι	Συμπαγείς βράχοι αμελητέας περατότητας (γρανίτες)	Εμπορικά κέντρα, περιοχές πυκνής δόμησης
-------------	---	---	--

## 2.2 Βλάστηση

Η κατηγοριοποίηση της βλάστησης αφορά στα χαρακτηριστικά που σχετίζονται με τους μηχανισμούς κατακράτησης της βροχόπτωσης, την τραχύτητα του εδάφους και της διηθητικής του ικανότητας. Οι καμένες εκτάσεις κατατάσσονται, γενικά, μία κατηγορία κάτω από την αρχική τους κατάσταση (π.χ. καμένο δάσος κωνοφόρων χαρακτηρίζεται ως «μεσαία βλάστηση»). Οι κλάσεις βλάστησης αναπαριστώνται στον Πίνακα 2.

**Πίνακας 2** Κλάσεις βλάστησης με βάση τα χαρακτηριστικά κάλυψης γης (Ευστρατιάδης κ.α., 2014)

Κλάση βλάστησης	Χαρακτηριστικά κάλυψης γης
Πυκνή	Δάση (κωνοφόρα, πλατύφυλλα)
Μεσαία	Μεταβατικά δάση, οπωρώνες, ελαιώνες, παρόχθια βλάστηση
Χαμηλή	Βοσκότοποι, καλλιέργειες, αμπελώνες, χορτολιβαδικές εκτάσεις, θάμνοι,
Αραιή	Χέρσα γη, μη αρδεύσιμη-αρόσιμη γη, αμμοθίνες, υγρότοποι, διακεκομμένη αστική δόμηση
Μηδενική	Γυμνό ή βραχώδες έδαφος, τεχνητές επιφάνειες (δρόμοι, κτήρια)

## 2.3 Αποστραγγιστική ικανότητα εδάφους

Η αποστραγγιστική ικανότητα του εδάφους και συνεπώς η παραγωγή επιφανειακής απορροής εξαρτάται από τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά του (ανάγλυφο, κλίση), την ανάπτυξη του υδρογραφικού δικτύου, και την ύπαρξη σχετικών τεχνικών έργων (έργα ανάσχεσης, αποστραγγιστικά δίκτυα). Οι κλάσεις αποστραγγιστικής ικανότητας αναπαριστώνται στον Πίνακα 3.

**Πίνακας 3** Κλάσεις αποστραγγιστικής ικανότητας με βάση τη μέση κλίση και τα συναφή χαρακτηριστικά εδάφους (Ευστρατιάδης κ.α., 2014)

Κλάση αποστραγγιστικής ικανότητας	Μέση κλίση εδάφους <sup>1</sup>	Λοιπά χαρακτηριστικά
Αμελητέα	0%	Ανεπαρκές σύστημα αποστράγγισης, συχνές και εκτενείς κατακλύσεις, μη διαμορφωμένο υδρογραφικό δίκτυο
Χαμηλή	1-2%	Σημαντικές επιφανειακές ταπεινώσεις, περιστασιακές κατακλύσεις, όχι καλά διαμορφωμένο υδρογραφικό δίκτυο
Μέτρια	2-10%	Μικρές επιφανειακές ταπεινώσεις, σπάνιες κατακλύσεις, αβαθείς, μικροί διάδρομοι αποστράγγισης
Υψηλή	10-30%	Αμελητέες ταπεινώσεις εδάφους, πολύ καλά διαμορφωμένο υδρογραφικό δίκτυο, ύπαρξη αποστραγγιστικού δικτύου
Πολύ υψηλή	30%	Ορεινό ανάγλυφο

### 3. Εκτίμηση αριθμού καμπύλης απορροής

Αρχικά, εκτιμάται η τιμή αναφοράς της παραμέτρου CN, που θεωρείται ότι αντιστοιχεί σε μέσες συνθήκες υγρασίας (τύπου II) και ποσοστό αρχικών απωλειών 20%, και συμβολίζεται CN<sub>II,20</sub>. Η τιμή αυτή εκτιμάται με βάση τις κυρίαρχες κλάσεις υδατοπερατότητας, βλάστησης και αποστραγγιστικής ικανότητας της λεκάνης, σύμφωνα με την εμπειρική σχέση:

$$CN_{II,20} = 10 + 9 \times i_{PERM} + 6 \times i_{VEG} + 3 \times i_{SLOPE} \quad (3)$$

όπου  $i_{PERM}$ ,  $i_{VEG}$ ,  $i_{SLOPE}$  κωδικοί που λαμβάνουν τιμές από 1 έως 5 και υποδηλώνουν κάθε μία από τις κλάσεις ανά φυσιογραφικό χαρακτηριστικό που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Η εν λόγω κωδικοποίηση αναπαρίσταται στο Πίνακα 4. Σύμφωνα με την παραπάνω σχέση, η ελάχιστη τιμή του CN αναφοράς είναι 28, ενώ η μέγιστη 100. Η ελάχιστη τιμή λαμβάνεται στην ακραία περίπτωση λεκανών πολύ υψηλής περατότητας, πυκνής βλάστησης και αμελητέας αποστραγγιστικής ικανότητας.

<sup>1</sup> Στρογγυλεύεται σε ακέραιο που σημαίνει ότι η πρώτη κλάση αντιστοιχεί σε κλίσεις < 0,5%, η δεύτερη σε κλίσεις μεταξύ 0,5 έως 2,5% κοκ.

