ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΕΝΩΣΗ
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΤΑΜΕΙΟ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ

ΕΣΠΑ 2007-2013
πρόγραμμα για την ανάπτυξη

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ

ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ – Εκτίμηση πλημμυρικών ροών στην Ελλάδα σε συνθήκες υδροκλιματικής μεταβλητότητας: Ανάπτυξη φυσικά εδραιωμένου εννοιολογικού-πιθανοτικού πλαισίου και υπολογιστικών εργαλείων

Συνεργαζόμενοι φορείς:

ΕΤΜΕ: Πέππας & Συνεργάτες Ε.Ε.

Γραφείο Μαχαίρα Α.Ε.

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο – Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος

Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών – Ινστιτούτο Ερευνών Περιβάλλοντος και Βιώσιμης Ανάπτυξης

Ενότητα Εργασίας 3

Ανάπτυξη φυσικά εδραιωμένων εργαλείων υδρολογίας πλημμυρών

Παραδοτέο Π3.3

Τεχνική έκθεση περιγραφής περιοχικών σχέσεων εκτίμησης χαρακτηριστικών υδρολογικών μεγεθών

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της έκθεσης είναι η συστηματική διερεύνηση και αξιολόγηση των περιοχικών σχέσεων και συναφών μοντέλων επεισοδίου που εφαρμόζονται στις μελέτες πλημμυρών, με επαλήθευση των προγνώσεών τους στις πιλοτικές λεκάνες του έργου. Η έρευνα εστιάζει στη δημοφιλέστερη στην Ελλάδα (αλλά και παγκοσμίως) διαδικασία υδρολογικού σχεδιασμού, που βασίζεται στην εφαρμογή της μεθόδου SCS-CN για την εκτίμηση των υδρολογικών ελλειμμάτων, που συνδυάζεται με τη θεωρία μοναδιαίου υδρογραφήματος για την μετατροπή της επιφανειακής απορροής σε πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης. Στην έκθεση διερευνώνται τόσο το θεωρητικό-εννοιολογικό πλαίσιο των μοντέλων όσο και η διαδικασία εκτίμησης των βασικών μεγεθών εισόδου τους (χρόνος συγκέντρωσης, αριθμός καμπύλης απορροής, ποσοστό αρχικών απωλειών, συνθήκες αρχικής υγρασίας). Για τον σκοπό αυτό, αναλύθηκαν περισσότερα από 100 επεισόδια πλημμυρών στις 11 θέσεις ενδιαφέροντος, για τα οποία επιχειρήθηκε η αναπαραγωγή τους, με διάφορες εναλλακτικές προσεγγίσεις. Από τις αναλύσεις προέκυψε η ανάγκη αναθεώρησης κρίσιμων πτυχών του υδρολογικού σχεδιασμού. Οι κυριότερες είναι: (α) η διόρθωση του χρόνου συγκέντρωσης που εκτιμάται κατά Giandotti συναρτήσει της έντασης βροχής, (β) η εκτίμηση της παραμέτρου CN της μεθόδου SCS-CN με βάση τρία χαρακτηριστικά επίπεδα χωρικής πληροφορίας και η αναγωγή του για δεδομένο ποσοστό αρχικών απωλειών, (γ) η εφαρμογή ενός παραμετρικού συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος, τα χρονικά μεγέθη του οποίου εξαρτώνται όχι μόνο από τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας της λεκάνης αλλά και τους μηχανισμούς του υπεδάφους, και (δ) η στατιστικά συνεπής εκτίμηση των πλημμυρικών μεγεθών με βάση τις πιθανότητες πραγματοποίησης της βροχόπτωσης σχεδιασμού σε ξηρές, μέσες και υγρές συνθήκες αρχικής εδαφικής υγρασίας.

ABSTRACT

The objective of the report is the systematic investigation and evaluation of regional relationships and associated event-based models that are applied in flood studies, through validating their predictions across the pilot basins of the project. The research focuses on the most popular, in Greece as well as globally, hydrological design procedure, which is based on the application of the SCS-CN method for the estimation of hydrological losses, combined with the unit hydrograph theory for the transformation of surface runoff to flood hydrograph at the basin outlet. In the report are investigated both the theoretical-conceptual background of the models as well as the procedure for estimating their basic input quantities (time of concentration, runoff curve number, initial abstraction ratio, initial soil moisture conditions). In this respect, we analyzed more than 100 flood events in 11 sites of interest, which we attempted to represent through several alternative approaches. The analyses showed that it is essential to revise critical aspects of the hydrological design. The most important are: (a) the correction of the time of concentration, as estimated by the Giandotti formula, according to the rainfall intensity; (b) the estimation of parameter CN of the SCS-CN method on the basis of three characteristic layers of spatial information and its adjustment for given initial abstraction ratio; (c) the application of a parametric synthetic unit hydrograph, the time parameters of which depend not only on the characteristics of the basin's surface but also the mechanisms of the shallow soil; and (d) the statistically consistent estimation of the flood design quantities on the basis of the probabilities of occurrence of the design rainfall under dry, medium or wet antecedent soil moisture conditions.

Π Ε Ρ Ι Ε Χ Ο Μ Ε Ν Α

1 Εισαγωγή 8

1.1 Αντικείμενο του τεύχους - Ιστορικό ... 8

1.2 Διάρθρωση του τεύχους ... 10

2 Ανάλυση πλημμυρικών επεισοδίων πιλοτικών υδρολογικών λεκανών 11

2.1 Σκοπός και μεθοδολογία ... 11
2.1.1 Σκοπός ... 11
2.1.2 Κριτήριο επιλογής επεισοδίων ... 11
2.1.3 Εκτίμηση χαρακτηριστικών πλημμυρικών μεγεθών ... 11

2.2 Λεκάνη απορροής Νέδοντα ... 12
2.2.1 Γενικά χρακτηριστικά λεκάνης ... 12
2.2.2 Επεισόδια λεκάνης Νέδουντα ... 13
2.2.3 Επεισόδια υπολεκάνης Καρβελιώτη ... 14
2.2.4 Επεισόδια υπολεκάνης Αλαγονίας ... 15

2.3 Λεκάνη απορροής Λούσιου ... 17
2.3.1 Γενικά χρακτηριστικά λεκάνης ... 17
2.3.2 Αναλύσεις πλημμυρικών επεισοδίων ... 17

2.4 Λεκάνη απορροής Σαρανταπόταμου ... 19
2.4.1 Γενικά χρακτηριστικά λεκάνης ... 19
2.4.2 Επεισόδια λεκάνης Σαρανταπόταμου ... 20
2.4.3 Επεισόδια υπολεκάνης Οινόης ... 21

2.5 Λεκάνη απορροής ρέματος Χαλανδρίου ... 22
2.5.1 Γενικά χρακτηριστικά λεκάνης ... 22
2.5.2 Αναλύσεις πλημμυρικών επεισοδίων ... 23

2.6 Λεκάνη απορροής Λυκορέματος Ραφήνας ... 24
2.6.1 Γενικά χρακτηριστικά λεκάνης ... 24
2.6.2 Επεισόδια υπολεκάνης Λυκορέματος ... 25
2.6.3 Επεισόδια υπολεκάνης Ντράφι ... 26

2.7 Λεκάνη απορροής Περιστερώνα ... 27
2.7.1 Γενικά χρακτηριστικά λεκάνης ... 27
2.7.2 Αναλύσεις πλημμυρικών επεισοδίων ... 28

2.8 Λεκάνη απορροής Ξερού ... 30
2.8.1 Γενικά χρακτηριστικά λεκάνης ... 30
2.8.2 Αναλύσεις πλημμυρικών επεισοδίων ... 30

2.9 Συγκεντρωτικά μεγέθη ... 32

3 Διερεύνηση περιοχικών σχέσεων εκτίμησης του χρόνου συγκέντρωσης 36

3.1 Σκοπός και μεθοδολογία ... 36

3.2 Θεωρητικό υπόβαθρο ... 37

3.2.1 Ορισμός χρόνου συγκέντρωσης ... 37
3.2.2 Παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται ο χρόνος συγκέντρωσης ... 37
3.2.3 Εκτίμηση χρόνου συγκέντρωσης με βάση περιοχικές προσεγγίσεις ... 38
3.2.4 Εφαρμογή στα πλαίσια της ορθολογικής μεθόδου ... 38

3.3 Συλλογή και επεξεργασία δεδομένων ... 39
3.3.1 Γεωγραφικά δεδομένα ... 39
3.3.2 Χαρακτηριστικά λεκανών απορροής ... 40
3.3.3 Κλάσεις υδατοπερατότητας και κάλυψης γης ... 40
3.3.4 Επιλογή υδρομετρικών σταθμών ενδιαφέροντος ... 41

3.4 Δεδομένα εισόδου για την εφαρμογή της ορθολογικής μεθόδου ... 41
3.4.1 Όμβριες καμπύλες ... 41
3.4.2 Κατάρτιση δείγματος μέγιστων παροχών ... 42
3.4.3 Εκτίμηση περιόδου επαναφοράς παροχών αιχμής ... 44
3.4.4 Εκτίμηση χρόνου συγκέντρωσης λεκανών ... 44
3.4.5 Εκτίμηση συντελεστών απορροής ... 46
3.4.6 Εκτίμηση αριθμού καμπύλης απορροής ... 47

3.5 Επαλήθευση ορθολογικής μεθόδου ... 48
3.5.1 Υπολογιστική διαδικασία ... 48
3.5.2 Μέτρο αξιολόγησης ... 49
3.5.3 Αναλυτικά αποτελέσματα ... 50
3.5.4 Αξιολόγηση μεθόδων εκτίμησης χρόνου συγκέντρωσης ... 53

3.6 Ανάπτυξη βελτιωμένων σχέσεων εκτίμησης χρόνου συγκέντρωσης ... 54
3.6.1 Βελτιστοποίηση συντελεστών των σχέσεων Giandotti και Kirpich ... 54
3.6.2 Ανάπτυξη νέων εμπειρικών σχέσεων ... 55

3.7 Μείωση χρόνου συγκέντρωσης συναρτήσει της έντασης βροχής ... 57

3.8 Συμπεράσματα ... 58

4 Επισκόπηση και θεωρητική διερεύνηση μεθόδου SCS-CN για την εκτίμηση των υδρολογικών ελλειμμάτων 60

4.1 Σκοπός και μεθοδολογία ... 60

4.2 Συνοπτική επισκόπησης της μεθόδου SCS-CN ... 60
4.2.1 Υπολογιστική διαδικασία ... 60
4.2.2 Εκτίμηση μέγιστης δυνητικής κατακράτησης από μετρημένα επεισόδια ... 62
4.2.3 Εκτίμηση μέγιστης δυνητικής κατακράτησης σε λεκάνες χωρίς μετρήσεις ... 63

4.3 Θεωρητικές αναλύσεις ... 65
4.3.1 Συσχέτιση συντελεστή απορροής και αριθμού καμπύλης απορροής ... 65
4.3.2 Αναλυτική εκτίμηση παραμέτρου CN για τυχαίες αρχικές απώλειες και δεδομένες συνθήκες υγρασίας ... 67

5 Διερεύνηση προγνωστικής ικανότητας συνδυαστικής μεθόδου SCS-CN και συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος 69

5.1 Σκοπός και μεθοδολογία ... 69

5.2 Μοναδιαίο υδρογράφημα: Θεωρητικό υπόβαθρο και συνθετικές προσεγγίσεις ... 70
5.2.1 Ορισμοί, εννοιολογία και παραδοχές ... 70
5.2.2 Η έννοια του συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος (ΣΜΥ) ... 70
5.2.3 Συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα Snyder ... 70
5.2.4 Συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας ... 72

5.3 Προκαταρκτικές αναλύσεις στη λεκάνη Λυκορέματος Ραφήνας με χρήση εναλλακτικών ΣΜΥ ... 73
5.3.1 Περιοχή μελέτης και χωρικά δεδομένα ... 73
5.3.2 Επιλογή και επεξεργασία πλημμυρικών επεισοδίων ... 74
5.3.3 Διαχωρισμός επιφανειακής απορροής ... 74
5.3.4 Εκτίμηση χαρακτηριστικών υδρολογικών μεγεθών ... 76
5.3.5 Εφαρμογή μεθόδου για αρχικές απώλειες 20% ... 77
5.3.6 Αναπαραγωγή πλημμυρικών επεισοδίων με βελτιστοποίηση των παραμέτρων της μεθόδου SCS-CN&ΜΥ ... 78
5.3.7 Προσαρμογή ΣΜΥ για μεταβλητό χρόνο συγκέντρωσης ... 81

5.4 Αναπαραγωγή πλημμυρικών επεισοδίων στις πιλοτικές λεκάνες ... 82
5.4.1 Μεθοδολογία και παραδοχές ... 82
5.4.2 Παραμετρικό συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα ... 83

5.5 Σύγκριση παρατηρημένων και προσομοιωμένων υδρογραφημάτων ... 84
5.5.1 Λεκάνη Νέδοντα ... 84
5.5.2 Υπολεκάνη Καρβελιώτη ... 86
5.5.3 Υπολεκάνη Αλαγονίας ... 88
5.5.4 Λεκάνη Λούσιου ... 90
5.5.5 Λεκάνη Σαρανταπόταμου ... 92
5.5.6 Υπολεκάνη Οινόης ... 95
5.5.7 Λεκάνη ρέματος Χαλανδρίου ... 96
5.5.8 Λεκάνη Λυκορέματος Ραφήνας (υδρ. σταθμός Ντράφι) ... 97
5.5.9 Υπολεκάνη Λυκορέματος (υδρ. σταθμός Λυκόρεμα) ... 100
5.5.10 Λεκάνη Περιστερώνα ... 103
5.5.11 Λεκάνη Ξερού ... 106

5.6 Φυσική ερμηνεία βελτιστοποιημένων παραμέτρων ... 108
5.6.1 Εκτίμηση χαρακτηριστικών μεγεθών πλημμυρικών επεισοδίων ... 108
5.6.2 Λεκάνη Νέδοντα ... 108
5.6.3 Υπολεκάνη Καρβελιώτη ... 110
5.6.4 Υπολεκάνη Αλαγονίας ... 111
5.6.5 Λεκάνη Λούσιου ... 112
5.6.6 Λεκάνη Σαρανταπόταμου ... 113
5.6.7 Υπολεκάνη Οινόης ... 114
5.6.8 Λεκάνη ρέματος Χαλανδρίου ... 114
5.6.9 Υπολεκάνη ρέματος Ραφήνας ανάντη υδρ. σταθμού Ντράφι ... 115
5.6.10 Υπολεκάνη ρέματος Ραφήνας ανάντη Λυκορέματος ... 116
5.6.11 Λεκάνη Περιστερώνα ... 118
5.6.12 Λεκάνη Ξερού ... 119

5.7 Συγκεντρωτικά μεγέθη 120

5.8 Τελικές παρατηρήσεις 122
5.8.1 Χειρισμός παραμέτρου CN ως τυχαία μεταβλητή 122
5.8.2 Εκτίμηση ποσοστού αρχικών απωλειών μεθόδου SCS-CN 123
5.8.3 Εκτίμηση παραμέτρων ΣΜΥ 123

6 Μεθοδολογία εκτίμησης αριθμού καμπύλης απορροής αναφοράς σε περιβάλλον ΣΓΠ 125

6.1 Σκοπός και μεθοδολογία 125

6.2 Αναθεωρημένο πλαίσιο εκτίμησης παραμέτρου CN 125
6.2.1 Γεωγραφικά δεδομένα εισόδου 125
6.2.2 Κατηγοριοποίηση υδατοπερατότητας 126
6.2.3 Κατηγοριοποίηση βλάστησης 127
6.2.4 Κατηγοριοποίηση αποστραγγιστικής ικανότητας εδάφους 127
6.2.5 Εκτίμηση αριθμού καμπύλης απορροής αναφοράς 128

6.3 Εφαρμογή στις πιλοτικές λεκάνες 128

6.4 Σύγκριση θεωρητικών και εκτιμημένων CN αναφοράς 132

7 Πιθανοτική θεώρηση καταστάσεων αρχικής εδαφικής υγρασίας 134

7.1 Σκοπός και μεθοδολογία 134

7.2 Υπολογιστική διαδικασία 135
7.2.1 Εκτίμηση πιθανοτήτων κατάστασης υγρασίας 135
7.2.2 Εκτίμηση πλημμυρικών μεγεθών σχεδιασμού 136

7.3 Εκτίμηση πιθανοτήτων κατάστασης υγρασίας στην Ελλάδα 136

8 Συμπεράσματα 140

Αναφορές 143

1 Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο του τεύχους - Ιστορικό

Στα πλαίσια της Δράσης «Συνεργασία» του ΕΣΠΑ 2007-2013, η Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας ανέθεσε στη σύμπραξη τεσσάρων φορέων (ΕΤΜΕ: Πέππας & Συνεργάτες, Γραφείο Μαχαίρα, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, και Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών) το ερευνητικό έργο "*ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ – Εκτίμηση πλημμυρικών ροών στην Ελλάδα σε συνθήκες υδροκλιματικής μεταβλητότητας: Ανάπτυξη φυσικά εδραιωμένου εννοιολογικού-πιθανοτικού πλαισίου και υπολογιστικών εργαλείων*". Το έργο αποσκοπεί στην ανάπτυξη φυσικά εδραιωμένων μεθοδολογιών μοντελοποίησης και πρόγνωσης των ισχυρών καταιγίδων και των επαγόμενων πλημμυρικών φαινομένων, προσαρμοσμένων στις ιδιαιτερότητες των ελληνικών υδροκλιματικών και γεωμορφολογικών συνθηκών. Κεντρική συνιστώσα του έργου αποτελεί η διαμόρφωση ενός δικτύου πιλοτικών λεκανών, υφιστάμενων και νέων, τα δεδομένα των οποίων χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη και επαλήθευση των νέων μεθοδολογιών και μοντέλων.

Σκοπός της Ενότητας Εργασίας 3 με τίτλο "*Ανάπτυξη φυσικά εδραιωμένων εργαλείων υδρολογίας πλημμυρών*" είναι η αξιοποίηση των δεδομένων του νέου μετρητικού δικτύου, για την διατύπωση ενός φυσικά εδραιωμένου μεθοδολογικού πλαισίου μοντελοποίησης των πλημμυρών, προσαρμοσμένου στις ελληνικές συνθήκες. Το πλαίσιο αυτό περιλαμβάνει ένα φάσμα μεθοδολογικών προσεγγίσεων, από στοιχειώδεις εμπειρικές σχέσεις έως προχωρημένα μοντέλα προσομοίωσης, τα οποία ελέγχθηκαν στις πιλοτικές περιοχές του έργου και συγκρίθηκαν τόσο με τις κοινές πρακτικές των μελετητών όσο και με καταξιωμένα υπολογιστικά εργαλεία της βιβλιογραφίας.

Ειδικότερα, η παρούσα τεχνική έκθεση περιγράφει τις ερευνητικές εργασίες που αφορούν στην ανάπτυξη νέων ή και βελτίωση υφιστάμενων περιοχικών σχέσεων για την εκτίμηση βασικών υδρολογικών μεγεθών που εισάγονται στα τυπικά μοντέλα επεισοδίου και έχουν ευρεία εφαρμογή σε μελέτες πλημμυρών. Επισημαίνεται ότι η χρήση των περιοχικών σχέσεων και συναφών μοντέλων βασίζεται στην υπόθεση της *υδρολογικής ομοιότητας* των λεκανών απορροής – υπόθεση που έχει δεχθεί έντονη κριτική (π.χ. Wagener *et al.*, 2007). Πρόκειται για ημιεμπειρικές προσεγγίσεις που εκτιμούν τα υδρολογικά μεγέθη ενδιαφέροντος μέσω εύκολα μετρήσιμων φυσιογραφικών χαρακτηριστικών της λεκάνης (π.χ., γεωμετρικά). Τα μεγέθη αυτά εκτιμώνται είτε μέσω αναλυτικών εξισώσεων (που κυρίως έχουν προκύψει μέσω σχέσεων παλινδρόμησης) είτε με χρήση πινάκων αναφοράς. Βεβαίως, οι περιοχικές σχέσεις σε καμία περίπτωση δεν υποκαθιστούν φυσικούς νόμους ούτε μπορεί να θεωρηθεί ότι έχουν κάποια γενική ισχύ. Από την άλλη πλευρά, η αντίθετη υπόθεση της *μοναδικότητας* κάθε διεργασίας στη μικροκλίμακα ("uniqueness in place"· βλ. Beven, 2000), αν και φυσικά συνεπής, είναι στην πράξη ανεφάρμοστη.

Στην υδρολογία πλημμυρών, η χρήση των περιοχικών σχέσεων είναι ιδιαίτερα προσφιλής, καθώς μέσω αυτών εκτιμώνται οι παράμετροι των μοντέλων επεισοδίου, που αποτελούν το βασικό εργαλείο σχεδιασμού σε λεκάνες χωρίς μετρήσεις. Κατά κανόνα, η προσαρμογή των σχέσεων αυτών έχει γίνει με βάση μετρήσεις πεδίου σε περιορισμένο πλήθος πειραματικών λεκανών του εξωτερικού, με συγκεκριμένα φυσιογραφικά και υδροκλιματικά χαρακτηριστικά

(π.χ. μικρές αγροτικές λεκάνες με ήπιες κλίσεις). Παρά την ευρεία αποδοχή τους, σε λίγες περιπτώσεις έχει γίνει επαλήθευση (και αναπροσαρμογή) των περιοχικών σχέσεων στις τοπικές συνθήκες. Ειδικότερα όσον αφορά στην Ελλάδα, η σχετική έρευνα είναι μάλλον αποσπασματική, έχοντας επικεντρωθεί σε περιορισμένο αριθμό πειραματικών λεκανών και σε συγκεκριμένες πτυχές των υδρολογικών διεργασιών και συναφών μοντέλων .

Την ανάγκη ολοκληρωμένης και συστηματικής αξιολόγησης των μεθόδων που εφαρμόζονται στον υδρολογικό σχεδιασμό, με επαλήθευση των προγνώσεών τους σε μεγάλο πλήθος αντιπροσωπευτικών λεκανών της Ελλάδας, καλύπτει η παρούσα έρευνα, που αποτελεί την κεντρική συνιστώσα του προγράμματος Δευκαλίων. Η έρευνα εστιάζει στη δημοφιλέστερη στην Ελλάδα (αλλά και παγκοσμίως) διαδικασία υδρολογικού σχεδιασμού, που βασίζεται στην εφαρμογή της μεθόδου SCS-CN για την εκτίμηση των υδρολογικών ελλειμμάτων, όπως συνδυάζεται με τη θεωρία μοναδιαίου υδρογραφήματος για την μετατροπή της επιφανειακής απορροής σε πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης. Ειδικότερα, διερευνήθηκαν τόσο το θεωρητικό πλαίσιο της διαδικασίας όσο και η διαδικασία εκτίμησης των βασικών μεγεθών εισόδου (χρόνος συγκέντρωσης, αριθμός καμπύλης απορροής, ποσοστό αρχικών απωλειών, συνθήκες αρχικής υγρασίας), ενώ προέκυψε και η ανάγκη διατύπωσης ενός παραμετρικού συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος, που προσαρμόζεται καλύτερα στα χαρακτηριστικά των ελληνικών λεκανών. Για τον σκοπό αυτό, αναλύθηκαν περισσότερα από 100 επεισόδια πλημμυρών στις πιλοτικές λεκάνες του έργου, για τα οποία επιχειρήθηκε η αναπαραγωγή τους, με διάφορες εναλλακτικές προσεγγίσεις. Τα επεισόδια και οι σχετικές επεξεργασίες τους είναι διαθέσιμα στην ιστοσελίδα του έργου (http://deucalionproject.gr/).

Από την παραπάνω έρευνα, τα αποτελέσματα της οποίας περιγράφονται αναλυτικά στην παρούσα έκθεση, προέκυψε ένα πλήθος δημοσιεύσεων (Galiouna *et al.*, 2011· Mathioudaki *et al.*, 2012· Michaelidi *et al.*, 2013· Efstratiadis *et al.*, 2013· Efstratiadis *et al.*, 2014), καθώς και ακαδημαϊκών εργασιών (Γαλιούνα, 2011· Μαθιουδάκη, 2012· Ζωγάκης, 2013· Μιχαηλίδη, 2013· Μαστροθεόδωρος, 2013· Ζαρκαδούλας, 2014· Ποντικός, 2014). Τα συμπεράσματα των αναλύσεων αξιοποιήθηκαν στη συνέχεια για την κατάρτιση τεχνικών προδιαγραφών των μελετών αντιπλημμυρικών έργων, που αποτελεί παραδοτέο της Ενότητας Εργασίας 6.

Η ομάδα εκπόνησης του παρόντος τεύχους είναι:

- Ανδρέας Ευστρατιάδης, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, ΜΔΕ, ΕΔΙΠ ΕΜΠ
- Αντώνης Κουκουβίνος, Τοπογράφος Μηχανικός, DEA
- Ελένη-Μαρία Μιχαηλίδη, Πολιτικός Μηχανικός
- Ελένη Γαλιούνα, Πολιτικός Μηχανικός, ΜΔΕ
- Κατερίνα Τζούκα, Γεωλόγος, ΜΔΕ
- Αντώνης Κούσης, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Διευθυντής Ερευνών ΕΑΑ
- Νίκος Μαμάσης, Τοπογράφος Μηχανικός, Δρ. Μηχανικός, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ
- Δημήτρης Κουτσογιάννης, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής ΕΜΠ

Στην έρευνα που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας έκθεσης συμμετείχαν ακόμη οι προπτυχιακοί και μεταπτυχιακοί φοιτητές Μαρίνα Μαθιουδάκη, Πολιτικός Μηχανικός, ΜΔΕ Υδρολόγος, Χρήστος Ζωγάκης, Τοπογράφος Μηχανικός, ΜΔΕ Υδρολόγος, Θεόδωρος Μαστροθεόδωρος, Πολιτικός Μηχανικός, Θεόδωρος-Πατάπιος Ζαρκαδούλας, Πολιτικός Μηχανικός, και Σταμάτης Ποντικός, Πολιτικός Μηχανικός.

Συντονιστής του συνόλου των εργασιών της Ενότητας Εργασίας 3 είναι ο Δ. Κουτσογιάννης, Καθηγητής ΕΜΠ.

1.2 Διάρθρωση του τεύχους

Το τεύχος διαρθρώνεται, μαζί με την παρούσα εισαγωγή (Κεφάλαιο 1), σε δέκα κεφάλαια.

Στο **Κεφάλαιο 2** δίνονται τα χαρακτηριστικά των πλημμυρικών επεισοδίων που συλλέχθηκαν από τις πιλοτικές λεκάνες.

Στο **Κεφάλαιο 3** αφορά στη διερεύνηση των περιοχικών σχέσεων εκτίμησης του χρόνου συγκέντρωσης, με βάση δεδομένα μέγιστων πλημμυρικών παροχών σε λεκάνες της Κύπρου, καθώς και η διατύπωση σχέσεων αναγωγής (μείωσης) του χρόνου συγκέντρωσης συναρτήσει της κρίσιμη έντασης βροχής.

Στο **Κεφάλαιο 4** εξετάζεται το θεωρητικό πλαίσιο της μεθόδου SCS-CN για την εκτίμηση των υδρολογικών ελλειμμάτων, και διατυπώνονται σχέσεις εκτίμησης της παραμέτρου CN για τυχαίες αρχικές απώλειες και δεδομένες συνθήκες αρχικής υγρασίας.

Στο **Κεφάλαιο 5** διερευνάται η εφαρμογή της συνδυαστική μεθόδου SCS-CN και συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος (ΣΜΥ) στις πιλοτικές λεκάνες του έργου (όπου προκρίνεται, τελικά, η εφαρμογή ενός παραμετρικού ΣΜΥ), βελτιστοποιώντας τις σχετικές παραμέτρους εισόδου για τα πλημμυρικά επεισόδια που συλλέχθηκαν από τις πιλοτικές λεκάνες και προτείνονται αντιπροσωπευτικές τιμές των εν λόγω παραμέτρων.

Στο **Κεφάλαιο 6** αναπτύσσεται μια μεθοδολογία συνεπούς εκτίμησης του αριθμού καμπύλης απορροής αναφοράς, CN, σε περιβάλλον ΣΓΠ, που συνδυάζει τρία χαρακτηριστικά επίπεδα κατανεμημένης χωρικής πληροφορίας (υδατοπερατότητα, φυτοκάλυψη, αποστραγγιστική ικανότητα), καταλήγοντας σε χάρτες κλάσεων του CN.

Στο **Κεφάλαιο 7** αναλύεται ένα μεγάλο δείγμα ημερήσιων χρονοσειρών βροχόπτωσης σε όλη την Ελλάδα, με σκοπό την παραγωγή χαρτών ισοτιμικών τιμών των πιθανοτήτων εμφάνισης των τριών τυπικών καταστάσεων αρχικής υγρασίας της μεθόδου SCS-CN, και διατυπώνεται ένα πλαίσιο εφαρμογής τους στην εκτίμηση των μεγεθών σχεδιασμού, με όρους πιθανοτήτων.

Τέλος, στο **Κεφάλαιο 8** συνοψίζονται τα συμπεράσματα της έρευνας, με έμφαση στην πρακτική τους αξιοποίηση στις υδρολογικές μελέτες πλημμυρών.

2 Ανάλυση πλημμυρικών επεισοδίων πιλοτικών υδρολογικών λεκανών

2.1 Σκοπός και μεθοδολογία

2.1.1 Σκοπός

Για την διερεύνηση των εμπειρικών σχέσεων που εφαρμόζονται στην υδρολογία πλημμυρών, εξετάστηκε τα σημαντικότερα πλημμυρικά επεισόδια που παρατηρήθηκαν στις τέσσερις πιλοτικές λεκάνες του έργου (Νέδοντα, Λούσιου, Σαρανταπόταμου, ρέματος Χαλανδρίου), καθώς και στις λεκάνες Λυκορέματος Ραφήνας (Αττική), Περιστερώνα και Ξερού (οι δύο τελευταίες στην Κύπρο), για τις οποίες συλλέχθηκαν παρατηρημένα δεδομένα πλημμυρών από υφιστάμενα μετρητικά δίκτυα. Αρχικά εκτιμήθηκαν τα χαρακτηριστικά μεγέθη των επεισοδίων, στα οποία βασίστηκαν οι επόμενες αναλύσεις, με στόχο την επαλήθευση ή και βελτίωση των περιοχικών υδρολογικών σχέσεων και μοντέλων σχεδιασμού.

2.1.2 Κριτήριο επιλογής επεισοδίων

Η επιλογή των επεισοδίων έγινε με βάση την παροχής αιχμής, θέτοντας ως όριο ανηγμένης παροχής τα 0.5 m^3/km^2. Στις περιπτώσεις στις οποίες το χρονικό δείγμα ήταν αρκετά μικρό ή δεν βρέθηκαν επεισόδια που να ικανοποιούν το κριτήριο αυτό, επιλέχθηκαν μικρότερα επεισόδια πλημμύρας.

2.1.3 Εκτίμηση χαρακτηριστικών πλημμυρικών μεγεθών

Στα πλαίσια της ανάλυσης των επεισοδίων υπολογίστηκαν (ή εκτιμήθηκαν) τα εξής μεγέθη:

- ολικό ύψος βροχής
- καθαρή διάρκεια βροχής
- μέση ένταση βροχής (ορίζεται ως το ολικό ύψος βροχής προς την αντίστοιχη διάρκεια)
- μέγιστη στάθμη υδατορεύματος
- παροχή αιχμής
- ύψος απορροής, μετά την αφαίρεση της βασικής ροής (κατά κανόνα ελήφθη ίση με την παροχή κατά την έναρξη της βροχόπτωσης)
- συντελεστής απορροής (ύψος πλημμυρικής απορροής/ύψος βροχής)
- συνολικός όγκος πλημμυρικής απορροής.

Στη γενική περίπτωση, το χρονικό βήμα των αναλύσεων ήταν 15 min, ενώ σε κάποιους σταθμούς το βήμα ήταν 10-λεπτο (και σε έναν ωριαίο).

Στο πέρας του κεφαλαίου παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά μεγέθη των αναλύσεων των επεισοδίων πλημμυρών για όλες τις λεκάνες που εξετάστηκαν.

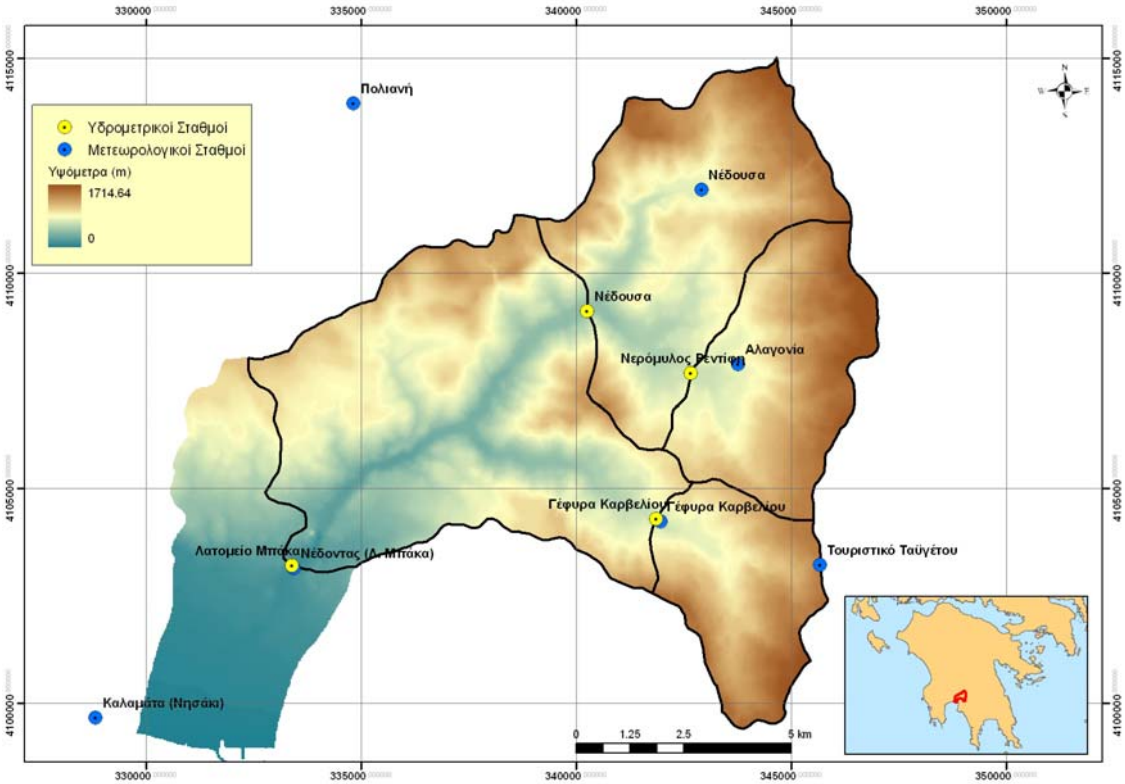
2.2 Λεκάνη απορροής Νέδοντα

2.2.1 Γενικά χαρακτηριστικά λεκάνης

Η λεκάνη του Νέδοντα (Σχήμα 2.1) βρίσκεται στη Δυτική Πελοπόννησο έχει έκταση 120.8 km^2 και χρόνο συγκέντρωσης 3.17 h. Η λεκάνη έχει χωριστεί σε τέσσερις υπολεκάνες, με έξοδο τους υδρομετρικούς σταθμούς Λατομείου Μπάκα, Καρβελιώτη, Νερόμυλου Ρεντίφη (Αλαγονία) και Νέδουσας (Πίνακας 2.1). Στις υδρολογικές αναλύσεις χρησιμοποιήθηκαν οι μετεωρολογικοί σταθμοί Νέδουσας, Αλαγονίας, Καρβελιώτη, Πολιανής και Λατομείου Μπάκα, και οι υδρομετρικοί σταθμοί Λατομείου Μπάκα, Καρβελιώτη και Αλαγονίας. Σημειώνεται ότι ο σταθμός της Νέδουσας τοποθετήθηκε σε προχωρημένη φάση του έργου (Οκτώβριος 2013), και δεν κατέστη δυνατή η κατάρτιση αξιόπιστων χρονοσειρών παροχής.

Πίνακας 2.1: Χαρακτηριστικά λεκάνης Νέδοντα και τριών υπολεκανών της.

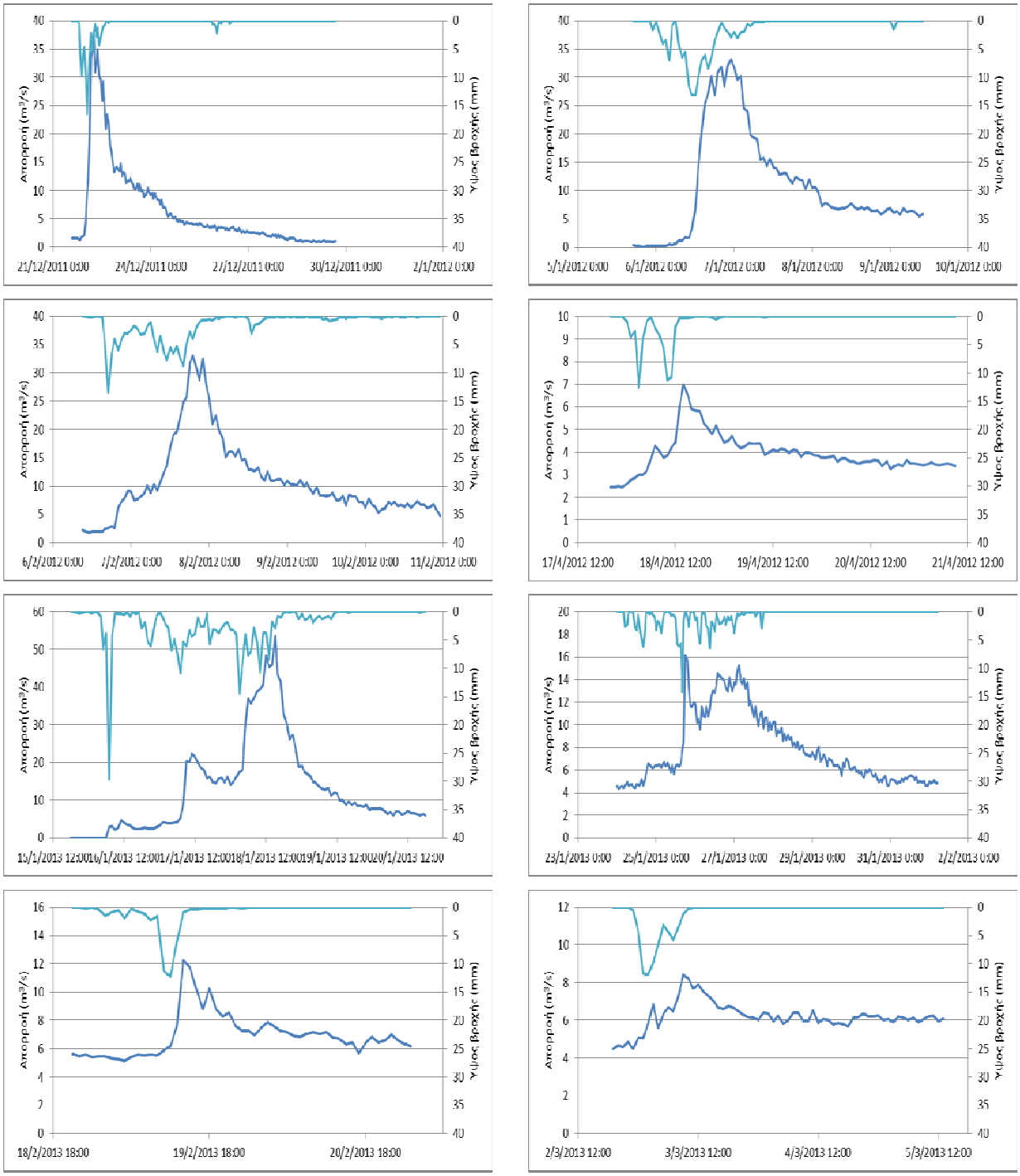
	Λατομείο Μπάκα	Καρβελιώτης	Αλαγονία	Νέδουσα
Έκταση λεκάνης (km^2)	120.8	15.3	20.9	32.2
Μήκος κύριου υδατορέματος (km)	18	6.5	5.6	8.1
Μέσο υψόμετρο λεκάνης (m)	875.7	1098.5	1092.6	927.6
Υψόμετρο στην έξοδο (m)	93	596.2	597.5	397.5
Διαφορά μέσου υψομέτρου και υψομέτρου στην έξοδο (m)	782.7	502.3	495.1	530.1
Χρόνος συγκέντρωσης κατά Giandotti (h)	3.17	1.42	1.50	1.89

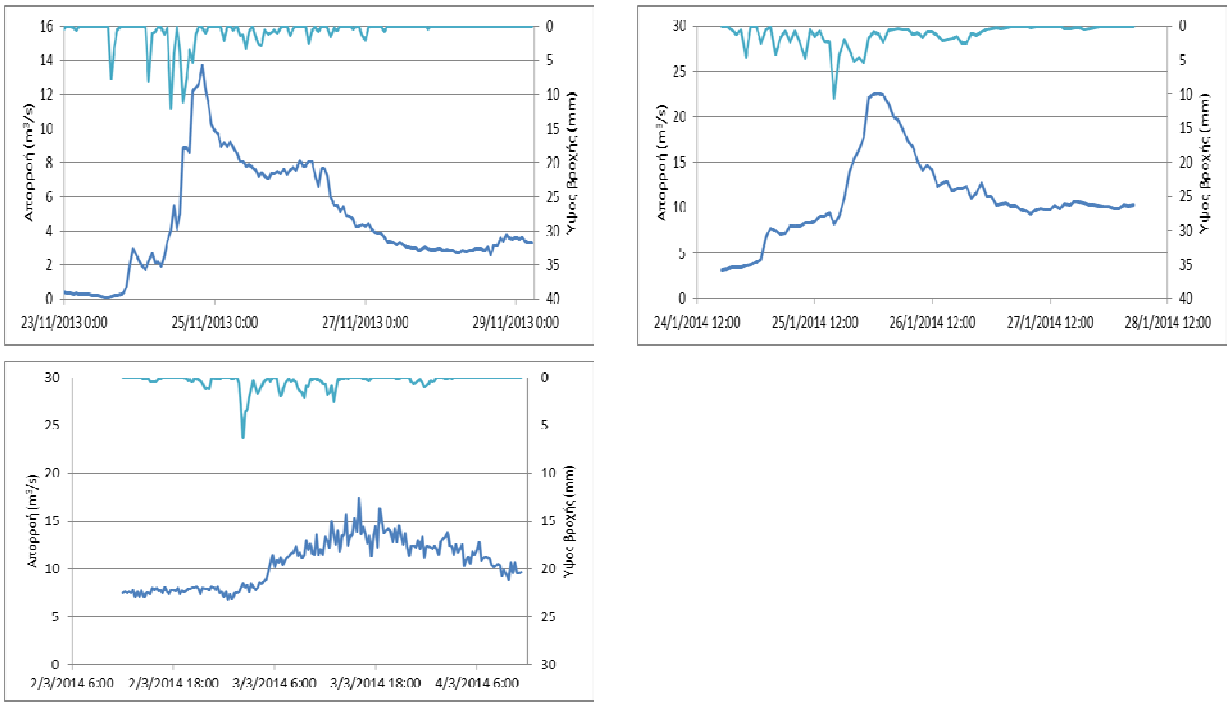


Σχήμα 2.1: Λεκάνη απορροής Νέδοντα και θέσεις μετρητικών σταθμών.