**Πίνακας 4** Κωδικοποίηση φυσιογραφικών χαρακτηριστικών για την εκτίμηση της τιμής αναφοράς  $CN_{II,20}$  (Ευστρατιάδης κ.α., 2014)

Κλάση περατότητας	$I_{PERM}$	Κλάση βλάστησης	$I_{VEG}$	Κλάση αποστραγγιστικής ικανότητας	$I_{SLOPE}$
Πολύ υψηλή	1	Πυκνή	1	Αμελητέα	1
Υψηλή	2	Μεσαία	2	Χαμηλή	2
Μέτρια	3	Χαμηλή	3	Μέτρια	3
Χαμηλή	4	Αραιή	4	Υψηλή	4
Πολύ χαμηλή	5	Μηδενική	5	Πολύ υψηλή	5

Η επιλογή της τιμής του CN αναφοράς βασίζεται στην κυρίαρχη κλάση από κάθε κατηγορία φυσιογραφικών χαρακτηριστικών. Αν η υπολεκάνη παρουσιάζει χωρική ανομοιογένεια ως προς τα εν λόγω χαρακτηριστικά, λαμβάνεται ένας σταθμισμένος μέσος αριθμός καμπύλης απορροής, με βάση την έκταση που καταλαμβάνει κάθε επιμέρους κλάση του CN. Σε έντονα ανομοιογενείς υπολεκάνες, όπου οι τιμές του CN παρουσιάζουν σημαντική μεταβλητότητα, συστήνεται ο διαχωρισμός τους σε μικρότερες υπολεκάνες, κατά το δυνατόν ομοιογενείς. Σημειώνεται εδώ ότι στην περίπτωση υδάτινων σωμάτων (ποτάμια, λίμνες, κτλ.), ο συντελεστής CN είναι εξ ορισμού ίσος με 100, καθώς όλη η προσπίπτουσα βροχόπτωση μετατρέπεται σε απορροή.

Η τιμή αναφοράς της παραμέτρου CN, που αντιστοιχεί σε μέσες συνθήκες υγρασίας (τύπου II) και αρχικές απώλειες 20%, ανάγεται στις άλλες δύο τυπικές συνθήκες αρχικής εδαφικής υγρασίας (ξηρές, τύπου I, και υγρές, τύπου III) με το ποσοστό αρχικών απωλειών αναφοράς, ήτοι  $a = 20\%$ , σύμφωνα με τις εμπειρικές σχέσεις:

$$CN_I = \frac{0,42CN_{II}}{1 - 0,0058CN_{II}} \quad (4)$$

$$CN_{III} = \frac{2,3CN_{II}}{1 + 0,013CN_{II}} \quad (5)$$

Στη συνέχεια, εκτιμάται σε κάθε υπολεκάνη η παράμετρος αρχικών απωλειών, που δίνεται ως ποσοστό της μέγιστης δυνητικής κατακράτησης του εδάφους. Το ποσοστό αυτό παρουσιάζει μεγάλο εύρος διακύμανσης, με τιμή αναφοράς  $a = 20\%$  (η τιμή αυτή έχει προκύψει ως μέσος όρος ενός μεγάλου δείγματος παρατηρήσεων από αγροτικές, κυρίως, λεκάνες στις ΗΠΑ). Οι αρχικές απώλειες εξαρτώνται από τη δυνατότητα κατακράτησης της βροχόπτωσης από τη χλωρίδα και το ανάγλυφο, καθώς και τη διηθητικότητα του εδάφους. Η εκτίμηση της παραμέτρου  $a$  γίνεται σύμφωνα με τον Πίνακα 5.

**Πίνακας 5** Προτεινόμενες τιμές ποσοστού αρχικών απωλειών (Ευστρατιάδης κ.α., 2014)

$a$ (%)	Τύπος λεκάνης
5	Αστικές λεκάνες, λεκάνες με σημαντική κλίση, εδάφη χαμηλής διηθητικότητας
10	Μη αστικές λεκάνες μέτριας υδατοπερατότητας και βλάστησης
20	Αγροτικές και δασικές λεκάνες, λεκάνες με σημαντικά έργα ανάσχεσης

Η εκτίμηση της παραμέτρου CN που αντιστοιχεί σε δεδομένες συνθήκες υγρασίας και στο εφαρμοζόμενο ποσοστό αρχικών απωλειών  $a$  βασίζεται στην ακόλουθη διαδικασία:

1. Εκτιμάται το ολικό ύψος βροχής  $h$  που αντιστοιχεί στην περίοδο επαναφοράς  $T$ , για τη δεδομένη διάρκεια του υετογραφήματος σχεδιασμού (βλ. Εισαγωγή).
2. Εκτιμάται η τιμή της μέγιστης δυναμικής κατακράτησης  $S$  που αντιστοιχεί στην τιμή αναφοράς του CN (για ποσοστό απωλειών 20% και συνθήκες υγρασίας I, II και III), μέσω της σχέσης (2).
3. Με εφαρμογή της σχέσης (1), εκτιμάται το ολικό ενεργό ύψος βροχής  $h_e$  συναρτήσει των  $h$  και  $S$ , για  $a = 20\%$ .
4. Για τον προσδιορισμό της μέγιστης δυναμικής κατακράτησης  $S$  που αντιστοιχεί στο ζητούμενο ποσοστό απωλειών  $a$ , επιλύεται η σχέση (2) με γνωστά  $h$ ,  $h_e$  και  $a$  από όπου προκύπτει:

$$S = 5h + 10h_e - 10\sqrt{h_e(h + 1,25h)} \quad (6)$$

5. Η τελική τιμή του CN εκτιμάται συναρτήσει του  $S$  μέσω της σχέσης (2), ήτοι:

$$CN = 25400 / (S + 254) \quad (7)$$

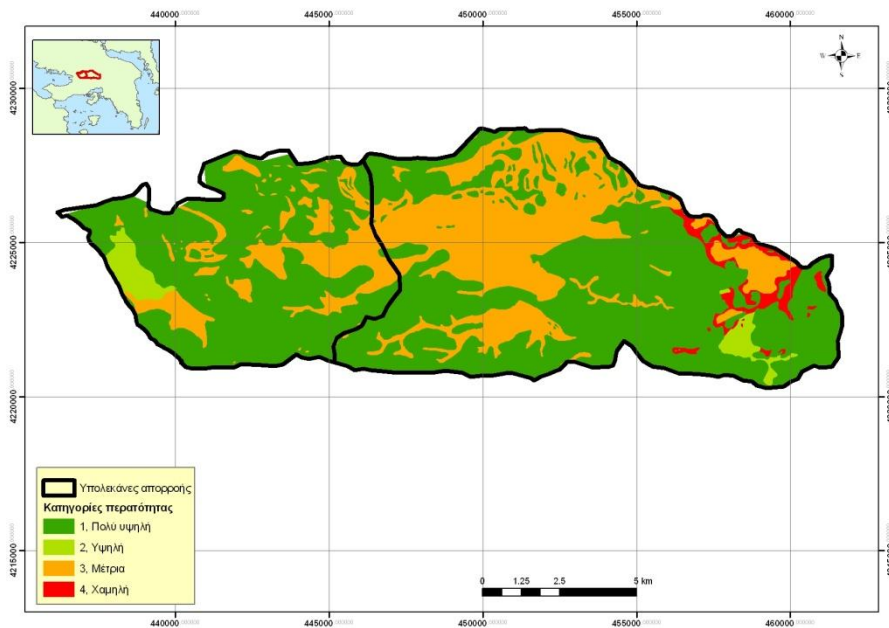
Με την εφαρμογή της παραπάνω διαδικασίας, προκύπτουν οι τιμές της μέγιστης δυναμικής κατακράτησης και του αριθμού καμπύλης απορροής που αντιστοιχούν στο υπόψη ποσοστό απωλειών  $a$ , για τις τρεις τυπικές συνθήκες αρχικής υγρασίας.

#### 4. Εφαρμογή της μεθόδου στη λεκάνη του Σαρανταπόταμου

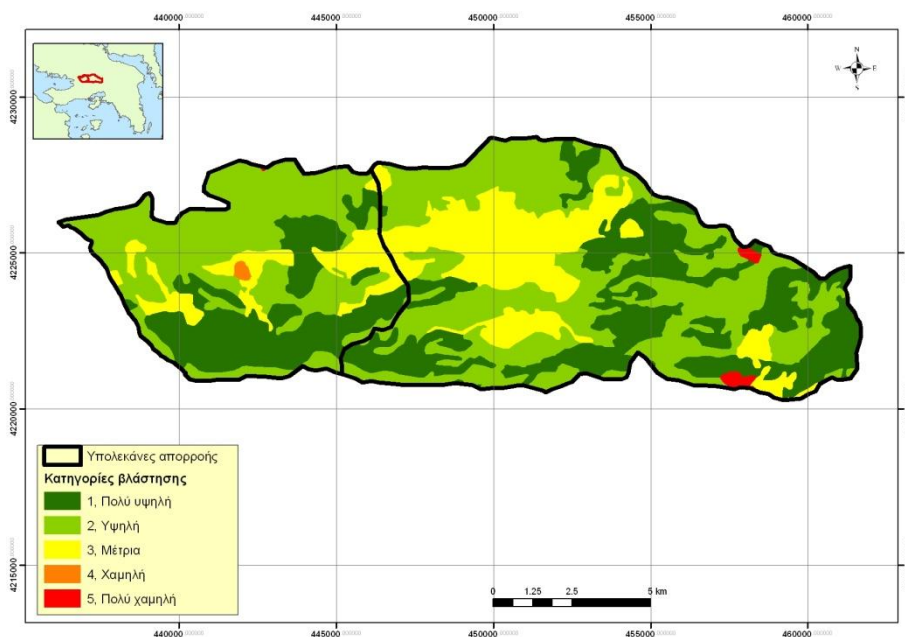
Όπως έχει ήδη αναφερθεί και στο υποκεφάλαιο 4.2.2, οι Μονάδες Υδρολογικής Απόκρισης της λεκάνης του Σαρανταπόταμου θα οριστούν με βάση τον αριθμό καμπύλης απορροής CN. Συγκεκριμένα, επιλέγεται, για λόγους αδρής σχηματοποίησης της λεκάνης, ο ορισμός μόνον δύο ΜΥΑ: μία για τα τμήματα της λεκάνης με συντελεστή CN κάτω από 50, τα οποία είναι και τα περισσότερα περατά, και μία για τα λιγότερα περατά τμήματα με συντελεστή CN πάνω από 50.



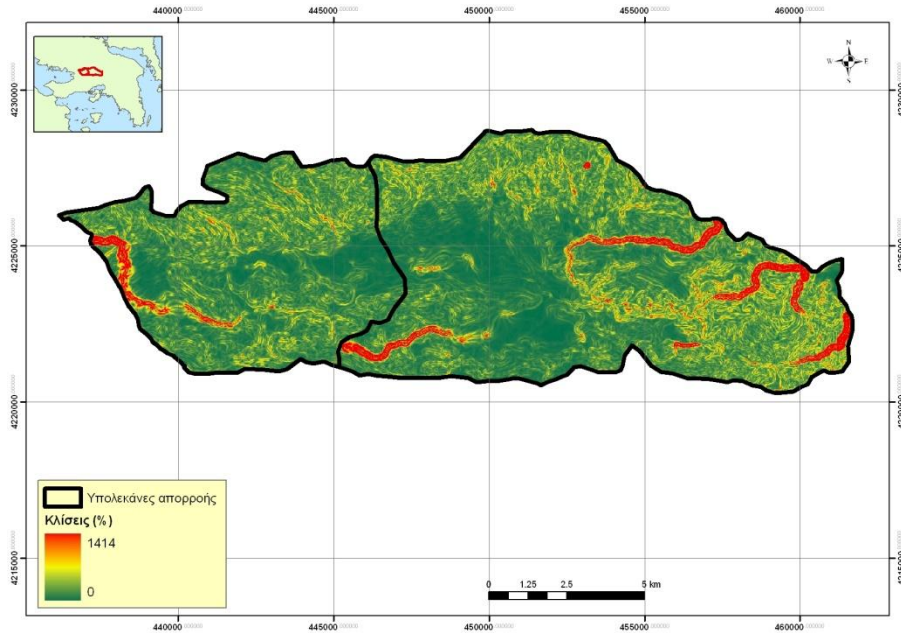
Η λεκάνη του Σαρανταπόταμου έχει σχηματοποιηθεί με βάση τα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά της που απαιτούνται για τον υπολογισμό του συντελεστή CN στο Κεφάλαιο 3. Η σχηματοποίηση αυτή (Κουκοβίνος, 2012), με βάση τους Πίνακες 1, 2 και 3 φαίνεται στο Σχήμα 1 για την υδατοπερατότητα (που απεικονίζεται και στο Σχήμα 3.5), στο Σχήμα 2 για τη βλάστηση με βάση τη κάλυψη γης (η οποία απεικονίζεται στο Σχήμα 3.6) και στο Σχήμα 3 για την αποστραγγιστική ικανότητα του εδάφους με βάση τη κλίση εδάφους (που απεικονίζεται και στο Σχήμα 3.7).