2.2.2 Επεισόδια λεκάνης Νέδουντα

Εξετάστηκαν 11 πλημμυρικά επεισόδια (σε ωριαίο βήμα), που απεικονίζονται στο Σχήμα 2.2 (στο σχήμα αυτό, καθώς και στα επόμενα, απεικονίζονται οι χρονοσειρές βροχόπτωσης, πάνω, και παροχής, κάτω). Από τις αναλύσεις διαπιστώθηκε πως στα περισσότερα επεισόδια η παροχή αιχμής ξεπερνά τα 15 m^3/s και ο συντελεστής απορροής κυμαίνεται από 0.02 έως 0.28. Η βασική ροή στο ποτάμι είναι μικρή (ως 0.08 m^3/s). Ακόμη, ο ανοδικός κλάδος των πλημμυρογραφημάτων είναι αρκετά απότομος, ιδιαίτερα στα μεγάλα επεισόδια, ενδεικτικός της σχετικά γρήγορης απόκρισης της λεκάνης. Από την άλλη πλευρά, παρατηρείται πολύ αργή εκφόρτιση, πολύ μεγαλύτερη σε διάρκεια του χρόνου συγκέντρωσης (έως και 5.5 ημέρες), το οποίο αποτελεί ένδειξη ύπαρξης σημαντικής υποδερμικής ροής.

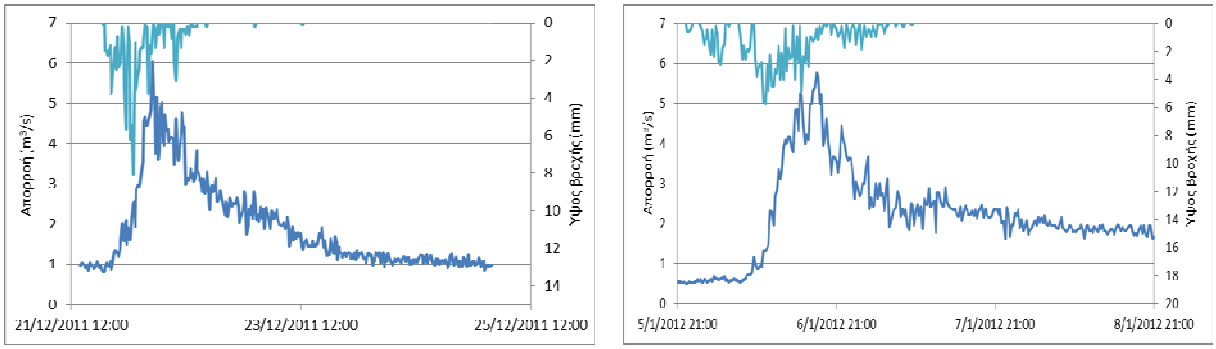


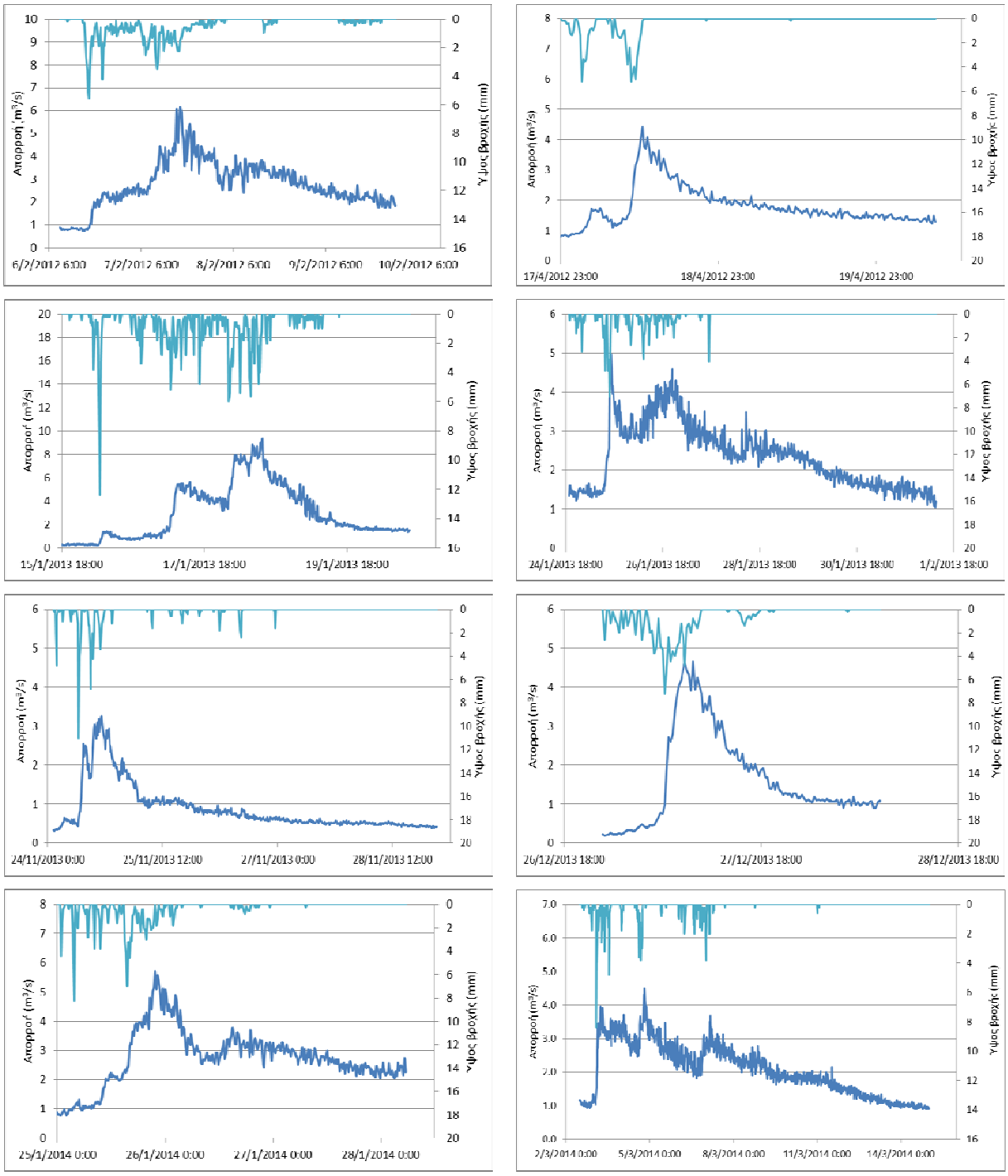


Σχήμα 2.2: Επεισόδια πλημμυρών στην έξοδο της λεκάνης Νέδουντα (υδρομετρικός σταθμός Λατομείο Μπάκα).

2.2.3 Επεισόδια υπολεκάνης Καρβελιώτη

Εξετάστηκαν 10 πλημμυρικά επεισόδια (με χρονικό βήμα 15 min), που απεικονίζονται στο Σχήμα 2.3. Από τις αναλύσεις διαπιστώθηκε πως στα περισσότερα επεισόδια η παροχή αιχμής κυμαίνεται μεταξύ 3.3 και 9.3 m^3/s και ο συντελεστής απορροής από 0.08 έως 0.39. Η βασική ροή στο ρέμα κυμαίνεται μεταξύ 0.1 και 0.6 m^3/s. Όπως και στη συνολική λεκάνη, ο ανοδικός κλάδος των πλημμυρογραφημάτων είναι απότομος, ενώ και πάλι παρατηρείται αργή εκφόρτιση, πολύ μεγαλύτερη σε διάρκεια του χρόνου συγκέντρωσης (της τάξης των δύο ημερών). Σε ορισμένα επεισόδια η απορροή φαίνεται να αυξάνει χωρίς την ύπαρξη βροχής. Αυτό πιθανότατα οφείλεται στην προσεγγιστική εκτίμηση της βροχόπτωσης στην υπολεκάνη, με βάση το δείγμα ενός και μόνο σταθμού (Καρβελιώτης), καθώς ο άλλος βροχομετρικός σταθμός της υπολεκάνης, στο Τουριστικό Ταϋγέτου, κρίθηκε αναξιόπιστος (Μαρκόνης *κ.ά.*, 2014).

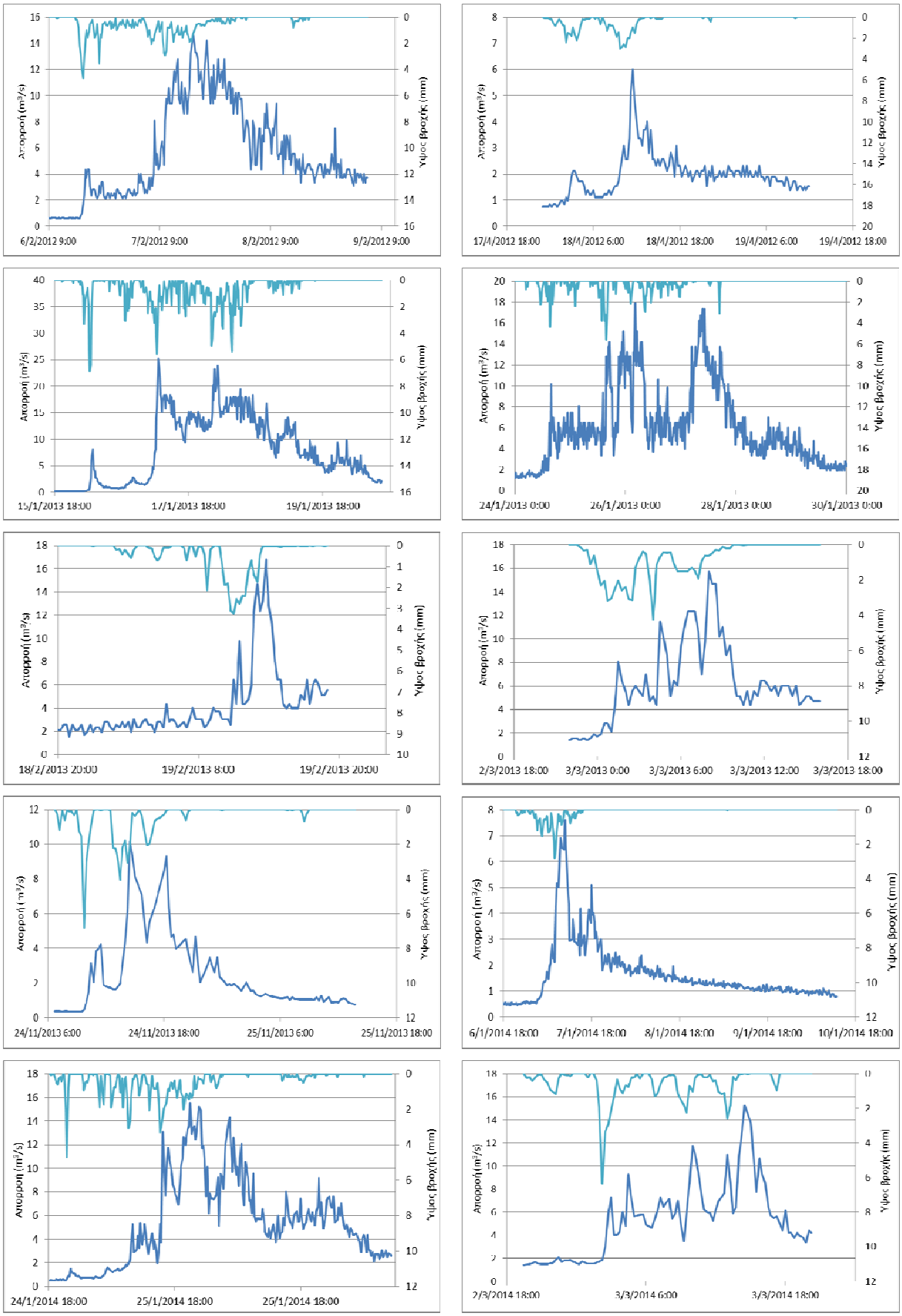




Σχήμα 2.3: Επεισόδια πλημμυρών υπολεκάνης Καρβελιώτη

2.2.4 Επεισόδια υπολεκάνης Αλαγονίας

Εξετάστηκαν 10 πλημμυρικά επεισόδια (με χρονικό βήμα 15 min), που απεικονίζονται στο Σχήμα 2.4. Από τις αναλύσεις διαπιστώθηκε πως στα περισσότερα επεισόδια η αιχμή ξεπερνά τα 10 m^3/s και ο συντελεστής απορροής κυμαίνεται από 0.09 έως 0.60. Η βασική ροή στο ποτάμι κυμαίνεται μεταξύ 0.01 και 0.30 m^3/s. Όπως και στις υπόλοιπες υπολεκάνες του Νέδοντα, ο ανοδικός κλάδος των πλημμυρογραφημάτων είναι απότομος και παρατηρείται αργή εκφόρτιση πολύ μεγαλύτερη σε διάρκεια του χρόνου συγκέντρωσης (διάρκειας μιας έως και τρεις ημέρες).



Σχήμα 2.4: Επεισόδια πλημμυρών υπολεκάνης Αλαγονία

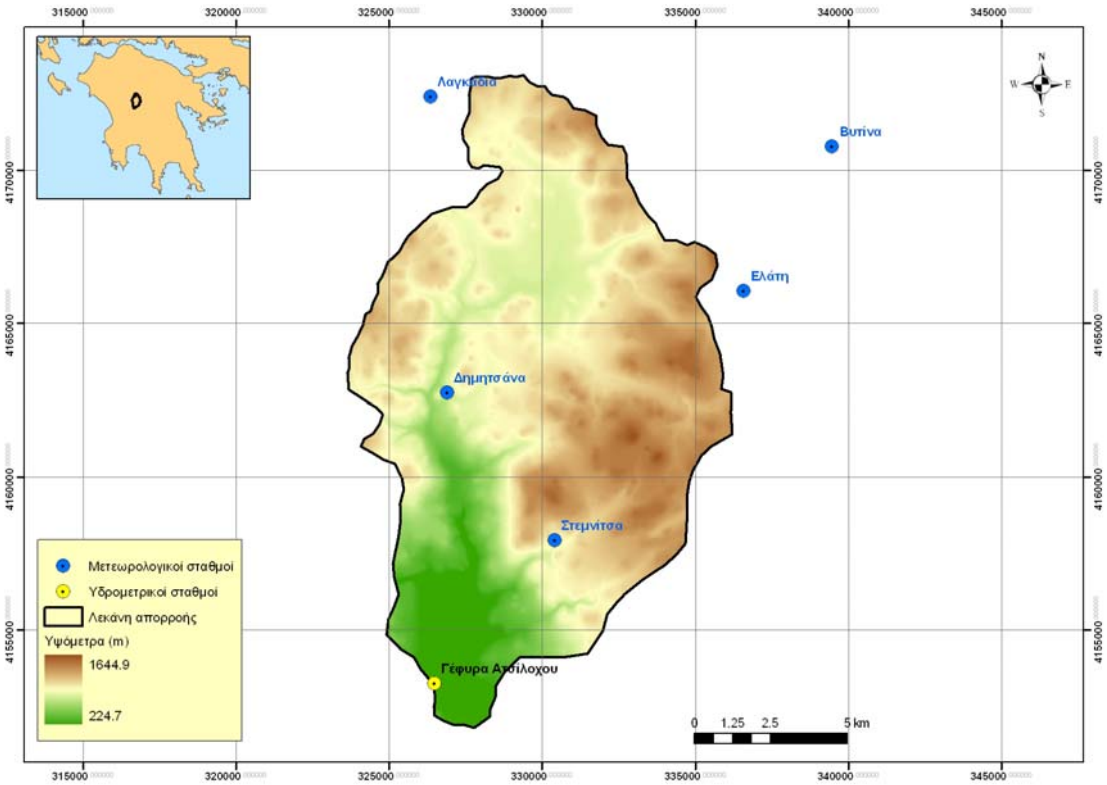
2.3 Λεκάνη απορροής Λούσιου

2.3.1 Γενικά χαρακτηριστικά λεκάνης

Η λεκάνη του Λούσιου (Σχήμα 2.5) βρίσκεται στη Δυτική Πελοπόννησο και έχει έκταση 166.3 km^2 και χρόνο συγκέντρωσης 4.02 h (Πίνακας 2.2). Οι πλημμυρικές παροχές της λεκάνης εκτιμήθηκαν με βάση τα δεδομένα του υδρομετρικού σταθμού Γέφυρας Ατσιχόλου, όπου εγκαταστάθηκε ροόμετρο για τη συνεχή καταγραφή του πεδίου ταχυτήτων. Για την ανάλυση των βροχοπτώσεων χρησιμοποιήθηκαν οι μετεωρολογικοί σταθμοί Δημητσάνας, Ελάτης, Λαγκαδιών, Στεμνίτσας και Βυτίνας.

Πίνακας 2.2: Χαρακτηριστικά λεκάνης Λούσιου.

Έκταση λεκάνης (km^2)	166.3
Μήκος κύριου υδατορέματος (km)	28.3
Μέσο υψόμετρο λεκάνης (m)	1081.3
Υψόμετρο στην έξοδο (m)	224.8
Διαφορά μέσου υψομέτρου και υψομέτρου στην έξοδο (m)	856.5
Χρόνος συγκέντρωσης κατά Giandotti (h)	4.02

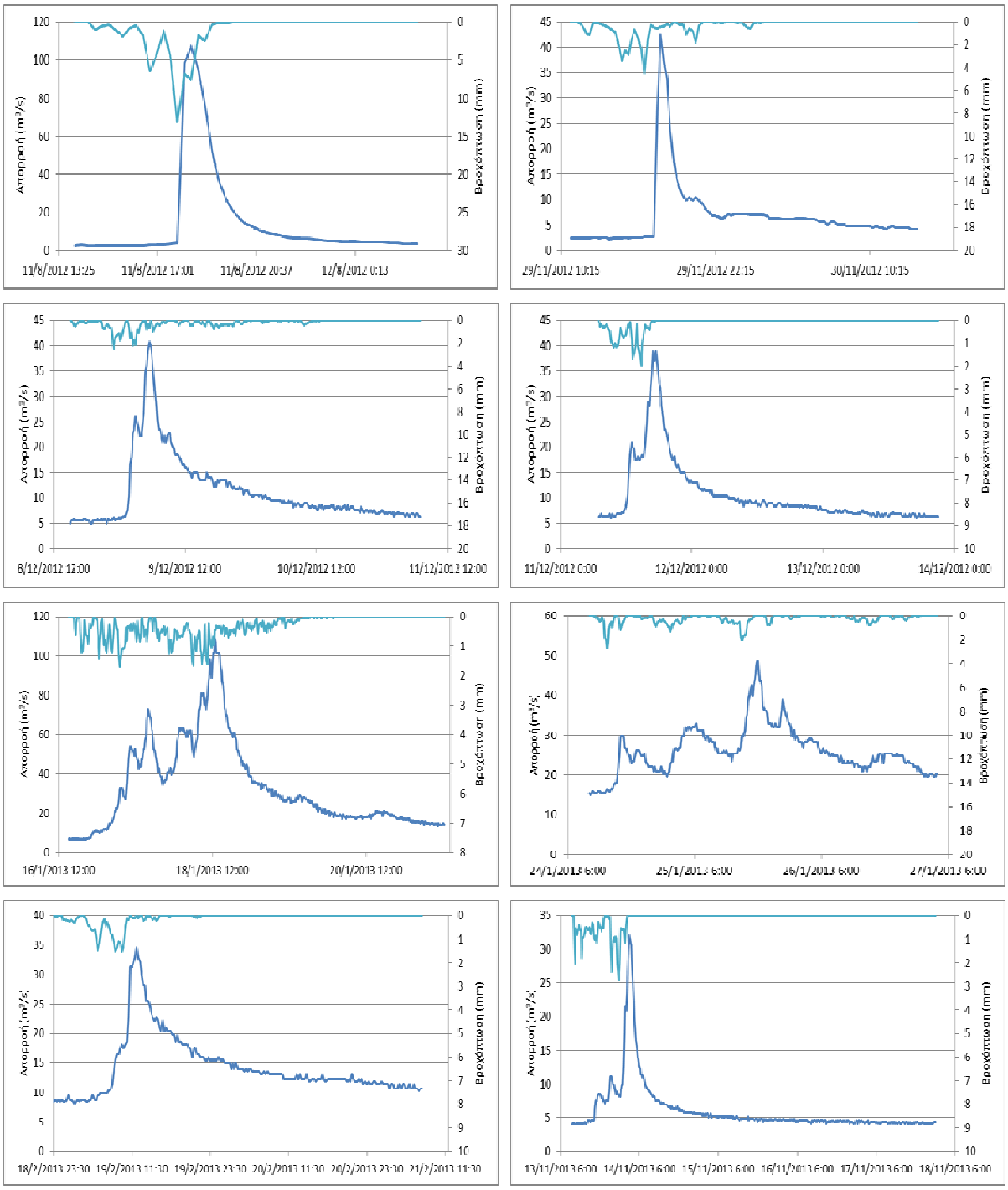


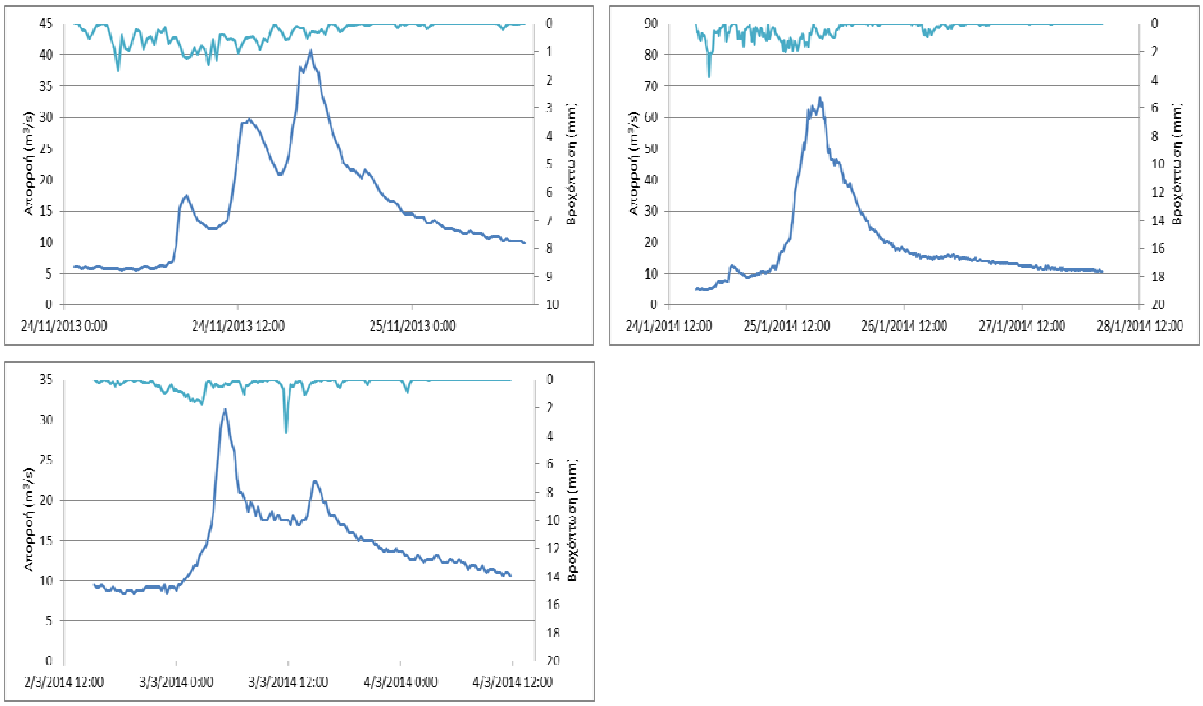
Σχήμα 2.5: Λεκάνη απορροής Λούσιου και θέσεις μετρητικών σταθμών.

2.3.2 Αναλύσεις πλημμυρικών επεισοδίων

Εξετάστηκαν 11 πλημμυρικά επεισόδια (με χρονικό βήμα 15 min), που απεικονίζονται στο Σχήμα 2.6. Από τις αναλύσεις διαπιστώθηκε πως στα περισσότερα επεισόδια η παροχή αιχμής κυμαίνεται στα 40 m^3/s, ενώ σε δύο επεισόδια ξεπερνά τα 100 m^3/s. Ο συντελεστής απορροής κυμαίνεται από 0.05 έως 0.40. Η βασική ροή στο ποτάμι είναι μεγαλύτερη των 2.5

m^3/s και διατηρείται καθ'όλη τη διάρκεια του χρόνου. Πράγματι, η λεκάνη του Λούσιου έχει πολύ σημαντική τροφοδοσία από υπόγεια νερά, που μάλιστα παράγονται από ένα ευρύτερο υδρογεωλογικό σύστημα, ενώ σημαντική πρέπει να είναι και η τροφοδοσία της λόγω τήξης χιονιού. Ο ανοδικός κλάδος των πλημμυρογραφημάτων είναι απότομος, σχεδόν κάθετος, ενδεικτικός της γρήγορης απόκρισης της λεκάνης, και παρατηρείται αργή εκφόρτιση, πολύ μεγαλύτερη σε διάρκεια του χρόνου συγκέντρωσης (διάρκειας έως και τρεις ημέρες). Παρά τη συνθετότητα των επεισοδίων βροχής, τα περισσότερα πλημμυρογραφήματα είναι αρκετά απλά στη μορφή τους.



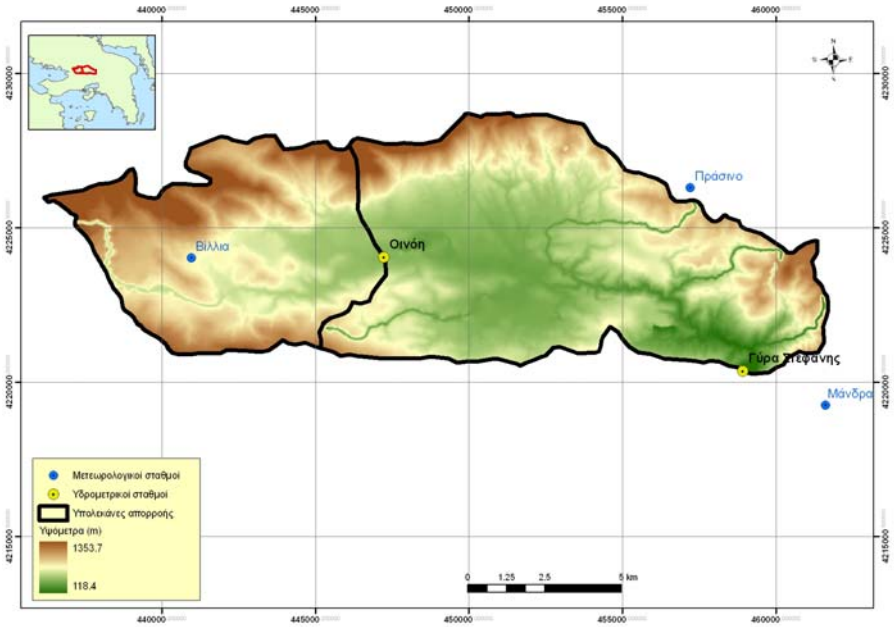


Σχήμα 2.6: Επεισόδια πλημμυρών στη Γέφυρα Ατσιχόλου στο Λούσιο.

2.4 Λεκάνη απορροής Σαρανταπόταμου

2.4.1 Γενικά χαρακτηριστικά λεκάνης

Η λεκάνη του Σαρανταπόταμου (Σχήμα 2.7) βρίσκεται στο νομό Αττικής και έχει έκταση 144.6 km^2 και χρόνο συγκέντρωσης 6.40 h. Τμήμα της αποτελεί η υπολεκάνη Οινόης, με έκταση 51.2 km^2 και χρόνο συγκέντρωσης 3.57 h (Πίνακας 2.3). Για την εκτίμηση των επιφανειακών βροχοπτώσεων χρησιμοποιήθηκαν τρεις μετεωρολογικοί σταθμοί (Βίλια, Πράσινο, Μάνδρα), ενώ οι παροχές εκτιμήθηκαν με βάση τα δεδομένα των υδρομετρικών σταθμών Γύρας Στεφάνης και Οινόης.



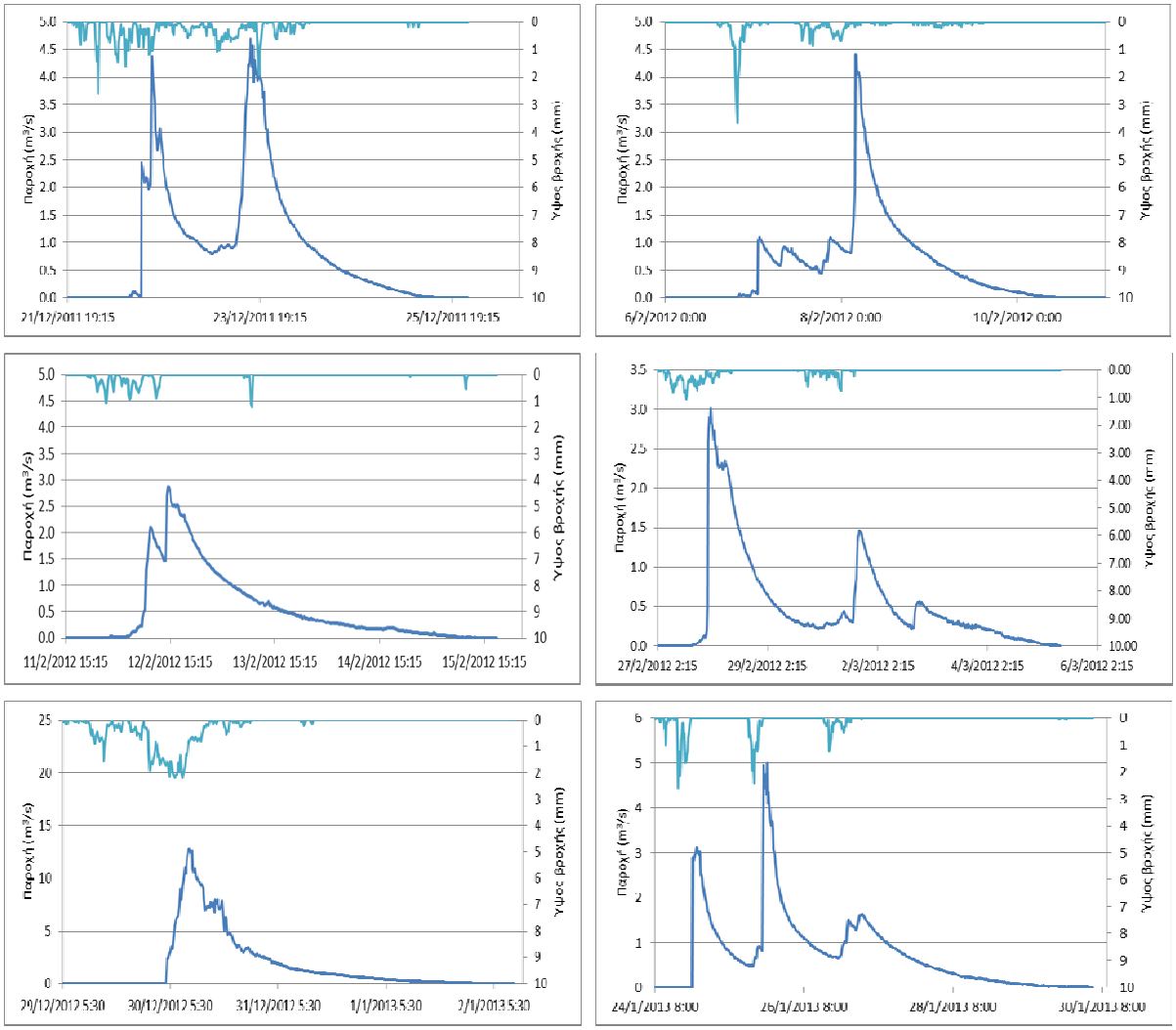
Σχήμα 2.7: Λεκάνη απορροής Σαρανταπόταμου και θέσεις μετρητικών σταθμών.

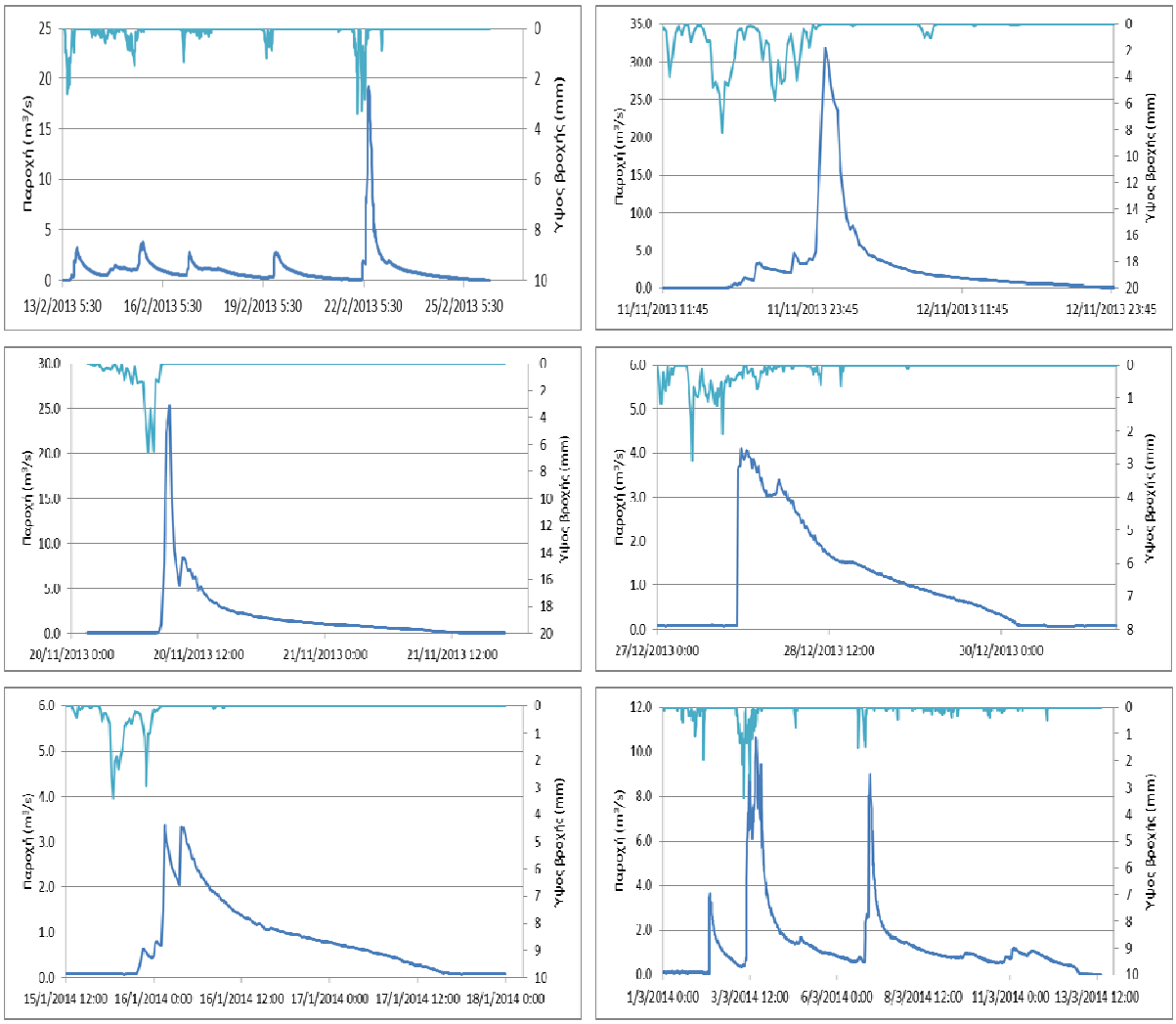
Πίνακας 2.3: Χαρακτηριστικά λεκάνης Σαρανταπόταμου και υπολεκάνης Οινόης.

	Γύρα Στεφάνης	Οινόη
Έκταση λεκάνης (km^2)	144.6	51.2
Μήκος κύριου υδατορέματος (km)	30.7	13.0
Μέσο υψόμετρο λεκάνης (m)	494.9	603.8
Υψόμετρο στην έξοδο (m)	157	320.0
Διαφορά μέσου υψομέτρου και υψομέτρου στην έξοδο (m)	337.9	283.8
Χρόνος συγκέντρωσης κατά Giandotti (h)	6.40	3.57

2.4.2 Επεισόδια λεκάνης Σαρανταπόταμου

Εξετάστηκαν 12 πλημμυρικά επεισόδια (με χρονικό βήμα 15 min), που απεικονίζονται στο Σχήμα 2.8. Από τις αναλύσεις διαπιστώθηκε πως πρόκειται για ένα ρέμα με μηδενική βασική ροή καθ'όλη τη διάρκεια του χρόνου με την παροχή αιχμής σπανίως να ξεπερνά τα 5.0 m^3/s, παρά τα ισχυρά επεισόδια βροχής, ενώ ο συντελεστής απορροής είναι πολύ χαμηλός, από 0.03 έως 0.11. Γενικά, στη λεκάνη κυριαρχούν τα ασβεστολιθικά πετρώματα, με συνέπεια την πολύ χαμηλή παραγωγή επιφανειακής ροής (Μιχαηλίδη, 2013). Σε όλα τα επεισόδια, παρατηρείται ένας απότομος, σχεδόν κάθετος, ανοδικός κλάδος, και πολύ αργή εκφόρτιση πολύ μεγαλύτερη σε διάρκεια του χρόνου συγκέντρωσης (διάρκειας έως και τρεις ημέρες).

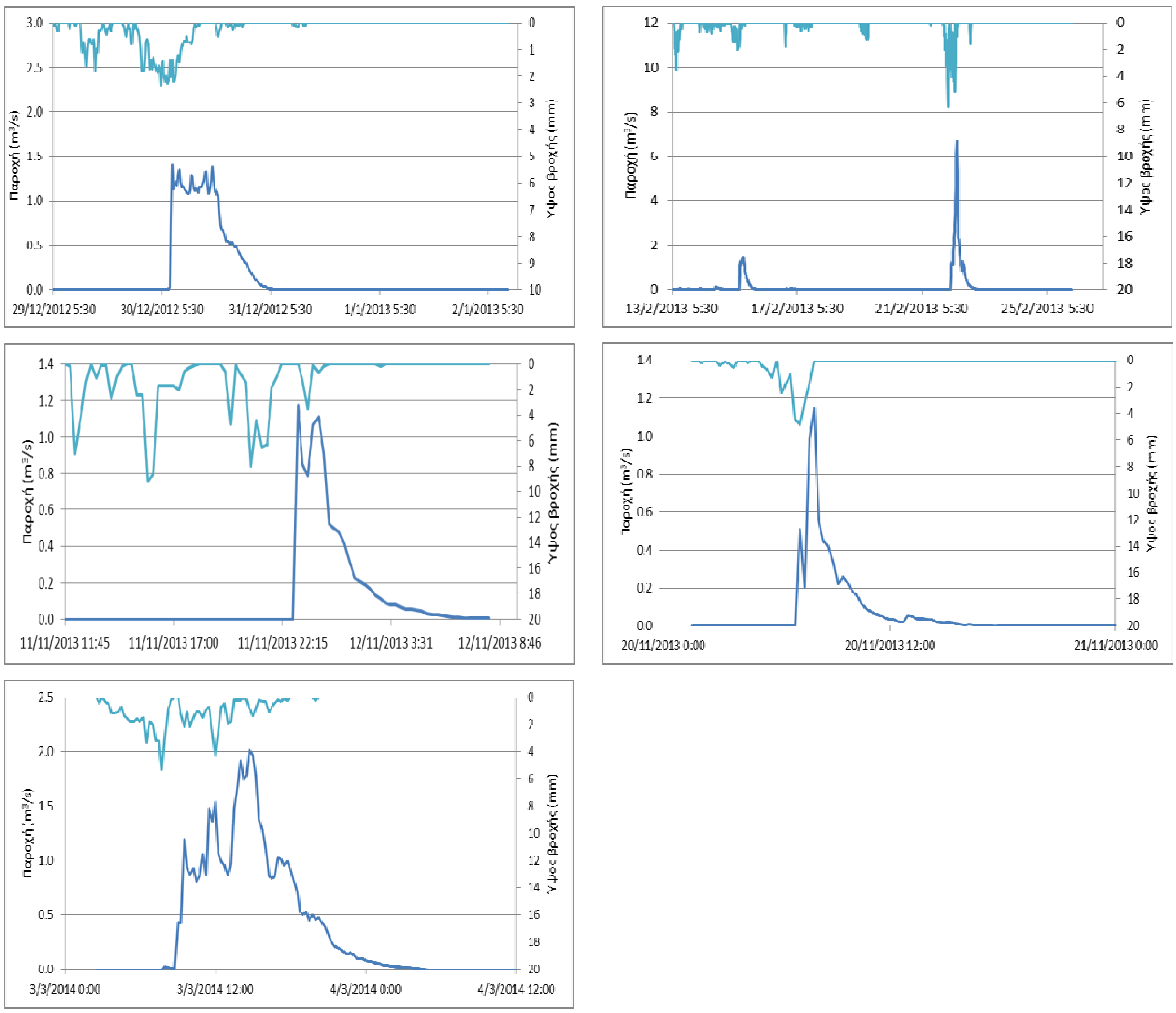




Σχήμα 2.8: Επεισόδια πλημμυρών στη θέση Γύρα Στεφάνης.

2.4.3 Επεισόδια υπολεκάνης Οινόης

Εξετάστηκαν 12 πλημμυρικά επεισόδια (με χρονικό βήμα 15 min), που απεικονίζονται στο Σχήμα 2.9. Από τις αναλύσεις διαπιστώθηκε διαπιστώθηκε πως παρά το γεγονός πως η υπολεκάνη καταλαμβάνει το 35% της συνολικής λεκάνης, οι παραγόμενες απορροές είναι, αναλογικά, πολύ χαμηλότερες. Ειδικότερα, οι παροχές αιχμής της είναι σημαντικά υποπολλαπλάσιες (έως και 27 φορές) των αντίστοιχων παροχών της Γύρας Στεφάνης. Γενικά, σε διάστημα τριών υγρών υδρολογικών περιόδων, καταγράφηκαν ελάχιστα επεισόδια, τα οποία χαρακτηρίζονται από εξαιρετικά μικρές παροχές αιχμής. Σε αρκετές περιπτώσεις, εμφανίζονται μηδενικές τιμές παροχής παρά την ύπαρξη ισχυρών επεισοδίων βροχής. Ο συντελεστής απορροής των επεισοδίων κυμαίνεται από 0.002 έως 0.02. Οι παρατηρήσεις αυτές υποδηλώνουν την ύπαρξη εδαφών εξαιρετικά υψηλής διηθητικότητας. Όπως και στη συνολική λεκάνη, με έξοδο τη Γύρα Στεφάνης, τα επεισόδια χαρακτηρίζονται από απότομο ανοδικό κλάδο και εκθετικό κλάδο αρκετά μεγαλύτερο σε διάρκεια του χρόνου συγκέντρωσης (διάρκειας έως και 15 h).



Σχήμα 2.9: Επεισόδια πλημμυρών στη θέση Οινόη.

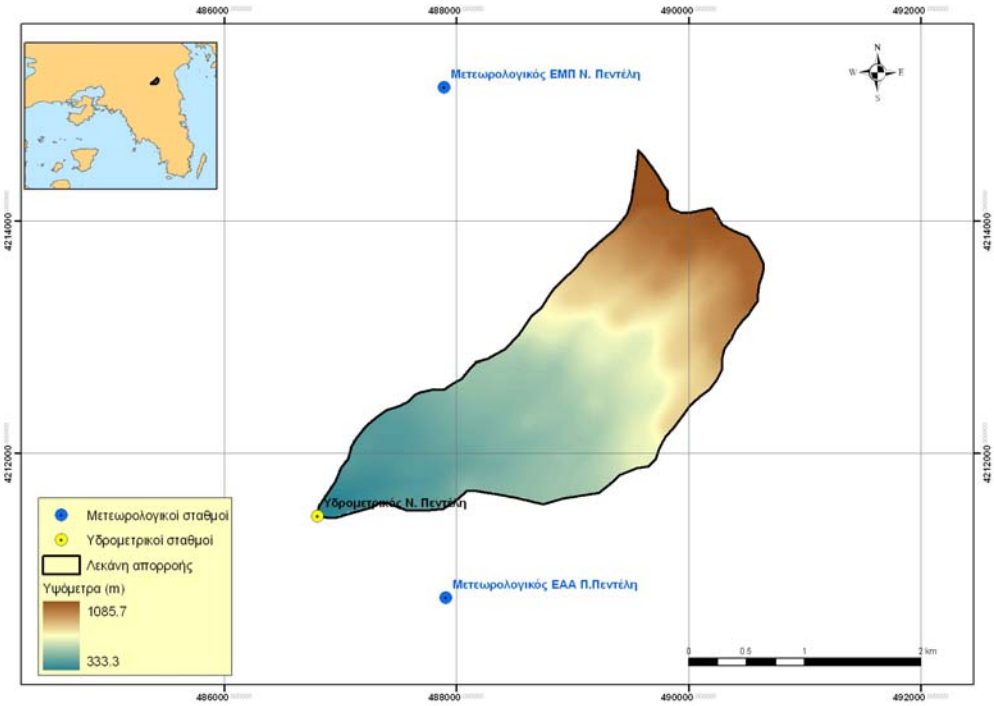
2.5 Λεκάνη απορροής ρέματος Χαλανδρίου

2.5.1 Γενικά χαρακτηριστικά λεκάνης

Η λεκάνη ρέματος Χαλανδρίου (Σχήμα 2.10) βρίσκεται στο νομό Αττικής και έχει έκταση 5.2 km^2 και χρόνο συγκέντρωσης 1.27 h (Πίνακας 2.4). Για τις αναλύσεις των πλημμυρικών επεισοδίων χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα των μετεωρολογικών σταθμών Νέας και Παλαιάς Πεντέλης, και του υδρομετρικού σταθμού Νέας Πεντέλης.