**Σχήμα 1** Η διαβάθμιση της υδατοπερατότητας της υπό μελέτη λεκάνης του Σαρανταπόταμου

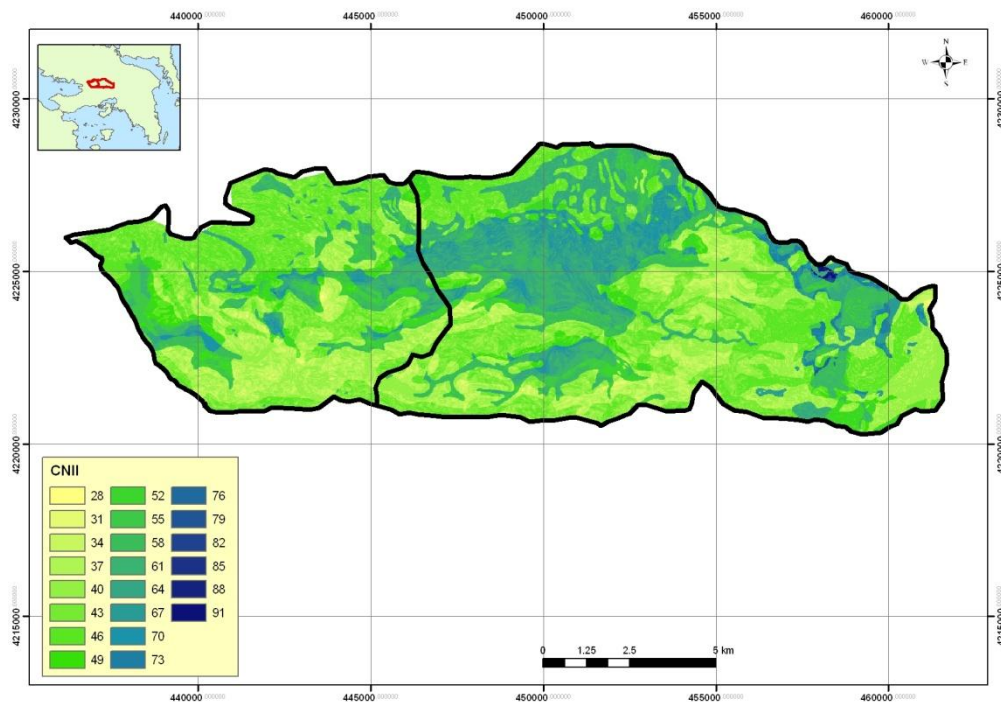


**Σχήμα 2** Η διαβάθμιση της βλάστησης της υπό μελέτη λεκάνης του Σαρανταπόταμου



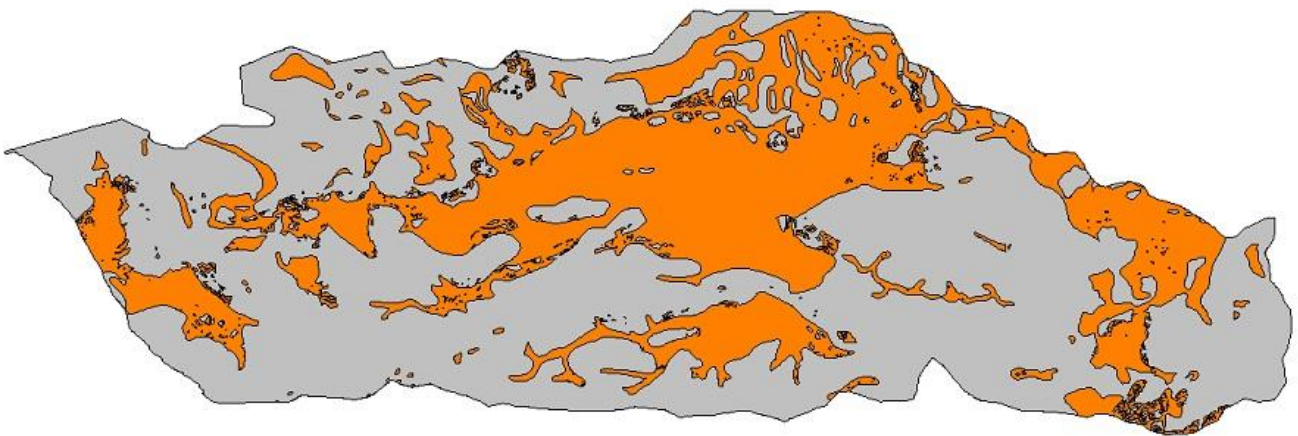
**Σχήμα 3** Οι κλίσεις της υπό μελέτη λεκάνης του Σαρανταπόταμου

Με βάση τα παραπάνω σχήματα και με τη χρήση Συστήματος Γεωγραφικής Πληροφορίας ορίζεται για κάθε σημείο της λεκάνης ένας αριθμός  $CN_{II,20}$  (αριθμός CN για συνθήκες υγρασίας Τύπου II με αρχικό ποσοστό απωλειών 20%), σύμφωνα με τον τύπο 3 και τον Πίνακα 4, έτσι ώστε να παραχθεί η σχηματοποίηση της λεκάνης του Σαρανταπόταμου με βάση τον αριθμό  $CN_{II,20}$ . Η σχηματοποίηση αυτή αναπαριστάται στο Σχήμα 4.