Πίνακας 2.4: Χαρακτηριστικά λεκάνης ρέματος Χαλανδρίου.

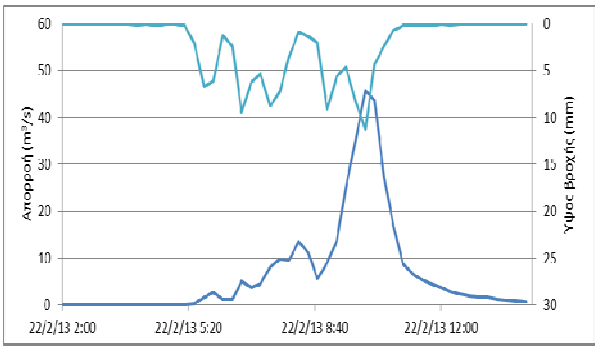
Έκταση λεκάνης (km^2)	5.2
Μήκος κύριου υδατορέματος (km)	5.1
Μέσο υψόμετρο λεκάνης (m)	607.5
Υψόμετρο στην έξοδο (m)	333.3
Διαφορά μέσου υψομέτρου και υψομέτρου στην έξοδο (m)	274.2
Χρόνος συγκέντρωσης κατά Giandotti (h)	1.27



Σχήμα 2.10: Λεκάνη απορροής ρέματος Χαλανδρίου και θέσεις μετρητικών σταθμών.

2.5.2 Αναλύσεις πλημμυρικών επεισοδίων

Λόγω τακτικών διακοπών στη λειτουργία του οργάνου αλλά και της καταστροφής του μετά το πλημμυρικό επεισόδιο της 22/2/2013, εντοπίστηκε ένα μοναδικό αξιόλογο επεισόδιο, δηλαδή το προαναφερθέν (Σχήμα 2.11). Η παροχή αιχμής του ξεπέρασε τα 45 m^3/s (όταν σε καμία άλλη περίπτωση δεν καταγράφηκε παροχή μεγαλύτερη του 1.0 m^3/s στη λεκάνη), ενώ συντελεστής απορροής εκτιμήθηκε σε 0.50, τιμή που είναι εντυπωσιακά υψηλή σε σύγκριση με τα υπόλοιπα επεισόδια στη λεκάνη αυτή αλλά και στις υπόλοιπες λεκάνες που εξετάστηκαν. Ακόμη, ο καθοδικός κλάδος του πλημμυρογραφήματος έχει διάρκεια 4 h, που δεν ξεπερνά τόσο πολύ το χρόνο συγκέντρωσης, όσο τα υπόλοιπα επεισόδια που εξετάστηκαν. Προφανώς, πρόκειται για πλημμύρα αρκετά μεγάλης περιόδου επαναφοράς, με σημαντικό ποσοστό της παραγόμενης απορροής να είναι επιφανειακή (κάτι που αιτιολογεί την αρκετά γρήγορη εκφόρτιση). Επισημαίνεται ότι το επεισόδιο αυτό προκάλεσε σημαντικές ζημιές, ενώ υπήρξε και ανθρώπινο θύμα. Μάλιστα, η αθροιστική βροχόπτωση στον σταθμό Παλαιάς Πεντέλης ανήλθε σε 124.2 mm, που είναι η δεύτερη υψηλότερη τιμή που έχει καταγραφεί στην Αττική σε διάσημα 12ώρου (πλήρες αρχείο δίνεται στη μελέτη των Κουτσογιάννη *κ.ά.*, 2010).



Σχήμα 2.11: Επεισόδιο πλημμύρας 22/2/2013 στη Νέα Πεντέλη.

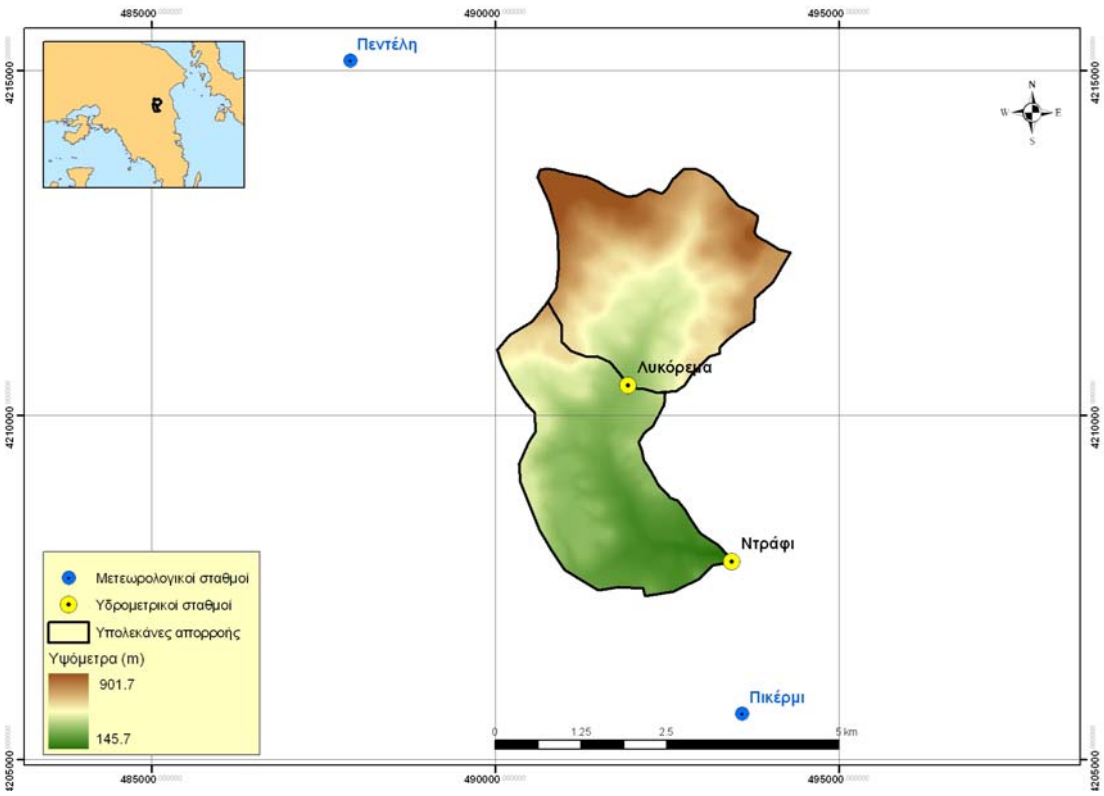
2.6 Λεκάνη απορροής Λυκορέματος Ραφήνας

2.6.1 Γενικά χαρακτηριστικά λεκάνης

Η υπολεκάνη του ρέματος Ραφήνας ανάντη του υδρομετρικού σταθμού Ντράφι (Σχήμα 2.12) βρίσκεται στο νομό Αττικής και έχει έκταση 15.7 km^2 και χρόνο συγκέντρωσης 2.04 h (Πίνακας 2.5). Τμήμα της αποτελεί η υπολεκάνη ανάντη του σταθμού Λυκορέματος, έκτασης 7.9 km^2 και χρόνου συγκέντρωσης 1.35 h. Η περιοχή αυτή χρησιμοποιείται ως πειραματική λεκάνη από το 2005, και επιλέχθηκε συμπληρωματικά των νέων λεκανών που εξοπλίστηκαν στο πλαίσιο του έργου. Η εκτίμηση της επιφανειακής βροχόπτωσης των δύο υπολεκανών βασίστηκε στα δεδομένα των μετεωρολογικών σταθμών Πικερμίου, Αγίου Νικολάου, Ντράφι και Μπάλα. Στις αναλύσεις ελήφθησαν υπόψη προηγούμενες επεξεργασίες της Μαθιουδάκη (2012· βλ. και ενότητα 5.3).

Πίνακας 2.5: Χαρακτηριστικά υπολεκάνης Λυκορέματος και λεκάνης Ντραφίου

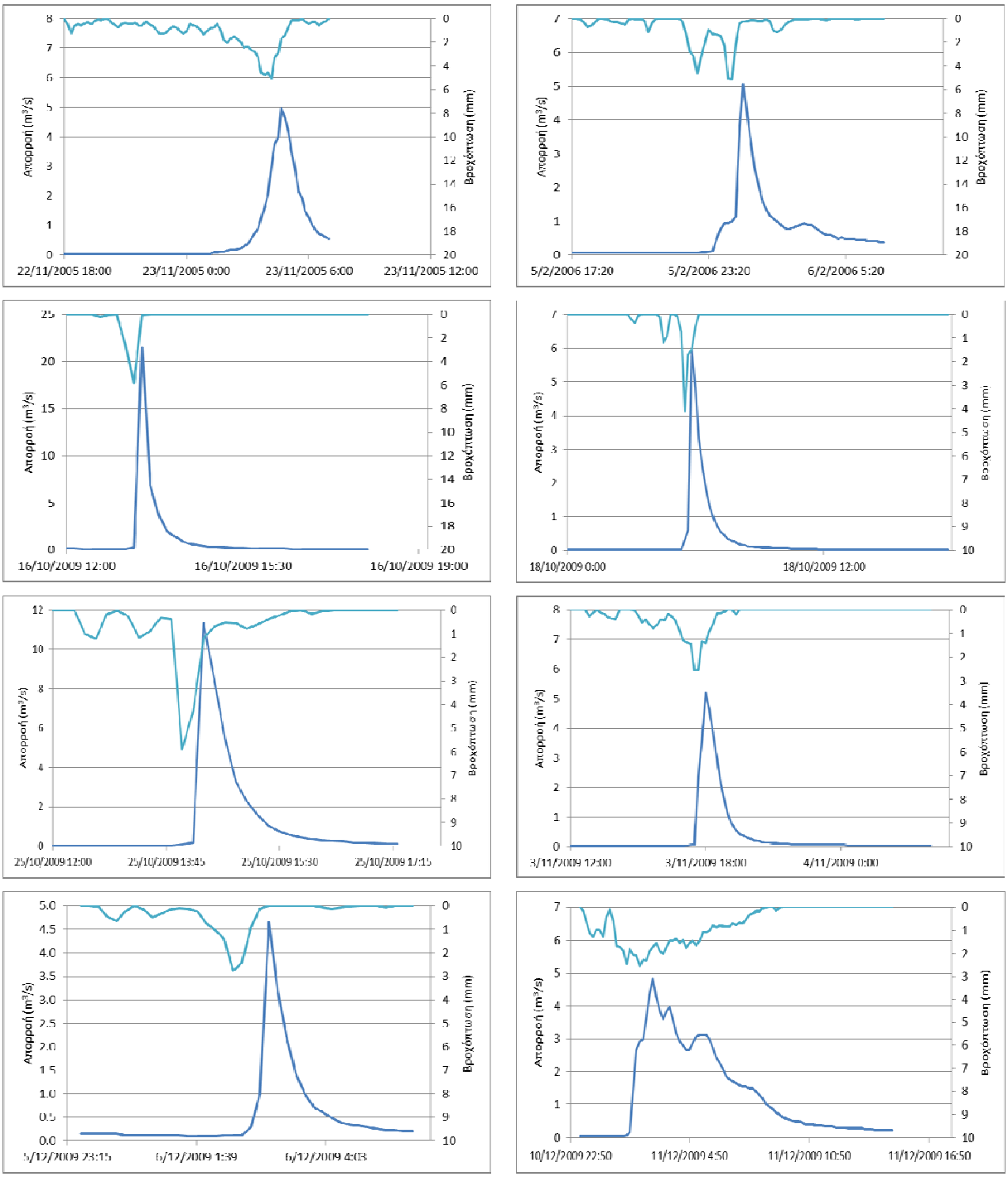
	Λυκόρεμα	Ντράφι
Έκταση λεκάνης (km^2)	7.91	15.71
Μήκος κύριου υδατορέματος (km)	3.9	7.70
Μέσο υψόμετρο λεκάνης (m)	544.9	430.3
Υψόμετρο στην έξοδο (m)	293.5	148.3
Διαφορά μέσου υψομέτρου και υψομέτρου στην έξοδο (m)	251.4	282.0
Χρόνος συγκέντρωσης κατά Giandotti (h)	1.35	2.04

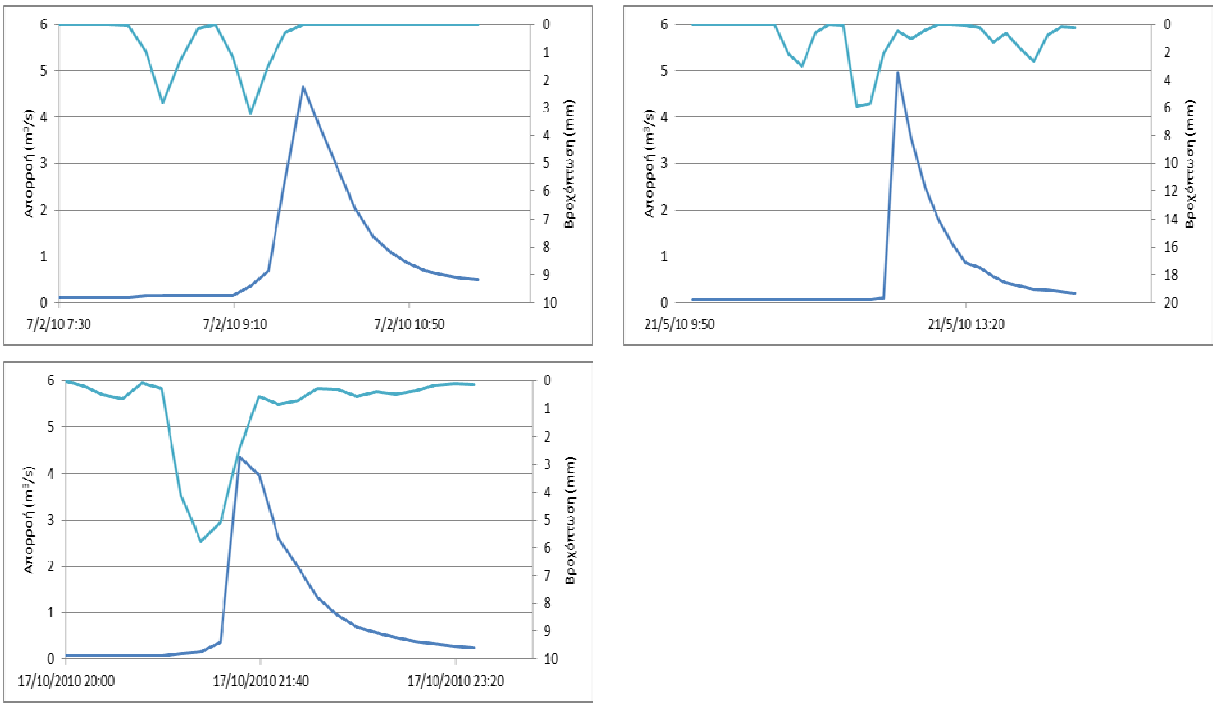


Σχήμα 2.12: Λεκάνη απορροής Λυκορέματος Ραφήνας και θέσεις μετρητικών σταθμών.

2.6.2 Επεισόδια υπολεκάνης Λυκορέματος

Εξετάστηκαν 11 πλημμυρικά επεισόδια (με χρονικό βήμα 15 min), που απεικονίζονται στο Σχήμα 2.13. Από τις αναλύσεις διαπιστώθηκε πως η παροχή αιχμής κυμαίνεται από 4.3 έως 21.5 m^3/s και ο συντελεστής απορροής από 0.04 έως 0.33. Ο ανοδικός κλάδος των πλημμυρογραφημάτων είναι αρκετά απότομος, ωστόσο αντίθετα με τις προηγούμενες λεκάνες η εκφόρτιση γίνεται σχετικά γρήγορα (μέση διάρκεια 3 h).

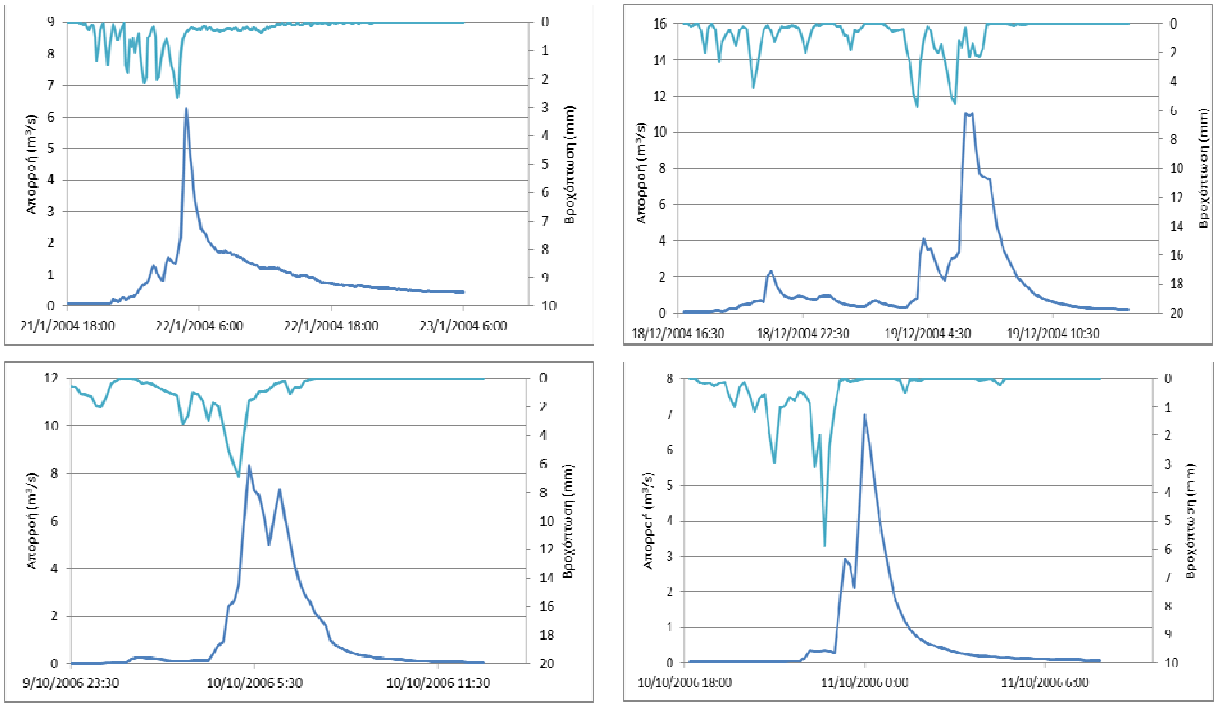


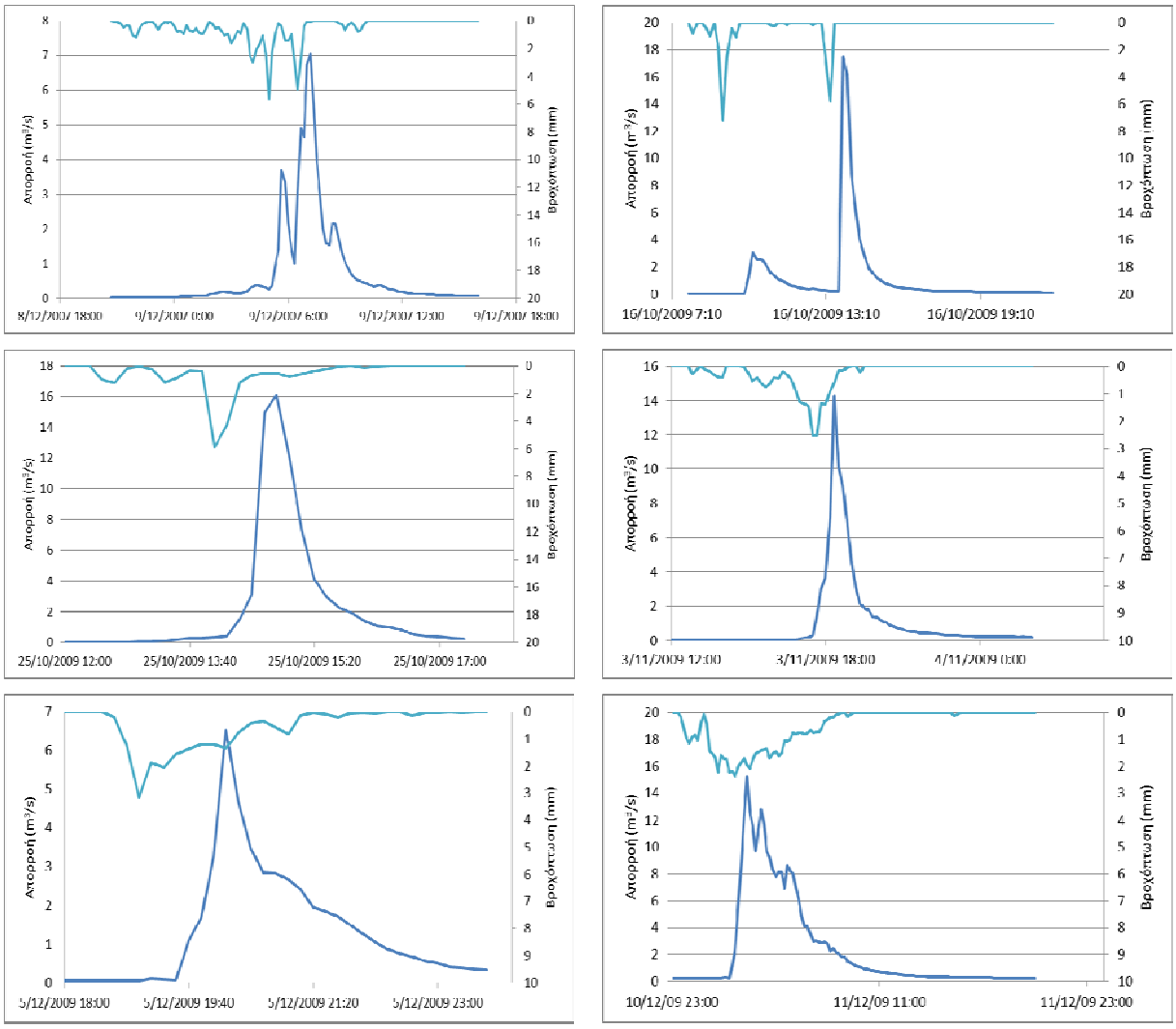


Σχήμα 2.13: Επεισόδια πλημμυρών υπολεκάνης ανάντη υδρομετρικού σταθμού Λυκορέματος.

2.6.3 Επεισόδια υπολεκάνης Ντράφι

Εξετάστηκαν 10 πλημμυρικά επεισόδια (με χρονικό βήμα 15 min), που απεικονίζονται στο Σχήμα 2.14. Από τις αναλύσεις διαπιστώθηκε πως η παροχή αιχμής κυμαίνεται από 6.3 έως 17.5 m^3/s και ο συντελεστής απορροής από 0.05 έως 0.16. Γενικά, ο ανοδικός κλάδος των πλημμυρογραφημάτων είναι πολύ απότομος, σχεδόν κάθετος στα μεγάλα επεισόδια, ενώ και η εκφόρτιση της πλημμύρας γίνεται σχετικά γρήγορα (μέση διάρκεια 6 h).





Σχήμα 2.14: Επεισόδια πλημμυρών υπολεκάνης ανάντη υδρομετρικού σταθμού Ντράφι.

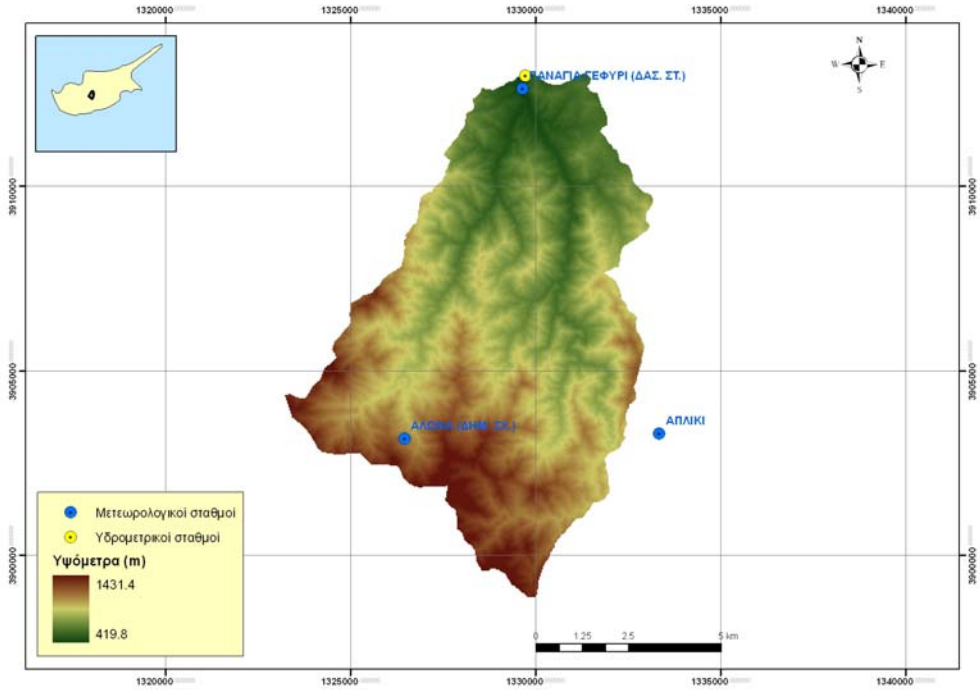
2.7 Λεκάνη απορροής Περιστερώνα

2.7.1 Γενικά χαρακτηριστικά λεκάνης

Η λεκάνη του ποταμού Περιστερώνα (Σχήμα 2.15) βρίσκεται στην κεντρική Κύπρο και έχει έκταση 77.1 km^2 με χρόνο συγκέντρωσης 3.58 h (Πίνακας 2.6). Οι παροχές του ποταμού μετρώνται στον υδρομετρικό σταθμό Γεφύρι Παναγίας. Για την ανάλυση των βροχοπτώσεων χρησιμοποιήθηκαν οι μετεωρολογικοί σταθμοί Άλωνα, Απλίκι και Γεφύρι Παναγίας.

Πίνακας 2.6: Χαρακτηριστικά λεκάνης Περιστερώνα.

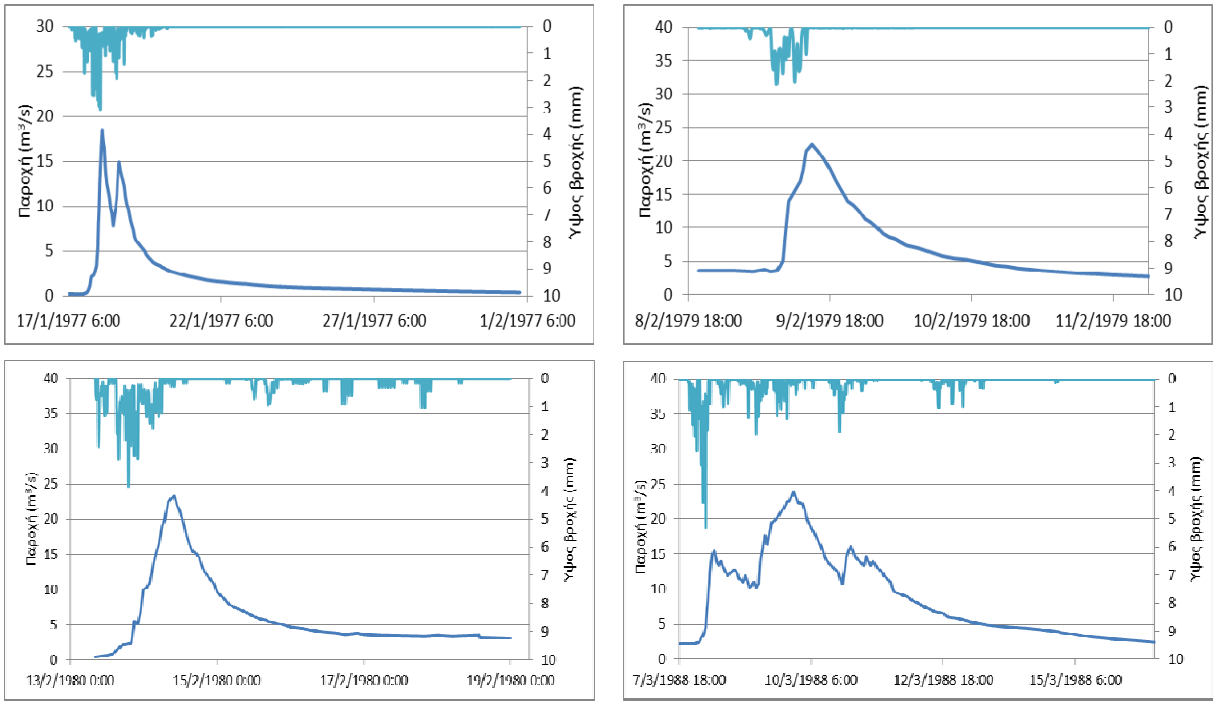
Έκταση λεκάνης (km^2)	77.1
Μήκος κύριου υδατορέματος (km)	18.1
Μέσο υψόμετρο λεκάνης (m)	1019.7
Υψόμετρο στην έξοδο (m)	546.0
Διαφορά μέσου υψομέτρου και υψομέτρου στην έξοδο (m)	473.7
Χρόνος συγκέντρωσης κατά Giandotti (h)	3.58

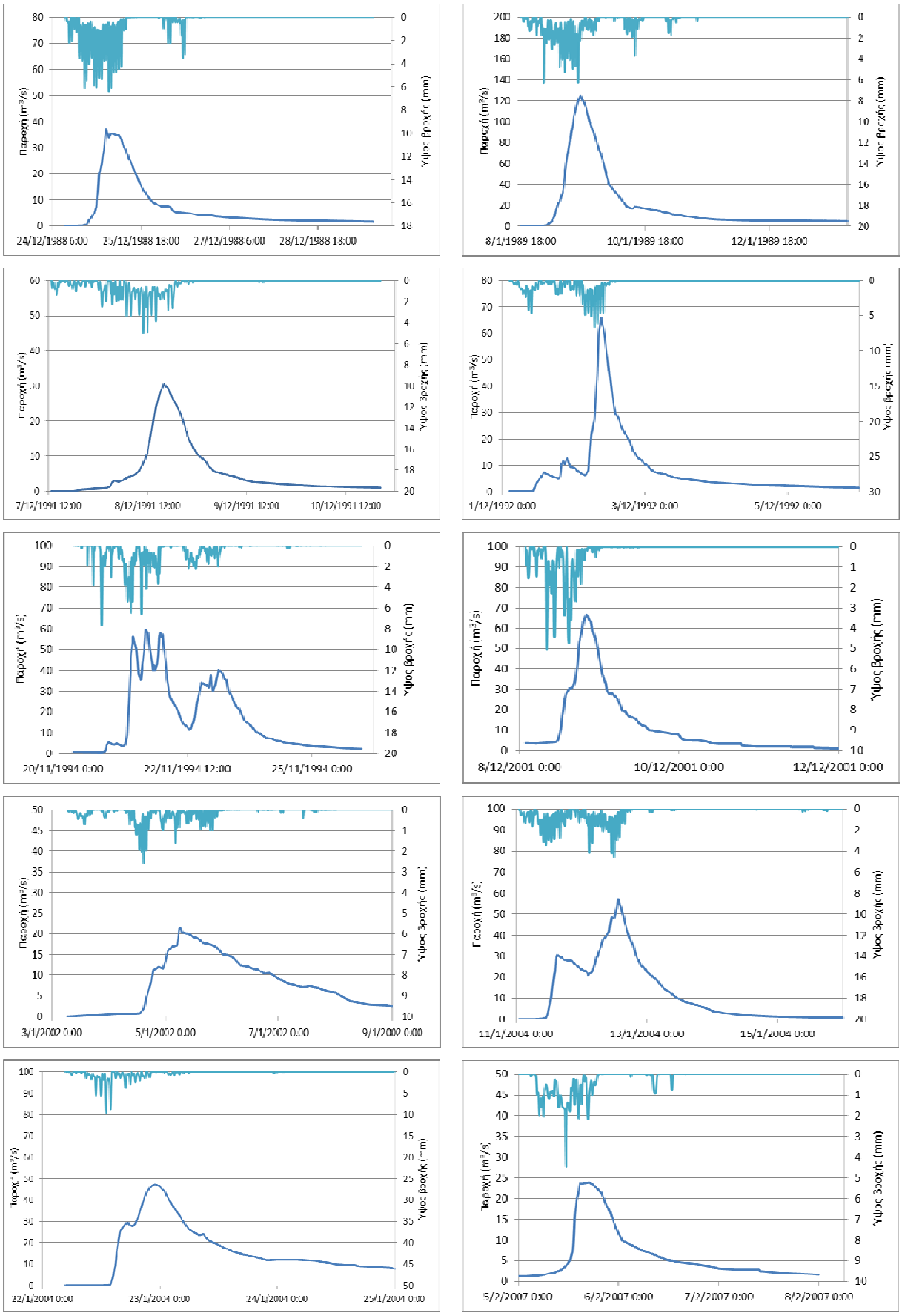


Σχήμα 2.15: Λεκάνη απορροής Περιστερώνα και θέσεις μετρητικών σταθμών.

2.7.2 Αναλύσεις πλημμυρικών επεισοδίων

Από το διαθέσιμο δείγμα των 30 ετών επιλέχθηκαν 14 πλημμυρικά επεισόδια (με χρονικό βήμα 15 min), που απεικονίζονται στο Σχήμα 2.16. Από τις αναλύσεις διαπιστώθηκε πως η παροχή αιχμής κυμαίνεται από 18 έως 125 m^3/s, και ο συντελεστής απορροής από 0.17 έως 0.64. Η τιμή του συντελεστή απορροής αιτιολογείται από την κυριαρχία πετρωμάτων χαμηλής περατότητας στη λεκάνη, όπως βασάλτης (Μαστροθεόδωρος, 2013). Ο ανοδικός κλάδος των πλημμυρογραφημάτων είναι απότομος και παρατηρείται αργή εκφόρτιση πολύ μεγαλύτερη σε διάρκεια του χρόνου συγκέντρωσης (της τάξης των 2.5 ημερών).





Σχήμα 2.16: Επεισόδια πλημμυρών στη λεκάνη της Περιστερώνας.

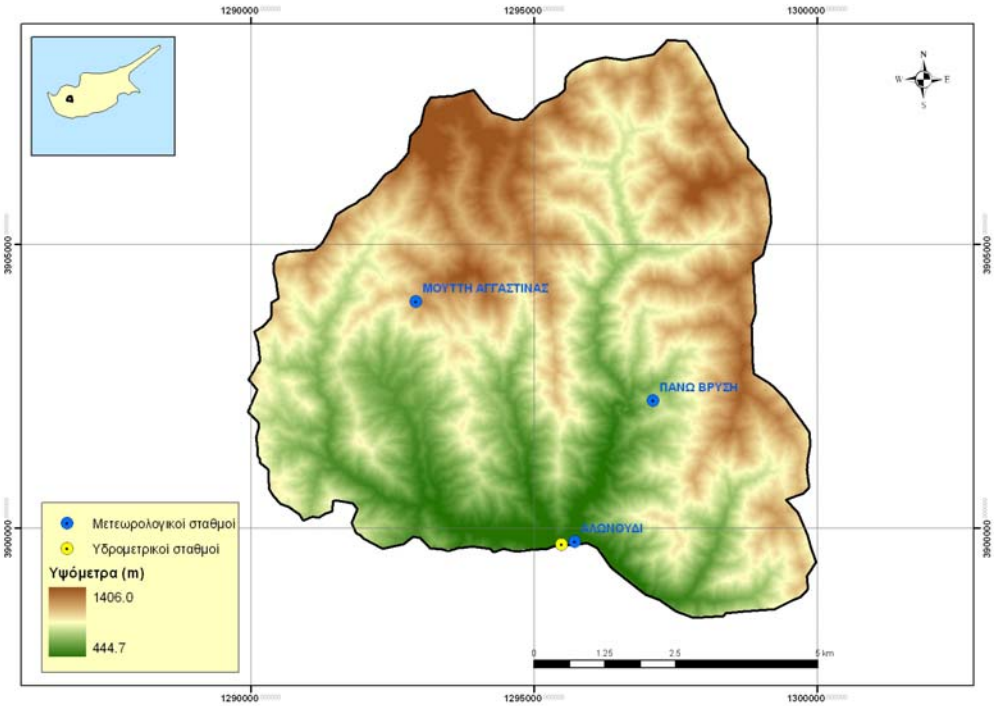
2.8 Λεκάνη απορροής Ξερού

2.8.1 Γενικά χαρακτηριστικά λεκάνης

Η λεκάνη του ποταμού Ξερού (Σχήμα 2.17) βρίσκεται στη ΝΔ Κύπρο και έχει έκταση 68.5 km^2 με χρόνο συγκέντρωσης 2.71 h (Πίνακας 2.7). Οι παροχές του ποταμού μετρώνται στον υδρομετρικό σταθμό Αλωνούδι. Για την ανάλυση των βροχοπτώσεων χρησιμοποιήθηκαν οι μετεωρολογικοί σταθμοί Μούττη Αγγαστίνας, Πάνω Βρύση και Αλωνούδι. Στις αναλύσεις ελήφθησαν υπόψη προηγούμενες επεξεργασίες του Μαστροθεόδωρου (2013).

Πίνακας 2.7: Χαρακτηριστικά λεκάνης Ξερού

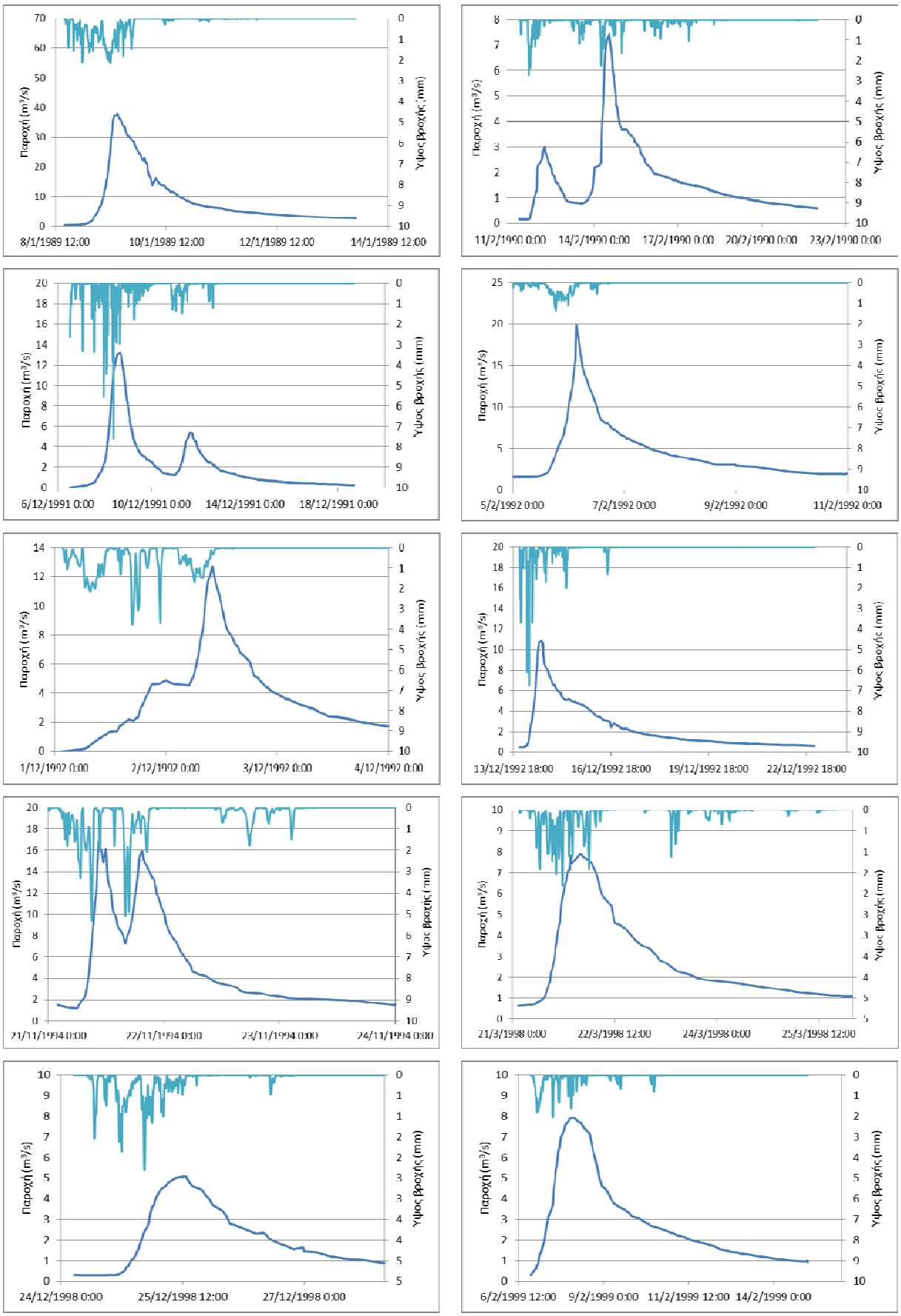
Έκταση λεκάνης (km^2)	68.5
Μήκος κύριου υδατορέματος (km)	9.7
Μέσο υψόμετρο λεκάνης (m)	1035.2
Υψόμετρο στην έξοδο (m)	553.0
Διαφορά μέσου υψομέτρου και υψομέτρου στην έξοδο (m)	482.2
Χρόνος συγκέντρωσης κατά Giandotti (h)	2.71



Σχήμα 2.17: Λεκάνη απορροής Ξερού και θέσεις μετρητικών σταθμών.

2.8.2 Αναλύσεις πλημμυρικών επεισοδίων

Από το διαθέσιμο δείγμα των 10 ετών, επιλέχθηκαν 10 ισχυρά πλημμυρικά επεισόδια (με χρονικό βήμα 15 min), που απεικονίζονται στο Σχήμα 2.18. Από τις αναλύσεις διαπιστώθηκε πως στα περισσότερα επεισόδια η παροχή αιχμής κυμαίνεται από 8 έως 38 m^3/s και ο συντελεστής απορροής από 0.10 έως 0.53. Ο ανοδικός κλάδος των πλημμυρογραφημάτων είναι σχετικά απότομος, ενώ παρατηρείται πολύ αργή εκφόρτιση πολύ μεγαλύτερη σε διάρκεια του χρόνου συγκέντρωσης (διάρκειας έως και 8 ημερών).



Σχήμα 2.18: Επεισόδια πλημμυρών στη λεκάνη Ξερού.

2.9 Συγκεντρωτικά μεγέθη

Στους παρακάτω πίνακες συνοψίζονται τα συγκεντρωτικά μεγέθη από την ανάλυση των επεισοδίων σε κάθε λεκάνη ή υπολεκάνη.