**Σχήμα 4** Η διαβάθμιση του αριθμού CN (συγκεκριμένα του  $CN_{II,20}$ ) στη λεκάνη του Σαρανταπόταμου με βάση τα χαρακτηριστικά που απεικονίζονται στα Σχήματα 1,2 και 3, τον Πίνακα 4 και τον τύπο 3

Για τη μελέτη πλημμυρικής πρόγνωσης την οποία πραγματοποιούμε δεν είναι αναγκαίο να συντελεστεί η διαδικασία που περιγράφεται στην παράγραφο 3 του παρόντος παραρτήματος, δηλαδή η αναγωγή του  $CN_{II,20}$  στον αριθμό CN με βάση το δεδομένο ποσοστό απωλειών  $a$ . Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται περισσότερο σε μελέτες σχεδιασμού, όπου οι δεδομένες συνθήκες ποσοστού απωλειών αλλά και αρχικής υγρασίας έχουν βαρύνουσα σημασία. Έτσι, θεωρούμε ότι ο αριθμός  $CN_{II,20}$ , δηλαδή ο αριθμός CN για αρχικές συνθήκες υγρασίας Τύπου II και ποσοστό απωλειών  $a = 20\%$  είναι αντιπροσωπευτικός της φυσιογραφικής περιγραφής της λεκάνης του Σαρανταπόταμου για την παρούσα μελέτη. Η τελική διαμόρφωση των ΜΥΑ φαίνεται στο Σχήμα 5.



**Σχήμα 5** Οι Μονάδες Υδρολογικής Απόκρισης. Συγκεκριμένα, η ΜΥΑ 1 (μεγαλύτερη περατότητα,  $CN < 50$ ) αναπαρίσταται με γκρι χρώμα, ενώ η ΜΥΑ 2 (μικρότερη περατότητα,  $CN > 50$ ) με πορτοκαλί χρώμα.

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β:** **ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΩΝ** **ΕΞΑΤΜΟΔΙΑΠΝΟΗΣ**

Ο υπολογισμός των χρονοσειρών εξατμισοδιαπνοής έγινε με τη χρήση παραμετρικής μεθόδου που αναπτύχθηκε από τους *Koutsoyiannis & Xanthopoulos* και αναλύθηκε με βάση τα ελληνικά δεδομένα από τους *Tegos et al.* Η ανάπτυξη της μεθόδου αυτής προήλθε από την ανάγκη για την ύπαρξη μιας μεθόδου υπολογισμού εξατμισοδιαπνοής με όσο το δυνατόν απλούστερο μοντέλο (μαθηματικό τύπο), με όσο το δυνατόν περισσότερη *φειδωλότητα* (parsimony) στα δεδομένα εισόδου, αλλά και με συνέπεια αναφορικά με την εκτίμησή της.

Η λογική της μεθόδου βασίζεται στο ότι η εξατμοδιαπνοή εξαρτάται κυρίως από τη μεταβλητότητα της θερμοκρασίας αλλά και της ηλιακής ακτινοβολίας. Με βάση παρατηρήσεις που πραγματοποιηθήκαν, εξάχθηκε το συμπέρασμα ότι δεν υπάρχει αντιστοιχία ένα-προς-ένα της εξατμοδιαπνοής με τη θερμοκρασίας και άρα και η ηλιακή ακτινοβολία (extraterrestrial radiation) επηρεάζει το φαινόμενο.

Επιπλέον, ο αριθμός των απαιτούμενων παραμέτρων επιλέχθηκε με βάση την εμπειρία από την ανάπτυξη των εννοιολογικών υδρολογικών μοντέλων. Συγκεκριμένα, εφόσον για τα μοντέλα βροχόπτωσης-απορροής οι παράμετροι που αρκούν για να περιγραφεί ικανοποιητικά το φαινόμενο πρέπει να είναι τουλάχιστον πέντε ή έξι, για το μοντέλο εξατμοδιαπνοής, που εξ ορισμού διακρίνεται από μικρότερη μεταβλητότητα, κρίθηκε αναγκαία η χρήση τριών παραμέτρων.

Η μέθοδος Penmann-Monteith γράφεται στην παρακάτω μορφή:

$$E = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_n}{\lambda} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} F(u)D \quad (1)$$

Οι Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος πρότειναν μια παραμετρική απλοποίηση της εν λόγω μεθόδου, όπου ο αριθμητής συνδέεται γραμμικά με την εξωγήινη ηλιακή ακτινοβολία ενώ ο παρανομαστής συνδέεται γραμμικά με φθίνων τρόπο με τη θερμοκρασία. Συγκεκριμένα, πρότειναν τον τύπο:

$$E = \frac{aR_a + b}{1 - cT_a} \quad (2)$$

όπου,

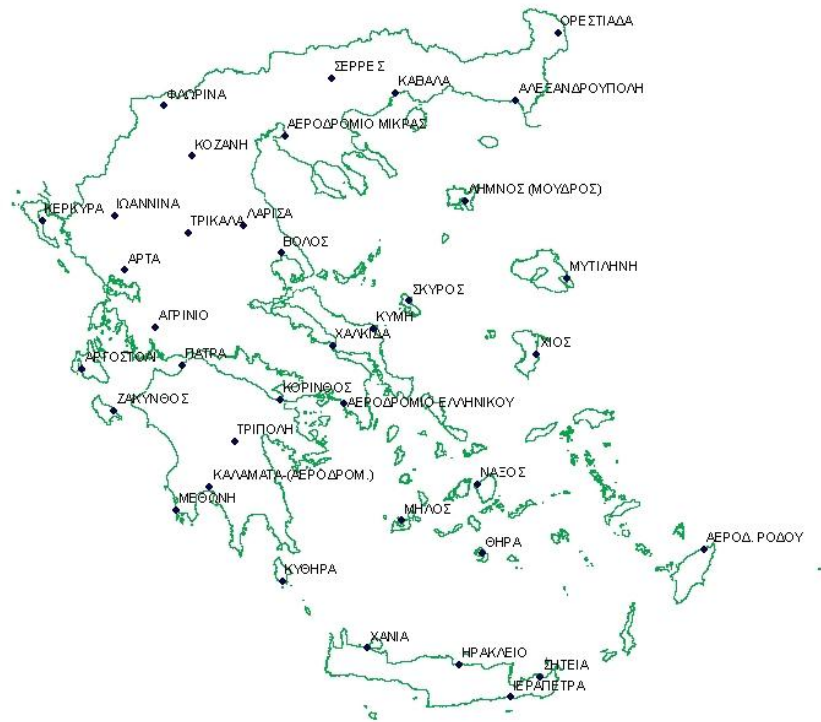
E η εξάτμιση σε mm/d

R<sub>a</sub> η εξωγήινη ηλιακή ακτινοβολία σε kJ/(m<sup>2</sup> d),

T<sub>a</sub> η θερμοκρασία σε °C και

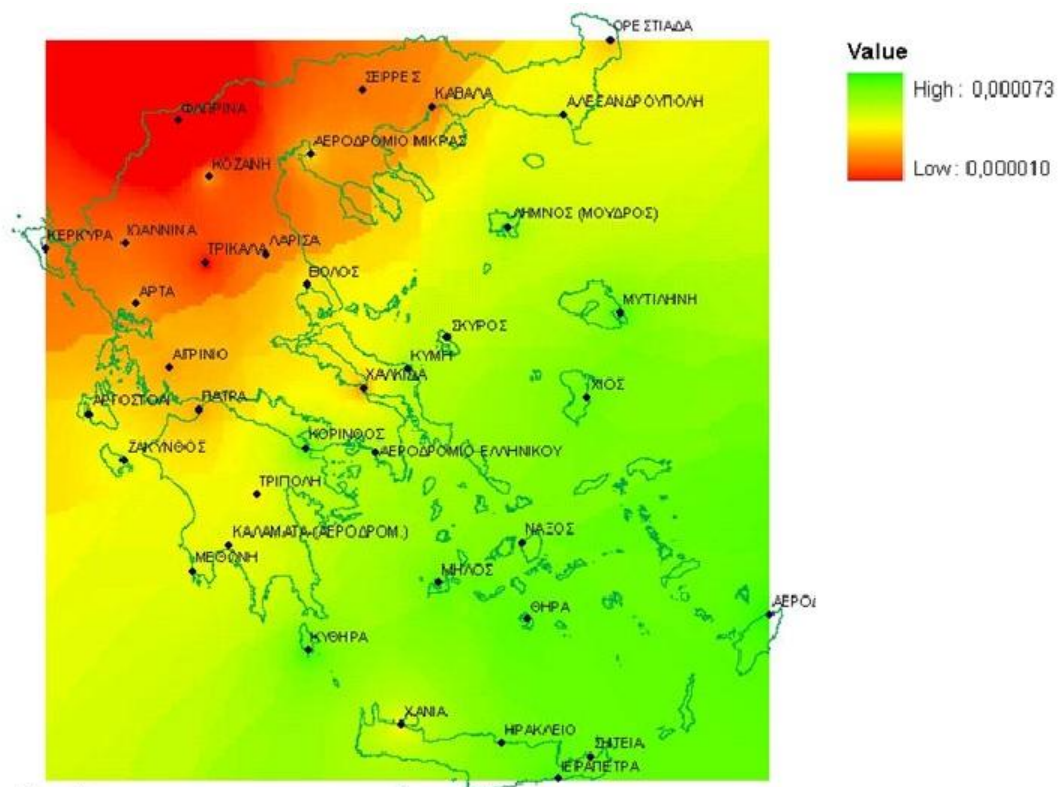
a, b, c παράμετροι.

Οι παράμετροι a, b, c που έχουν χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία έχουν προκύψει από τους Tegos et al μέσω δεδομένων από εγκατεστημένους μετεωρολογικούς σταθμούς σε όλη την ελληνική επικράτεια και μπορεί να τους αποδοθεί κάποια φυσική σημασία. Συγκεκριμένα, η παράμετρος a (kg/kJ) αντιπροσωπεύει το μέσο ποσοστό της ενέργειας που παρέχεται από τον ήλιο και, μετά την προσέγγιση του εδάφους της Γης, μετατρέπεται σε λανθάνουσα θερμότητα, οδηγώντας έτσι στη διαδικασία της εξατμισοδιαπνοής. Η παράμετρος b (kg/m<sup>2</sup>) ομογενοποιεί τις ελλείψεις πληροφορίες που σχετίζονται με αεροδυναμικές διεργασίες, που εξαρτώνται από τον άνεμο και το έλλειμμα υδρατμών στην ατμόσφαιρα. Τέλος, η παράμετρος c (°C<sup>-1</sup>) μέσω του όρου 1 - c T<sub>a</sub> προσεγγίζει τον πιο πολύπλοκο όρο της μεθόδου Penmann-Monteith 1 + γ' / Δ. Υπενθυμίζουμε εδώ ότι το γ είναι συνάρτηση της επιφάνειας και της αεροδυναμικής αντίστασης, και Δ είναι η καμπύλη πίεσης ατμών κλίση, η οποία είναι συνάρτηση του T<sub>a</sub>. Οι παράμετροι προσεγγίστηκαν με βάση μηνιαία μετεωρολογικά δεδομένα από 37 σταθμούς της ΕΜΥ σε όλη την έκταση της Ελλάδας, που απεικονίζονται στο Σχήμα 1.