Πίνακας 2.8: Συγκεντρωτικά μεγέθη πλημμυρικών επεισοδίων στην έξοδο της λεκάνης Νέδοντα (Λατομείο Μπάκα).

	N12_2011	N1_2012	N2_2012	N4_2012	N1_2013a	N1_2013b	N2_2013	N3_2013	N11_2013	N1_2014b	N3_2014
Ύψος βροχής (mm)	102.62	136.39	154.99	60.25	262.85	141.99	43.33	63.20	108.90	106.21	66.10
Διάρκεια βροχής (h)	46	39	86	21	84	76	27	13	75	74	101
Μέση ένταση (mm/h)	2.23	3.50	1.80	2.87	3.13	1.87	1.60	4.86	1.45	1.44	0.65
Παροχή αιχμής (m^3/s)	37.67	33.15	33.08	7.00	53.63	16.14	12.27	8.41	13.68	22.61	17.43
Ύψος άμεσης απορροής (mm)	28.74	20.95	24.03	2.28	36.35	16.30	1.81	1.30	13.11	10.28	11.34
Συντελεστής απορροής	0.28	0.15	0.16	0.04	0.14	0.11	0.04	0.02	0.12	0.10	0.17
Όγκος απορροής (hm^3)	3.47	2.53	2.90	0.28	4.39	1.97	0.22	0.16	1.58	1.24	7.49

Πίνακας 2.9: Συγκεντρωτικά μεγέθη πλημμυρικών επεισοδίων στην υπολεκάνη Καρβελιώτη.

	N12_2011	N1_2012	N2_2012	N4_2012	N1_2013a	N1_2013b	N11_2013	N12_2013	N1_2014b	N3_2014
Ύψος βροχής (mm)	107.14	161.66	156.70	71.60	279.00	140.97	88.00	95.60	127.60	159.60
Διάρκεια βροχής (h)	19	27	45	10	54	36	16	14	26	39
Μέση ένταση (mm/h)	5.79	5.99	3.48	6.99	5.14	3.97	5.50	6.95	4.96	4.07
Μέγιστη στάθμη (m)	0.37	0.36	0.38	0.30	0.51	0.32	0.24	0.31	0.36	0.30
Παροχή αιχμής (m^3/s)	6.04	5.77	6.16	4.44	9.33	4.96	3.27	4.66	5.73	4.50
Ύψος άμεσης απορροής (mm)	18.04	18.92	28.97	9.63	52.65	14.71	24.95	7.89	22.76	62.02
Συντελεστής απορροής	0.17	0.12	0.18	0.13	0.19	0.10	0.16	0.08	0.18	0.39
Όγκος απορροής (hm^3)	0.28	0.29	0.44	0.15	0.81	0.23	0.21	0.12	0.35	0.95

Πίνακας 2.10: Συγκεντρωτικά μεγέθη πλημμυρικών επεισοδίων στην υπολεκάνη Αλαγονίας.

	N2_2012	N4_2012	N1_2013a	N1_2013b	N2_2013	N3_2013	N11_2013	N1_2014a	N1_2014b	N3_2014
Ύψος βροχής (mm)	126.56	52.73	272.65	143.69	35.85	58.11	51.06	36.24	94.81	52.58
Διάρκεια βροχής (h)	69	15	69	50	23	18	12	17	43	18
Μέση ένταση (mm/h)	1.83	3.46	3.95	2.86	1.54	3.18	4.17	2.13	2.23	2.96
Μέγιστη στάθμη (m)	0.52	0.34	1.58	0.58	0.56	0.54	0.42	0.37	0.54	0.53
Παροχή αιχμής (m^3/s)	14.70	6.00	25.25	17.87	16.77	15.72	10.18	7.60	15.51	15.26
Ύψος άμεσης απορροής (mm)	40.79	4.51	138.32	86.19	2.92	9.77	10.70	15.02	42.61	10.97
Συντελεστής απορροής	0.32	0.09	0.51	0.60	0.08	0.17	0.21	0.41	0.45	0.21
Όγκος απορροής (hm^3)	0.85	0.09	2.89	1.80	0.06	0.20	0.22	0.31	0.89	0.23

Πίνακας 2.11: Συγκεντρωτικά μεγέθη πλημμυρικών επεισοδίων στην έξοδο της λεκάνης Λούσιου.

	L8_2012	L11_2012	L12_2012a	L12_2012b	L1_2013a	L1_2013b	L2_2013	L11_2013a	L11_2013b	L3_2014
Ύψος βροχής (mm)	56.98	38.08	54.42	25.88	141.90	65.51	24.33	51.93	39.44	48.50
Διάρκεια βροχής (h)	5	13	35	10	73	44	15	17	22	26.50
Μέση ένταση (mm/h)	11.40	3.05	1.57	2.59	1.95	1.50	1.60	3.10	1.77	1.83
Μέγιστη στάθμη (m)	106.98	42.62	40.73	38.89	108.75	48.64	34.54	32.09	40.73	31.30
Παροχή αιχμής (m^3/s)	3.02	2.10	6.69	5.40	57.42	11.18	5.31	3.96	5.64	4.39
Ύψος άμεσης απορροής (mm)	0.05	0.06	0.12	0.21	0.40	0.17	0.22	0.08	0.14	0.09
Συντελεστής απορροής	0.50	0.35	1.11	0.90	9.55	1.86	0.88	0.66	0.94	0.73
Όγκος απορροής (hm^3)										

Πίνακας 2.12: Συγκεντρωτικά μεγέθη πλημμυρικών επεισοδίων στην έξοδο της λεκάνης Σαρανταπόταμου (Γύρα Στεφάνης).

	S12_2011	S2_2012a	S2_2012b	S2_2012c	S12_2012	S1_2013	S2_2013	S11_2013a	S11_2013b
Ύψος βροχής (mm)	74.08	40.76	22.48	45.61	94.53	47.44	134.92	100.85	34.06
Διάρκεια βροχής (h)	48	37	18	46	39	23	72	15	7
Μέση ένταση (mm/h)	1.54	1.12	1.28	0.99	2.42	2.09	1.89	6.61	4.87
Μέγιστη στάθμη (m)	0.67	0.64	0.51	0.52	1.17	0.69	1.46	1.94	1.71
Παροχή αιχμής (m^3/s)	4.70	4.40	2.86	3.01	12.78	4.99	19.20	31.83	25.28
Ύψος άμεσης απορροής (mm)	2.21	1.60	1.32	2.20	4.18	2.60	8.46	2.61	1.59
Συντελεστής απορροής	0.03	0.04	0.06	0.05	0.04	0.05	0.06	0.03	0.05
Όγκος απορροής (hm^3)	0.32	0.23	0.19	0.32	0.60	0.38	1.22	0.38	0.23

	S12_2013	S1_2014	S3_2014
Ύψος βροχής (mm)	49.41	31.96	90.69
Διάρκεια βροχής (h)	26	11	59
Μέση ένταση (mm/h)	1.90	2.91	1.54
Μέγιστη στάθμη (m)	0.62	0.56	1.05
Παροχή αιχμής (m^3/s)	4.09	3.37	10.65
Ύψος άμεσης απορροής (mm)	2.16	1.02	9.87
Συντελεστής απορροής	0.04	0.03	0.11
Όγκος απορροής (hm^3)	0.31	0.15	1.43

Πίνακας 2.13: Συγκεντρωτικά μεγέθη πλημμυρικών επεισοδίων στην υπολεκάνη Οινόης.

	S12_2012	S2_2013	S11_2013a	S11_2013b	S3_2014
Ύψος βροχής (mm)	93.10	180.40	92.20	24.00	75.20
Διάρκεια βροχής (h)	32	55	10	5	15
Μέση ένταση (mm/h)	2.96	3.28	9.46	5.33	5.19
Μέγιστη στάθμη (m)	0.26	0.63	0.21	0.20	0.29
Παροχή αιχμής (m^3/s)	1.40	6.68	1.17	1.15	2.01
Ύψος άμεσης απορροής (mm)	1.14	2.31	0.17	0.12	0.91
Συντελεστής απορροής	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01
Όγκος απορροής (hm^3)	0.06	0.12	0.01	0.01	0.05

Πίνακας 2.14: Συγκεντρωτικά μεγέθη πλημμυρικού επεισοδίου στη λεκάνη ρέματος Χαλανδρίου.

	CH2_2013
Ύψος βροχής (mm)	111.98
Διάρκεια βροχής (h)	9
Μέση ένταση (mm/h)	13.17
Μέγιστη στάθμη (m)	1.55
Παροχή αιχμής (m^3/s)	45.71
Ύψος άμεσης απορροής (mm)	55.59
Συντελεστής απορροής	0.50
Όγκος απορροής (hm^3)	0.29

Πίνακας 2.15: Συγκεντρωτικά μεγέθη πλημμυρικών επεισοδίων στην υπολεκάνη Λυκορέματος (ρέμα Ραφήνας).

	Rl11_2005	Rl2_2006	R10_2009a	Rl10_2009b	R10_2009b	R11_2009	R12_2009b	R12_2009c	Rl2_2010	Rl5_2010a	Rl10_2010
Ύψος βροχής (mm)	84.96	48.76	8.60	11.40	20.80	21.60	12.33	66.61	11.36	21.45	24.08
Διάρκεια βροχής (h)	19.50	13.75	1.25	3.00	5.50	8.25	6.50	14.50	2.50	4.75	5.25
Μέση ένταση (mm/h)	4.36	3.55	6.88	3.80	3.78	2.62	1.90	4.59	4.54	4.51	4.59
Μέγιστη στάθμη (m)	4.97	5.05	21.54	5.95	11.34	5.21	4.65	4.81	4.65	4.97	4.35
Παροχή αιχμής (m^3/s)	3.06	2.99	2.85	1.88	2.70	2.37	0.55	8.43	1.36	1.22	1.27
Ύψος άμεσης απορροής (mm)	0.04	0.06	0.33	0.17	0.13	0.11	0.04	0.13	0.12	0.06	0.05
Συντελεστής απορροής	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.07	0.01	0.01	0.01

Πίνακας 2.16: Συγκεντρωτικά μεγέθη πλημμυρικών επεισοδίων στην υπολεκάνη Ντράφι (ρέμα Ραφήνας).

	R1_2004b	R12_2004	R10_2006a	R10_2006b	R12_2007	R10_2009a	R10_2009b	R11_2009	R12_2009a	R12_2009c
Ύψος βροχής (mm)	62.05	94.47	71.30	31.82	63.18	24.40	20.80	21.60	18.81	63.91
Διάρκεια βροχής (h)	36	21	15	11	18	5	6	8	8	15
Μέση ένταση (mm/h)	1.75	4.50	4.83	2.96	3.46	5.14	3.78	2.62	2.51	4.19
Μέγιστη στάθμη (m)	6.27	11.03	8.34	6.99	7.05	17.50	16.07	14.26	6.53	15.20
Παροχή αιχμής (m^3/s)	5.91	7.03	3.88	2.09	2.95	3.36	2.68	3.06	1.53	10.27
Ύψος άμεσης απορροής (mm)	0.10	0.07	0.05	0.07	0.05	0.14	0.13	0.14	0.08	0.16
Συντελεστής απορροής	0.09	0.11	0.06	0.03	0.05	0.05	0.04	0.05	0.02	0.16

Πίνακας 2.17: Συγκεντρωτικά μεγέθη πλημμυρικών επεισοδίων στη λεκάνη Περιστερώνα.

	P_1_1977	P_2_1979	P_2_1980	P_3_1988	P_12_1988	P_1_1989	P_12_1991_a	P_12_1992	P_11_1994
Ύψος βροχής (mm)	86.39	24.94	94.85	108.72	164.23	166.29	109.44	143.58	246.39
Διάρκεια βροχής (h)	68	24	40	113	38	43	34	41	75
Μέση ένταση (mm/h)	1.27	1.04	2.36	0.96	4.35	3.91	3.24	3.48	3.29
Μέγιστη στάθμη (m)	18.45	22.50	23.25	23.80	37.00	125.00	30.40	66.00	59.20
Παροχή αιχμής (m^3/s)	29.13	12.93	27.98	65.30	35.19	103.77	18.26	39.43	94.25
Ύψος άμεσης απορροής (mm)	0.34	0.52	0.29	0.60	0.21	0.62	0.17	0.27	0.38
Συντελεστής απορροής	2.24	1.00	2.16	5.03	2.71	8.00	1.41	3.04	7.26

	P_12_2001	P_1_2002	P_1_2004_a	P_1_2004_b	P_2_2007
Ύψος βροχής (mm)	84.02	65.96	152.46	84.48	65.87
Διάρκεια βροχής (h)	24	82	75	25	29
Μέση ένταση (mm/h)	3.5	0.81	2.05	3.38	2.25
Μέγιστη στάθμη (m)	66.40	21.60	57.20	47.50	23.90
Παροχή αιχμής (m^3/s)	40.92	42.42	67.41	39.64	16.06
Ύψος άμεσης απορροής (mm)	0.49	0.64	0.44	0.47	0.24
Συντελεστής απορροής	3.15	3.27	5.19	3.05	1.24

Πίνακας 2.18: Συγκεντρωτικά μεγέθη πλημμυρικών επεισοδίων στη λεκάνη Ξερού.

	L_1_1989	L_2_1990	L_12_1991_a	L_2_1992	L_12_1992_a	L_12_1992_b	L_11_1994	L_3_1998	L_12_1998	L_2_1999
Ύψος βροχής (mm)	97.56	105.59	193.13	37.51	96.60	84.47	117.18	45.24	47.31	60.05
Διάρκεια βροχής (h)	53	120	89	37	32	42	53	65	41	64
Μέση ένταση (mm/h)	1.86	0.88	2.17	1.01	3.00	2.02	2.22	0.70	1.15	0.94
Μέγιστη στάθμη (m)	38.00	7.43	13.20	19.75	12.70	10.88	16.80	7.90	5.10	7.90
Παροχή αιχμής (m^3/s)	47.68	17.72	30.74	20.07	10.66	20.51	12.20	11.72	7.44	23.22
Ύψος άμεσης απορροής (mm)	0.49	0.17	0.16	0.53	0.11	0.24	0.10	0.26	0.16	0.39
Συντελεστής απορροής	3.27	1.21	2.11	1.37	0.73	1.41	0.84	0.80	0.51	1.59

3 Διερεύνηση περιοχικών σχέσεων εκτίμησης του χρόνου συγκέντρωσης

3.1 Σκοπός και μεθοδολογία

Ο χρόνος συγκέντρωσης, t_c, καθώς και τα σχετιζόμενα με αυτόν χρονικά μεγέθη που συνήθως εκφράζονται συναρτήσει του t_c, όπως ο χρόνος υστέρησης της λεκάνης και οι χρόνοι βάσης και ανόδου της αιχμής του μοναδιαίου υδρογραφήματος, αποτελούν βασικές συνιστώσες εισόδου των τυπικών υδρολογικών μοντέλων γεγονότος. Στις συνήθεις εφαρμογές, η εκτίμηση του χρόνου συγκέντρωσης γίνεται μέσω περιοχικών (regional) σχέσεων, που συσχετίζουν στατιστικά την παράμετρο t_c με φυσιογραφικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής, όπως η έκταση, η κλίση και το μήκος του υδρογραφικού δικτύου. Οι σχέσεις αυτές είναι εμπειρικές και έχουν εξαχθεί με βάση αναλύσεις πλημμυρικών δεδομένων σε λεκάνες του εξωτερικού. Συνήθως, πρόκειται για μικρές πειραματικές λεκάνες, με περιορισμένο εύρος φυσιογραφικών και υδροκλιματικών χαρακτηριστικών (π.χ. αγροτικές λεκάνες, με σχετικά ήπιες κλίσεις). Το γεγονός αυτό καθιστά προβληματική την άκριτη εφαρμογή τους σε περιοχές με διαφορετικά χαρακτηριστικά, στις οποίες δεν έχει αξιολογηθεί η προγνωστική ικανότητα των αντίστοιχων σχέσεων με τοπικά δεδομένα. Για το λόγο αυτό, η πληθώρα των περιοχικών εξισώσεων που διατίθενται στη βιβλιογραφία για την εκτίμηση t_c παρέχουν ένα πολύ μεγάλο εύρος τιμών, που με τη σειρά του οδηγεί σε πολύ μεγάλες αποκλίσεις στα υπολογιζόμενα πλημμυρικά, ανάλογα με τη σχέση που έχει επιλεχθεί.

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται οι εμπειρικές και θεωρητικές αναλύσεις που έγιναν, με σκοπό την αξιολόγηση των υφιστάμενων μεθόδων εκτίμησης και τη διατύπωση βελτιωμένων σχέσεων. Οι εμπειρικές αναλύσεις βασίστηκαν σε δεδομένα πλημμυρικών παροχών αιχμής της Κύπρου, προκειμένου να επιλεχθεί πλέον αξιόπιστη από τις περιοχικές σχέσεις της βιβλιογραφίας για την εκτίμηση του χρόνου συγκέντρωσης. Η αξιολόγηση έγινε με αντίστροφη εφαρμογή της ορθολογικής μεθόδου, που είναι το απλούστερο υδρολογικό μοντέλο πλημμυρών, το οποίο μάλιστα χαρακτηρίζεται από υψηλή ευαισθησία έναντι της παραμέτρου t_c. Επιλέχθηκαν τα μεγαλύτερα πλημμυρικά γεγονότα από ένα μεγάλο αριθμό λεκανών απορροής και ελέγχθηκε η προγνωστική ικανότητα της ορθολογικής μεθόδου, για τέσσερις εναλλακτικές μεθοδολογίες εκτίμησης του χρόνου συγκέντρωσης. Ακόμη, προτάθηκαν βελτιωμένες εμπειρικές σχέσεις που προσαρμόστηκαν, μέσω βελτιστοποίησης, στα τοπικά χαρακτηριστικά των παραπάνω λεκανών. Τέλος, για τις ανάγκες του υδρολογικού σχεδιασμού, προτάθηκε μια θεωρητική προσέγγιση για τη μείωση του χρόνου συγκέντρωσης συναρτήσεις της κρίσιμης έντασης βροχής.

Στη συνέχεια, μετά από μια συνοπτική επισκόπηση του θεωρητικού υποβάθρου των αναλύσεων (βασικές έννοιες χρόνου συγκέντρωσης, ορθολογική μέθοδος), περιγράφονται η περιοχή μελέτης και τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν, οι παραδοχές της μεθοδολογίας, τα αποτελέσματα των αναλύσεων και τα τελικά συμπεράσματα.

3.2 Θεωρητικό υπόβαθρο

3.2.1 Ορισμός χρόνου συγκέντρωσης

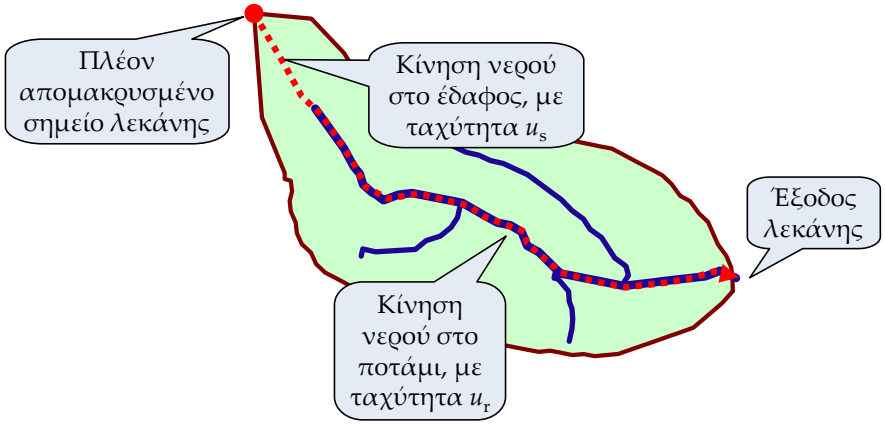
Ο *χρόνος συγκέντρωσης* (ή χρόνος συρροής) αποτελεί χαρακτηριστική χρονική παράμετρο, για την οποία δίνονται διάφοροι ορισμοί στη βιβλιογραφία (McCuen, 2009· Grimaldi *et al.*, 2012). Με βάση τον πλέον διαδεδομένο ορισμό, αναφέρεται ως ο χρόνος που απαιτείται για να φθάσει το νερό που απορρέει επιφανειακά (ακριβέστερα, το κύμα) από το υδραυλικά πιο απομακρυσμένο σημείο της λεκάνης (υδροκρίτης) μέχρι τη διατομή εξόδου (Huber, 1987). Η διαδρομή αυτή ορίζεται κατά μήκος του κύριου υδατορεύματος και περιλαμβάνει δύο συνιστώσες (Σχήμα 3.1):

- τη διαδρομή του νερού στο ανάντη μη διαμορφωμένο τμήμα (πλαγιές και μισγάγκειες), μήκους L_h, που πραγματοποιείται με μέση ταχύτητα u_h·
- τη διαδρομή στο κατάντη διαμορφωμένο τμήμα του κύριου υδατορεύματος, μήκους L_r, που πραγματοποιείται με μέση ταχύτητα u_r.

Με την παραπάνω υπόθεση, ο χρόνος συγκέντρωσης μπορεί να εκφραστεί ως το πηλίκο:

$$t_c = \frac{L_h}{u_h} + \frac{L_r}{u_r} \tag{3.1}$$

Για δεδομένη παροχή και δεδομένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δικτύου, η συνιστώσα u_r υπολογίζεται με σχετική ακρίβεια, με εφαρμογή γνωστών νόμων της υδραυλικής. Αντίθετα, η ροή στο ανάντη τμήμα πραγματοποιείται πάνω στο έδαφος και διέπεται από πολύπλοκους φυσικούς νόμους, μη καθορισμένη γεωμετρία και παραμέτρους που παρουσιάζουν έντονη ετερογένεια σε όλες τις κλίμακες (π.χ. συντελεστές τραχύτητας), οπότε η αναλυτική εκτίμηση της ταχύτητας u_s καθίσταται εξαιρετικά δυσχερής.



Σχήμα 3.1: Ερμηνεία του χρόνου συγκέντρωσης, ως ο χρόνος που απαιτείται για τη διαδρομή του νερού από το πιο απομακρυσμένο σημείο της λεκάνης μέχρι την έξοδο.

3.2.2 Παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται ο χρόνος συγκέντρωσης

Με βάση τον εννοιολογικό ορισμό που δόθηκε στο εδάφιο 3.2.1, ο χρόνος συγκέντρωσης εξαρτάται από τα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά της λεκάνης και του υδρογραφικού δικτύου, που επηρεάζουν την επιφανειακή διαδρομή του νερού καθώς και την ταχύτητα ροής, όπως:

- το σχήμα και η έκταση της λεκάνης απορροής·
- το μήκος και η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου·

- η κλίση και αποστραγγιστική ικανότητα του εδάφους·
- τα χαρακτηριστικά που σχετίζονται με την τραχύτητα του εδάφους (π.χ. φυτοκάλυψη)·
- τα γεωμετρικά και υδραυλικά χαρακτηριστικά υδρογραφικού δικτύου.

Δεδομένου ότι η ταχύτητα ροής του νερού, τόσο πάνω στην επιφάνεια του εδάφους όσο και κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου, δεν είναι σταθερή αλλά αυξάνει με την παροχή, αντίστοιχος ο χρόνος συγκέντρωσης μειώνεται με την παροχή (και τις σχετιζόμενες με αυτή μεταβλητές, ήτοι τη βροχόπτωση). Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι οι Grimaldi *et al.* (2012), αναλύοντας μεγάλο αριθμό επεισοδίων πλημμυρών, διαπίστωσαν ότι η ποσότητα t_c μπορεί να διαφέρει ακόμα και τάξη μεγέθους μεταξύ επεισοδίων καταιγίδας διαφορετικής έντασης. Η μεταβλητότητα αυτή εξηγείται φυσικά από την εξάρτηση της ταχύτητας του κινηματικού κύματος από την παροχή, που είναι ένα μη γραμμικό φαινόμενο (π.χ., Koussis, 2009, 2010). Προφανώς, όσο μεγαλύτερη είναι η παραγωγή επιφανειακής απορροής, τόσο πιο γρήγορα θα φτάσει η απορροή αυτή στην έξοδο της λεκάνης. Ωστόσο, επειδή η μη γραμμικότητα του φαινομένου καθιστά εξαιρετικά δυσχερή τον χειρισμό του στα μοντέλα πλημμυρών (καθώς ο χρόνος συγκέντρωσης είναι παράμετρος εισόδου, ενώ η απορροή είναι μεταβλητή εξόδου), στις πλείστες των περιπτώσεων ο χρόνος συγκέντρωσης λαμβάνεται σταθερός, δηλαδή ανεξάρτητος της παροχής.

3.2.3 Εκτίμηση χρόνου συγκέντρωσης με βάση περιοχικές προσεγγίσεις

Λόγω της πολυπλοκότητας του φαινομένου (περιλαμβανομένης της μη γραμμικότητας), δεν είναι δυνατή η εκτίμηση του χρόνου συγκέντρωσης με εφαρμογή των φυσικών νόμων. Για το λόγο αυτό, προτιμώνται οι εμπειρικές περιοχικές σχέσεις της βιβλιογραφίας που εκτιμούν την παράμετρο t_c συναρτήσει των σχετιζόμενων φυσιογραφικών χαρακτηριστικών της λεκάνης απορροής, χωρίς, κατά κανόνα, να κάνουν διάκριση μεταξύ του χρόνου επίγειας ροής και του χρόνου ροής στο υδρογραφικό δίκτυο. Η γενική σχέση υπολογισμού είναι της μορφής:

$$t_c = f(i, L, S, A) \tag{3.2}$$

όπου i ένα χαρακτηριστικό μέγεθος που σχετίζεται με την απορροή (π.χ. ένταση βροχής), L ένα χαρακτηριστικό μήκος διαδρομής του νερού στη λεκάνη, S μια χαρακτηριστική κλίση του εδάφους, και A το εμβαδό της λεκάνης. Βεβαίως, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, στις περισσότερες εμπειρικές σχέσεις, στην εκτίμηση του χρόνου συγκέντρωσης δεν εισάγεται κάποιο μέγεθος απορροής.

Κοινό χαρακτηριστικό των περιοχικών προσεγγίσεων είναι η παλαιότητά τους αλλά και η εξάρτησή τους από τις τοπικές συνθήκες αναφοράς. Πράγματι, οι αρκετές από τις περιοχικές σχέσεις έχουν εξαχθεί με βάση περιορισμένου εύρους δείγματα υδρολογικών παρατηρήσεων σε πειραματικές λεκάνες, με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Για το λόγο αυτό, οι αποκλίσεις μεταξύ των επιμέρους μεθόδων είναι συχνά εντυπωσιακές, γεγονός που καθιστά ιδιαίτερα επισφαλή τη γενίκευσή τους (Efstratiadis *et al.*, 2014).

3.2.4 Εφαρμογή στα πλαίσια της ορθολογικής μεθόδου

Η ορθολογική μέθοδος αποτελεί το πλέον διαδεδομένο εργαλείο εκτίμησης της παροχής σχεδιασμού μικρής και μεσαίας κλίμακας αντιπλημμυρικών έργων, όπως αστικά δίκτυα ομβρίων, και τυγχάνει ευρύτατης εφαρμογής στην Ελλάδα. Ο μετασχηματισμός της βροχής σε απορροή γίνεται μέσω της απλής σχέσης:

$$Q_p = C\, i\, A \tag{3.3}$$

όπου Q_p η παροχή αιχμής της πλημμύρας, C ο αδιάστατος συντελεστής απορροής, i η μέση (χρονικά και χωρικά) ένταση βροχής, και A η έκταση της λεκάνης απορροής (ή, γενικότερα, της επιφάνειας που αποχετεύεται).

Συμβατικά, η κρίσιμη ένταση βροχής υπολογίζεται από τις όμβριες καμπύλες $i(d, T)$ της περιοχής μελέτης, αφού επιλεγεί η περίοδος επαναφοράς T (η οποία εξαρτάται από τον σκοπό του έργου) και καθοριστεί η διάρκεια d. Είναι προφανές ότι για σταθερή, χωρικά και χρονικά, ένταση βροχόπτωσης, η παραγωγή της απορροής φτάνει στο μέγιστο ρυθμό της όταν η διάρκεια της βροχής είναι τουλάχιστον ίση με το χρόνο συγκέντρωσης, οπότε συμβάλλουν όλα τα τμήματα της λεκάνης. Για τον λόγο αυτό, η διάρκεια βροχής λαμβάνεται ίση με t_c.

Αν οι όμβριες καμπύλες έχουν προκύψει από σημειακές εκτιμήσεις, απαιτείται αναγωγή τους στη χωρική και χρονική κλίμακα αναφοράς, δηλαδή την έκταση της λεκάνης, A, και τη διάρκεια βροχής $d = t_c$. Για την αναγωγή εφαρμόζεται η εμπειρική σχέση των Κουτσογιάννη και Ξανθόπουλου (1999), που έχει εξαχθεί με βάση σε πινακοποιημένα αποτελέσματα του UK-NERC (1975):

$$\varphi = \max\left(1 - \frac{0.048\, A^{0.36 - 0.01 \ln A}}{d^{0.35}}, 0.25\right) \tag{3.4}$$

Με βάση τις παραπάνω παραδοχές, η σχέση (3.3) γράφεται:

$$Q_p = C\, \varphi(A, t_c)\, i(t_c, T)\, A \tag{3.5}$$

Κατά συνέπεια, για δεδομένη περίοδο επαναφοράς, T, και δεδομένη έκταση λεκάνης, A, η ορθολογική μέθοδος χρησιμοποιεί δύο παραμέτρους, ήτοι τον συντελεστή απορροής, C, και τον χρόνο συγκέντρωσης, t_c. Είναι προφανές ότι η σχέση αυτή είναι έντονα μη γραμμική ως προς τον χρόνο συγκέντρωσης, ενώ μεταβάλλεται αναλογικά με τον συντελεστή απορροής.

3.3 Συλλογή και επεξεργασία δεδομένων

Για την εφαρμογή της ορθολογικής μεθόδου, με σκοπό την αξιολόγηση των εμπειρικών σχέσεων εκτίμησης του χρόνου συγκέντρωσης, απαιτήθηκε η συλλογή και επεξεργασία πληθώρας γεωγραφικών και υδρολογικών δεδομένων της Κύπρου. Αναλυτική περιγραφή όλων των δεδομένων και των επεξεργασιών τους γίνεται από τη Γαλιούνα (2011).

3.3.1 Γεωγραφικά δεδομένα

Για τις χωρικές επεξεργασίες που αφορούν σε επιλεγμένες λεκάνες απορροής της Κύπρου, χρησιμοποιήθηκαν τα ακόλουθα επίπεδα γεωγραφικής πληροφορίας (σε παρένθεση δίνεται η αντίστοιχη υπηρεσία που παρείχε τα δεδομένα):

- Ψηφιακό μοντέλο εδάφους, ανάλυσης 30 × 30 m (Τμήμα Κτηματολογίου και Χωροταξίας)
- Υδρογραφικό δίκτυο (Τμήμα Ανάπτυξη Υδάτων)
- Δίκτυο υδρομετρικών σταθμών (Τμήμα Ανάπτυξη Υδάτων)
- Λεκάνες απορροής ανάντη των υδρομετρικών σταθμών (Τμήμα Ανάπτυξη Υδάτων)
- Χάρτης κάλυψης γης CORINE (Τμήμα Δασών)
- Εδαφολογικός χάρτης (Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης)
- Ταμιευτήρες και φράγματα (Τμήμα Ανάπτυξη Υδάτων)
- Γεωλογικός χάρτης (Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης)

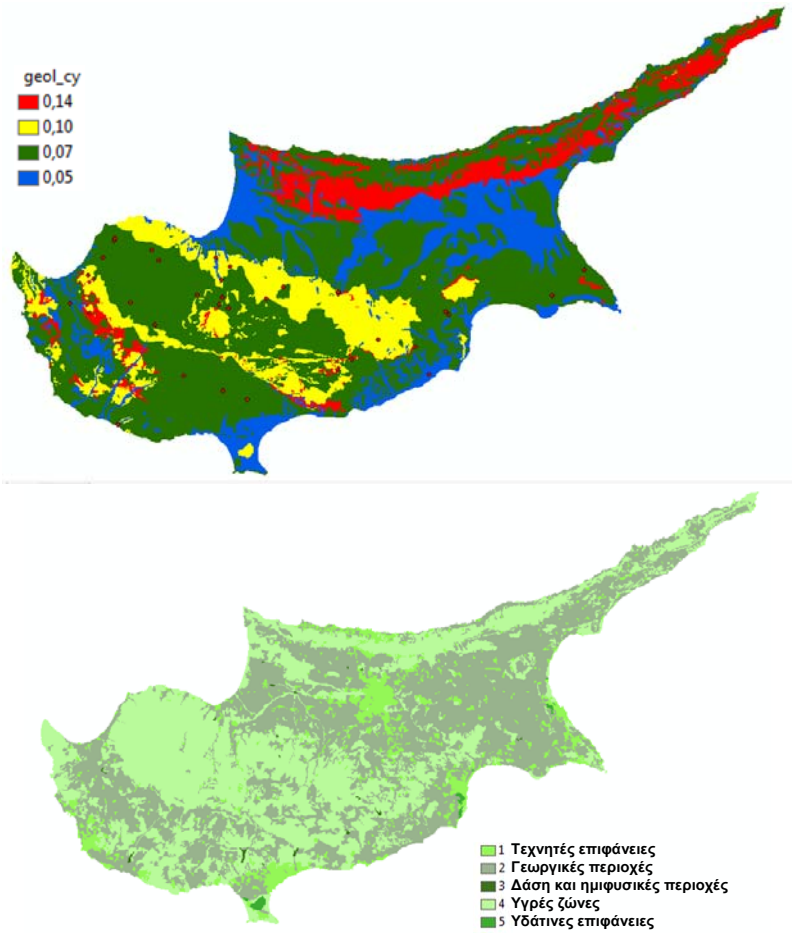
3.3.2 Χαρακτηριστικά λεκανών απορροής

Σε κάθε λεκάνη ανάντη υδρομετρικού σταθμού υπολογίστηκαν τα εξής γεωμετρικά μεγέθη, με χρήση ΣΓΠ (Γαλιούνα, 2011):

- Έκταση λεκάνης
- Μήκος κύριου υδατορεύματος
- Μέγιστο μήκος διαδρομής νερού
- Συνολικό μήκος υδρογραφικού δικτύου
- Μέγιστο, ελάχιστο και μέσο υψόμετρο λεκάνης
- Υψόμετρο πλέον απομακρυσμένου σημείου
- Μέση και μέγιστη κλίση λεκάνης

3.3.3 Κλάσεις υδατοπερατότητας και κάλυψης γης

Με βάση τους χάρτες γεωλογίας και κάλυψης γης κατά CORINE, έγινε κατηγοριοποίηση των εν λόγω χαρακτηριστικών, διαμορφώνοντας τέσσερις κλάσεις περατότητας των γεωλογικών σχηματισμών και πέντε κλάσεις που αναφέρονται στην κάλυψη γης (Σχήμα 3.2). Με βάση την κατηγοριοποίηση αυτή εκτιμήθηκαν, στη συνέχεια, ο συντελεστής απορροής και ο αριθμός καμπύλης απορροής κάθε λεκάνης (βλ. 3.4.5 και 3.4.6, αντίστοιχα).



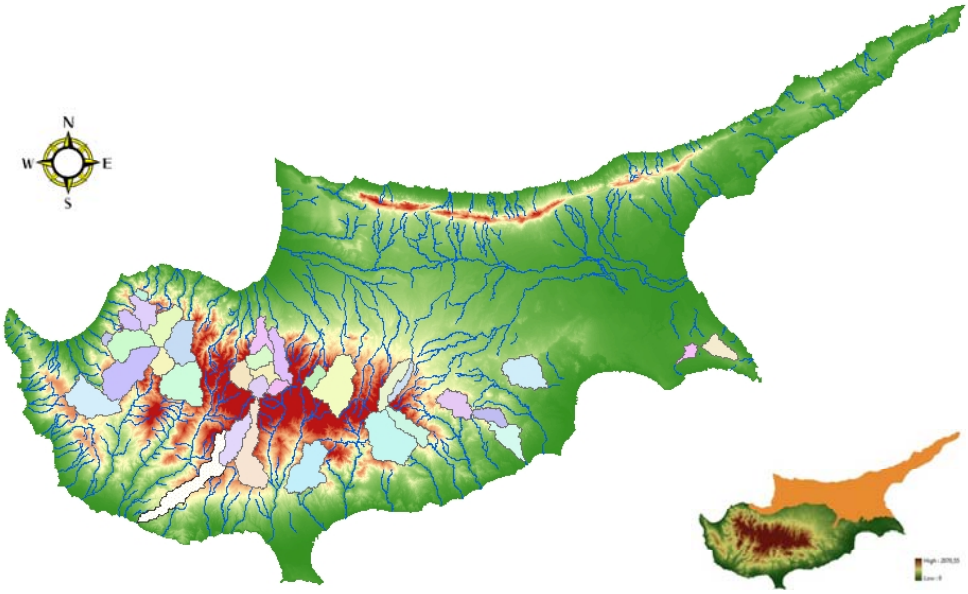
Σχήμα 3.2: Κατηγοριοποίηση γεωλογικών σχηματισμών σε κλάσεις υδατοπερατότητας (πάνω) και κάλυψης γης (κάτω· Πηγή: Γαλιούνα, 2011, μετά από προσαρμογή).

3.3.4 Επιλογή υδρομετρικών σταθμών ενδιαφέροντος

Στην Κύπρο είναι εγκατεστημένοι 124 υδρομετρικοί σταθμοί, καλύπτουν όλη την έκταση του νησιού, με το μεγαλύτερο ποσοστό τους να βρίσκεται στις ελεύθερες περιοχές. Οι σταθμοί αυτοί λειτουργούν υπό την εποπτεία του Τμήματος Ανάπτυξη Υδάτων (ΤΑΥ). Για τον σκοπό των αναλύσεων, αρχικά ελήφθησαν οι μηνιαίες τιμές των παροχών αιχμής από 118 σταθμούς, για κάθε μήνα λειτουργίας τους (2239 τιμές μέγιστων παροχών, συνολικά).

Από τους 118 υδρομετρικούς σταθμούς, για τις περαιτέρω αναλύσεις επιλέχθηκαν τελικά 34 σταθμοί (με τις αντίστοιχες ανάντη λεκάνες απορροής), λαμβάνοντας υπόψη τα ακόλουθα κριτήρια:

- Ελάχιστο μήκος δείγματος παροχών αιχμής 20 έτη
- Ελάχιστη έκταση λεκάνης 5 km^2
- Απουσία φραγμάτων ή άλλων αναρρυθμιστικών έργων ανάντη λεκάνη



Σχήμα 3.3: Λεκάνες απορροής ανάντη των υδρομετρικών σταθμών που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις (Πηγή: Galiouna *et al.*, 2011).

3.4 Δεδομένα εισόδου για την εφαρμογή της ορθολογικής μεθόδου

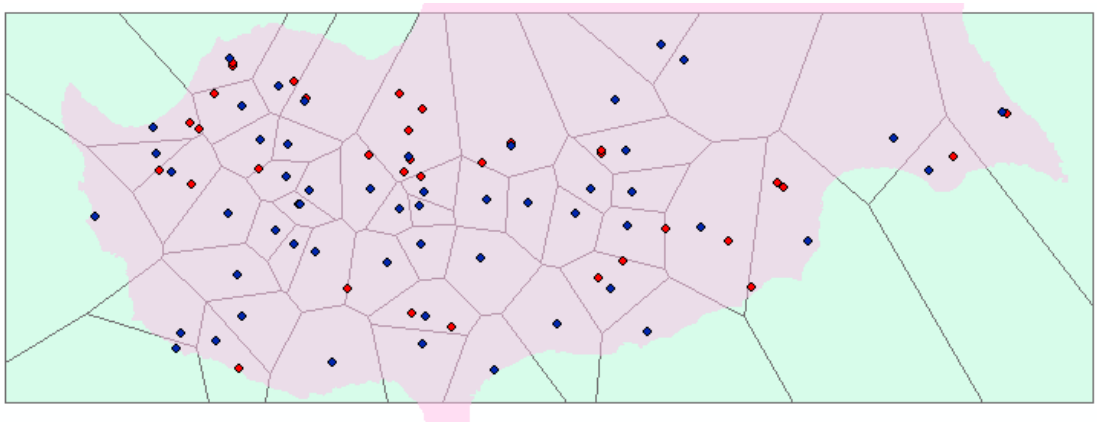
3.4.1 Όμβριες καμπύλες

Για την εκτίμηση της κρίσιμης έντασης βροχής απαιτήθηκε η συλλογή των σημειακών όμβριων καμπυλών και η αναγωγή του στις λεκάνες απορροής ενδιαφέροντος. Οι σχέσεις που εφαρμόζονται στην Κύπρο έχουν αναπτυχθεί από τη Μετεωρολογική Υπηρεσία (Πασιαρδής, 2009) και αναφέρονται σε 36 μετεωρολογικούς σταθμούς εν λειτουργία. Οι σταθμοί αυτοί και τα αντίστοιχα πολύγωνα Thiessen απεικονίζονται στον χάρτη του Σχήματος 3.4. Σε όλες τις περιπτώσεις, θεωρείται η ακόλουθη γενικευμένη έκφραση όμβριων καμπυλών:

$$i(d, T) = \frac{\lambda \left\{ \left[-\ln\left(1 - \frac{1}{T}\right) \right]^{-\kappa} + \psi \right\}}{(d + \theta)^{\eta}} \tag{3.6}$$

όπου λ, ψ, κ, θ και η παράμετροι. Η παραπάνω σχέση έχει αναπτυχθεί από τους Koutsoyiannis *et al.* (1998) και βασίζεται στην προσαρμογή της Κατανομής Ακραίων Τιμών στις μέγιστες εντάσεις βροχής κάθε περιοχής.

Για την εξαγωγή των τιμών των παραμέτρων σε κάθε λεκάνη ενδιαφέροντος, εντοπίστηκαν οι μετεωρολογικοί σταθμοί της ευρύτερης περιοχής και υπολογίστηκαν οι σταθμισμένες τιμές των παραμέτρων τους, με ολοκλήρωση κατά Thiessen. Οι τελικές τιμές των συντελεστών ανά λεκάνη δίνονται στον Πίνακα 3.1.



Σχήμα 3.4: Μετεωρολογικοί (μπλε χρώμα) και υδρομετρικοί (κόκκινο χρώμα) σταθμοί Κύπρου και πολύγωνα Thiessen (Πηγή: Γαλιούνα, 2011).

Πίνακας 3.1: Τελικές τιμές παραμέτρων όμβριων καμπυλών στις λεκάνες ενδιαφέροντος.

Λεκάνη	κ	λ	ψ	θ	η
1-1-3-95	0.120	6.210	2.740	0.046	0.669
2-2-3-95	0.064	9.809	2.591	0.091	0.713
2-2-6-60	0.064	8.151	2.591	0.091	0.713
2-3-4-80	0.040	5.540	2.790	0.067	0.776
2-3-8-60	0.290	3.730	3.940	0.053	0.736
2-4-6-70	0.120	7.900	2.780	0.201	0.820
3-2-1-85	0.010	10.550	2.290	0.158	0.764
3-3-1-70	0.049	7.747	2.668	0.115	0.766
3-4-2-90	0.064	8.151	2.591	0.091	0.713
3-5-1-50	0.120	11.520	1.780	0.162	0.816
3-7-1-50	0.120	11.520	1.780	0.162	0.816
6-1-1-80	0.090	9.360	2.280	0.149	0.806
6-1-1-85	0.090	9.360	2.280	0.149	0.806
8-2-2-90	0.070	6.090	3.200	0.161	0.800
8-2-4-10	0.070	6.090	3.200	0.161	0.800
8-5-1-60	-0.040	11.550	2.460	0.331	0.882
8-7-3-60	-0.040	11.550	2.460	0.331	0.882

3.4.2 Κατάρτιση δείγματος μέγιστων παροχών

Για την εφαρμογή της ορθολογικής μεθόδου θεωρήθηκαν τα τρία μεγαλύτερα, ως προς τις παροχής αιχμής τους, πλημμυρικά επεισόδια των 34 λεκανών απορροής, που δίνονται στον Πίνακα 3.2. Από το σύνολο αυτό επιλέχθηκαν οι τιμές που υπερβαίνουν το όριο της ειδικής παροχής (παροχή αιχμής προς εμβαδό λεκάνης απορροής) το 1.0 $m^3/s/km^2$. Με τον τρόπο

αυτό διαμορφώθηκε το τελικό δείγμα μέγιστων παροχών, που περιλαμβάνει 32 τιμές από 17 λεκάνες. Επισημαίνεται ότι σε δύο περιπτώσεις, που μάλιστα αφορούν σε μικρές λεκάνες, οι τιμές ειδικής παροχής τους απορρίφθηκαν, καθώς θεωρήθηκαν ύποπτα υψηλές.