**Σχήμα 1** Απεικόνιση των χρησιμοποιούμενων μετεωρολογικών σταθμών

Οι παράμετροι υπολογίστηκαν μέσω βαθμονόμησης βασισμένης σε βελτιστοποίηση μέσω μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων. Η περίοδος βαθμονόμησης ήταν από το 1968 έως το 1983 ενώ τα δεδομένα από το 1984 έως το 1989 χρησιμοποιήθηκαν για επαλήθευση. Με βάση τη βαθμονόμηση υπολογίστηκαν οι παράμετροι για κάθε σημείο ενώ δημιουργήθηκαν και χάρτες που καλύπτουν όλη την ελληνική επικράτεια για την εύρεση των παραμέτρων. Ένας τέτοιος χάρτης, για την εύρεση της παραμέτρου  $a$ , απεικονίζεται στο Σχήμα 2.



**Σχήμα 2** Γεωγραφική κατανομή της παραμέτρου *a*

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας έχοντας ως δεδομένες τις χρονοσειρές της ημερήσιας θερμοκρασίας, υπολογίστηκε αρχικά η ημερήσια εξατμοδιαπνοή μέσω της παραμετρικής μεθόδου που είναι ενσωματωμένη στον Υδρογνώμονα και απαιτεί ως δεδομένα εισόδου το γεωγραφικό πλάτος και τις τρεις παραμέτρους. Συγκεκριμένα, θεωρήθηκε ως γεωγραφικό πλάτος της περιοχής μια μέση τιμή των  $38^\circ$  και οι παράμετροι λήφθηκαν ως ο μέσος όρος των υπολογισμένων παραμέτρων στους μετεωρολογικούς σταθμούς του Αεροδρομίου Ελληνικού και της Κορίνθου, εφόσον η εκτιμήθηκε ότι η λεκάνη του Σαρανταπόταμου βρίσκεται περίπου στο μέσον των δύο περιοχών. Οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν είναι  $a=0,00044 \text{ kg/kJ}$ ,  $b=0,678 \text{ kg/m}^2$  και  $c=0,02555^\circ\text{C}^{-1}$ .

Η μέθοδος αυτή εφαρμόστηκε για κάθε μία από τις χρονοσειρές θερμοκρασίας που προέκυψε από την εφαρμογή της μεθόδου Thiessen για κάθε υπολεκάνη και το αποτέλεσμα ήταν η παραγωγή ισάριθμων χρονοσειρών ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής. Τελευταίο βήμα πριν την εισαγωγή τους στην Υδρόγειο είναι η διακριτοποίησή τους σε ωριαίο βήμα, επιμερίζοντας ισόποσα την ημερήσια εξατμοδιαπνοή ανά ώρα.

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ:** **ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΟΔΗΓΙΑΣ 2007/06/ΕΚ** **ΓΙΑ ΤΙΣ ΠΛΗΜΜΥΡΕΣ**

Το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο εξέδωσε στις 23 Οκτωβρίου 2007 την Οδηγία 2007/06/ΕΚ για την αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας. Η Οδηγία τέθηκε σε ισχύ στις 26 Νοεμβρίου του 2007.

Ο σκοπός της οδηγίας είναι η θέσπιση ενός πλαισίου για την αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας, με στόχο τη μείωση των δυσμενών συνεπειών της στην ανθρώπινη υγεία, στο περιβάλλον, στην πολιτιστική κληρονομιά και την οικονομική ανάπτυξη (άρθρο 1, 2007/60/ΕΚ). Ουσιαστικά, η συγκεκριμένη οδηγία αποτελεί την πρώτη προσπάθεια ολιστικής προσέγγισης του ζητήματος των πλημμυρών, περνώντας από μία παραδοσιακή αντιμετώπιση των πλημμυρών με έργα αντιπλημμυρικής προστασίας, σε μία σύγχρονη θεώρηση διαχείρισης της πλημμυρικής επικινδυνότητας.

Οι βασικοί άξονες διαχείρισης της πλημμυρικής διακινδύνευσης σύμφωνα με την ευρωπαϊκή οδηγία είναι:

- ✓ Η πρόληψη
- ✓ Η προστασία με αντιπλημμυρικά έργα
- ✓ Η ετοιμότητα
- ✓ Η μετρίαση των επιπτώσεων σε περίπτωση πλημμύρας
- ✓ Η αντιμετώπιση καταστάσεων έκτακτης ανάγκης



✓ Η αποκατάσταση και επαναξιολόγηση

Τα βήματα εφαρμογής της Οδηγίας 2007/06/ΕΚ περιλαμβάνουν αρχικά την *προκαταρκτική αξιολόγηση των κινδύνων πλημμύρας*. Στη συνέχεια ακολουθεί η κατάρτιση *χαρτών επικινδυνότητας πλημμύρας (flood hazard)* και *χαρτών πλημμυρικής διακινδύνευσης (flood risk)*, πάντα σε επίπεδο λεκάνης απορροής ποταμού, όπως ορίζει και η Οδηγία 2000/60/ΕΚ για τα νερά. Τέλος, εκπονούνται *σχέδια διαχείρισης* για κάθε λεκάνης απορροής.