Πίνακας 3.2: Επιλογή δείγματος μέγιστων παροχών (σημειώνονται με γαλάζιο χρώμα) από τις λεκάνες ενδιαφέροντος, για όριο ειδικής παροχής 1.0 $m^3/s/km^2$.

Κωδικός λεκάνης	Έκταση (km^2)	Παροχή αιχμής (m^3/s)			Ειδική παροχή ($m^3/s/km^2$)		
		1η τιμή	2η τιμή	3η τιμή	1η τιμή	2η τιμή	3η τιμή
1-1-3-95	38.7	54.0	13.0	12.5	1.39	0.34	0.32
1-1-7-95	112.3	45.0	39.0	13.5	0.40	0.35	0.12
1-3-5-05	68.5	43.5	30.0	20.0	0.63	0.44	0.29
1-4-2-15	21.4	7.3	3.9	3.6	0.34	0.18	0.17
2-2-3-95	63.9	94.0	54.0	38.0	1.47	0.85	0.59
2-2-6-60	79.0	248.0	150.0	145.0	3.14	1.90	1.84
2-3-4-80	45.0	71.0	8.0	6.9	1.58	0.18	0.15
2-3-4-95	50.1	35.0	4.5	2.8	0.70	0.09	0.06
2-3-8-60	15.9	17.0	3.5	0.7	1.07	0.22	0.05
2-4-6-70	27.9	28.0	11.7	8.4	1.00	0.42	0.30
2-4-6-80	5.2	63.0	3.1	2.9	12.05*	0.58	0.55
2-7-2-75	38.2	37.0	12.0	9.3	0.97	0.31	0.24
2-8-3-10	47.8	46.0	23.5	16.6	0.96	0.49	0.35
3-2-1-85	22.7	25.0	21.0	17.7	1.10	0.93	0.78
3-3-1-70	15.9	45.0	26.0	12.5	2.83	1.64	0.79
3-3-2-60	11.0	6.0	5.4	3.0	0.55	0.49	0.27
3-3-3-15	42.4	29.0	16.0	11.5	0.68	0.38	0.27
3-3-3-95	62.4	47.0	24.0	20.0	0.75	0.38	0.32
3-3-4-95	85.8	64.0	49.0	49.0	0.75	0.57	0.57
3-4-2-90	32.6	135.0	92.0	16.3	4.14	2.82	0.50
3-5-1-50	14.4	87.0	14.8	12.0	6.06	1.03	0.84
3-7-1-50	77.1	200.0	66.4	66.0	2.60	0.86	0.86
6-1-1-80	14.2	26.9	26.0	21.0	1.90	1.84	1.48
6-1-1-85	29.8	58.0	54.0	26.5	1.95	1.81	0.89
7-2-3-50	9.0	185.0	17.0	17.0	20.56*	1.89	1.89
7-2-7-05	22.6	2.5	1.9	1.6	0.11	0.08	0.07
8-2-2-90	18.8	71.0	44.0	37.0	3.77	2.34	1.97
8-2-4-10	52.2	72.0	24.0	23.0	1.38	0.46	0.44
8-5-1-60	20.1	64.0	23.0	23.0	3.18	1.14	1.14
8-5-1-90	52.7	50.0	25.0	21.0	0.95	0.47	0.40
8-7-3-60	31.4	34.0	33.0	26.0	1.08	1.05	0.83
8-8-2-50	30.9	25.0	22.0	21.0	0.81	0.71	0.68
8-9-5-40	86.8	51.0	40.0	25.0	0.59	0.46	0.29
9-4-3-80	66.8	26.0	20.0	14.7	0.39	0.30	0.22
9-6-2-90	67.5	27.7	13.5	7.6	0.41	0.20	0.11

(*) Η τιμή θεωρήθηκε ύποπτη και δεν συμπεριλήφθηκε στο δείγμα.

3.4.3 Εκτίμηση περιόδου επαναφοράς παροχών αιχμής

Στην ορθολογική μέθοδο θεωρείται ότι η περίοδος επαναφοράς της παροχής αιχμής ταυτίζεται με την περίοδο επαναφοράς της κρίσιμης έντασης βροχής, για διάρκεια βροχής ίση με το χρόνο συγκέντρωσης της λεκάνης. Στην ευθεία εφαρμογή της μεθόδου (δηλαδή, στη χρήση της για σχεδιασμό), εκτιμάται η κρίσιμη ένταση βροχής για δεδομένη περίοδο επαναφοράς, με βάση την οποία υπολογίζεται η παροχή αιχμής που θεωρείται ότι έχει την ίδια περίοδο επαναφοράς. Στην αντίστροφη προσέγγιση, στην οποία είναι γνωστή η τιμή της παροχής αιχμής, εκτιμάται μέσω κάποιου στατιστικού μοντέλου (θεωρητικού ή εμπειρικού) η πιθανότητα υπέρβασης της εν λόγω παροχής (και η αντίστοιχη περίοδος επαναφοράς), που θεωρείται ότι ταυτίζεται με την περίοδο επαναφοράς της βροχόπτωσης.

Η εκτίμηση της περιόδου επαναφοράς έγινε με βάση τη διάταξη των παροχών αιχμής κατά φθίνουσα σειρά, δηλαδή ανάλογα με το αν είναι το πρώτο, δεύτερο ή τρίτο μεγαλύτερο επεισόδιο της αντίστοιχης λεκάνης. Αν n είναι το μέγεθος του δείγματος στη συγκεκριμένη λεκάνη και k είναι η θέση της παροχής στο διατεταγμένο δείγμα, τότε η περίοδος επαναφοράς της εν λόγω παροχής θεωρήθηκε ίση με:

$$T = n - k + 1 \tag{3.7}$$

Κατά συνέπεια, για τη μεγαλύτερη τιμή του δείγματος θεωρήθηκε περίοδος επαναφοράς n έτη, για τη δεύτερη μεγαλύτερη $n-1$ έτη, ενώ για την τρίτη μεγαλύτερη $n-2$ έτη.

3.4.4 Εκτίμηση χρόνου συγκέντρωσης λεκανών

Για κάθε τιμή του δείγματος παροχών αιχμής, ο χρόνος συγκέντρωσης της αντίστοιχης λεκάνης απορροής εκτιμήθηκε με τέσσερις τυπικές περιοχικές σχέσεις της βιβλιογραφίας, που αναφέρονται στη συνέχεια. Για λόγους ομοιομορφίας, ο χρόνος t_c δίνεται σε h.

Εξίσωση Passini:

$$t_c = 0.108\,(A\,L)^{1/3} / S_b^{0.50} \tag{3.8}$$

όπου A η επιφάνεια της λεκάνης (km^2), L το μήκος της κύριας μισγάγκειας (km) και S_b η μέση κλίση της λεκάνης. Η εξίσωση αυτή θεωρείται κατάλληλη για λεκάνες μεγαλύτερες των 40 km^2.

Εξίσωση Giandotti:

$$t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{\Delta z}} \tag{3.9}$$

όπου A η επιφάνεια της λεκάνης (km^2), L το μήκος της κύριας μισγάγκειας (km) και Δz η υψομετρική διαφορά του μέσου υψομέτρου της λεκάνης από το υψόμετρο της εξόδου της (m). Η σχέση (3.9) έχει παραχθεί με ανάλυση δεδομένων σε 12 λεκάνες, με εύρος μεγεθών από 170 έως 70 000 km^2.

Εξίσωση Kirpich:

$$t_c = 0.0667\,L^{0.77} / S^{0.385} \tag{3.10}$$

όπου L το μήκος της κύριας μισγάγκειας (km) και S η μέση κλίση (m/m), αναπτύχθηκε το 1940 από δεδομένα της Αμερικανικής Soil Conservation Service. Τα δεδομένα προέρχονται από τις περιοχές Tennessee και Pennsylvania των ΗΠΑ, και αναφέρονται σε μικρές αγροτικές λεκάνες έκτασης από 0.5 ως 45 ha, με ισχυρές κλίσεις 3-10%, φυτοκάλυψη 0-56% και με καλά σχηματισμένο υδρογραφικό δίκτυο.

Εξίσωση Soil Conservation Service:

$$t_c = 0.057\, L^{0.8}\, (1000 / \mathrm{CN} - 9)^{0.70} / S^{1/2} \qquad (3.11)$$

όπου L το μήκος της κύριας μισγάγκειας (km), S η μέση κλίση της λεκάνης (m/m), και CN ο αριθμός καμπύλης απορροής της μεθόδου SCS. Η μέθοδος θεωρείται κατάλληλη για μικρές αστικές λεκάνες κάτω των 800 ha.

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη των λεκανών και οι αντίστοιχες τιμές του χρόνου συγκέντρωσης δίνονται στον Πίνακα 3.3. Σε όλες τις περιπτώσεις, η σχέση του Giandotti είναι αυτή που δίνει τις μεγαλύτερες τιμές του t_c, ενώ οι άλλες τρεις σχέσεις δίνουν παρεμφερείς εκτιμήσεις.

Πίνακας 3.3: Εκτίμηση χρόνου συγκέντρωσης t_c (h) στις λεκάνες ενδιαφέροντος, με διάφορες εμπειρικές σχέσεις.

Λεκάνη	A (km^2)	L (km)	S	Δz (m)	Passini	Giandotti	Kirpich	SCS
1-1-3-95	38.73	12.25	0.458	678	1.24	2.53	1.32	1.37
1-1-7-95	112.32	45.31	0.270	1457	3.58	5.61	4.80	4.61
1-3-5-05	68.51	9.70	0.571	800	1.25	2.71	0.91	0.98
1-4-2-15	21.44	4.38	0.477	751	0.71	1.62	0.47	0.40
2-2-3-95	63.90	8.42	0.142	395	2.33	3.14	1.17	1.09
2-2-6-60	78.97	14.88	0.353	1102	1.92	3.77	1.58	1.42
2-3-4-80	45.05	7.55	0.434	1018	1.14	2.26	0.81	0.67
2-3-4-95	50.14	9.48	0.421	1066	1.30	2.47	1.01	0.86
2-3-8-60	15.92	3.15	0.444	650	0.60	1.38	0.33	0.29
2-4-6-70	27.88	8.69	0.415	887	1.04	2.13	0.86	0.83
2-4-6-80	5.23	1.64	0.448	466	0.33	0.90	0.21	0.16
2-7-2-75	38.17	9.55	0.511	689	1.08	2.26	1.00	1.02
2-8-3-10	47.80	9.69	0.570	457	1.11	2.33	0.97	1.21
3-2-1-85	22.67	4.34	0.429	261	0.76	1.41	0.40	0.60
3-3-1-70	15.88	1.58	0.444	945	0.48	0.89	0.19	0.11
3-3-2-60	10.97	2.40	0.381	914	0.52	1.11	0.24	0.19
3-3-3-15	42.40	6.43	0.561	1163	0.94	1.71	0.61	0.53
3-3-3-95	62.35	11.50	0.382	1352	1.56	2.42	1.00	0.98
3-3-4-95	85.76	18.01	0.561	1556	1.67	2.71	1.61	1.55
3-4-2-90	32.61	15.35	0.346	1077	1.46	2.75	1.54	1.49
3-5-1-50	14.37	2.93	0.539	949	0.51	1.10	0.33	0.23
3-7-1-50	77.06	18.13	0.424	894	1.86	3.58	1.95	1.93
6-1-1-80	14.16	10.57	0.158	1002	1.44	2.17	1.09	1.00
6-1-1-85	29.76	12.01	0.168	755	1.87	2.55	1.35	1.28
7-2-3-50	9.00	2.23	0.012	53	2.64	4.13	0.73	0.51
7-2-7-05	22.57	6.08	0.172	95	1.34	4.76	1.30	1.29
8-2-2-90	18.81	5.36	0.135	231	1.37	2.99	0.91	0.80
8-2-4-10	52.22	6.76	0.144	198	2.01	4.00	1.16	1.10
8-5-1-60	20.10	7.46	0.201	260	1.28	2.80	0.97	1.11
8-5-1-90	52.74	18.23	0.144	388	2.81	5.04	2.35	2.67
8-7-3-60	31.41	3.74	0.170	168	1.28	3.02	0.50	0.59
8-8-2-50	30.90	11.10	0.335	1041	1.31	2.50	1.20	1.04
8-9-5-40	86.75	11.34	0.305	1038	1.95	3.48	1.22	1.07
9-4-3-80	66.84	13.70	0.266	507	2.03	3.84	1.48	1.74
9-6-2-90	67.50	20.52	0.296	1535	2.21	3.61	2.03	1.82

3.4.5 Εκτίμηση συντελεστών απορροής

Η εκτίμηση του συντελεστή απορροής κάθε λεκάνης έγινε με βάση τις προδιαγραφές των Οδηγιών Μελετών Οδικών Έργων του ΥΠΕΧΩΔΕ (2002). Σύμφωνα με αυτές, ο συντελεστής απορροής προσδιορίζεται ως άθροισμα τεσσάρων συνιστωσών, C_1, …, C_4, που αναφέρονται στο ανάγλυφο, τη διηθητικότητα του εδάφους, το είδος της βλάστησης και τις δυνατότητες αποστράγγισης του εδάφους (Πίνακας 3.4). Επισημαίνεται ότι οι συντελεστές αναφέρονται σε περιόδους επαναφοράς 5-10 έτη. Για μεγαλύτερες περιόδους επαναφοράς, η τιμή του προσαυξάνεται κατά 10% για T = 25 έτη, 20% για T = 50 έτη και 25% για T = 50 έτη.

Πίνακας 3.4: Εκτίμηση επιμέρους συντελεστών απορροής κατά ΟΜΟΕ (2002).

C_1	0.28–0.35: Επικλινές ανάγλυφο, ανώμαλες επιφάνειες μέσες κλίσεις >30%	0.20–0.28: Λοφώδες ανάγλυφο, μέσες κλίσεις 10-30%	0.14–0.20: Κυματώδες ανάγλυφο, μέσες κλίσεις 5-10%	0.08–0.14: Σχετικά επίπεδο ανάγλυφο, μέσες κλίσεις 0-5%
C_2	0.12–0.16: Μη επηρεαζόμενο κάλυμμα εδάφους, είτε βραχώδες είτε μανδύας λεπτόκκοκου εδάφους αμελητέας διηθητικότητας	0.08–0.12: Βραδεία διηθητικότητα, άργιλοι ή αβαθή παχιά εδάφη χαμηλής διηθητικότητας, ατελώς ή πολύ μικρής αποστραγγιστικότητας	0.06–0.08: Κανονική διηθητικότητα, καλά αποστραγγιζόμενα μικρής ή μεσαίας μακροϋφής εδάφη, αμμώδη παχιά εδάφη, ιλύες και ιλυώδη εδάφη	0.04–0.06: Υψηλή διηθητικότητα, βαθιά άμμος ή άλλο έδαφος που απορροφά νερό, πολύ ελαφριά καλά αποστραγγιζόμενα εδάφη
C_3	0.12–0.16: Βλάστηση που δεν επηρεάζει την απορροή, γυμνό έδαφος ή πολύ αραιά κάλυψη	0.08–0.12: Πτωχή ως μέτρια βλάστηση, καθαρές καλλιέργειες ή πτωχής φυσικής κάλυψης, <20% επιφάνειας με καλή κάλυψη	0.06–0.08: Μέτρια ως καλή βλάστηση, ~50% επιφάνειας είναι καλή φυτική γη ή δασώδες, <50% επιφάνειες είναι καλλιέργειες	0.04–0.06: Καλή ως άριστη βλάστηση, ~90% της επιφάνειας είναι καλή φυτική γη, δασώδες ή ισοδύναμης κάλυψης
C_4	0.10–0.12: Αμελητέες ταπεινώσεις εδάφους και αβαθείς, μικροί διάδρομοι αποστράγγισης, καθόλου τέλματα	0.08–0.10: Χαμηλή αποθηκευτικότητα, καλά οριζόμενο σύστημα διαδρόμων αποστράγγισης, όχι λιμνάζοντα νερά ή τέλματα	0.06–0.08: Κανονική αποθηκευτικότητα, σημαντικές επιφανειακές ταπεινώσεις, λιμνάζοντα νερά και τέλματα	0.04–0.06: Υψηλή αποθηκευτικότητα, σύστημα αποστράγγισης όχι καλά οριζόμενο, μεγάλος αριθμός πλημμυριζόμενων επιφανειών ή τελμάτων

Η εκτίμηση των επιμέρους συντελεστών έγινε με χρήση ΣΓΠ, ως εξής:

- Η τιμή του C_1 υπολογίστηκε ως συνάρτηση της μέσης κλίσης της λεκάνης, με εφαρμογή μιας σχέσης παρεμβολής που αντιστοιχεί σε κάθε κλίση (ή εύρος κλίσεων) μία τιμή.
- Η τιμή του C_2 εκτιμήθηκε με βάση την κατάταξη των εδαφών σε τέσσερις κατηγορίες περατότητας (Σχήμα 3.2, πάνω). Οι τιμές που δόθηκαν για κάθε κατηγορία είναι 0.05 (κατηγορία A), 0.07 (κατηγορία B), 0.10 (κατηγορία C), και 0.14 (κατηγορία D). Γενικά, στην Κύπρο εμφανίζονται ημιπερατά μέσης έως καλής αποστράγγισης εδάφη.
- Η τιμή του C_3 εκτιμήθηκε με βάση την κατάταξη των εδαφών σε κάθε κατηγορία κάλυψης γης Corine (Σχήμα 3.2, κάτω), θέτοντας τιμές από 0.04 (δάση) έως 0.15 (βραχώδη εδάφη).
- Η τιμή του C_4 εκτιμήθηκε με βάση την πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου κάθε λεκάνης. Η πυκνότητα αυτή ορίζεται ως ο λόγος της έκτασης του υδρογραφικού δικτύου

(αριθμός κυττάρων υδρογραφικού δικτύου επί έκταση κάθε κυττάρου, ήτοι 900 m^2) προς την επιφάνεια της λεκάνης. Η ελάχιστη τιμή του C_4 τέθηκε ίση από 0.04, για πυκνότητα δικτύου μικρότερη του 1%, έως 0.12, για πυκνότητα δικτύου μεγαλύτερη του 30%.

Για περιοχές με ετερογενή φυσιογραφικά χαρακτηριστικά υπολογίστηκε ο σταθμισμένος συντελεστής απορροής, σύμφωνα με τη σχέση:

$$C = \sum_i C_i A_i / \sum_i A_i \tag{3.12}$$

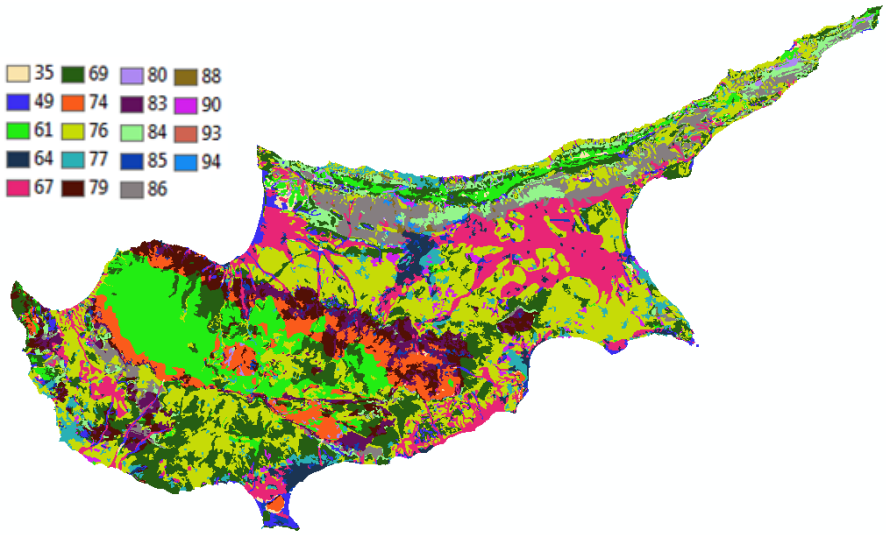
όπου C_i οι επιμέρους συντελεστές των επιμέρους εκτάσεων A_i. Οι τελικές τιμές του συντελεστή απορροής στις λεκάνες ενδιαφέροντος δίνονται στον Πίνακα 3.5.

Πίνακας 3.5: Σταθμισμένες τιμές συντελεστών απορροής στις λεκάνες ενδιαφέροντος για $T <$ 10 έτη.

Κωδικός λεκάνης	Συντελ. απορροής	Κωδικός λεκάνης	Συντελ. απορροής	Κωδικός λεκάνης	Συντελ. απορροής	Κωδικός λεκάνης	Συντελ. απορροής
1-1-3-95	0.479	2-4-6-70	0.450	3-3-4-95	0.409	8-2-4-10	0.415
1-1-7-95	0.446	2-4-6-80	0.512	3-4-2-90	0.452	8-5-1-60	0.430
1-3-5-05	0.460	2-7-2-75	0.459	3-5-1-50	0.472	8-5-1-90	0.405
1-4-2-15	0.450	2-8-3-10	0.460	3-7-1-50	0.470	8-7-3-60	0.420
2-2-3-95	0.408	3-2-1-85	0.474	6-1-1-80	0.405	8-8-2-50	0.457
2-2-6-60	0.475	3-3-1-70	0.456	6-1-1-85	0.405	8-9-5-40	0.460
2-3-4-80	0.458	3-3-2-60	0.456	7-2-3-50	0.289	9-4-3-80	0.443
2-3-4-95	0.459	3-3-3-15	0.493	7-2-7-05	0.457	9-6-2-90	0.456
2-3-8-60	0.450	3-3-3-95	0.468	8-2-2-90	0.419		

3.4.6 Εκτίμηση αριθμού καμπύλης απορροής

Ο αριθμός καμπύλης απορροής (curve number, CN) είναι μια χαρακτηριστική παράμετρος της λεκάνης απορροής, που προτάθηκε από την Αμερικανική Soil Conservation Service (SCS, 1972) προκειμένου να συμπυκνώσει τα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά της λεκάνης σε μια μοναδική αντιπροσωπευτική τιμή. Η διαδικασία τυποποιήθηκε σε περιβάλλον ΣΓΠ, οπότε προέκυψε ο χάρτη τιμών του Σχήματος 3.5.



Σχήμα 3.5: Κατηγοριοποίηση τιμών CN (Πηγή: Γαλιούνα, 2011).

Οι τελικές τιμές του CN για κάθε λεκάνη ενδιαφέροντος δίνονται στον Πίνακα 3.5. Οι τιμές αυτές χρησιμοποιήθηκαν τόσο στις εκτιμήσεις του χρόνου συγκέντρωσης κατά την SCS, σύμφωνα με τη σχέση (4.2), όσο και σε άλλες εμπειρικές σχέσεις που αναπτύχθηκαν, στις οποίες ο CN ελήφθη ως εκτιμήτρια της τραχύτητας της λεκάνες.

Πίνακας 3.6: Τελικές τιμές συντελεστών CN στις λεκάνες ενδιαφέροντος.

Κωδικός λεκάνης	CN	Κωδικός λεκάνης	CN	Κωδικός λεκάνης	CN	Κωδικός λεκάνης	CN
1-1-3-95	72.4	2-4-6-70	61.0	3-3-4-95	70.2	8-2-4-10	72.1
1-1-7-95	71.8	2-4-6-80	61.8	3-4-2-90	66.3	8-5-1-60	76.2
1-3-5-05	61.0	2-7-2-75	60.7	3-5-1-50	66.9	8-5-1-90	72.5
1-4-2-15	61.0	2-8-3-10	61.0	3-7-1-50	71.2	8-7-3-60	77.5
2-2-3-95	74.2	3-2-1-85	69.4	6-1-1-80	72.2	8-8-2-50	68.4
2-2-6-60	71.6	3-3-1-70	66.5	6-1-1-85	70.2	8-9-5-40	74.3
2-3-4-80	64.3	3-3-2-60	66.4	7-2-3-50	77.3	9-4-3-80	72.4
2-3-4-95	65.0	3-3-3-15	69.6	7-2-7-05	78.8	9-6-2-90	71.5
2-3-8-60	61.0	3-3-3-95	69.5	8-2-2-90	71.5		

3.5 Επαλήθευση ορθολογικής μεθόδου

3.5.1 Υπολογιστική διαδικασία

Έστω ότι ζητείται η αναπαραγωγή της k μεγαλύτερης παροχής αιχμής που έχει παρατηρηθεί στη λεκάνη j, στην οποία διατίθεται ένα δείγμα ετήσιων μέγιστων παροχών αιχμής μεγέθους n_j. Για τη λεκάνη αυτή, έκτασης A_j, θεωρούνται γνωστά ο συντελεστής απορροής C_j, ο χρόνος συγκέντρωσης t_{cj}, και οι σημειακές εκτιμήσεις των παραμέτρων λ_j, ψ_j, κ_j, θ_j και η_j της συναρτησιακής σχέσης της όμβριας καμπύλης.

Με βάση τις υποθέσεις του εδαφίου 3.4.3, για την εν λόγω παροχή αιχμής θεωρείται περίοδος επαναφοράς $T_{kj} = n_j - k + 1$, η οποία ταυτίζεται με την περίοδο επαναφοράς της κρίσιμης έντασης βροχής i_{kj}, διάρκειας $d_j = t_{cj}$. Η ένταση αυτή εκτιμάται, σε σημειακή κλίμακα, από την σχέση (3.6), ενώ για την επιφανειακή αναγωγή της εφαρμόζεται ο μειωτικός συντελεστής (3.4), οπότε προκύπτει η επιφανειακή ένταση της βροχής i_{kj}^*. Για την εκτίμηση της παροχής αιχμής εφαρμόζεται η ορθολογική μέθοδος, ήτοι:

$$Q_{kj} = C_j\, \varphi(A_j, t_{cj})\, i(t_{cj}, T_{kj}, \lambda_j, \psi_j, \kappa_j, \theta_j, \eta_j)\, A_j \tag{3.13}$$

Η εφαρμογή της παραπάνω διαδικασίας γίνεται για τις τέσσερις εμπειρικές σχέσεις εκτίμησης του χρόνου συγκέντρωσης, ώστε να εντοπιστεί αυτή που παράγει τις πλέον αξιόπιστες προγνώσεις της παροχής αιχμής, με αναφορά στις αντίστοιχες παρατηρημένες τιμές.

Στον Πίνακα 3.7 δίνονται οι παροχές αιχμής που εξετάζονται σε κάθε λεκάνη ενδιαφέροντος και τα χαρακτηριστικά μεγέθη της υπολογιστικής διαδικασίας, τα οποία δεν εξαρτώνται από τον χρόνο συγκέντρωσης (έκταση λεκάνης, συντελεστής απορροής, περίοδος επαναφοράς, παράμετροι όμβριων καμπυλών). Πρόκειται για 32 τιμές παροχών αιχμής, όπου στις 17 περιπτώσεις αφορά στη μέγιστη τιμή του δείγματος, σε 10 περιπτώσεις αφορά στη δεύτερη μεγαλύτερη τιμή και 5 περιπτώσεις αναφέρονται στην τρίτη μεγαλύτερη τιμή.

Πίνακας 3.7: Δεδομένα εισόδου, μη εξαρτώμενα από το χρόνο συγκέντρωσης.

Λεκάνη	Q (m^3/s)	k	n (έτη)	T (έτη)	A (km^2)	C	κ	λ	ψ	θ	η
1-1-3-95	54.0	1	39	39	38.7	0.479	0.120	6.21	2.740	0.046	0.669
2-2-3-95	94.0	1	43	43	63.9	0.408	0.064	9.81	2.591	0.091	0.713
2-2-6-60	248.0	1	43	43	79.0	0.475	0.064	8.15	2.591	0.091	0.713
2-3-4-80	71.0	1	26	26	45.0	0.458	0.040	5.54	2.790	0.067	0.776
2-3-8-60	17.0	1	28	28	15.9	0.450	0.290	3.73	3.940	0.053	0.736
2-4-6-70	28.0	1	28	28	27.9	0.450	0.120	7.90	2.780	0.201	0.820
3-2-1-85	25.0	1	37	37	22.7	0.474	0.010	10.55	2.290	0.158	0.764
3-3-1-70	45.0	1	43	43	15.9	0.456	0.049	7.75	2.668	0.115	0.766
3-4-2-90	135.0	1	41	41	32.6	0.452	0.064	8.15	2.591	0.091	0.713
3-5-1-50	87.0	1	32	32	14.4	0.472	0.120	11.52	1.780	0.162	0.816
3-7-1-50	200.0	1	43	43	77.1	0.470	0.120	11.52	1.780	0.162	0.816
6-1-1-80	26.9	1	41	41	14.2	0.405	0.090	9.36	2.280	0.149	0.806
6-1-1-85	58.0	1	33	33	29.8	0.405	0.090	9.36	2.280	0.149	0.806
8-2-2-90	71.0	1	38	38	18.8	0.419	0.070	6.09	3.200	0.161	0.800
8-2-4-10	72.0	1	24	24	52.2	0.415	0.070	6.09	3.200	0.161	0.800
8-5-1-60	64.0	1	24	24	20.1	0.430	-0.040	11.55	2.460	0.331	0.882
8-7-3-60	34.0	1	28	28	31.4	0.420	-0.040	11.55	2.460	0.331	0.882
2-2-6-60	150.0	2	43	42	79.0	0.475	0.064	8.15	2.591	0.091	0.713
3-3-1-70	26.0	2	43	42	15.9	0.456	0.049	7.75	2.668	0.115	0.766
3-4-2-90	92.0	2	41	40	32.6	0.452	0.064	8.15	2.591	0.091	0.713
3-5-1-50	14.8	2	32	31	14.4	0.472	0.120	11.52	1.780	0.162	0.816
6-1-1-80	26.0	2	41	40	14.2	0.405	0.090	9.36	2.280	0.149	0.806
6-1-1-85	54.0	2	33	32	29.8	0.405	0.090	9.36	2.280	0.149	0.806
7-2-3-50	17.0	2	42	41	9.0	0.289	0.064	8.15	2.591	0.091	0.713
8-2-2-90	44.0	2	38	37	18.8	0.419	0.070	6.09	3.200	0.161	0.800
8-5-1-60	23.0	2	24	23	20.1	0.430	-0.040	11.55	2.460	0.331	0.882
8-7-3-60	33.0	2	28	27	31.4	0.420	-0.040	11.55	2.460	0.331	0.882
2-2-6-60	145.0	3	43	41	79.0	0.475	0.064	8.15	2.591	0.091	0.713
6-1-1-80	21.0	3	41	39	14.2	0.405	0.090	9.36	2.280	0.149	0.806
7-2-3-50	17.0	3	42	40	9.0	0.289	0.064	8.15	2.591	0.091	0.713
8-2-2-90	37.0	3	38	36	18.8	0.419	0.070	6.09	3.200	0.161	0.800
8-5-1-60	23.0	3	24	22	20.1	0.430	-0.040	11.55	2.460	0.331	0.882

3.5.2 Μέτρο αξιολόγησης

Για την αξιολόγηση της προγνωστικής ικανότητας της ορθολογικής μεθόδου, δηλαδή της προσαρμογής των προσομοιωμένων στις παρατηρημένες παροχές αιχμής, χρησιμοποιείται το μέτρο *αποτελεσματικότητας* (efficiency), που διατυπώνεται ως εξής:

$$\mathrm{EFF} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{m} (y_i - y_i')^2}{\sum_{i=1}^{m} (y_i - \overline{y})^2} \tag{3.14}$$

όπου y_i' η τιμή του εκτιμούμενου μεγέθους (στην προκειμένη περίπτωση η παροχή αιχμής), y_i η αντίστοιχη παρατηρημένη τιμή, $\overline{y}$ η μέση τιμή των παρατηρήσεων και m το πλήθος των

παρατηρήσεων. Όσο πιο κοντά στη μονάδα βρίσκεται ο εν λόγω δείκτης, τόσο καλύτερη είναι η προσαρμογή του μοντέλου που εξετάζεται (στην προκειμένη περίπτωση η ορθολογική μέθοδος). Μηδενική τιμή υποδηλώνει ότι η προγνωστική ικανότητα του μοντέλου είναι ισοδύναμη με την μέση τιμή των παρατηρήσεων, ενώ αρνητικές τιμές υποδηλώνουν ακαταλληλότητα του μοντέλου.

3.5.3 Αναλυτικά αποτελέσματα

Στους Πίνακες 3.8 έως 4.1 δίνονται, για κάθε μία από τις τέσσερις εκτιμήτριες του χρόνου συγκέντρωσης, τα εξαρτώμενα από αυτόν μεγέθη εισόδου της ορθολογικής μεθόδου (κρίσιμη ένταση βροχής, συντελεστής επιφανειακής αναγωγής) και οι τιμές της παροχής αιχμής, που συγκρίνονται με τις παρατηρημένες.

Πίνακας 3.8: Δεδομένα εισόδου και αποτελέσματα ορθολογικής μεθόδου για εκτίμηση του χρόνου συγκέντρωσης με τη μέθοδο Passini.

Λεκάνη	t_c (h)	i (mm/h)	φ	i^* (mm/h)	Q_{sim} (m^3/s)	Q_{obs} (m^3/s)
1-1-3-95	1.24	38.3	0.855	32.8	168.7	54.0
2-2-3-95	2.33	35.6	0.866	30.9	223.2	94.0
2-2-6-60	1.92	33.9	0.848	28.7	299.2	248.0
2-3-4-80	1.14	29.8	0.844	25.2	144.2	71.0
2-3-8-60	0.60	48.7	0.856	41.6	82.9	17.0
2-4-6-70	1.04	45.2	0.860	38.9	135.4	28.0
3-2-1-85	0.76	67.0	0.853	57.1	170.4	25.0
3-3-1-70	0.48	78.8	0.844	66.5	133.6	45.0
3-4-2-90	1.46	40.4	0.869	35.1	143.7	135.0
3-5-1-50	0.51	96.3	0.852	82.1	154.7	87.0
3-7-1-50	1.86	42.3	0.847	35.9	360.7	200.0
6-1-1-80	1.44	43.0	0.898	38.6	61.5	26.9
6-1-1-85	1.87	33.8	0.883	29.9	100.0	58.0
8-2-2-90	1.37	31.7	0.887	28.1	61.5	71.0
8-2-4-10	2.01	22.0	0.866	19.1	115.1	72.0
8-5-1-60	1.28	41.2	0.881	36.3	87.2	64.0
8-7-3-60	1.28	42.1	0.865	36.4	133.5	34.0
2-2-6-60	1.92	33.7	0.848	28.6	297.9	150.0
3-3-1-70	0.48	78.4	0.844	66.2	133.0	26.0
3-4-2-90	1.46	40.2	0.869	34.9	143.0	92.0
3-5-1-50	0.51	95.5	0.852	81.4	153.4	14.8
6-1-1-80	1.44	42.7	0.898	38.4	61.1	26.0
6-1-1-85	1.87	33.6	0.883	29.7	99.4	54.0
7-2-3-50	2.64	27.0	0.928	25.0	18.1	17.0
8-2-2-90	1.37	31.6	0.887	28.0	61.2	44.0
8-5-1-60	1.28	40.9	0.881	36.0	86.5	23.0
8-7-3-60	1.28	41.9	0.865	36.2	132.7	33.0
2-2-6-60	1.92	33.6	0.848	28.4	296.6	145.0
6-1-1-80	1.44	42.5	0.898	38.2	60.8	21.0
7-2-3-50	2.64	26.8	0.928	24.9	18.0	17.0
8-2-2-90	1.37	31.4	0.887	27.9	60.9	37.0
8-5-1-60	1.28	40.6	0.881	35.8	85.9	23.0

Πίνακας 3.9: Δεδομένα εισόδου και αποτελέσματα ορθολογικής μεθόδου για εκτίμηση του χρόνου συγκέντρωσης με τη μέθοδο Giandotti.

Λεκάνη	t_c (h)	i (mm/h)	φ	i^* (mm/h)	Q_{sim} (m^3/s)	Q_{obs} (m^3/s)
1-1-3-95	2.53	24.2	0.887	21.4	110.2	54.0
2-2-3-95	3.14	29.0	0.879	25.5	184.5	94.0
2-2-6-60	3.77	21.3	0.880	18.7	195.0	248.0
2-3-4-80	2.26	18.0	0.877	15.8	90.4	71.0
2-3-8-60	1.38	27.2	0.893	24.2	48.3	17.0
2-4-6-70	2.13	27.1	0.891	24.1	84.0	28.0
3-2-1-85	1.41	44.6	0.881	39.3	117.2	25.0
3-3-1-70	0.89	52.3	0.875	45.8	92.0	45.0
3-4-2-90	2.75	26.2	0.895	23.5	96.1	135.0
3-5-1-50	1.10	57.8	0.887	51.3	96.7	87.0
3-7-1-50	3.58	25.6	0.878	22.5	226.0	200.0
6-1-1-80	2.17	31.7	0.911	28.9	46.0	26.9
6-1-1-85	2.55	26.8	0.895	24.0	80.2	58.0
8-2-2-90	2.99	17.8	0.914	16.3	35.6	71.0
8-2-4-10	4.00	13.1	0.895	11.7	70.7	72.0
8-5-1-60	2.80	22.9	0.910	20.9	50.1	64.0
8-7-3-60	3.02	22.1	0.900	19.9	73.0	34.0
2-2-6-60	3.77	21.2	0.880	18.6	194.2	150.0
3-3-1-70	0.89	52.1	0.875	45.6	91.6	26.0
3-4-2-90	2.75	26.1	0.895	23.4	95.7	92.0
3-5-1-50	1.10	57.4	0.887	50.9	95.9	14.8
6-1-1-80	2.17	31.5	0.911	28.7	45.7	26.0
6-1-1-85	2.55	26.6	0.895	23.8	79.7	54.0
7-2-3-50	4.13	19.8	0.939	18.6	13.4	17.0
8-2-2-90	2.99	17.7	0.914	16.2	35.4	44.0
8-5-1-60	2.80	22.8	0.910	20.7	49.7	23.0
8-7-3-60	3.02	22.0	0.900	19.8	72.5	33.0
2-2-6-60	3.77	21.1	0.880	18.5	193.3	145.0
6-1-1-80	2.17	31.3	0.911	28.6	45.5	21.0
7-2-3-50	4.13	19.7	0.939	18.5	13.4	17.0
8-2-2-90	2.99	17.6	0.914	16.1	35.2	37.0
8-5-1-60	2.80	22.6	0.910	20.6	49.4	23.0

Πίνακας 3.10: Δεδομένα εισόδου και αποτελέσματα ορθολογικής μεθόδου για εκτίμηση του χρόνου συγκέντρωσης με τη μέθοδο Kirpich.

Λεκάνη	t_c (h)	i (mm/h)	φ	i^* (mm/h)	Q_{sim} (m^3/s)	Q_{obs} (m^3/s)
1-1-3-95	1.32	36.9	0.858	31.7	163.0	54.0
2-2-3-95	1.17	56.8	0.829	47.1	340.6	94.0
2-2-6-60	1.58	38.7	0.837	32.4	337.3	248.0
2-3-4-80	0.81	38.2	0.824	31.5	180.5	71.0
2-3-8-60	0.33	71.7	0.823	59.0	117.3	17.0
2-4-6-70	0.86	51.4	0.850	43.7	152.4	28.0
3-2-1-85	0.40	97.8	0.816	79.8	238.1	25.0
3-3-1-70	0.19	130.3	0.785	102.3	205.7	45.0
3-4-2-90	1.54	38.9	0.872	33.9	138.7	135.0
3-5-1-50	0.33	124.5	0.828	103.1	194.3	87.0
3-7-1-50	1.95	40.7	0.850	34.6	348.2	200.0
6-1-1-80	1.09	52.4	0.887	46.5	74.1	26.9
6-1-1-85	1.35	43.1	0.869	37.4	125.3	58.0
8-2-2-90	0.91	42.3	0.869	36.7	80.4	71.0
8-2-4-10	1.16	32.7	0.838	27.5	165.3	72.0
8-5-1-60	0.97	49.7	0.869	43.2	103.8	64.0
8-7-3-60	0.50	75.7	0.812	61.5	225.3	34.0
2-2-6-60	1.58	38.5	0.837	32.2	335.8	150.0
3-3-1-70	0.19	129.8	0.785	101.9	204.8	26.0
3-4-2-90	1.54	38.7	0.872	33.7	138.1	92.0
3-5-1-50	0.33	123.5	0.828	102.3	192.8	14.8
6-1-1-80	1.09	52.1	0.887	46.2	73.7	26.0
6-1-1-85	1.35	42.8	0.869	37.2	124.4	54.0
7-2-3-50	0.73	63.4	0.887	56.3	40.7	17.0
8-2-2-90	0.91	42.1	0.869	36.6	80.0	44.0
8-5-1-60	0.97	49.3	0.869	42.9	103.0	23.0
8-7-3-60	0.50	75.2	0.812	61.1	223.9	33.0
2-2-6-60	1.58	38.3	0.837	32.1	334.3	145.0
6-1-1-80	1.09	51.8	0.887	46.0	73.3	21.0
7-2-3-50	0.73	63.1	0.887	56.0	40.5	17.0
8-2-2-90	0.91	41.9	0.869	36.4	79.6	37.0
8-5-1-60	0.97	49.0	0.869	42.6	102.3	23.0

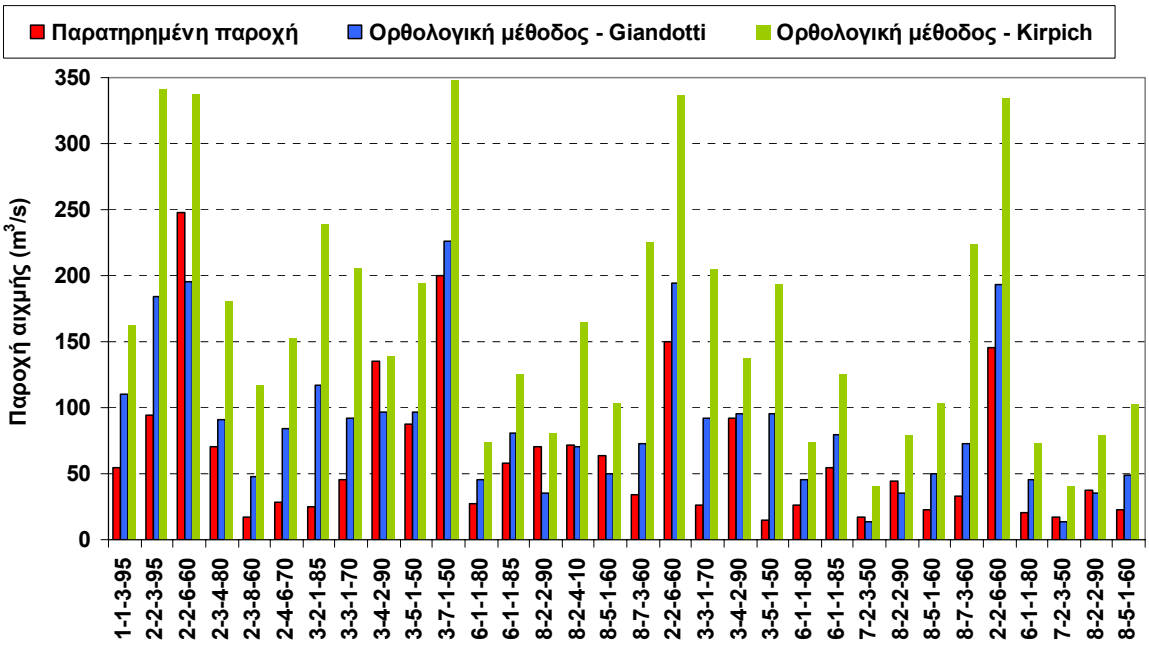
Πίνακας 3.11: Δεδομένα εισόδου και αποτελέσματα ορθολογικής μεθόδου για εκτίμηση του χρόνου συγκέντρωσης με τη μέθοδο SCS.