Στο πρώτο στάδιο εφαρμογής της Οδηγίας, στην *προκαταρκτική αξιολόγηση*, τα κράτη-μέλη υποχρεούνται να προσδιορίσουν τις περιοχές που είναι επιρρεπείς στην εμφάνιση πλημμυρικών συμβάντων, ώστε να προκαταλάβουν τις δυσμενείς επιπτώσεις τους (άρθρο 4-5, παρ. 1). Ουσιαστικά, καταγράφονται τα περιγραφικά δεδομένα ιστορικών πλημμυρών με τις αντίστοιχες συνέπειές τους και γίνεται μια αξιολόγηση των δυνητικών αρνητικών συνεπειών μελλοντικών πλημμυρών με βάση στοιχεία όπως η τοπογραφία, η θέση και τα όρια των υδατορευμάτων, τα υδρολογικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά τους, η αποτελεσματικότητα των υφιστάμενων πλημμυρικών έργων, η θέση των κατοικημένων περιοχών και των περιοχών οικονομικής δραστηριότητας, καθώς και οι μακροπρόθεσμες δυνητικές εξελίξεις (Ευστρατιάδης και Μαμάσης, 2011).

Όσον αφορά την εκπόνηση *χαρτών επικινδυνότητας*, αυτοί καλύπτουν τις γεωγραφικές περιοχές που θα μπορούσαν να πλημμυρίσουν με τα ακόλουθα σενάρια (άρθρο 6, παρ. 3):

- Πλημμύρες χαμηλής πιθανότητας ή σενάρια ακραίων φαινομένων
- Πλημμύρες μέσης πιθανότητας με πιθανή περίοδο επαναφοράς  $\geq 100$  χρόνια
- Πλημμύρες υψηλής πιθανότητας

Για κάθε τέτοιο σενάριο θα πρέπει να παρατίθενται τα εξής στοιχεία:

- Η έκταση της πλημμύρας
- Το βάθος νερού ή η στάθμη νερού ανάλογα με την περίπτωση
- Η ταχύτητα ροής ή η σχετική ροή υδάτων ανάλογα με την περίπτωση

Οι *χάρτες πλημμυρικής διακινδύνευσης* περιγράφουν τις δυσμενείς επιπτώσεις των πλημμυρών που συνδέονται με τα σενάρια που αναφέρθηκαν. Οι επιπτώσεις αυτές εκφράζονται ως εξής (άρθρο 6, παρ. 5):

- Ενδεικτικός αριθμός κατοίκων που ενδέχεται να πληγούν
- Τύπος οικονομικής δραστηριότητας της περιοχής που πιθανώς να πληγεί

- Εγκαταστάσεις οι οποίες ενδέχεται να προκαλέσουν τυχαία ρύπανση σε περίπτωση πλημμύρας και οι προστατευόμενες περιοχές που ενδέχεται να πληγούν
- Άλλες πληροφορίες για ενέργειες που κρίνονται από τα κράτη-μέλη ότι θα προκαλέσουν πιθανή φθορά στο περιβάλλον. Συγκεκριμένα, η επισήμανση των περιοχών που υπάρχει μεγάλη πιθανότητα εμφάνισης πλημμυρών με αυξημένο ποσοστό μεταφερόμενων ιζημάτων, πλημμυρών που παρασύρουν υπολείμματα και πληροφορίες για πιθανές άλλες πηγές ρύπανσης.

Στο τελικό στάδιο εφαρμογής της οδηγίας εκπονούνται τα *σχέδια διαχείρισης* για κάθε λεκάνη απορροής. Τα σχέδια διαχείρισης των κινδύνων πλημμύρας συντάσσονται από τα κράτη-μέλη, με βάση τους χάρτες επικινδυνότητας πλημμύρας και τους χάρτες κινδύνων πλημμύρας, για τις περιοχές στις οποίες υπάρχουν δυνητικοί, σοβαροί κίνδυνοι εμφάνισης πλημμύρας. Ουσιαστικά, περιλαμβάνονται μέτρα για την επίτευξη συγκεκριμένων στόχων, όπως ο περιορισμός των δυσάρεστων, επιζήμιων αποτελεσμάτων που έχουν οι πλημμύρες στην ανθρώπινη υγεία, στην πολιτιστική κληρονομιά, στο περιβάλλον και στην οικονομική δραστηριότητα (άρθρο 7, παρ. 2), προωθώντας μη κατασκευαστικά μέτρα και δράσεις. Τα σχέδια διαχείρισης εστιάζουν στο τρίπτυχο πρόληψη, προστασία και ετοιμότητα που περιλαμβάνει ακόμα συστήματα πρόγνωσης πλημμυρών και συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης. Παρακάτω παρατίθεται το ενδεικτικό χρονοδιάγραμμα εφαρμογής της οδηγίας.

Έναρξη ισχύος	26/11/2007
Υλοποίηση διοικητικών διευθετήσεων	26/5/2010
Προκαταρκτική αξιολόγηση πλημμυρικής διακινδύνευσης	22/12/2011
Έναρξη κοινωνικών διαβουλεύσεων	22/12/2012
Χάρτες πλημμυρικής επικινδυνότητας και διακινδύνευσης	22/12/2013
Σχέδια διαχείρισης πλημμυρικής διακινδύνευσης	22/12/2015
2η προκαταρκτική αξιολόγηση πλημμυρικής διακινδύνευσης	22/12/2018
2η έκδοση χαρτών πλημμυρικής επικινδυνότητας και διακινδύνευσης	22/12/2019
Τέλος πρώτου κύκλου διαχείρισης πλημμυρικής διακινδύνευσης	22/12/2021

**Πίνακας 1** Χρονοδιάγραμμα εφαρμογής Οδηγίας 2007/60/ΕΚ για τις πλημμύρες (Ευστρατιάδης και Μαμάσης, 2011)