Λεκάνη	t_c (h)	i (mm/h)	φ	i^* (mm/h)	Q_{sim} (m^3/s)	Q_{obs} (m^3/s)
1-1-3-95	1.37	36.0	0.860	31.0	159.5	54.0
2-2-3-95	1.09	59.4	0.825	49.1	354.8	94.0
2-2-6-60	1.42	41.4	0.831	34.4	358.8	248.0
2-3-4-80	0.67	43.7	0.812	35.5	203.4	71.0
2-3-8-60	0.29	77.7	0.815	63.3	125.9	17.0
2-4-6-70	0.83	52.7	0.848	44.7	155.6	28.0
3-2-1-85	0.60	77.9	0.840	65.4	195.2	25.0
3-3-1-70	0.11	162.3	0.743	120.6	242.4	45.0
3-4-2-90	1.49	39.8	0.870	34.7	142.0	135.0
3-5-1-50	0.23	149.1	0.805	120.1	226.3	87.0
3-7-1-50	1.93	41.0	0.849	34.8	350.4	200.0
6-1-1-80	1.00	56.0	0.884	49.5	78.9	26.9
6-1-1-85	1.28	44.6	0.867	38.7	129.4	58.0
8-2-2-90	0.80	46.2	0.863	39.9	87.2	71.0
8-2-4-10	1.10	34.0	0.835	28.4	171.0	72.0
8-5-1-60	1.11	45.3	0.876	39.7	95.3	64.0
8-7-3-60	0.59	68.8	0.823	56.6	207.6	34.0
2-2-6-60	1.42	41.2	0.831	34.3	357.2	150.0
3-3-1-70	0.11	161.6	0.743	120.1	241.4	26.0
3-4-2-90	1.49	39.7	0.870	34.5	141.3	92.0
3-5-1-50	0.23	147.9	0.805	119.1	224.5	14.8
6-1-1-80	1.00	55.7	0.884	49.2	78.5	26.0
6-1-1-85	1.28	44.3	0.867	38.4	128.5	54.0
7-2-3-50	0.51	79.6	0.872	69.5	50.2	17.0
8-2-2-90	0.80	46.0	0.863	39.7	86.8	44.0
8-5-1-60	1.11	45.0	0.876	39.4	94.6	23.0
8-7-3-60	0.59	68.4	0.823	56.3	206.4	33.0
2-2-6-60	1.42	41.0	0.831	34.1	355.6	145.0
6-1-1-80	1.00	55.4	0.884	49.0	78.0	21.0
7-2-3-50	0.51	79.3	0.872	69.1	50.0	17.0
8-2-2-90	0.80	45.8	0.863	39.5	86.4	37.0
8-5-1-60	1.11	44.6	0.876	39.1	93.9	23.0

3.5.4 Αξιολόγηση μεθόδων εκτίμησης χρόνου συγκέντρωσης

Σε όρους αποτελεσματικότητας, οι μέθοδοι Passini, Giandotti, Kirpich και SCS δίνουν τιμές -116.5, 47.9, -347.5 και -402.3%, αντίστοιχα. Είναι προφανές ότι μόνο η μέθοδος Giandotti δίνει αποδεκτές προγνώσεις της παροχής αιχμής, ενώ οι άλλες τρεις αποκλίνουν δραματικά από τις ιστορικές τιμές. Συγκεκριμένα, επειδή οι μέθοδοι Passini, Kirpich και SCS εκτιμούν πολύ μικρότερους χρόνους συγκέντρωσης σε σχέση με αυτή του Giandotti, οδηγούν σε σημαντική υπερεκτίμηση των παροχών αιχμής, όπως φαίνεται και στο συγκριτικό διάγραμμα του Σχήματος 3.6. Στο διάγραμμα αντιπαραβάλλονται οι παρατηρημένες παροχές με αυτές που προκύπτουν από την ορθολογική μέθοδο, με εκτίμηση του χρόνου συγκέντρωσης κατά Giandotti και Kirpich. Σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις, η μέθοδος Kirpich δίνει διπλάσιες ή και παραπάνω εκτιμήσεις, ενώ η μέθοδος Giandotti είναι σαφώς πιο ρεαλιστική.

Βεβαίως, για την ολοκληρωμένη αξιολόγηση της επίδοσης των τεσσάρων μοντέλων πρέπει να ληφθούν υπόψη όλες οι αβεβαιότητες που εισέρχονται στην εφαρμογή της ορθολογικής μεθόδου, καθώς και τα σφάλματα των δεδομένων εισόδου (παροχές αιχμής, εντάσεις βροχής). Ωστόσο, οι εντυπωσιακές διαφορές που παρατηρούνται στα αποτελέσματα των τεσσάρων προσεγγίσεων καθιστούν προφανές ότι η πλέον σημαντική πηγή αβεβαιότητας αφορά στην εκτίμηση του χρόνου συγκέντρωσης.



Σχήμα 3.6: Σύγκριση παρατηρημένων και προσομοιωμένων παροχών αιχμής, με εκτίμηση του χρόνου συγκέντρωσης κατά Giandotti και Kirpich.

3.6 Ανάπτυξη βελτιωμένων σχέσεων εκτίμησης χρόνου συγκέντρωσης

Στις αναλύσεις που προηγήθηκαν με την ορθολογική μέθοδο, αν και η υπεροχή της μεθόδου Giandotti είναι αναμφισβήτητη, συγκριτικά με τις άλλες τρεις περιοχικές σχέσεις, η επίδοση που επιτυγχάνει, ήτοι 47.9%, είναι οριακά μόνο ικανοποιητική. Προκειμένου να βελτιωθεί η προγνωστική ικανότητα του μοντέλου εκτίμησης του χρόνου συγκέντρωσης, διατυπώθηκαν διάφορες παραμετρικές εμπειρικές σχέσεις, οι παράμετροι των οποίων βελτιστοποιήθηκαν ως προς τις 32 παρατηρημένες παροχές αιχμής. Σε όλες τις περιπτώσεις, ως κριτήριο καλής προσαρμογής θεωρήθηκε η αποτελεσματικότητα.

3.6.1 Βελτιστοποίηση συντελεστών των σχέσεων Giandotti και Kirpich

Στη διερεύνηση αυτή θεωρήθηκε η παραμετρική δομή των σχέσεων Giandotti και Kirpich, και μετά από βελτιστοποίηση των συντελεστών τους προέκυψαν οι εξής εκφράσεις:

Βελτιστοποιημένη εξίσωση Giandotti:

$$t_c = \frac{10\sqrt{A} + 0.1L}{0.867\sqrt{\Delta z}} \tag{3.15}$$

Βελτιστοποιημένη εξίσωση Kirpich:

$$t_c = 1.50\, L^{0.160} / S^{0.139} \tag{3.16}$$

Οι παραπάνω σχέσεις εμφανίζουν παρεμφερή αποτελεσματικότητα, ήτοι 72.7 και 75.0%, αντίστοιχα. Η επίδοση αυτή κρίνεται ιδιαίτερα ικανοποιητική και υποδηλώνει ότι η γενική μαθηματική δομή των εν λόγω σχέσεων είναι ορθή, απαιτείται ωστόσο προσαρμογή των παραμέτρων τους στα τοπικά χαρακτηριστικά των λεκανών απορροής ώστε να παρέχουν ρεαλιστικές εκτιμήσεις του χρόνου συγκέντρωσης. Πάντως, για το σύνολο της Κύπρου, οι σχέσεις αυτές ενδείκνυνται να εφαρμόζονται στα πλαίσια της ορθολογικής μεθόδου, και με εκτίμηση των συντελεστών απορροής με τη διαδικασία ΟΜΟΕ-ΑΣΥΕΟ, για την εκτίμηση των πλημμυρικών παροχών αιχμής.

3.6.2 Ανάπτυξη νέων εμπειρικών σχέσεων

Στη συνέχεια διερευνήθηκαν διάφορες παραμετρικές δομές, προκειμένου να επιτευχθεί ακόμα μεγαλύτερη προγνωστική ικανότητα της ορθολογικής μεθόδου. Τα αποτελέσματα των προσεγγίσεων που εξετάστηκαν συνοψίζονται στον Πίνακα 3.12. Συγκεκριμένα:

Εμπειρική σχέση 1: Θεωρήθηκε η απλούστερη δυνατή δομή, η οποία βασίζεται στον ορισμό του χρόνου συγκέντρωσης και θεωρεί μια βέλτιστη ταχύτητα ροής του νερού κατά μήκος της κύριας μισγάγκειας. Η σχέση αυτή γράφεται:

$$t_c = \frac{L}{3600\, u} \tag{3.17}$$

όπου L το μήκος της κύριας μισγάγκειας σε m και u η μέση ταχύτητα ροής σε m/s. Η εν λόγω ταχύτητα προέκυψε ίση με u = 2.2 m/s, τιμή που κρίνεται υπερβολική, καθώς περιλαμβάνει και τη ροή στο ανάντη μη διαμορφωμένο τμήμα του υδρογραφικού δικτύου (βλ. 3.2.1). Η επίδοση (σε όρους αποτελεσματικότητας) του παραπάνω μοντέλου ήταν αρνητική (-17.0%), επιβεβαιώνοντας την ακαταλληλότητά της.

Εμπειρική σχέση 2: Στην προηγούμενη σχέση, εξετάστηκε αν είναι εφικτή η εκτίμηση της ταχύτητας ροής κατά μήκος της κύριας μισγάγκειας συναρτήσει της μέγιστης κλίσης της λεκάνης, ήτοι $u = a\sqrt{S_{max}}$. Με βελτιστοποίηση της παραμέτρου a προέκυψε η σχέση:

$$t_c = \frac{L}{27036\sqrt{S_{max}}} \tag{3.18}$$

Η σχέση αυτή έδωσε ακόμα μικρότερη επίδοση, ήτοι -29.0%.

Εμπειρική σχέση 3: Θεωρείται μια στοιχειώδης παραμετρική σχέση, σύμφωνα με την οποία ο χρόνος συγκέντρωσης είναι συνάρτηση μόνο του εμβαδού της λεκάνης A (σε km^2), που μετά από βελτιστοποίηση διατυπώνεται ως εξής:

$$t_c = 0.617\sqrt{A} \tag{3.19}$$

Η παραπάνω σχέση επιτυγχάνει εντυπωσιακή (σε σχέση με την απλότητά της) επίδοση, ήτοι 72.7%.

Εμπειρική σχέση 4: Θεωρείται μια τριπαραμετρική σχέση που εκτός από την έκταση της λεκάνης, A (σε km^2), χρησιμοποιεί και το μέγιστο μήκος διαδρομής του νερού, L_{max} (σε m). Η τελική σχέση που προκύπτει μετά τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων της είναι:

$$t_c = \frac{5.0\, A^{0.47}}{L_{max}^{\;0.73}} \tag{3.20}$$

Η εν λόγω σχέση επιτυγχάνει την υψηλότερη ως τώρα αποτελεσματικότητα, 79.8%. Ωστόσο, η βελτίωσή της συγκριτικά με το προηγούμενο μονοπαραμετρκό μοντέλο είναι μικρή.

Εμπειρική σχέση 5: Θεωρείται μια παρόμοιας δομής τριπαραμετρική σχέση, με βάση την οποία προκύπτει ένας αρχικός χρόνος συγκέντρωσης (χρόνος αναφοράς) t_c, που στη συνέχεια μειώνεται συναρτήσει της περιόδου επαναφοράς, T. Μετά τη βελτιστοποίηση των τεσσάρων, συνολικά, παραμέτρων της εν λόγω διαδικασίας, προκύπτουν οι ακόλουθες εκφράσεις:

$$t_c' = t_c / T^{0.07}, \text{ όπου } t_c = \frac{3.59\, A^{0.42}}{L_{max}^{0.49}} \tag{3.21}$$

Η επίδοση της παραπάνω σχέσης ανέρχεται σε 79.9%. Παρά την εισαγωγή μιας επιπλέον παραμέτρου, η αύξηση που επιτυγχάνεται είναι ανεπαίσθητη.

Επισημαίνεται ότι η υπόθεση μείωσης του χρόνου συγκέντρωσης με την περίοδο επαναφοράς βασίζεται στη λογική ότι ο εν λόγω χρόνος είναι φθίνουσα συνάρτηση της παροχής, όπως συζητήθηκε στο εδάφιο 3.2.1. Επειδή, ωστόσο, τα δύο μεγέθη (χρόνος συγκέντρωσης και παροχή) είναι αλληλοεξαρτώμενα, προκειμένου να διατυπωθεί μια ρητή έκφραση, θεωρείται αντί της παροχής αιχμής η περίοδος επαναφοράς, της οποίας είναι αύξουσα συνάρτηση.

Εμπειρική σχέση 6: Εξετάζεται μια εναλλακτική δομή που χρησιμοποιεί τρία μεγέθη, την έκταση, A (σε km^2), τη μέγιστη διαδρομή νερού στη λεκάνη, L_{max} (σε m), και την κλίση ανάμεσα στο πιο απομακρυσμένο σημείο και την έξοδο της λεκάνης, S. Όπως και προηγουμένως, θεωρείται μείωση του χρόνου συγκέντρωσης συναρτήσει της περιόδου επαναφοράς, αλλά και μείωση του εκτιμώμενου συντελεστή απορροής κατά τις προδιαγραφές των ΟΜΟΕ-ΑΣΥΕΟ στο μισό, ήτοι $c' = 0.5\, c$. Η μείωση αυτή κρίνεται εύλογη, δεδομένου ότι οι τιμές που προκύπτουν για το σύνολο σχεδόν των λεκανών απορροής κυμαίνονται σε αρκετά υψηλά επίπεδα, της τάξης του 0.40-0.50 (Πίνακας 3.5).

Η τελική έκφραση που προκύπτει είναι:

$$t_c' = t_c / T^{0.20}, \text{ όπου } t_c = \frac{2.03\, (A/L_{max})^{0.40}}{S^{0.01}} \tag{3.22}$$

Η επίδοση της παραπάνω σχέσης ανέρχεται στα ίδια επίπεδα με προηγουμένως, ήτοι 79.0%.

Εμπειρική σχέση 7: Η έκφραση στον παρονομαστή, που αποτελεί ένα μέτρο ταχύτητας, διατυπώνεται στο μορφή:

$$u = \mathrm{CN}^{\lambda} \sqrt{S} \tag{3.23}$$

όπου S η κλίση ανάμεσα στο πιο απομακρυσμένο σημείο και την έξοδο της λεκάνης, CN ο αριθμός καμπύλης απορροής και λ παράμετρος. Στην εμπειρική αυτή έκφραση, η παράμετρος CN χρησιμοποιείται ως μέτρο της τραχύτητας του εδάφους, που μαζί με την κλίση αποτελούν τα βασικά χαρακτηριστικά προσδιορισμού της ταχύτητας σε ένα υδραυλικό μέσο.

Με βάση την παραπάνω υπόθεση, λαμβάνοντας $c' = 0.5\, c$, προκύπτει η βελτιστοποιημένη διατύπωση του χρόνου συγκέντρωσης:

$$t_c' = t_c / T^{0.20}, \text{ όπου } t_c = \frac{3.74\, (A/L_{max})^{0.27}}{\mathrm{CN}^{0.43} \sqrt{S}} \tag{3.24}$$

Και σε αυτή την περίπτωση, η αποτελεσματικότητα του μοντέλου διατηρείται σε παρόμοια επίπεδα, συγκεκριμένα 76.0%.

Εμπειρική σχέση 8: Εφαρμόζεται μιας παρόμοιας παραμετρικής δομής έκφραση για το χρόνο συγκέντρωσης, ενώ εισάγεται μια συνάρτηση μεταβολής (αύξησης) του συντελεστή απορροής συναρτήσει της περιόδου επαναφοράς. Η αύξηση αυτή αιτιολογείται από το γεγονός ότι το ποσοστό της ενεργού βροχόπτωσης είναι αύξουσα συνάρτηση της έντασης

βροχής (που με τη σειρά της είναι αύξουσα συνάρτηση της περιόδου επαναφοράς), καθώς περιορίζεται η διηθητικότητα του εδάφους.

Μετά τη βελτιστοποίηση των έξι, συνολικά, παραμέτρων του συνδυαστικού μοντέλου του χρόνου συγκέντρωσης και συντελεστή απορροής, προκύπτουν οι εξής σχέσεις:

$$t_c' = t_c / T^{0.02}, \text{ όπου } t_c = \frac{4.23\,(A/L_{max})^{0.43}}{CN^{0.29}\sqrt{S}} \tag{3.25}$$

$$c' = 0.43\,c + 0.10\ln(T) \tag{3.26}$$

Η επίδοση του παραπάνω μοντέλου ανέρχεται σε 79.7%.

Πίνακας 3.12: Εφαρμογή εμπειρικών σχέσεων εκτίμησης του χρόνου συγκέντρωσης στα πλαίσια της ορθολογικής μεθόδου, με βελτιστοποίηση των παραμέτρων τους.

α/α	Εξίσωση χρόνου συγκέντρωσης t_c	Αναγωγή χρόνου συγκέντρωσης	Συντελεστής απορροής	Αποτελεσματικότητα
1	$\frac{L}{3600\,u}$, $u = 2.2$ m/s	-	ΟΜΟΕ-ΑΣΥΕΟ	-.0170
2	$\frac{L}{27036\sqrt{S_{max}}}$	-	ΟΜΟΕ-ΑΣΥΕΟ	-0.290
3	$0.617\sqrt{A}$	-	ΟΜΟΕ-ΑΣΥΕΟ	0.727
4	$\frac{5.0\,A^{0.47}}{L_{max}^{0.73}}$	-	ΟΜΟΕ-ΑΣΥΕΟ	0.798
5	$\frac{3.59\,A^{0.42}}{L_{max}^{0.49}}$	$t_c' = t_c / T^{0.07}$	ΟΜΟΕ-ΑΣΥΕΟ	0.799
6	$\frac{2.03\,(A/L_{max})^{0.40}}{S^{0.01}}$	$t_c' = t_c / T^{0.20}$	$c' = 0.5\,c$	0.790
7	$\frac{3.74\,(A/L_{max})^{0.27}}{CN^{0.43}\sqrt{S}}$	$t_c' = t_c / T^{0.20}$	$c' = 0.5\,c$	0.760
8	$\frac{4.23\,(A/L_{max})^{0.43}}{CN^{0.29}\sqrt{S}}$	$t_c' = t_c / T^{0.02}$	$c' = 0.43\,c + 0.10\ln(T)$	0.797

3.7 Μείωση χρόνου συγκέντρωσης συναρτήσει της έντασης βροχής

Προκειμένου να ληφθεί υπόψη η εξάρτηση του χρόνου συγκέντρωσης από την πλημμυρική απορροή (δεδομένου ότι ο χρόνος αυτός μειώνεται με την αύξηση της παροχής, όπως εξηγήθηκε παραπάνω), αναπτύχθηκε μια εμπειρική σχέση που βασίζεται στις εξής υποθέσεις:

- Ο χρόνος συγκέντρωσης δίνεται από τη σχέση $t_c = L / u$, όπου L ένα χαρακτηριστικό μήκος διαδρομής στην επιφάνεια της λεκάνης και u μια μέση ταχύτητα ροής.
- Η παροχή q θεωρείται ανάλογη της έντασης βροχής i.
- Η διαδρομή στην επιφάνεια της λεκάνης αναπαρίσταται ως ροή με ελεύθερη επιφάνεια σε έναν ορθογωνικό αγωγό μεγάλου πλάτους, b, και βάθους ροής y, τέτοιου ώστε $b >> y$.
- Η ταχύτητα u συνδέονται με το βάθος ροής y μέσω της σχέσης του Manning:

$$u = \frac{1}{n} R^{2/3} J^{1/2} \tag{3.27}$$

όπου n ο συντελεστής τραχύτητας, J η κατά μήκος κλίση του αγωγού, και R η υδραυλική ακτίνα, που δίνεται από τη σχέση:

$$R = \frac{A}{\Pi} = \frac{by}{b + 2y} \approx b \tag{3.28}$$

όπου A η επιφάνεια της υγρής διατομής και Π η βρεχόμενη περίμετρος. Η παροχή συνδέεται με την ταχύτητα μέσω της σχέσης:

$$q = A\,u = b\,y\,u = b\,y\,L\,/\,t_c \tag{3.29}$$

Σύμφωνα με τις παραπάνω υποθέσεις, αν έχουμε δύο επεισόδια βροχής έντασης i_1 και i_2, από τα οποία προκύπτουν οι πλημμυρικές παροχές q_1 και q_2, αντίστοιχα, τότε ισχύει:

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{q_1}{q_2} = \frac{y_1}{y_2}\frac{t_{c2}}{t_{c1}} \tag{3.30}$$

Ακόμη, από την εφαρμογή της σχέσης του Manning προκύπτει:

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{t_{c2}}{t_{c1}} = \left(\frac{y_1}{y_2}\right)^{2/3} \Leftrightarrow \frac{y_1}{y_2} = \left(\frac{t_{c2}}{t_{c1}}\right)^{3/2} \tag{3.31}$$

Συνδυάζοντας τα παραπάνω προκύπτει η ακόλουθη σχέση αναλογίας:

$$\frac{i_1}{i_2} = \left(\frac{t_{c2}}{t_{c1}}\right)^{5/2} \tag{3.32}$$

που συνδέει τον χρόνο συγκέντρωσης με την ένταση βροχής.

Σε πρακτικό επίπεδο, συστήνεται η μείωση του χρόνου που προκύπτει από την σχέση του Giandotti, σύμφωνα με την ακόλουθη εμπειρική σχέση, που είναι μια απλοποιημένη εκδοχή της (3.32):

$$t_c(T) = t_c \sqrt{i(5)\,/\,i(T)} \tag{3.33}$$

όπου $i(5)$ η κρίσιμη ένταση βροχής που αντιστοιχεί σε περίοδο επαναφοράς $T = 5$ έτη, για την οποία θεωρείται αντιπροσωπευτική η εκτίμηση του χρόνου συγκέντρωσης κατά Giandotti, και $i(T)$ η ένταση βροχής που αντιστοιχεί στην περίοδο επαναφοράς της μελέτης.

3.8 Συμπεράσματα

Πραγματοποιήθηκε εκτενής ανάλυση των παρατηρημένων πλημμυρικών παροχών σε ένα μεγάλο εύρος λεκανών απορροής της Κύπρου, και της συσχέτισής τους με τα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά των λεκανών απορροής. Από τις αναλύσεις επιβεβαιώθηκε ότι η ορθολογική μέθοδος, στην οποία ο χρόνος συγκέντρωσης εκτιμάται με τη μέθοδο Giandotti, μπορεί να αναπαράξει με αρκετά ικανοποιητική ακρίβεια τις παροχές αιχμής, και συνεπώς ενδείκνυται η χρήση της για υδρολογικό σχεδιασμό, τουλάχιστον σε επίπεδο προκαταρκτικής διερεύνησης.

Για τη βελτίωση της προγνωστικής ικανότητας της ορθολογικής μεθόδου, εξετάστηκαν διάφορες εμπειρικές σχέσεις εκτίμησης του χρόνου συγκέντρωσης, προσαρμοσμένες στα τοπικά χαρακτηριστικά της ευρύτερης περιοχής της Κύπρου. Λόγω της βελτιστοποίησης των παραμέτρων τους, οι σχέσεις αυτές αναπαράγουν με πολύ καλή ακρίβεια τις παρατηρημένες παροχές αιχμής. Ωστόσο, από την εφαρμογή πιο πολύπλοκων παραμετρικών σχέσεων, σε μια απόπειρα καλύτερης φυσικής περιγραφής του χρόνου συγκέντρωσης, προέκυψε οριακή μόνο βελτίωση, σε σχέση με τις απλούστερες παραμετρικές δομές.

Ακόμη, εξετάστηκε η διατύπωση μιας θεωρητικά εδραιωμένης σχέσης που συνδέει τον χρόνο συγκέντρωσης με την ένταση βροχής, που επιτρέπει την ορθότερη αποτύπωση της μη γραμμικότητας της σχέσης μεταξύ της βροχής και της πλημμυρικής απορροής, η οποία οφείλεται, μεταξύ άλλων, στην εξάρτηση του χρόνου συγκέντρωσης από τα χαρακτηριστικά της ροής. Τελικά, προέκυψε η σχέση αναλογίας (3.32), που με τη σειρά της καταλήγει στην απλοποιημένη έκφραση (3.33), η οποία είναι κατάλληλη για μελέτες σχεδιασμού. Σύμφωνα με αυτή, ο χρόνος συγκέντρωσης, καθώς και όλα τα μεγέθη που σχετίζονται με αυτόν (π.χ., διάρκεια υετογραφήματος σχεδιασμού, χρονικές παράμετροι μοναδιαίου υδρογραφήματος), θεωρούνται μεταβλητά μεγέθη, που εξαρτώνται από την κρίσιμη ένταση βροχής. Στην πράξη, εφαρμόζεται μια σχέση διόρθωσης του χρόνου που εκτιμάται κατά Giandotti, που θεωρείται αντιπροσωπευτικός για επεισόδια μικρής περιόδου επαναφοράς, της τάξης των 5 ετών.

4 Επισκόπηση και θεωρητική διερεύνηση μεθόδου SCS-CN για την εκτίμηση των υδρολογικών ελλειμμάτων

4.1 Σκοπός και μεθοδολογία

Ο μετασχηματισμός της βροχόπτωσης σε πλημμυρική απορροή προϋποθέτει την εκτίμηση των υδρολογικών ελλειμμάτων, δηλαδή του τμήματος της βροχής που αρχικά κατακρατείται στο έδαφος και τη βλάστηση και, στη συνέχεια, είτε εξατμίζεται είτε διηθείται. Γνωρίζοντας τη χρονική εξέλιξη του επεισοδίου βροχής και τα συνολικά ελλείμματα, μπορεί να προσδιοριστεί το τμήμα της ολικής βροχόπτωσης που μετατρέπεται σε απορροή, γνωστό και ως *ενεργός βροχόπτωση* (effective rainfall) ή *πλεόνασμα βροχόπτωσης* (rainfall excess).

Η πλέον διαδεδομένη διαδικασία εκτίμησης της ενεργού βροχόπτωσης, είτε με είσοδο παρατηρημένα επεισόδια καταιγίδων ή υποθετικά «συνθετικά» επεισόδια που εφαρμόζονται στον υδρολογικό σχεδιασμό (π.χ. υετογραφήματα εναλλασσόμενων μπλοκ), βασίζεται στη λεγόμενη μέθοδο του αριθμού καμπύλης απορροής, η οποία αναπτύχθηκε το 1954 από τη Soil Conservation Service (SCS, 1972), Η μέθοδος, που στο εξής θα αναφέρεται ως SCS-CN, επικαιροποιήθηκε πρόσφατα από τη National Resources Conservation Service (NRCS, 2008).

4.2 Συνοπτική επισκόπησης της μεθόδου SCS-CN

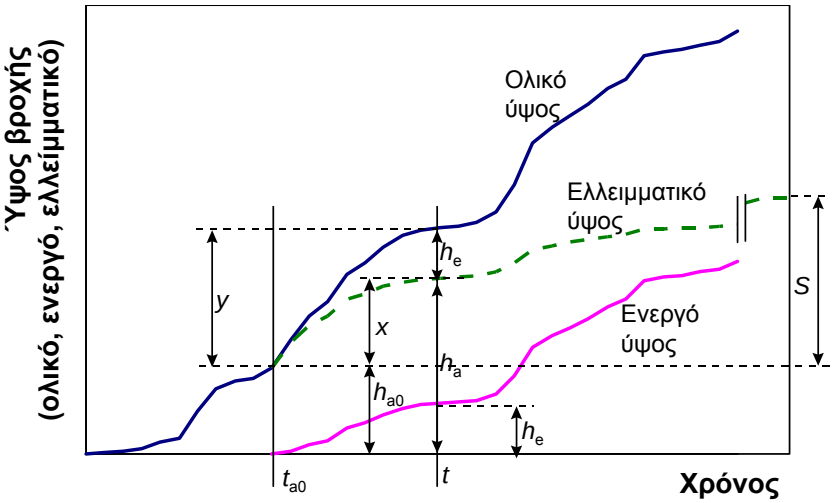
4.2.1 Υπολογιστική διαδικασία

Η μέθοδος περιγράφει τη χρονική εξέλιξη των υδρολογικών ελλειμμάτων στη διάρκεια του επεισοδίου βροχής, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\frac{F}{S} = \frac{h_e}{h - h_{a0}} \tag{4.1}$$

όπου F η πραγματική κατακράτηση, S η μέγιστη δυνητική κατακράτηση (potential maximum retention), h_e η ενεργός βροχόπτωση (απορροή), h η συνολική βροχόπτωση και h_{a0} το αρχικό έλλειμμα, λόγω κατακράτησης, διήθησης, επιφανειακής αποθήκευσης, κτλ. Η εννοιολογική διαδικασία, η οποία απεικονίζεται στο Σχήμα 4.1, βασίζεται στις ακόλουθες παραδοχές (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999, σ. 274-278):

- Για ένα αρχικό διάστημα $t_{\alpha 0}$, το σύνολο της βροχόπτωσης μετατρέπεται εξ ολοκλήρου σε έλλειμμα, χωρίς να δίνει καθόλου ενεργή βροχόπτωση. Κατά συνέπεια, μετά το χρόνο $t_{\alpha 0}$, το μέγιστο ύψος ενεργού βροχόπτωσης (απορροής) h_e δεν μπορεί να υπερβεί το δυνητικό μέγεθος $h - h_{a0}$, όπου h το ολικό ύψος βροχής.
- Το επιπλέον, πέραν του αρχικού h_{a0}, ελλειμματικό ύψος κατά τη διάρκεια μιας μεγάλης βροχόπτωσης δεν μπορεί να ξεπεράσει τη μέγιστη δυνητική κατακράτηση S.
- Σε κάθε χρονική στιγμή $t > t_{\alpha 0}$, οι λόγοι του ενεργού (καθαρού) ύψους βροχής h_e και του ελλειμματικού μείον το αρχικό έλλειμμα ($h_a - h_{a0}$), προς τα αντίστοιχα δυνητικά μεγέθη ($h - h_{a0}$ και S, αντίστοιχα), είναι ίσοι.



Σχήμα 4.1: Διευκρινιστικό σκαρίφημα για τη μέθοδο εκτίμησης ελλειμμάτων σύμφωνα με τη μέθοδο SCS-CN (Πηγή: Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999, σ. 275).

Βάσει των παραπάνω παραδοχών, και θέτοντας $F = h - h_e$, προκύπτει η εμπειρική σχέση:

$$h_e = \begin{cases} 0 & h \le h_{a0} \\ \dfrac{(h - h_{a0})^2}{h - h_{a0} + S} & h > h_{a0} \end{cases} \tag{4.2}$$

Η παραπάνω σχέση χρησιμοποιεί δύο παραμέτρους, τη μέγιστη δυνητική κατακράτηση S και τις αρχικές απώλειες h_{a0}, που μπορούν να εκφραστούν ως ποσοστό του S, ήτοι:

$$h_{a0} = \alpha\, S \tag{4.3}$$

όπου α το ποσοστό των αρχικών απωλειών. Στη βιβλιογραφία συστήνεται η γενική εφαρμογή ποσοστού 20%, οπότε $h_{a0} = 0.20\, S$. Η τιμή αυτή έχει προκύψει ως μέσος όρος του 50% των παρατηρήσεων πεδίου (κυρίως από μετρήσεις διήθησης σε μικρές αγροτικές λεκάνες στις ΗΠΑ), που κυμαίνεται από 0.095 ως 0.38 (Ponce and Hawkins, 1996).

Η παράμετρος S συνδέεται με ένα άλλο χαρακτηριστικό μέγεθος της λεκάνης, που καλείται *αριθμός καμπύλης απορροής* (curve number, CN), σύμφωνα με την εμπειρική σχέση:

$$S = 254\left(\frac{100}{\mathrm{CN}} - 1\right) \tag{4.4}$$

Ο αριθμός καμπύλης απορροής προτάθηκε και χρησιμοποιήθηκε από την SCS προκειμένου να συμπυκνώσει τα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά της λεκάνης σε μια μοναδική αντιπροσωπευτική τιμή. Η παράμετρος CN παίρνει τιμές από 0 μέχρι 100, και επηρεάζεται από τις συνθήκες εδάφους, τις χρήσεις γης, και τις προηγούμενες συνθήκες εδαφικής υγρασίας στη λεκάνη απορροής. Στα πλαίσια του υδρολογικού σχεδιασμού, η τιμή του εκτιμάται από πίνακες αναφοράς, με βάση τα παραπάνω χαρακτηριστικά (βλ. 4.2.2).

Με την έκφραση των αρχικών απωλειών ως ποσοστό α, η (4.2) γράφεται:

$$h_e = \begin{cases} 0 & h \le \alpha\, S \\ \dfrac{(h - \alpha\, S)^2}{h + (1 - \alpha)\, S} & h > \alpha\, S \end{cases} \tag{4.5}$$

που για $\alpha = 0.20$ γράφεται:

$$h_e = \begin{cases} 0 & h \leq 0.2\,S \\ \dfrac{(h - 0.2\,S)^2}{h + 0.8\,S} & h > 0.2\,S \end{cases} \tag{4.6}$$

Από την σχέση (4.6) προκύπτει ότι το τελικό ύψος ελλειμμάτων στη διάρκεια του επεισοδίου, μπορεί να φτάσει ασυμπτωτικά, για βροχόπτωση πολύ μεγάλου ύψους, την τιμή 1.2 *S*.

Αν και η γενικευμένη σχέση (4.5) αναπτύχθηκε αρχικά για την εκτίμηση της απορροής που παράγεται από βροχόπτωση ολικού ύψους *h* και διάρκειας 24 h, θεωρείται ότι μπορεί να εφαρμοστεί για οποιουδήποτε διάρκεια καταιγίδας και μάλιστα όχι μόνο για το τελικό ύψος βροχής, αλλά και για ενδιάμεσες τιμές του. Με τον τρόπο αυτό, μπορεί να απεικονιστεί η χρονική εξέλιξη του φαινομένου, παράγοντας έτσι το πλήρες ενεργό υετογράφημα, για δεδομένη χρονοσειρά αθροιστικών υψών βροχής (ολικό υετογράφημα). Βεβαίως, η πρακτική αυτή, η οποία εφαρμόζεται κατά κόρον στον υδρολογικό σχεδιασμό, δεν είναι συνεπής με τη φυσική του φαινομένου της διήθησης (γενικότερα, το εννοιολογικό υπόβαθρο της μεθόδου SCS-CN δεν είναι απολύτως συνεπές με την πραγματικότητα[1]) Για το λόγο αυτό, έχουν προταθεί συνδυαστικές προσεγγίσεις, στις οποίες η σχέση (4.2) εφαρμόζεται αποκλειστικά για την εκτίμηση του ολικού ύψους απορροής (όπως προβλέπεται από την αρχική υπόθεση της μεθόδου), ενώ η χρονική κατανομή των επιμέρους υψών επιφανειακής απορροής εκτιμάται από συνεπέστερα μοντέλα διήθησης, όπως π.χ. το μοντέλο φυσικής βάσης Green-Ampt (Grimaldi *et al.*, 2013).

4.2.2 Εκτίμηση μέγιστης δυνητικής κατακράτησης από μετρημένα επεισόδια

Αν είναι γνωστά το ολικό ύψος βροχής, *h*, και το ολικό ύψος επιφανειακής απορροής, h_e, μπορεί να εκτιμηθεί η μέγιστη δυνητική κατακράτηση, *S*, με αντίστροφη επίλυση της σχέσης (4.6), από την οποία προκύπτει:

$$S = 5\,h + 10\,h_e - 10\sqrt{h_e\,(h_e + 1.25\,h)} \tag{4.7}$$

Η παραπάνω σχέση βασίζεται στην υπόθεση ποσοστού αρχικών απωλειών $\alpha = 0.20$, η οποία αποτελεί παραδοχή. Για τυχαία τιμή του α, προκύπτει η γενικευμένη σχέση:

$$S = \frac{2\alpha h + (1-\alpha)\,h_e - \sqrt{h_e\,[h_e\,(1-\alpha)^2 + 4\,\alpha\,h]}}{2\alpha^2} \tag{4.8}$$

Συνεπώς, ακόμα και αν είναι γνωστό το ολικό ύψος επιφανειακής απορροής (κάτι που επίσης απαιτεί κάποιες παραδοχές, προκειμένου να διαχωριστεί η βασική ροή από το συνολικό πλημμυρογράφημα), δεν είναι δυνατός ο απευθείας προσδιορισμός της μέγιστης δυνητικής κατακράτησης, και συνακόλουθα του αριθμού καμπύλης απορροής. Αν θεωρηθεί μικρότερο ποσοστό αρχικών απωλειών σε σχέση με την προτεινόμενη βιβλιογραφική τιμή $\alpha = 0.20$, τότε θα πρέπει να εφαρμοστεί μεγαλύτερη τιμή της χωρητικότητας *S*, ώστε να διατηρηθεί ο ίδιος

[1] Η μέθοδος SCS-CN βασίζεται στην έννοια της κυριαρχίας της επιφανειακής απορροής, με βάση του υπόδειγμα του Horton (1933), ενώ ήδη από τη δεκαετία του 1960 έχει αποδειχθεί ότι το μεγαλύτερο ποσοστό της απορροής οφείλεται στην υποδερμική ροή. Κλασικές εργασίες που αντικρούουν την υπόθεση Horton, αναδεικνύοντας το ρόλο της υποδερμικής ροής, είναι αυτές των Hewlett (1961), Betson (1964), Hewlett and Hibbert (1967), Dunne and Black (1970), Freeze (1972), Knisel (1973), κ.ά. Νεότερες προσεγγίσεις αποδεικνύουν ότι κατά τον μετασχηματισμό της βροχής σε απορροή εισέρχονται ακόμα πιο σύνθετες διεργασίες, όπως η προνομιακές ροές (Beven and German, 1982), φαινόμενα υστερήσεων και αναρρυθμίσεων (McDonnell, 2003), και μηχανισμοί κατωφλίου, σύμφωνα με την υπόθεση πλήρωσης-υπερχείλισης (Tromp-van Meerveld and McDonnell, 2006). Λεπτομερής επισκόπηση γίνεται στην εργασία των Μπαλούτσου και Ρούσσου (2014).

όγκος πλημμυρογραφήματος. Κατ' αντιστοιχία, για τον σχεδιασμό θα πρέπει να εφαρμοστεί μικρότερη τιμή της παραμέτρου CN, δεδομένου ότι σύμφωνα με τη σχέση (4.12), τα μεγέθη *S* και CN είναι αντιστρόφως ανάλογα. Η αναλυτική διαδικασία αναγωγής των μεγεθών για τυχαίες τιμές αρχικών απωλειών περιγράφεται στο εδάφιο 4.3.2.

4.2.3 Εκτίμηση μέγιστης δυνητικής κατακράτησης σε λεκάνες χωρίς μετρήσεις

Όπως αναφέρθηκε στο εδάφιο 4.2.1, σε λεκάνες χωρίς μετρήσεις πλημμυρικών απορροών η μέγιστη δυνητική κατακράτηση, *S*, μπορεί να εκτιμηθεί μόνο έμμεσα, μέσω του αριθμού καμπύλης απορροής, CN. Σύμφωνα με την κλασική θεώρηση της SCS, η παράμετρος CN εξαρτάται από τον *υδρολογικό τύπο εδάφους*, που εκτιμάται με βάση τη διαπερατότητα και τις χρήσεις γης, και τις *προηγούμενες συνθήκες εδαφικής υγρασίας* στη λεκάνη.

Ειδικότερα, η SCS ορίζει τέσσερεις κλάσεις διαπερατότητας, ήτοι:

Ομάδα A: Εδάφη με μεγάλους ρυθμούς διήθησης, π.χ. αμμώδη και χαλικώδη με πολύ μικρό ποσοστό ιλύος και αργίλου.

Ομάδα B: Εδάφη με μέσους ρυθμούς διήθησης, π.χ. αμμώδης πηλός.

Ομάδα C: Εδάφη με μικρούς ρυθμούς διήθησης, π.χ. εδάφη από αργιλοπηλό, εδάφη με σημαντικό ποσοστό αργίλου, εδάφη φτωχά σε οργανικό υλικό.

Ομάδα D: Εδάφη με πολύ μικρούς ρυθμούς διήθησης, π.χ. εδάφη που διογκώνονται σημαντικά όταν διαβραχούν, πλαστικές άργιλοι, εδάφη μικρού βάθους με σχεδόν αδιαπέρατους ορίζοντες κοντά στην επιφάνεια.

Ακόμη, η SCS θεωρεί τρεις καταστάσεις προηγούμενης κατάστασης υγρασίας του εδάφους, ήτοι τύπου I (ξηρές), τύπου II (μέσες) και τύπου III (υγρές). Αυτές ορίζονται με βάση κάποια κατώφλια αθροιστικής βροχόπτωσης των προηγούμενων πέντε ημερών, ως εξής:

Τύπος I: Ξηρές συνθήκες (εδάφη ξηρά, αλλά πάνω από το σημείο μαρασμού), που αντιστοιχούν σε βροχόπτωση προηγούμενων 5 ημερών μικρότερη των 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 35-53 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).

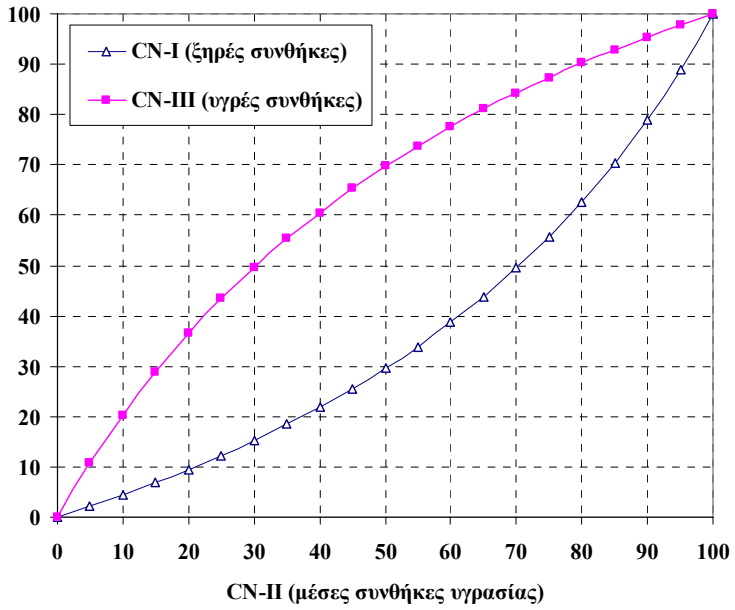
Για τις συνθήκες υγρασίας τύπου II, η SCS δίνει αναλυτικούς πίνακες με τιμές του CN για κάθε υδρολογική ομάδα εδαφών και για διάφορες χρήσεις γης (π.χ. όπως στον Πίνακα 4.1). Οι συνθήκες υγρασίας II και οι αντίστοιχες τιμές του CN θεωρούνται αντιπροσωπευτικές του 50% των πλημμυρικών επεισοδίων. Η τιμή που αντιστοιχεί σε μέσες συνθήκες υγρασίας (τύπου II) ανάγεται στις άλλες δύο τυπικές συνθήκες αρχικής εδαφικής υγρασίας (ξηρές, τύπου I, και υγρές, τύπου III), σύμφωνα με τις εμπειρικές σχέσεις:

$$CN_I = \frac{4.2\ CN_{II}}{10 - 0.058\ CN_{II}} \tag{4.9}$$

$$CN_{III} = \frac{23\ CN_{II}}{10 + 0.13\ CN_{II}} \tag{4.10}$$

Πίνακας 4.1: Αντιπροσωπευτικές τιμές αριθμού καμπύλης απορροής (CN) κατά SCS για αγροτικές, ημιαστικές και αστικές περιοχές και για προηγούμενες συνθήκες υγρασίας τύπου ΙΙ (Πηγή: Κουτσογιάννης, 2011, σ. 126).

Περιγραφή χρήσης γης		Υδρολογικός τύπος εδάφους			
		A	B	C	D
Καλλιεργημένες εκτάσεις		62-72	71-81	78-88	81-91
Λιβάδια, βοσκότοποι		30-68	58-79	71-86	78-89
Δάση		25-45	55-66	70-77	77-83
Ανοιχτοί χώροι, πάρκα, νεκροταφεία κτλ.					
με κάλυψη από πράσινο > 75%		39	61	74	80
με κάλυψη από πράσινο < 75%		49	69	79	84
Εμπορικές περιοχές		89	92	94	95
Βιομηχανικές περιοχές (72% αδιαπέρατες)		81	88	91	93
Οικιστικές περιοχές					
Μέσο μέγεθος οικοπέδου (στρ.)	Ποσοστό αδιαπέρατης επιφάνειας (%)				
≤ 0.5	65	77	85	90	92
1.0	38	61	75	83	87
1.5	30	57	72	81	86
2.0	25	54	70	80	85
4.0	20	51	68	79	84
Δρόμοι					
με οδόστρωμα και αγωγούς ομβρίων		98	98	98	98
χαλικόστρωτοι		76	85	89	91
χωματόδρομοι		72	82	87	89



Σχήμα 4.2: Μεταβολή αριθμού καμπύλης απορροής για διάφορες καταστάσεις αρχικής υγρασίας του εδάφους.

Οι παραπάνω σχέσεις, οι οποίες παρίστανται γραφικά στο Σχήμα 4.2, αντιστοιχούν σε τιμές του CN που έχουν προκύψει με βάση το 90% και 10% ποσοστημόριο των παρατηρημένων πλημμυρικών επεισοδίων. Σε κάθε περίπτωση, όλες αυτές οι εκτιμήσεις, καθώς και η εξαγωγής των σχέσεων μεταβολής του CN για ξηρές και υγρές συνθήκες αρχικής υγρασίας, έχουν βασιστεί στην υπόθεση ότι οι αρχικές απώλειες ανέρχονται στο 20% της μέγιστης δυνητικής κατακράτησης του εδάφους.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η παράμετρος CN κυμαίνεται μεταξύ 0 μέχρι 100. Στην πράξη ωστόσο, δεν εφαρμόζονται τιμές χαμηλότερες του 40 (που αντιστοιχεί σε μέγιστη δυνητική κατακράτηση 380 mm), καθώς δεν υπάρχει εμπειρία για την εφαρμογή της μεθόδου SCS-CN σε τέτοιου τύπου λεκάνες. Είναι ενδιαφέρον το γεγονός ότι στον Πίνακα 4.1 δίνεται ότι για τύπους εδάφους A (εδάφη με μεγάλους ρυθμούς διήθησης) με δασική κάλυψη, η τιμή του CN εκτιμάται σε ένα εύρος από 25 έως 45. Τόσο χαμηλές τιμές του CN συνεπάγονται, με τη σειρά τους, πολύ χαμηλή παραγωγή επιφανειακής απορροής, όπως πράγματι παρατηρείται σε δασικές περιοχές καθώς και σε εδάφη πολύ υψηλής περατότητας. Σε τέτοιες λεκάνες, οι υποθέσεις της μεθόδου SCS-CN έχουν τύχει έντονης αμφισβήτησης, ήδη από τη δεκαετία του 1960 (για συνοπτική κριτική επισκόπηση βλ. Efstratiadis *et al.*, 2014).

4.3 Θεωρητικές αναλύσεις

4.3.1 Συσχέτιση συντελεστή απορροής και αριθμού καμπύλης απορροής

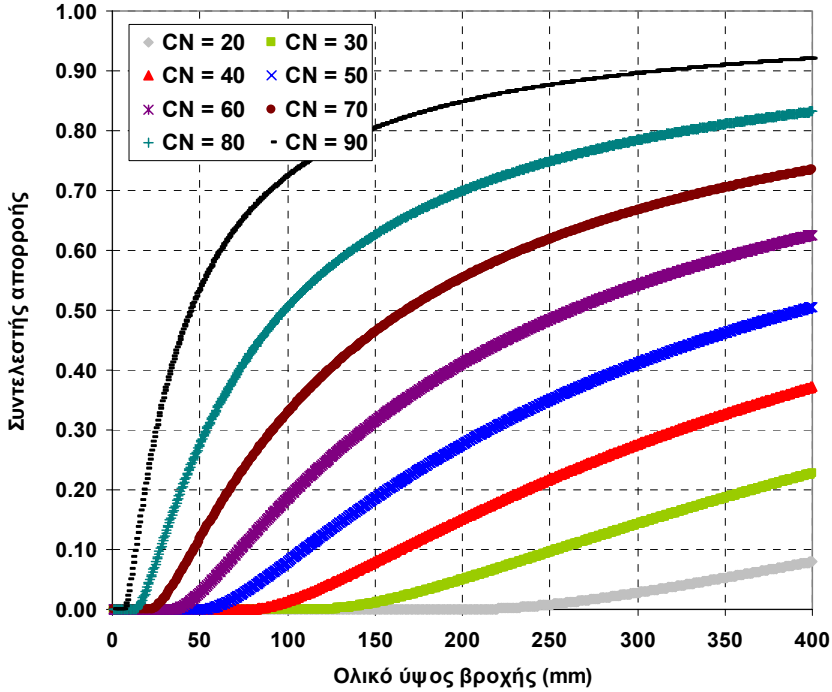
Στη χρονική κλίμακα του πλημμυρικού επεισοδίου, ο συντελεστής απορροής ορίζεται ως ο λόγος του συνολικού ύψους επιφανειακής απορροής προς το συνολικό ύψος βροχόπτωσης:

$$c = h_e / h \tag{4.11}$$

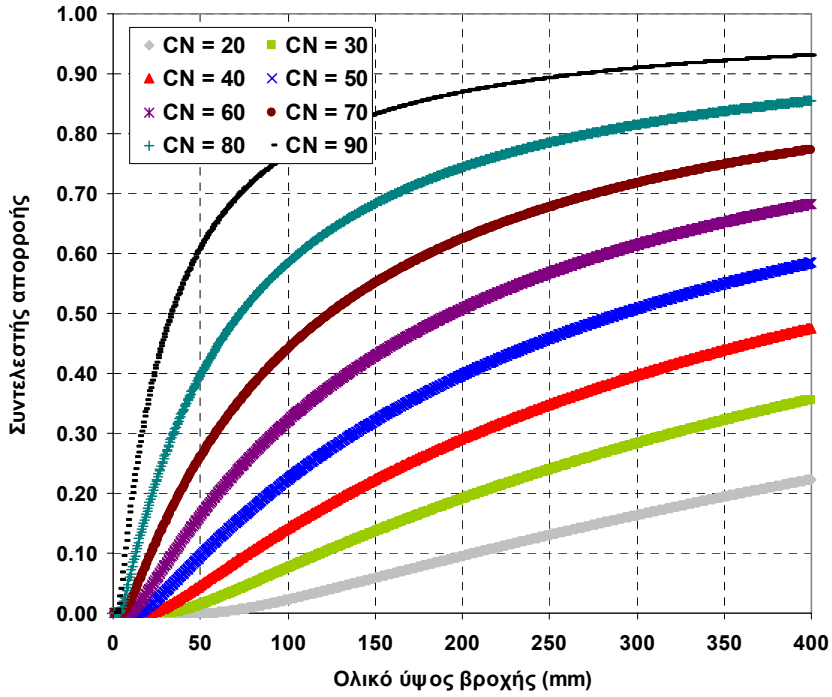
Απλοποιημένα μοντέλα πλημμυρών, όπως η ορθολογικής μέθοδος, βασίζονται στην υπόθεση σταθερού συντελεστή απορροής. Στα μοντέλα αυτά, ο εν λόγω συντελεστής αντιμετωπίζεται ως χαρακτηριστική παράμετρος της λεκάνης, που δεν εξαρτάται ούτε από το μέγεθος του επεισοδίου καταιγίδας ούτε από τη χρονική κατανομή του. Προφανώς αυτό δεν έχει φυσική συνέπεια, καθώς είναι γνωστό ότι ο ρυθμός παραγωγής της απορροής (και συνεπώς ο συντελεστής απορροής) μεταβάλλεται όχι μόνο από επεισόδιο σε επεισόδιο, αλλά και κατά τη διάρκεια του ίδιου του πλημμυρικού επεισοδίου. Ειδικότερα, όσο αυξάνει η αποθηκευμένη υγρασία στην ακόρεστη ζώνη, τόσο μειώνεται η διηθητική ικανότητα του εδάφους, και κατά συνέπεια αυξάνει η απορροή. Ομοίως, με την αύξηση της υγρασίας του εδάφους αυξάνει και η υποδερμική ροή, που μπορεί απολοποιητικά να παρασταθεί ως εκφόρτιση μέσω γραμμικού ταμιευτήρα (Efstratiadis *et al.*, 2014).

Προκειμένου να επαληθευτεί η φυσική συνέπεια της μεθόδου SCS-CN με τις παραπάνω θεμελιώδεις υδρολογικές υποθέσεις, παρήχθησαν σχέσεις μεταβολής των μεγεθών h, c, και CN, για ένα ευρύ φάσμα τιμών τους. Στα Σχήματα 4.3 και 4.4 απεικονίζεται, με τη μορφή ισοτιμικών καμπυλών, η σχέση μεταξύ του ολικού ύψους βροχής h και του συντελεστή απορροής c, για διάφορες τιμές του CN, από 20 έως 90, με την υπόθεση αρχικών απωλειών $\alpha = 0.20$ και $\alpha = 0.05$, αντίστοιχα. Οι τιμές του c προέκυψαν με βάση το καθαρό ύψος βροχής που εκτιμήθηκε από τη σχέση (4.6), δηλαδή για ποσοστό αρχικών απωλειών 20%. Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα, η σχέση αυτή είναι εμφανώς μη γραμμική. Για μεγάλες τιμές του CN, ο συντελεστής απορροής αυξάνει γρήγορα, ενώ αντίθετα για μικρές τιμές του CN, λόγω και της επίδρασης των αρχικών απωλειών, απαιτείται μεγάλο ύψος βροχής προκειμένου να ξεκινήσει η παραγωγή απορροής, ενώ και ο ρυθμός παραγωγής, δηλαδή ο συντελεστής

απορροής, διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα. Από τη σύγκριση των δύο γραφημάτων είναι εμφανής και η διαφοροποίηση του ρυθμού μεταβολής του συντελεστή απορροής συναρτήσει του ποσοστού αρχικών απωλειών. Όσο μειώνεται η τιμή του *α*, τόσο πιο άμεση είναι η απόκριση της λεκάνης στην παραγωγή της απορροής και συνεπώς πιο μεγάλη η τιμή του *c*.



Σχήμα 4.3: Σχέσεις μεταβολής συντελεστή απορροής συναρτήσει του ολικού ύψους βροχής, για διάφορες τιμές του αριθμού καμπύλης απορροής, για αρχικές απώλειες $\alpha = 0.20$.



Σχήμα 4.4: Σχέσεις μεταβολής συντελεστή απορροής συναρτήσει του ολικού ύψους βροχής, για διάφορες τιμές του αριθμού καμπύλης απορροής, για αρχικές απώλειες $\alpha = 0.05$.

Τα διαγράμματα αυτά υποδηλώνουν ότι στην πράξη, οι δύο παράμετροι της μεθόδου SCS-CN, δηλαδή ο αριθμός CN και το ποσοστό α, χαρακτηρίζουν μια δεδομένη υδρολογική συμπεριφορά λεκάνης που είναι βεβαίως μη γραμμική, αναπαριστώντας με έναν απλό, φειδωλό και εύληπτο τρόπο τις διεργασίες παραγωγής επιφανειακής απορροής. Μάλιστα, με κατάλληλη προσαρμογή των εν λόγω παραμέτρων μπορούν να αναπαρασταθούν λεκάνες με εντελώς διαφορετική υδρολογική δίαιτα,.

4.3.2 Αναλυτική εκτίμηση παραμέτρου CN για τυχαίες αρχικές απώλειες και δεδομένες συνθήκες υγρασίας

Στο Σχήμα 4.2 είναι εμφανής η μεταβλητότητα του CN ανάλογα με την προηγούμενη κατάσταση υγρασίας του εδάφους. Μάλιστα, η μεταβλητότητα αυτή μεγιστοποιείται στην περιοχή των ενδιάμεσων τιμών της παραμέτρου (40 έως 60), με αποτέλεσμα την έντονη διαφοροποίησή της μεταξύ ξηρών και υγρών συνθηκών. Ωστόσο, τα διαγράμματα αυτά, και οι αντίστοιχες σχέσεις αναλυτικής εκτίμησης του CN για συνθήκες υγρασίας τύπου I και III, συναρτήσει της μέσης τιμής που αντίστοιχες σε συνθήκες τύπου II, έχουν προκύψει με την υπόθεση παραμέτρου αρχικών απωλειών $\alpha = 0.20$ (στο εξής τιμή αναφοράς). Στην περίπτωση που εκτιμάται ότι πρέπει να εφαρμοστεί διαφορετικό ποσοστό αρχικών απωλειών, οι εν λόγω σχέσεις δεν ισχύουν και πρέπει να γίνει διόρθωση των τιμών του CN.

Έστω h το ολικό ύψος βροχής, το οποίο εκτιμάται π.χ. από την όμβρια καμπύλη της περιοχής μελέτης, για δεδομένη περίοδο επαναφοράς T και δεδομένη διάρκεια του υετογραφήματος σχεδιασμού. Η εκτίμηση της παραμέτρου CN που αντιστοιχεί σε δεδομένες συνθήκες αρχικής υγρασίας και δεδομένο ποσοστό αρχικών απωλειών α βασίζεται στην ακόλουθη διαδικασία:

1. Εκτιμάται η τιμή της μέγιστης δυνητικής κατακράτησης S_{20} που αντιστοιχεί στην τιμή αναφοράς του CN, για ποσοστό απωλειών 20% (συμβολίζεται CN_{20}), μέσω της σχέσης:

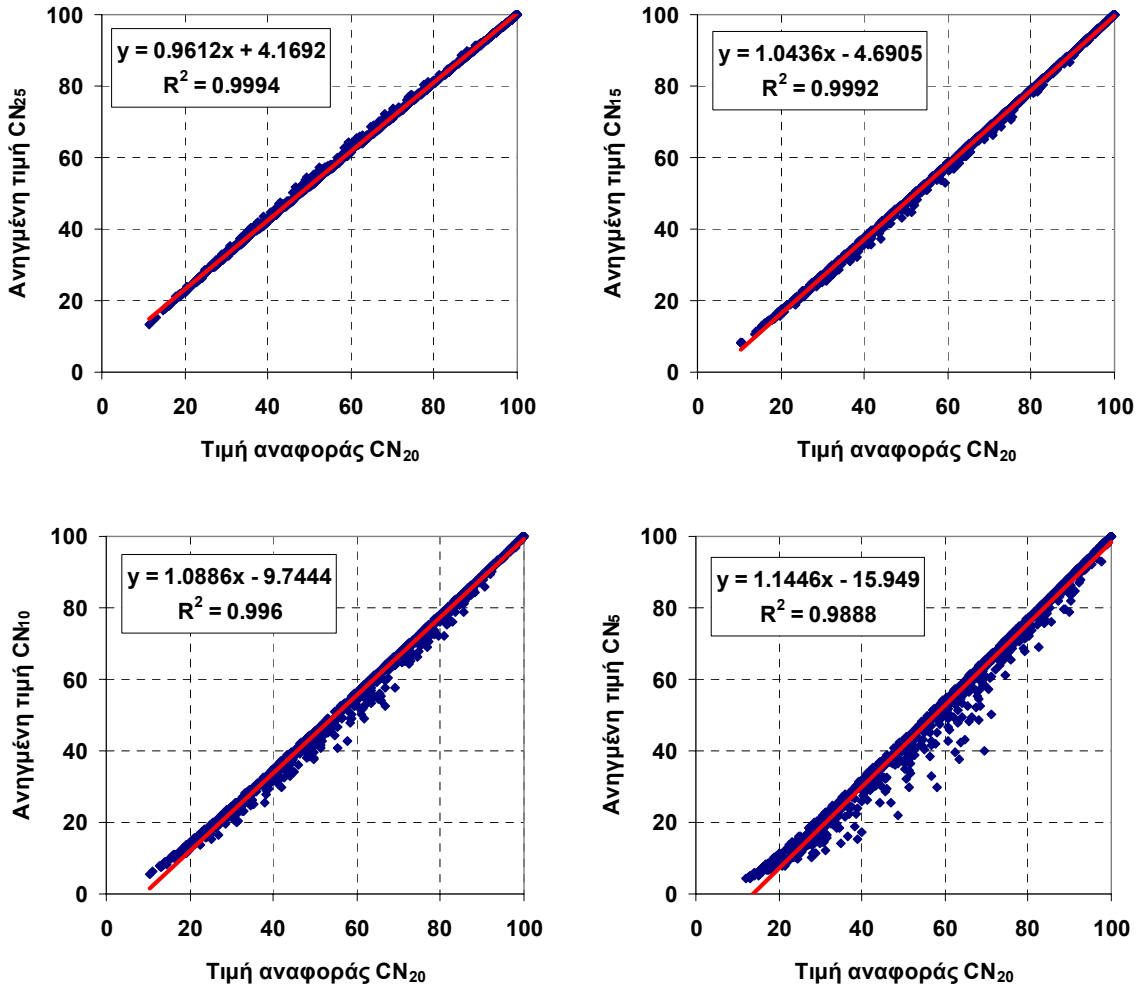
$$S_{20} = 254\,(100/CN_{20} - 1) \tag{4.12}$$

2. Μέσω της (4.5) εκτιμάται το ολικό ενεργό ύψος βροχής h_e συναρτήσει των h και S_{20}.
3. Για τον προσδιορισμό της μέγιστης δυνητικής κατακράτησης S_α που αντιστοιχεί στο ζητούμενο ποσοστό απωλειών α, επιλύεται η σχέση (4.8) με γνωστά h, h_e και α.
4. Η τελική τιμή του CN_α εκτιμάται συναρτήσει του S_α μέσω της αντίστροφης σχέσης:

$$CN_\alpha = 25400/(S_\alpha + 254) \tag{4.13}$$

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

Η σχέση μεταξύ της τιμής αναφοράς CN_{20} και της τιμής CN_α που αντιστοιχεί σε τυχαίες αρχικές απώλειες είναι μη γραμμική, καθώς εξαρτάται και από τις τιμές των υδρολογικών μεγεθών h και h_e. Ωστόσο, όσο η τιμή της παραμέτρου α πλησιάζει την τυπική τιμή 0.20, τόσο καλύτερα μπορεί να προσεγγιστεί από κατάλληλες σχέσεις γραμμικής παλινδρόμησης, όπως φαίνεται στα διαγράμματα του Σχήματος 4.5. Οι τιμές των CN_{20} και CN_α προέκυψαν μέσω προσομοίωσης Monte Carlo, παράγοντας 1000 τυχαία ζεύγη τιμών h και h_e, και εφαρμόζοντας την προαναφερθείσα διαδικασία αναγωγής.



Σχήμα 4.5: Διάγραμμα διασποράς CN αναφοράς και διορθωμένου CN, για αρχικές απώλειες $\alpha = 0.25$ (πάνω αριστερά), 0.15 (πάνω δεξιά), 0.10 (κάτω αριστερά) και 0.05 (κάτω δεξιά).

5 Διερεύνηση προγνωστικής ικανότητας συνδυαστικής μεθόδου SCS-CN και συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος

5.1 Σκοπός και μεθοδολογία

Ο όρος *προγνωστική ικανότητα* (prodictive capacity) χρησιμοποιείται για να αξιολογήσει τη δυνατότητα ενός υδρολογικού μοντέλου να αναπαράξει τις παρατηρημένες αποκρίσεις μιας λεκάνης, εφόσον τροφοδοτηθεί με τα αντίστοιχα δεδομένα εισόδου. Στην περίπτωση των μοντέλων πλημμυρών, ο παραπάνω όρος αναφέρεται στην ικανότητα αναπαραγωγής των παρατηρημένων πλημμυρρογραφημάτων, με είσοδο τα αντίστοιχα επεισόδια καταιγίδας.

Για την αξιολόγηση της προγνωστικής ικανότητας των τυπικών μοντέλων υδρολογικού σχεδιασμού διερευνήθηκε η πλέον διαδεδομένη προσέγγιση, που βασίζεται στη συνδυαστική χρήση της μεθόδου SCS-CN, για την εκτίμηση των υδρολογικών ελλειμμάτων, και της θεωρίας μοναδιαίου υδρογραφήματος (ΜΥ), για τη χωροχρονική διόδευση της απορροής που παράγεται στην επιφάνεια της λεκάνης στην έξοδο αυτής, δηλαδή τον μετασχηματισμό του επιφανειακού μεγέθους (ύψος ενεργού βροχόπτωσης ή, ισοδύναμα, επιφανειακής απορροής) σε σημειακό πλημμυρογράφημα. Στο εξής, η συνδυαστική αυτή μέθοδος θα αναφέρεται ως SCS-CN&ΜΥ.

Αρχικά, αξιολογήθηκε η προγνωστική ικανότητα τη τυποποιημένης, σύμφωνα με την κοινή πρακτική, διαδικασίας, με χρήση δύο τυπικών συνθετικών μοναδιαίων υδρογραφημάτων (ΣΜΥ) της βιβλιογραφίας, ήτοι του Snyder και του Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας. Η διερεύνηση αυτή αφορά στην αναπαραγωγή των παρατηρημένων επεισοδίων πλημμυρών στη λεκάνη Λυκορέματος Ραφήνας. Γενικά, η προσαρμογή των μοντέλων ήταν ανεπιτυχής, το οποίο ανέδειξε την ανάγκη αναθεώρησης μια εκ των βασικών υποθέσεων της μεθόδου SCS-CN, ήτοι της εφαρμογής ποσοστού αρχικών απωλειών 20%, καθώς και της διαμόρφωσης συνθετικών ΣΜΥ διαφορετικής δομής. Στα πλαίσια αυτά, εξετάστηκαν εναλλακτικές δομές παραμετρικών ΣΜΥ, που αναπαράγουν καλύτερα τη μορφή των πλημμυρογραφημάτων στις λεκάνες μελέτης.

Στη συνέχεια, για την καλύτερη αναπαραγωγή των παρατηρημένων πλημμυρογραφημάτων επιχειρήθηκε η βέλτιστη προσαρμογή των παραμέτρων του ΣΜΥ, ταυτόχρονα με τις δύο παραμέτρους της μεθόδου SCS-CN (μέγιστη δυνητική κατακράτηση και ποσοστό αρχικών απωλειών), μέσω βαθμονόμησης. Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων της βαθμονόμησης προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με την επιλογή αντιπροσωπευτικών τιμών των εν λόγω παραμέτρων, εφόσον εφαρμόζονται για την εκτίμηση πλημμυρογραφημάτων σχεδιασμού σε λεκάνες με παρεμφερή φυσιογραφικά χαρακτηριστικά. Τα συμπεράσματα των εν λόγω αναλύσεων αξιοποιήθηκαν για την αναθεώρηση του πλαισίου εκτίμησης των πλημμυρικών μεγεθών σχεδιασμού σε λεκάνες χωρίς μετρήσεις, με συνδυαστική χρήση της μεθόδου SCS-CN και του παραμετρικού ΣΜΥ.

5.2 Μοναδιαίο υδρογράφημα: Θεωρητικό υπόβαθρο και συνθετικές προσεγγίσεις

5.2.1 Ορισμοί, εννοιολογία και παραδοχές

Με τον όρο *μοναδιαίο υδρογράφημα* (unit hydrograph), $U_d(t)$, διάρκειας βροχής d νοείται το καθαρό πλημμυρογράφημα μιας λεκάνης που παράγεται από ενεργό βροχόπτωση μοναδιαίου ύψους h_0 και έντασης $i = h_0 / d$, ομοιόμορφα κατανεμημένης στο χώρο και το χρόνο (γενικά θεωρείται $h_0 = 10$ mm). Στην πράξη, το μοναδιαίο υδρογράφημα (ΜΥ) περιγράφει έναν χρονικό μετασχηματισμό της ενεργού βροχόπτωσης σε πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης, και αποτελεί σταθερό χαρακτηριστικό της λεκάνης. Συνεπώς, για κάθε διάρκεια ενεργού βροχής αντιστοιχεί ένα και μόνο ΜΥ. Αν A, είναι η έκταση της λεκάνης, τότε το εμβαδόν του ΜΥ, δηλαδή ο πλημμυρικός όγκος, ισούται με $V_0 = h_0 A$.

Η εφαρμογή του ΜΥ βασίζεται στις εξής παραδοχές:

- Η ένταση της βροχής είναι σταθερή για όλη τη διάρκεια του επεισοδίου και κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλη την έκταση της λεκάνης.
- Σε μια δεδομένη λεκάνη, δύο βροχές ίσης διάρκειας που προκαλούν απορροή, παράγουν υδρογραφήματα άμεσης απορροής με την ίδια χρονική διάρκεια, ανεξάρτητα από τις επιμέρους εντάσεις των επεισοδίων βροχής.
- Σε μια δεδομένη υδρολογική λεκάνη, η άμεση απορροή που προκαλείται από ένα συγκεκριμένο επεισόδιο βροχής είναι ανεξάρτητη από τα προηγούμενα επεισόδια.
- Το σχήμα του μοναδιαίου υδρογραφήματος δεδομένης διάρκειας βροχής αντιπροσωπεύει τα χαρακτηριστικά της λεκάνης, τα οποία θεωρούνται χρονικά αμετάβλητα.

Αν είναι γνωστή η ενεργός βροχόπτωση h_t, σε διακριτό χρόνο, και το ΜΥ της λεκάνης για διάρκεια ίση με την χρονική διακριτότητα της ενεργού βροχόπτωσης Δt, τότε ο υπολογισμός του πλημμυρογραφήματος γίνεται εύκολα, με βάση την αρχή της επαλληλίας. Συγκεκριμένα, από κάθε επιμέρους τμήμα του ενεργού υετογράμματος στο χρονικό διάστημα $[t, t + \Delta t]$ παράγεται το επιμέρους υδρογράφημα, πολλαπλασιάζοντας το ύψος βροχής h_t με τις τεταγμένες του ΜΥ. Αν D είναι η συνολική διάρκεια βροχής, τότε παράγονται $N = D / \Delta t$ υδρογραφήματα, που αθροίζονται χρονικά ώστε να προκύψει το τελικό πλημμυρογράφημα.

5.2.2 Η έννοια του συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος (ΣΜΥ)

Το ΜΥ μιας δεδομένης διάρκειας βροχής αποτελεί χαρακτηριστικό μέγεθος της λεκάνης, για την κατάρτιση του οποίου συνήθως εφαρμόζονται οι λεγόμενες συνθετικές προσεγγίσεις. Σύμφωνα με αυτές, η μαθηματική έκφραση ή τα χαρακτηριστικά μεγέθη του ΜΥ εκτιμώνται συναρτήσει των φυσιογραφικών χαρακτηριστικών της λεκάνης. Στη βιβλιογραφία διατίθεται ένα ευρύ φάσμα προσεγγίσεων για την κατάρτιση συνθετικών μοναδιαίων υδρογραφημάτων (στο εξής ΣΜΥ) σε λεκάνες χωρίς μετρήσεις. Δύο από τας πλέον διαδεδομένα ΣΜΥ στην ελληνική πρακτική είναι αυτό του Snyder και του Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας, συνοπτική παρουσίαση των οποίων γίνεται στη συνέχεια.

5.2.3 Συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα Snyder

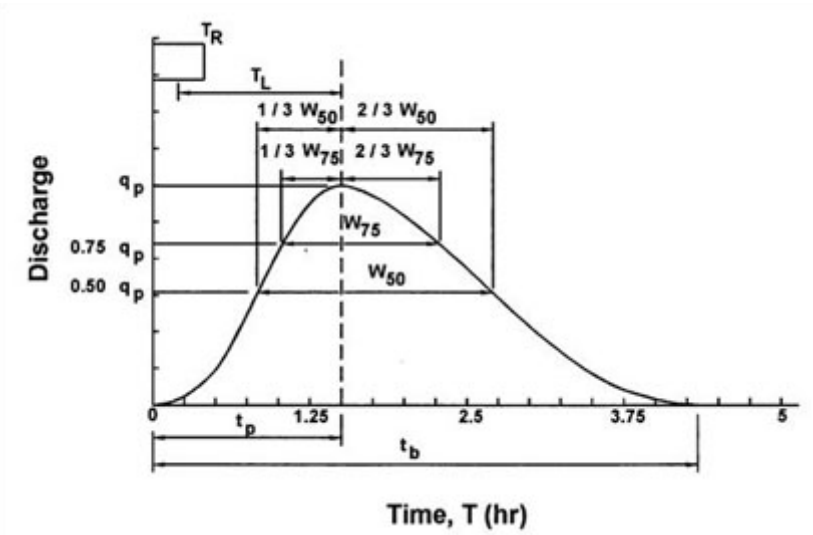
Το *συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα του Snyder* αναπτύχθηκε το 1938 και χρησιμοποιείται ευρύτατα στον υδρολογικό σχεδιασμό, ιδιαίτερα στις ΗΠΑ. Στο Σχήμα 5.1 απεικονίζονται η μορφή του υδρογραφήματος και τα χαρακτηριστικά του μεγέθη. Το ΜΥ αναφέρεται σε διάρκεια βροχής ίση με $t_R = t_p / 5.5$, και βασίζεται στις ακόλουθες σχέσεις:

$$t_p = 0.75\ C_t\ (L\ L_c)^{\ 0.3} \tag{5.1}$$

$$q_p = 2.78\ C_Q\ A\ /\ t_p \tag{5.2}$$

$$t_b = 72 + 3\ t_p \tag{5.3}$$

όπου L_c είναι το μήκος του κύριου υδατορεύματος από την έξοδο της λεκάνης μέχρι την προβολή του κέντρου βάρους της λεκάνης (σε km), και C_t και C_Q παράμετροι. Η παράμετρος C_t σχετίζεται με τα μορφολογικά και εδαφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής, και κυμαίνεται από 1.80 ως 2.20 (το κάτω όριο αναφέρεται σε λεκάνες με σχετικά μεγάλη κλίση, ενώ το άνω όριο σε σχεδόν επίπεδες λεκάνες). Η παράμετρος C_Q αντιπροσωπεύει τις συνθήκες μεταφοράς του πλημμυρικού κύματος και την αποθηκευτικότητα της λεκάνης, και κυμαίνεται από 0.56 ως 0.69 (Τσακίρης, 1995, σ. 409). Οι παραπάνω τιμές προέκυψαν από εκτεταμένες αναλύσεις πλημμυρικών δεδομένων σε λεκάνες απορροής των Απαλλαχίων, έκτασης από 30 ως 30 000 km^2. Ωστόσο, άλλες έρευνες κατέδειξαν πολύ μεγαλύτερο εύρος διακύμανσης των τιμών αυτών. Ο ίδιος ο Snyder, σε μελέτες που εκπόνησε στην Ελλάδα για το φράγμα Πουρναρίου στον Άραχθο, υιοθέτησε πολύ πιο δυσμενή τιμή για την παράμετρο C_t, συγκεκριμένα $C_t = 1.00$, και επιπλέον έθεσε $C_Q = 0.72$. Πράγματι, η γεωμορφολογία της λεκάνης του Άραχθου, και γενικότερα της Δυτικής Στερεάς Ελλάδας και Ηπείρου, ευνοεί τη δημιουργία έντονων πλημμυρικών επεισοδίων, που χαρακτηρίζονται από μικρούς χρόνους συγκέντρωσης και ταχεία απόκριση, δηλαδή απότομο ανοδικό κλάδο.



Σχήμα 5.1: Συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα κατά Snyder και χαρακτηριστικά του μεγέθη (Πηγή: http://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/pubs/10009/page03.cfm)

Οι Wright-McLaughlin Engineers (1969), με βάση μετρήσεις στην περιοχή του Denver των ΗΠΑ, συσχέτισαν τις τιμές των παραμέτρων του συνθετικού ΜΥ του Snyder με ένα τυπικό μέγεθος της λεκάνης απορροής, το ποσοστό της αδιαπέρατης επιφάνειας I, και προτείνουν τις σχέσεις υπολογισμού (U.S. Army Corps of Engineers, 1997, σ. 142, 152):

$$C_t = 7.81\ I^{\ -0.78} \tag{5.4}$$

$$C_Q = 0.89\ C_t^{\ 0.46} \tag{5.5}$$

Η παραπάνω σχέση ενδείκνυται μόνο για λεκάνες με ποσοστό αδιαπέρατης επιφάνειας >10%. Πρακτικά, ως αδιαπέρατες νοούνται οι εκτάσεις της λεκάνης στις οποίες αναπτύσσονται σχηματισμοί πολύ περιορισμένης υδατοπερατότητας, όπως φλύσχης, ενώ σε αυτές προφανώς περιλαμβάνονται και οι δομημένες εκτάσεις.

Άλλα χαρακτηριστικά μεγέθη του ΜΥ είναι τα πλάτη που αντιστοιχούν στα 1/3 αριστερά και στα 2/3 δεξιά της κατακορύφου της αιχμής (Σχήμα 5.1), τα οποία δίνονται από τις σχέσεις:

$$W_{50} = 2.143\ (Q_p / A)^{-1.08} \tag{5.6}$$

$$W_{75} = 1.225\ (Q_p / A)^{-1.08} \tag{5.7}$$

Όπως προαναφέρθηκε, το υδρογράφημα του Snyder υποθέτει διάρκεια βροχής ίση με t_p / 5.5 και χρόνο βάσης που ξεπερνά τις τρεις ημέρες, κάτι που προφανώς αφορά μόνο σε μεγάλες λεκάνες. Αν χρησιμοποιείται διαφορετική διάρκεια βροχής t_R', τότε για την εκτίμηση του χρόνου ανόδου εφαρμόζεται η απλή σχέση αναγωγής (Chow *et al.*, 1988, σ. 225):

$$t_p' = t_p - (t_p / 5.5 - t_R') / 4 \tag{5.8}$$

Με αντικατάσταση των ανηγμένων τιμών του χρόνου ανόδου t_p', προσαρμόζονται κατάλληλα η παροχή αιχμής q_p, ο χρόνος βάσης t_b, και τα χαρακτηριστικά πλάτη W_{70} και W_{75}, σύμφωνα με τις σχέσεις (5.2), (5.3), (5.6) και (5.7), αντίστοιχα.

5.2.4 Συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας

Η μέθοδος του *Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας* χρησιμοποιεί τοπογραφικά και υδρολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης, και δεδομένα κλίσεων που προκύπτουν από τη μηκοτομή του κύριου υδατορεύματος. Η εν λόγω μέθοδος συνιστά τη σύνθεση τριγωνικού υδρογραφήματος για διάρκεια βροχής d = 1 h, όπως αυτό που φαίνεται στο Σχήμα 5.2. Ο χρόνος ανόδου του υδρογραφήματος (σε h) υπολογίζεται συναρτήσει των χαρακτηριστικών της λεκάνης από τη σχέση (Sutcliffe, 1978):

$$t_{a1} = \frac{46.6\ L^{0.14}}{S_{1085}^{\ 0.38}\ (1 + \text{URBAN})^{1.99}\ \text{RSMD}^{0.4}} \tag{5.9}$$

όπου L είναι το μήκος της κύριας μισγάγκειας ή του κύριου υδατορεύματος (km), S_{1085} είναι μια χαρακτηριστική μέση κλίση του υδατορεύματος, ορισμένη μεταξύ των δύο θέσεων στο 10% (κατάντη) και 85% (ανάντη) του μήκους του (m/km), URBAN είναι συντελεστής που εκφράζει την αναλογία των αστικών περιοχών μέσα στη λεκάνη απορροής (αδιάστατος), ενώ RSMD είναι παράμετρος μεγέθους της βροχής (mm), ίση με το ενεργό ύψος της μέγιστης 24ωρης βροχής που αντιστοιχεί σε περίοδο επαναφοράς 5 ετών. Για ορεινές ή ημιορεινές λεκάνες, το ενεργό ύψος βροχής RSMD θεωρείται πρακτικά ίσο με το αντίστοιχο ολικό ύψος. Στην (5.9), ο συμβολισμός t_{a1} υποδηλώνει τη συγκεκριμένη διάρκεια βροχής, δηλαδή 1 h.

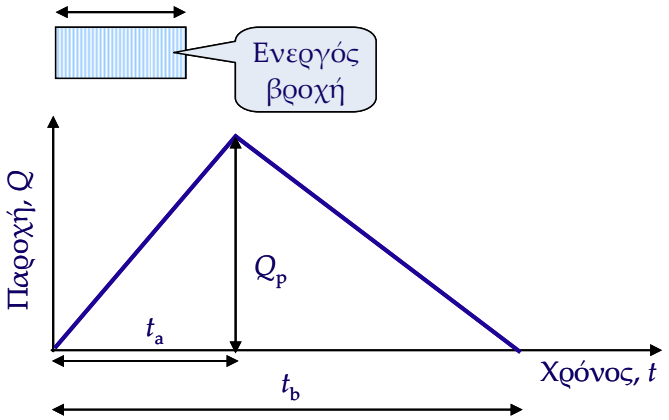
Εξαιτίας των φαινομένων διόδευσης, ο χρόνος ανόδου οποιουδήποτε υδρογραφήματος είναι πάντοτε μεγαλύτερος από τον ανοδικό, δηλαδή $t_\kappa = \xi\ t_a$, με $\xi > 1$. Η μέθοδος του Βρετανικού Ινστιτούτου δέχεται $\xi = 1.52$, οπότε η διάρκεια της πλημμύρας (χρόνος βάσης) είναι ίση με:

$$t_b = 2.52\ t_{a1} \tag{5.10}$$

Αν A η έκταση της λεκάνης, τότε η πλημμυρική παροχή αιχμής προκύπτει εύκολα από την εξίσωση συνέχειας (όγκος υετογραφήματος = όγκος πλημμυρογραφήματος), και δίνεται σε διαστατικά ομογενή μορφή από τη σχέση:

$$q_p = 2\ h_0 A / t_b = 0.794\ h_0 A / t_\alpha \tag{5.11}$$

όπου h_0 = 10 mm είναι το μοναδιαίο ύψος βροχής. Σημειώνεται ότι πριν τον υπολογισμό της παροχής αιχμής q_p και την εφαρμογή του μοναδιαίου υδρογραφήματος, τα μεγέθη t_p και t_b στρογγυλεύονται ώστε να είναι ακέραια πολλαπλάσια του χρονικού βήματος υπολογισμών.



Σχήμα 5.2: Συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας.

Σημειώνεται ότι η τυπική διάρκεια βροχής της μιας ώρας, στην οποία αναφέρεται η μέθοδος του Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας, δεν ενδείκνυται για μικρές λεκάνες απορροής, όπως οι αστικές, στις οποίες ο χρόνος συγκέντρωσης συχνά δεν ξεπερνά τα λίγα λεπτά της ώρας. Η αυθεντική μέθοδο δεν αναφέρει τρόπους αναγωγής του ΜΥ για διάρκειες βροχής μικρότερες της 1 h. Ωστόσο, με την παραδοχή ότι ο χρόνος υστέρησης t_L είναι ανεξάρτητος της διάρκειας, και παίρνοντας υπόψη τη γνωστή σχέση

$$t_a \approx t_L + d / 2 \approx 0.6\, t_c + d / 2 \tag{5.12}$$

καταλήγουμε στην τελική έκφραση:

$$t_a = t_{a1} - (1 - d) / 2 \tag{5.13}$$

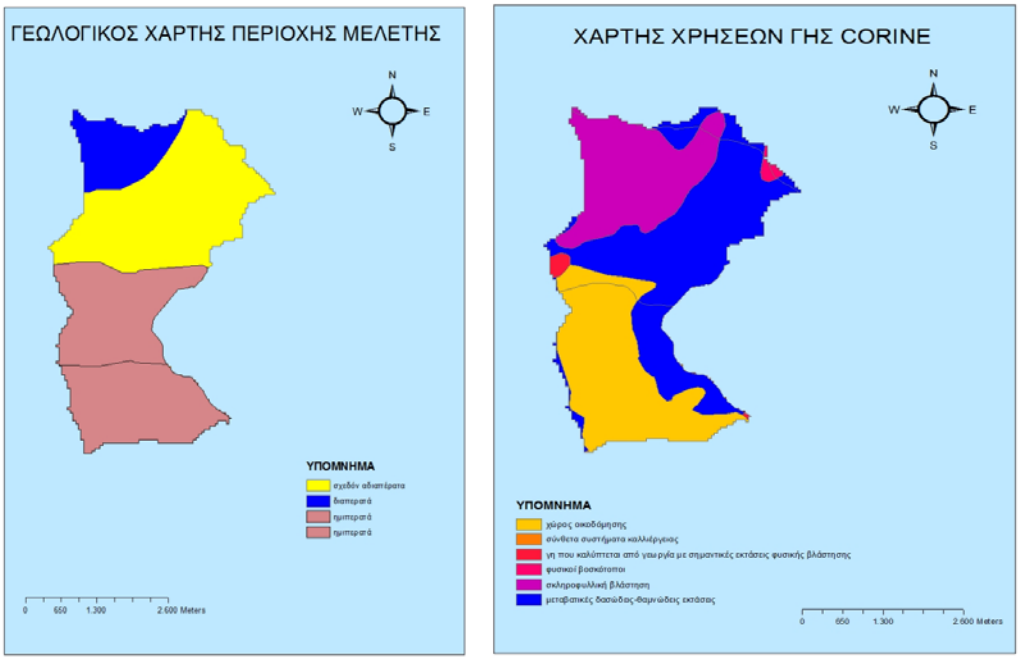
όπου ο χρόνος t_α αναφέρεται σε τυχούσα διάρκεια βροχής d (οι χρόνοι σε h). Παρ' όλα αυτά, λόγω της διαφοράς κλίμακας έχει παρατηρηθεί ότι το εν λόγω ΣΜΥ δεν δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα σε μικρές λεκάνες, για τις οποίες προτιμώνται άλλες προσεγγίσεις.

5.3 Προκαταρκτικές αναλύσεις στη λεκάνη Λυκορέματος Ραφήνας με χρήση εναλλακτικών ΣΜΥ

5.3.1 Περιοχή μελέτης και χωρικά δεδομένα

Οι αρχικές αναλύσεις αφορούν σε επιλεγμένα πλημμυρικά επεισόδια της πειραματικής λεκάνης Λυκορέματος Ραφήνας. Η περιοχή μελέτης αποτελεί τμήμα της λεκάνης απορροής του ρέματος Ραφήνας, έκτασης 127.2 km^2. Στην ευρύτερη περιοχή έχουν εγκατασταθεί υδρομετρικοί και βροχομετρικοί σταθμοί στα πλαίσια του Υδρολογικού Παρατηρητηρίου Αθήνας (Hydrological Observatory of Athens, http://hoa.ntua.gr/), που λειτουργούν υπό την εποπτεία του Εργαστηρίου Υδρολογίας και Διαχείρισης Υδατικών Πόρων του ΕΜΠ. Η περιοχή ενδιαφέροντος έχει έκταση 15.2 km^2, και διαχωρίζεται σε δύο υπολεκάνες, με βάση τους υδρομετρικούς σταθμούς Λυκόρεμα, ανάντη, και Ντράφι, στην έξοδο.

Στο Σχήμα 2.12 απεικονίζονται το ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων της λεκάνης και οι θέσεις των υδρομετρικών σταθμών, ενώ ο Πίνακας 2.5 συνοψίζει τα χαρακτηριστικά γεωμετρικά μεγέθη των δύο υπολεκανών. Στο Σχήμα 5.3 απεικονίζονται τα επίπεδα χωρικής πληροφορίας που παρήχθησαν για την κατηγοριοποίηση των γεωλογικών σχηματισμών και χρήσεων γης. Η ανάντη υπολεκάνη εκτείνεται στις παρειές της Πεντέλης και καλύπτεται από σχηματισμούς χαμηλής περατότητας (σχιστόλιθοι), ενώ η κατάντη υπολεκάνη, η οποία είναι μερικώς αστικοποιημένη καλύπτεται από σχηματισμούς μέτριας περατότητας.



Σχήμα 5.3: Κατηγοριοποίηση γεωλογικών σχηματισμών (αριστερά) και χρήσεων γης (δεξιά) στην υπολεκάνη Λυκορέματος Ραφήνας (Πηγή: Μαθιουδάκη, 2012).

5.3.2 Επιλογή και επεξεργασία πλημμυρικών επεισοδίων

Τα υδρολογικά δεδομένα που συλλέχτηκαν είναι οι επεξεργασμένες παροχές στους δύο υδρομετρικούς σταθμούς, καθώς και τα σημειακά ύψη βροχής σε τέσσερεις μετεωρολογικούς σταθμούς της ευρύτερης περιοχής (Ντράφι, Άγιος Νικόλαος, Μπάλα, Πικέρμι). Όλα τα πρωτογενή δεδομένα διατίθενται σε χρονικό βήμα δεκαλέπτου. Οι σχετικές επεξεργασίες, με στόχο την παραγωγή των τελικών χρονοσειρών απορροής και επιφανειακής βροχόπτωσης στις δύο υπολεκάνες, περιγράφονται από τη Μαθιουδάκη (2012).

Η επιλογή των επεισοδίων πλημμύρας έγινε με κριτήριο τις υψηλότερες τιμές από τις χρονοσειρές μέσων ημερήσιων παροχών των περιόδων λειτουργίας των δύο υδρομετρικών σταθμών. Τελικά, ελήφθησαν 15 επεισόδια πλημμύρας για τη συνολική λεκάνη (ανάντη του σταθμού Ντράφι) και 20 επεισόδια στην υπολεκάνη ανάντη του σταθμού Λυκορέματος. Τα επεισόδια αυτά πραγματοποιήθηκαν στη διάρκεια της περιόδου 2004-2009.

Με βάση την ημερομηνία της ημερήσιας παροχής, θεωρήθηκαν οι δεκάλεπτες χρονοσειρές παροχών και βροχοπτώσεων, με έναρξη μία μέρα πριν και δύο μέρες μετά την εν λόγω ημερομηνία. Ανάλογα με το ποιοι βροχομετρικοί σταθμοί λειτουργούσαν τη συγκεκριμένη περίοδο, εκτιμήθηκε η επιφανειακή βροχόπτωση, με τη μέθοδο ολοκλήρωσης Thiessen. Τέθηκε περιορισμός ώστε κάθε επεισόδιο καταιγίδας, ανεξαρτήτως μεγέθους, να απέχει χρονικά από το προηγούμενο και το επόμενο τουλάχιστον πέντε ώρες. Με τον τρόπο αυτό προσδιορίστηκε η χρονική διάρκεια της καταιγίδας από την οποία παρήχθη το αντίστοιχο πλημμυρικό επεισόδιο.

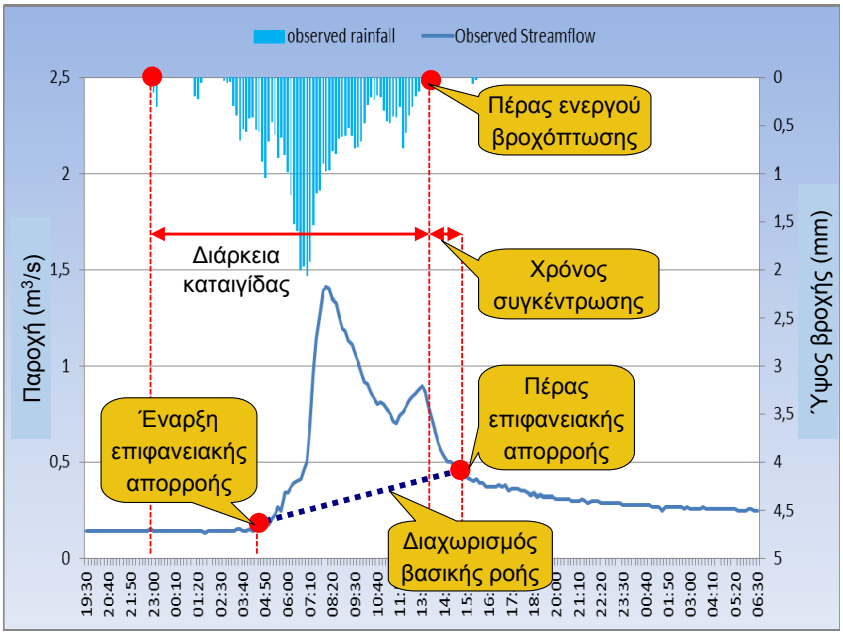
5.3.3 Διαχωρισμός επιφανειακής απορροής

Ο διαχωρισμός της επιφανειακής από τη συνολική απορροή αποτελεί κομβική συνιστώσα της όλης μεθοδολογίας. Ως γνωστόν, ο καθαρός όγκος της πλημμύρας ταυτίζεται με το τμήμα της βροχής που μετατρέπεται σε πλημμυρική απορροή με βάση το οποίο εκτιμώνται οι

παράμετροι της μεθόδου SCS-CN. Αν και σε απλά επεισόδια η διαδικασία διαχωρισμού είναι εύκολη (π.χ. με βάση γραφικές προσεγγίσεις), στην περίπτωση επεισοδίων σύνθετης δομής όπως συμβαίνει στην πραγματικότητα, ο παραπάνω διαχωρισμός δεν είναι εφαρμόσιμος, καθώς δεν είναι δυνατό να προσδιοριστεί το σημείου καμπής του πλημμυρογραφήματος. Στις προκαταρκτικές αναλύσεις εξετάστηκαν διάφορες ημιεμπειρικές τεχνικές για τον διαχωρισμό της επιφανειακής απορροής, που δεν κατέληξαν σε ικανοποιητικά αποτελέσματα. Τελικά, υλοποιήθηκε μια τεχνική που βασίστηκε στον τυπικό ορισμό του χρόνου συγκέντρωσης. Η προσέγγιση αυτή, όπως απεικονίζεται στο παράδειγμα του Σχήματος 5.4, είναι απλή στην εφαρμογή της και συνεπής με τη φυσική ερμηνεία του φαινομένου.

Η βασική παραδοχή της μεθόδου που υιοθετήθηκε είναι ότι η λήξη της ενεργού βροχής ταυτίζεται με τη γνωστή από τα δεδομένα λήξη της ακαθάριστης βροχής. Αυτό συμβαίνει διότι η μέθοδος SCS-CN δίνει τιμές, έστω και μικρές, για την ενεργό βροχή μέχρι το σημείο που λήγει η ακαθάριστη βροχή. Επιπλέον, ο χρόνος συγκέντρωσης κατά Giandotti ορίζεται ως το χρονικό διάστημα μεταξύ της λήξη της ενεργού βροχόπτωσης και της λήξης της επιφανειακής απορροής. Με βάση τον ορισμό αυτό, μετά τη λήξη της ενεργού βροχόπτωσης η επιφανειακή απορροή συνεχίζεται για διάστημα όσο ο χρόνος συγκέντρωσης, όταν και πραγματοποιείται η καμπή του υδρογραφήματος. Μετά το χρονικό αυτό σημείο, η απορροή θεωρείται ότι προέρχεται από την εκφόρτιση της βασικής ροής (αν και στην πραγματικότητα, αυτό που εδώ αναφέρεται ως βασική ροή περιλαμβάνει και τμήμα, ενδεχομένως σημαντικό, της υποδερμικής ροής που πραγματοποιείται διαμέσου της ακόρεστης ζώνης).

Η χρονική στιγμή που ξεκινάει η άμεση απορροή είναι γενικά εύκολο να προσδιοριστεί σε όλες τις χρονοσειρές παροχής, καθώς τότε είναι που αυξάνει απότομα η κλίση στο υδρογράφημα. Με τον τρόπο αυτό προσδιορίζεται η χρονική διάρκεια της πλημμυρικής επιφανειακής απορροής. Στο εν λόγω χρονικό διάστημα, η βασική απορροή θεωρείται, απλοποιητικά, ότι ακολουθεί τη γραμμή που ενώνει τα σημεία έναρξης και λήξης της άμεσης απορροής. Για κάθε χρονική στιγμή κατά τη διάρκεια της πλημμύρας προσδιορίζονται οι τιμές της βασικής απορροής και αφαιρούνται από τη συνολική τιμή απορροής, ώστε να προκύψει η επιφανειακή απορροή.



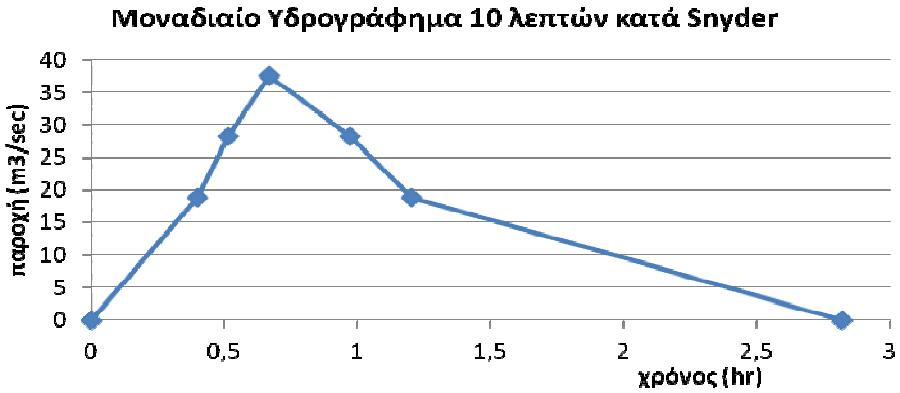
Σχήμα 5.4: Διαχωρισμός βασικής απορροής από το ολικό πλημμυρογράφημα του επεισοδίου της 1/2/2005 (Πηγή: Mathioudaki *et al.*, 2012, μετά από προσαρμογή).

5.3.4 Εκτίμηση χαρακτηριστικών υδρολογικών μεγεθών

Για την εφαρμογή της συνδυαστικής μεθόδου SCS-CN&ΜΥ στις δύο λεκάνες ενδιαφέροντος (λεκάνη Λυκορέματος και ανάντη υπολεκάνη), απαιτήθηκε η εκτίμηση δύο βασικών μεγεθών σχεδιασμού, ήτοι του αριθμού καμπύλης απορροής και του ΜΥ. Η τιμή της παραμέτρου CN εκτιμήθηκε με βάση την τυποποιημένη διαδικασία της SCS (βλ. 4.2.3), με βάση τα κυρίαρχα υδρολογικά χαρακτηριστικά του εδάφους και τις χρήσεις γης. Οι σχετικές εκτιμήσεις στις δύο υπολεκάνες, για τις τρεις συνθήκες αρχικής υγρασίας, δίνονται στον Πίνακα 5.1. Ακόμη, το ΣΜΥ κάθε λεκάνης, διάρκειας βροχής 10 min (όση η χρονική διακριτότητα των υδρολογικών δεδομένων), διαμορφώθηκε με τις δύο προαναφερθείσες τεχνικές (Snyder και Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας (Σχήμα 5.5). Παρατηρείται ότι τα δύο ΣΜΥ διαφέρουν πολύ, καθώς το ΣΜΥ του Snyder έχει υποδιπλάσιο χρόνο βάσης και πολύ υψηλότερη παροχή αιχμής.

Πίνακας 5.1: Εκτίμηση παραμέτρου CN στις υπολεκάνες ανάντη των υδρομετρικών σταθμών Ντράφι και Λυκόρεμα, για τις τρεις καταστάσεις αρχικής εδαφικής υγρασίας.

Υπολεκάνη	Ανάντη Ντράφι	Ανάντη Λυκορέματος
CN_I	59.0	56.5
CN_{II}	77.4	75.6
CN_{III}	88.7	87.7

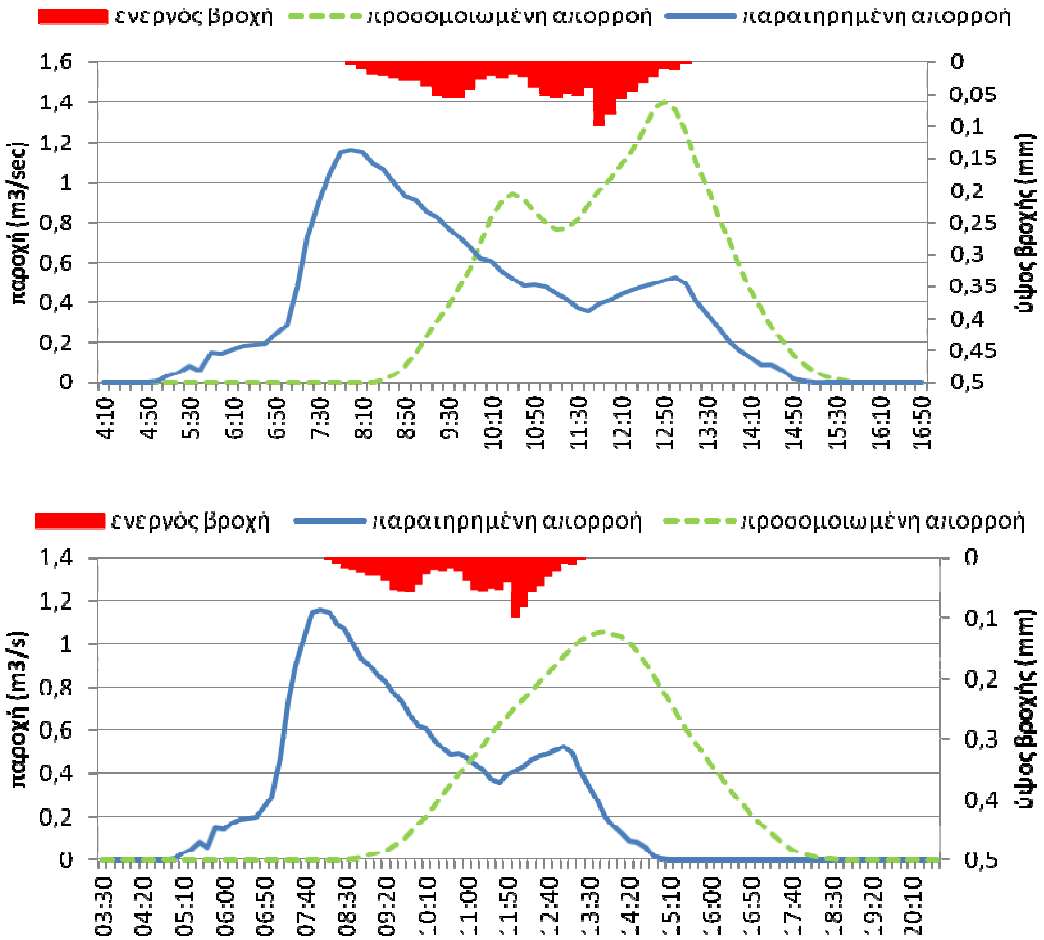


Σχήμα 5.5: Γραφική απεικόνιση ΣΜΥ υπολεκάνης ανάντη υδρομετρικού σταθμού Ντράφι, με τις μεθόδους Snyder και Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας (Πηγή: Μαθιουδάκη, 2012).

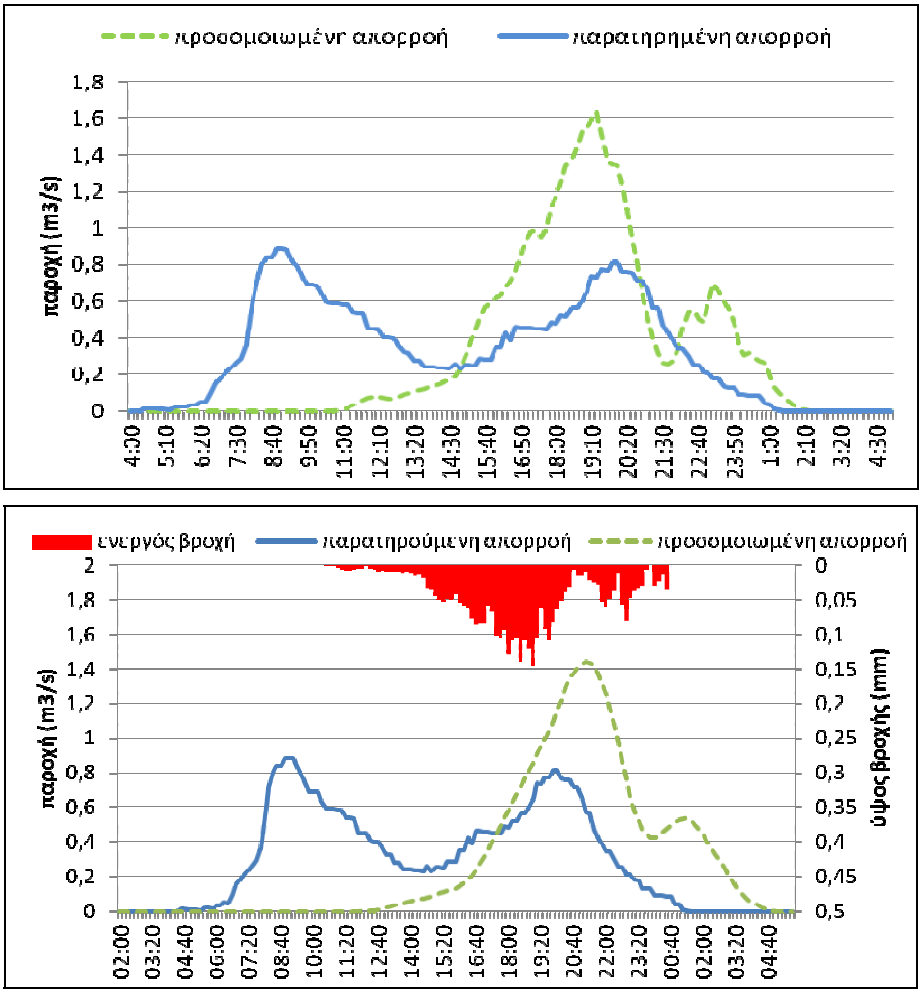
5.3.5 Εφαρμογή μεθόδου για αρχικές απώλειες 20%

Αρχικά, επιχειρήθηκε η εφαρμογή της συνδυαστικής μεθόδου SCS-CN&MY για ποσοστό αρχικών απωλειών α = 0.20, όπως κατά κανόνα εφαρμόζεται στον υδρολογικό σχεδιασμό. Δεδομένου ότι το ολικό ύψος πλημμύρας είναι γνωστό, εφαρμόστηκε η μέγιστη δυνητική κατακράτηση (και η αντίστοιχη τιμή της παραμέτρου CN) που προκύπτει από την αναλυτική σχέση (4.7), και όχι αυτή που εκτιμήθηκε συναρτήσει των φυσιογραφικών χαρακτηριστικών των υπολεκανών (Πίνακας 5.1). Στη συνέχεια, η ενεργός βροχόπτωση που προέκυψε με βάση κάθε επεισόδιο καταιγίδας μετασχηματίστηκε σε καθαρό πλημμυρογράφημα στην έξοδο της αντίστοιχης υπολεκάνης, εφαρμόζοντας τα δύο εναλλακτικά ΣΜΥ.

Στα Σχήματα 5.6 και 5.7 απεικονίζονται, ενδεικτικά, τα πλημμυρογραφήματα της 1/2/2005 και 4/11/2009 στον υδρομετρικό σταθμό Ντράφι, με εφαρμογή των δύο τυποποιημένων ΣΜΥ. Για τα επεισόδια αυτά, η τιμή του CN που προκύπτει από τις μετρήσεις είναι 62 και 38, αντίστοιχα, έναντι της εμπειρικής εκτίμησης CN = 77, που αναφέρεται σε συνθήκες υγρασίας τύπου ΙΙ (τη συγκεκριμένη εποχή, κρίνεται εύλογη η θεώρηση τέτοιων συνθηκών). Ακόμη, με την εφαρμογή των δύο ΣΜΥ προκύπτει ανεπίτρεπτα μεγάλη χρονική μετατόπιση του προσομοιωμένου υδρογραφήματος σε σχέση με το μετρημένο, που προφανώς οφείλεται σε εσφαλμένη υπόθεση των αρχικών απωλειών. Παρόμοια είναι η εικόνα στα περισσότερα από τα επεισόδια που εξετάστηκαν, που υποδηλώνει ότι στη συγκεκριμένη λεκάνη, η γενική εφαρμογή της βιβλιογραφικής τιμής α = 0.20 δεν είναι ρεαλιστική. Αυτό επιβεβαιώνεται και από παλαιότερες αναλύσεις στη λεκάνη του Λυκορέματος (Baltas *et al.*, 2007).



Σχήμα 5.6: Προσομοίωση πλημμύρας 1/2/2005 ανάντη σταθμού Ντράφι, με τα ΣΜΥ Snyder, πάνω, και Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας, κάτω (Πηγή: Μαθιουδάκη, 2012).



Σχήμα 5.7: Προσομοίωση πλημμύρας 4/11/2009 ανάντη σταθμού Ντράφι, με τα ΣΜΥ Snyder, πάνω, και Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας, κάτω (Πηγή: Μαθιουδάκη, 2012).

5.3.6 Αναπαραγωγή πλημμυρικών επεισοδίων με βελτιστοποίηση των παραμέτρων της μεθόδου SCS-CN&MY

Για τη βελτίωση της προσαρμογής των προσομοιωμένων υδρογραφημάτων, επιχειρήθηκε η βελτιστοποίηση των δύο παραμέτρων της μεθόδου SCS-CN, ήτοι του αριθμού CN και του συντελεστή αρχικών απωλειών, *α*. Ακόμη, επιχειρήθηκε η διαμόρφωση ενός παραμετρικού ΣΜΥ, που αποτελεί πρόδρομη εκδοχή του σχήματος που προτείνεται τελικά (βλ. ενότητα 5.4.2). Η παραμετρική προσέγγιση στην κατάρτιση του μοναδιαίου υδρογραφήματος μιας λεκάνης βασίζεται στην παραδοχή κατάλληλης αναλυτικής σχέσης για την περιγραφή του σχήματός του, χρησιμοποιώντας περιορισμένο αριθμό παραμέτρων (Koutsoyiannis and Xanthopoulos, 1989).

Το ΣΜΥ που αναπτύχθηκε αρχικά περιλαμβάνει έναν γραμμικό ανοδικό κλάδο και έναν καθοδικό κλάδο αρνητικής λογαριθμικής μορφής. Λαμβάνοντας υπόψη την θεωρητική ερμηνεία του χρόνου συγκέντρωσης, ο χρόνο βάσης του ΣΜΥ τέθηκε ίσος με $d + t_c$, όπου d η διάρκεια της μοναδιαίας βροχόπτωσης (στην προκειμένη περίπτωση 10 min) και t_c ο χρόνος συγκέντρωσης κατά Giandotti. Η επιλογή της σχέσης του Giandotti έναντι άλλων περιοχικών σχέσεων της βιβλιογραφίας βασίστηκε στα αποτελέσματα των αναλύσεων του Κεφαλαίου 3, που κατέδειξαν σαφή υπεροχή της εν λόγω προσέγγισης για τέτοιου είδους λεκάνες. Όσον

αφορά στο χρόνο ανόδου του ΣΜΥ, διατυπώθηκε παραμετρικά, ως συνάρτηση του χρόνου t_c, ήτοι $t_p = d/2 + b\ t_c$, όπου b αδιάστατη παράμετρος. Οι αναλυτικές μαθηματικές σχέσεις του παραμετρικού ΣΜΥ δίνονται στην εργασία της Μαθιουδάκη (2012).

Για την εκτίμηση, μέσω βελτιστοποίησης, των παραμέτρων CN και a της μεθόδου SCS-CN, καθώς και της αδιάστατης παραμέτρου b του προτεινόμενου ΣΜΥ (όπου αυτό εφαρμόστηκε), διατυπώθηκε μια πολυκριτηριακή στοχική συνάρτηση, της μορφής:

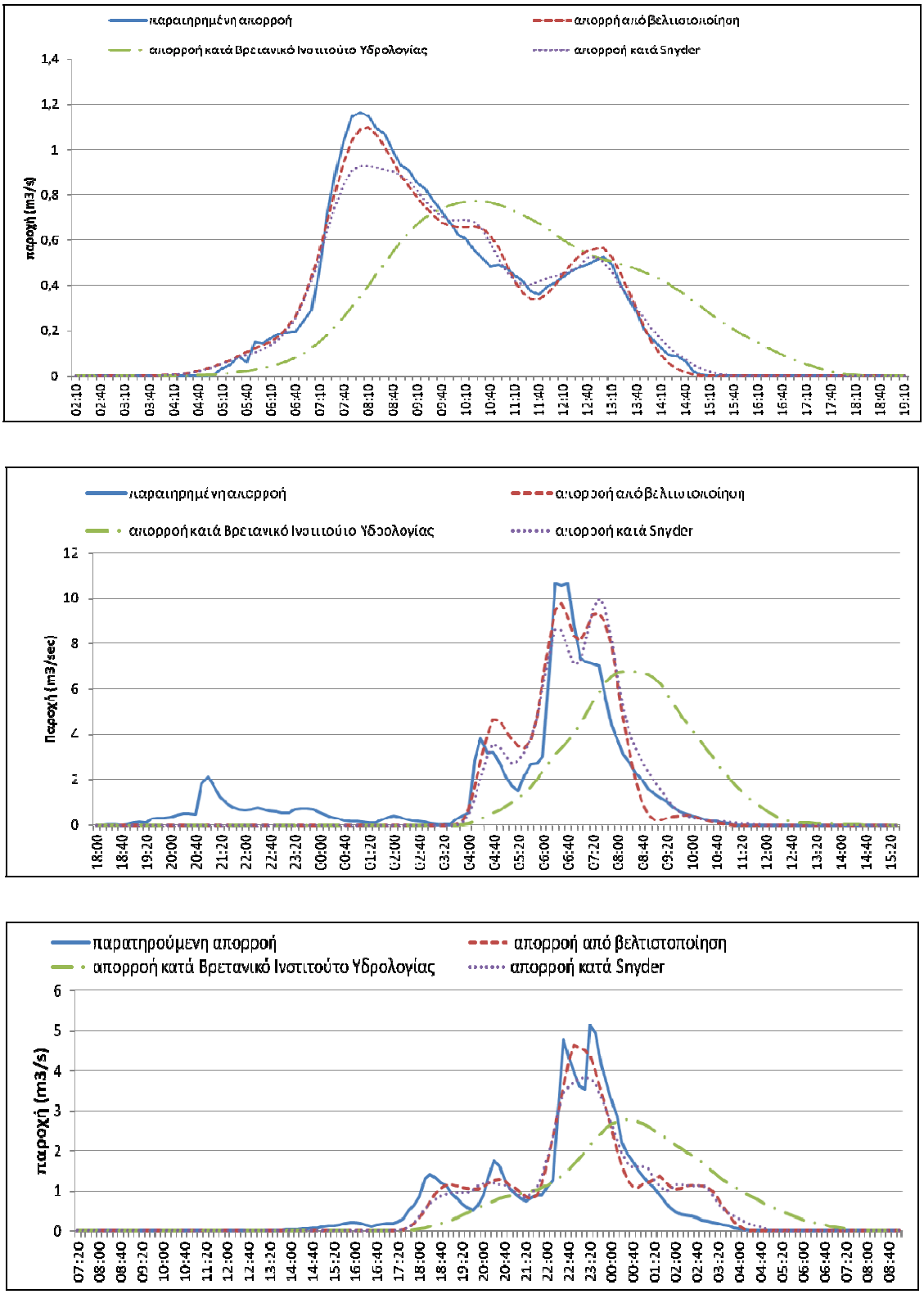
$$F(\mathrm{CN}, a, b) = \sum_{t=1}^{n} (q_{\mathrm{obs},t} - q_{\mathrm{sim},t})^2 + \lambda_1 (q_{\mathrm{p,obs}} - q_{\mathrm{p,sim}})^2 + \lambda_2 (V_{\mathrm{obs}} - V_{\mathrm{sim}})^2 \qquad (5.14)$$

όπου $q_{\mathrm{obs},t}$ η παρατηρημένη παροχή στο χρόνο t, $q_{\mathrm{sim},t}$ η αντίστοιχη προσομοιωμένη παροχή, $q_{\mathrm{p,obs}}$ και $q_{\mathrm{p,sim}}$ οι αντίστοιχες παροχές αιχμής, V_{obs} και V_{sim} οι αντίστοιχοι όγκοι πλημμύρας,, και λ_1, λ_2 συντελεστές στάθμισης. Ο πρώτος όρος της παραπάνω σχέσης αποσκοπεί στην αναπαραγωγή του σχήματος του υδρογραφήματος (πρόκειται για μια έκφραση τετραγωνικού σφάλματος), ο δεύτερος όρος δίνει επιπλέον έμφαση στην αναπαραγωγή της αιχμής, που αποτελεί το βασικό μέγεθος στον υδρολογικό σχεδιασμό, ενώ ο τρίτος όρος στοχεύει στη διατήρηση του όγκου του παρατηρημένου πλημμυρογραφήματος. Μετά από διερεύνηση, τέθηκαν οι τιμές $\lambda_1 = 10$ και $\lambda_2 = 1000$ που εξασφαλίζουν ικανοποιητικό συμβιβασμό μεταξύ των επιμέρους κριτηρίων της στοχικής συνάρτησης.

Στο Σχήμα 5.8 συγκρίνονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τρία χαρακτηριστικά επεισόδια που αναφέρονται στη συνολική λεκάνη, ανάντη του υδρομετρικού σταθμού Ντράφι. Σε κάθε σχήμα απεικονίζεται το παρατηρημένο καθαρό πλημμυρογράφημα, το οποίο συγκρίνεται με το προσομοιωμένο πλημμυρογράφημα που προκύπτει από την εφαρμογή της μεθόδου SCS-CN, με βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων CN και a, και των ΣΜΥ Snyder και Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας, με τυπικές τιμές παραμέτρων, και του προτεινόμενου ΣΜΥ, με βελτιστοποιημένο χρόνο ανόδου. Μεταξύ των τριών ΣΜΥ, το τριγωνικό ΜΥ του Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας εμφανίζει τη χειρότερη επίδοση, καθώς αποτυγχάνει να αναπαραστήσει τη μεταβλητότητα της απορροής, υπεκτιμά σημαντικά τις αιχμές, και υπερεκτιμά το χρόνο εκφόρτισης. Το ΣΜΥ του Snyder αναπαριστά αρκετά καλά τη γενική δομή των υδρογραφημάτων, ωστόσο υποεκτιμά τις παροχές αιχμής, ενώ το παραμετρικό ΣΜΥ αναπαράγει με πολύ καλή ακρίβεια όλα τα χαρακτηριστικά των παρατηρημένων υδρογραφημάτων.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η ανάλυση των βελτιστοποιημένων παραμέτρων της συνδυαστικής μεθόδου SCS-CN&ΜΥ. Όσον αφορά στις παραμέτρους CN και a, για τη μεν πρώτη προέκυψε μεγάλο εύρος τιμών (το οποίο ερμηνεύεται από την ισχυρή εξάρτηση της εν λόγω παραμέτρου από τις αρχικές συνθήκες υγρασίας), ενώ αντίθετα το ποσοστό απωλειών κυμάνθηκε σε χαμηλά επίπεδα, με μέση τιμή μόλις 3%. Όπως προαναφέρθηκε, η χαμηλή αυτή τιμή δεν προκαλεί έκπληξη, καθώς φαίνεται ότι ένα μικρό έστω τμήμα της λεκάνης συνεισφέρει άμεσα στην παραγωγή απορροής.

Κατ' αντιστοιχία με το ποσοστό αρχικών απωλειών α, και για την παράμετρο β του χρόνο ανόδου του ΣΜΥ προέκυψαν αρκετά σαφή συμπεράσματα. Συγκεκριμένα, στα περισσότερα επεισόδια, τόσο της συνολικής λεκάνης όσο και την υπολεκάνης ανάντη του σταθμού Λυκόρεμα, προέκυψε χρόνος ανόδου της τάξης του 1/3 του χρόνου συγκέντρωσης κατά Giandotti. Η τιμή αυτή είναι αρκετά χαμηλότερη σε σχέση με αυτή που εφαρμόζεται στις συνήθεις εκδοχές των ΣΜΥ, όπου κατά κανόνα λαμβάνεται $t_a \approx d + 0.6\ t_c$.



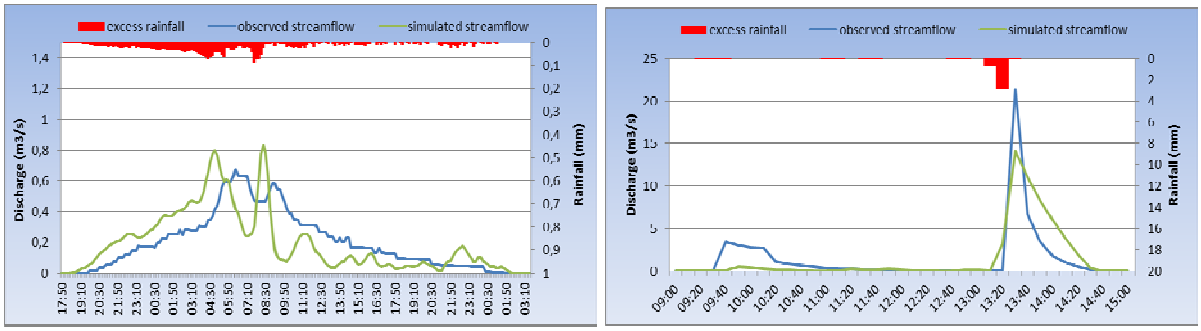
Σχήμα 5.8: Συγκριτική αξιολόγηση μεθόδων Snyder, Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας, και εμπειρικού ΣΜΥ με βελτιστοποιημένες τιμές παραμέτρων, για τα επεισόδια πλημμυρών στις 1/2/2005 (πάνω διάγραμμα), 19/12/2004 (μεσαίο διάγραμμα) και 23/3/2007 (κάτω διάγραμμα) στον σταθμό Ντράφι (Πηγή: Μαθιουδάκη, 2012).

5.3.7 Προσαρμογή ΣΜΥ για μεταβλητό χρόνο συγκέντρωσης

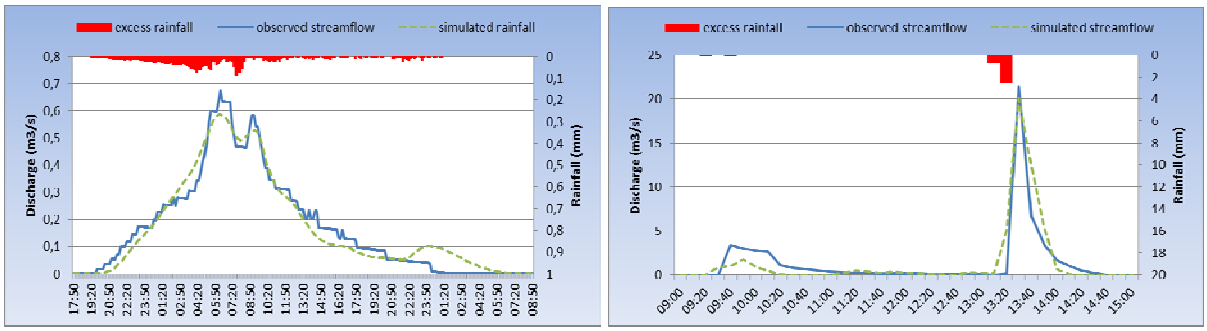
Σε λίγες αλλά εμφανείς περιπτώσεις, η προσαρμογή του παραμετρικού ΣΜΥ δεν ήταν εξίσου επιτυχής με άλλα πλημμυρικά επεισόδια. Δύο τέτοιες περιπτώσεις απεικονίζονται στο Σχήμα 5.9. Στο αριστερό διάγραμμα απεικονίζεται ένα πολύ ομαλό υδρογράφημα με μεγάλη διάρκεια και πολύ χαμηλές αιχμές, ενώ, αντίθετα, στο δεξί διάγραμμα απεικονίζεται ένα απότομο υδρογράφημα μικρής διάρκειας και υψηλής παροχής αιχμής. Μια προφανής ερμηνεία της κακής προσαρμογής του παραμετρκού ΣΜΥ είναι η εσφαλμένη εκτίμηση του χρόνου βάσης του, ως συνέπεια της εσφαλμένης εκτίμησης του χρόνου συγκέντρωσης.

Προκειμένου να εξασφαλιστεί μεγαλύτερη ευελιξία στο σχήμα του ΣΜΥ, ο χρόνος βάσης εκφράστηκε και αυτός ως συνάρτηση του χρόνου συγκέντρωσης, με την εισαγωγή μιας επιπλέον παραμέτρου $\gamma > 0$, έτσι ώστε $t_b = d + \gamma\, t_c$. Συμβατικά θεωρείται ότι το μέγεθος tc υποδηλώνει τον χρόνο συγκέντρωσης κατά Giandotti, ενώ η έκφραση $t_c^* = \gamma\, t_c$ υποδηλώνει μια ανηγμένη τιμή του, που μεταβάλλεται σε κάθε πλημμυρικό επεισόδιο. Η υπόθεση αυτή είναι πλήρως συνεπής με την έννοια του μεταβλητού χρόνου συγκέντρωσης, που συζητήθηκε στην ενότητα 3.7 (βλ. και Grimaldi *et al.*, 2012).

Στο παραπάνω πλαίσιο, επαναλήφθηκε η διαδικασία αναπαραγωγής των παρατηρημένων υδρογραφημάτων με τη συνδυαστική μέθοδο SCS-CN&MY, βελτιστοποιώντας τις δύο χρονικές παραμέτρους του ΣΜΥ. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.10, η προσαρμογή είναι πλέον πολύ πιο ακριβής. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι στα πρώτο επεισόδιο που εξετάζεται (αριστερά διάγραμμα), ο ανηγμένος χρόνος συγκέντρωσης t_c^* αυξάνει από 70 min, που είναι η αρχική εκτίμηση κατά Giandotti, σε 450 min, παρέχοντας έτσι ένα πολύ πιο εξομαλυμένο υδρογράφημα. Αντίθετα, στη δεύτερη περίπτωση ο ανηγμένος χρόνος συγκέντρωσης t_c^* μειώνεται σε 40 min, επιτρέποντας την αναπαράσταση της ταχείας αύξησης της παροχής, όπως αναμένεται λόγω της πολύ μεγάλης έντασης της βροχόπτωσης στο εν λόγω επεισόδιο.



Σχήμα 5.9: Χαρακτηριστικές περιπτώσεις ανεπιτυχούς προσαρμογής του παραμετρκού ΣΜΥ, με θεώρηση σταθερού χρόνου συγκέντρωσης (Πηγή: Mathioudaki *et al.*, 2012).



Σχήμα 5.10: Βελτιωμένη προσαρμογή του παραμετρκού ΣΜΥ, με θεώρηση μεταβλητού χρόνου συγκέντρωσης (Πηγή: Mathioudaki *et al.*, 2012).

5.4 Αναπαραγωγή πλημμυρικών επεισοδίων στις πιλοτικές λεκάνες

5.4.1 Μεθοδολογία και παραδοχές

Οι προκαταρκτικές αναλύσεις στη λεκάνη Λυκορέματος Ραφήνας κατέδειξαν ότι η μέθοδος SCS-CN, εφόσον συνδυαστεί με κατάλληλο ΜΥ, μπορεί να αναπαραστήσει με ικανοποιητική ακρίβεια ένα ευρύ φάσμα υδρογραφημάτων, που παράγονται από καταιγίδες διαφορετικής δομής και πολυπλοκότητας. Στην προσέγγιση αυτή, αποδείχτηκε ιδιαίτερα κρίσιμη η διαμόρφωση ενός παραμετρικού ΣΜΥ, τα χρονικά μεγέθη του οποίου (χρόνος ανόδου αιχμής και χρόνος βάσης) εκφράζονται συναρτήσει του χρόνου συγκέντρωσης, t_c, που εκτιμάται από την σχέση του Giandotti.

Για την προσομοίωση των πλημμυρικών παροχών στο σύνολο των πιλοτικών λεκανών του έργου αναπτύχθηκε μια ελαφρά διαφορετική δομή του παραμετρικού ΣΜΥ που εφαρμόστηκε στη λεκάνη Λυκορέματος. Το τροποποιημένο ΣΜΥ αποτελείται από έναν γραμμικό ανοδικό κλάδο και ένα αρνητικά εκθετικό καθοδικό κλάδο, όπως περιγράφεται στο εδάφιο 5.4.2. Η θεώρηση της εκθετικής σχέσης αντί για άλλες μορφές απόσβεσης προέκυψε με βάση τα παρατηρημένα επεισόδια, στα οποία διαπιστώθηκε ότι η εκφόρτιση της πλημμύρας προσεγγίζεται με ικανοποιητική ακρίβεια από μια εξίσωση τύπου γραμμικού ταμιευτήρα. Η προσέγγιση του γραμμικού ταμιευτήρα έχει χρησιμοποιηθεί σε πληθώρα εννοιολογικών υδρολογικών μοντέλων, για την αναπαράσταση διεργασιών στείρευσης, όπως η υποδερμική ροή. Η χρήση τέτοιων μοντέλων υπήρξε αρκετά επιτυχής για την προσομοίωση των πλημμυρικών ροών στις λεκάνες του Σαρανταπόταμου, Περιστρώνα και Ξεριά, σε μια απόπειρα εφαρμογής σχημάτων υδραυλικών αναλόγων, ως εναλλακτικών της μεθόδου SCS-CN&MY (Μιχαηλίδη, 2013· Μαστροθεόδωρος, 2013· Michaelidi *et al.*, 2013).

Όπως προηγουμένως, εφαρμόστηκε μια διαδικασία πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης σε ένα πλήθος επεισοδίων που ελήφθησαν από τις πιλοτικές λεκάνες, με σκοπό την προσαρμογή των παραμέτρων της μεθόδου SCS-CN&MY για κάθε παρατηρημένο πλημμυρογράφημα ξεχωριστά. Ειδικότερα, βελτιστοποιήθηκαν οι παράμετροι α (ποσοστό αρχικών απωλειών), β (παράμετρος χρόνου ανόδου) και γ (παράμετρος χρόνου βάσης). Για δεδομένη τιμή του α, και με γνωστά το ολικό ύψος βροχής, h, και το ύψος πλημμυρικής απορροής, h_e, του εκάστοτε επεισοδίου, η μέγιστη δυνητική κατακράτηση, S, και συνακόλουθα η παράμετρος CN, υπολογίστηκαν αναλυτικά, μέσω των σχέσεων (4.8) και (4.13), αντίστοιχα. Με τον τρόπο αυτό ότι σε κάθε σύνολο τιμών παραμέτρων που εξετάζεται στα πλαίσια της διαδικασίας βελτιστοποίησης, εξασφαλίζεται ακριβή αναπαραγωγή του όγκου του πλημμυρογραφήματος. Ως στοχική συνάρτηση χρησιμοποιήθηκε η σχέση (5.14), χωρίς τον τελευταίο όρο, η χρήση του οποίου παρέλκει.

Για κάθε επεισόδιο αναζητήθηκε, όπου ήταν διαθέσιμη, η αθροιστική βροχόπτωση των προηγούμενων πέντε ημερών, για τον προσδιορισμό της κατάστασης υγρασίας του εδάφους, σύμφωνα με την τυπική διαδικασία της SCS (βλ. 4.2.3). Στην περίπτωση που το επεισόδιο αναφερόταν είτε σε ξηρές είτε σε υγρές συνθήκες εδάφους, τότε η βελτιστοποιημένη τιμή του CN διορθώθηκε ώστε να αντιστοιχεί σε συνθήκες τύπου ΙΙ, με εφαρμογή των σχέσεων (4.9) ή (4.10), αντίστοιχα. Τέλος, από τις σχέσεις (4.8) και (4.13), εκτιμήθηκε η τιμή αναφοράς του CN, για ποσοστό απωλειών $\alpha = 0.20$ και συνθήκες υγρασίας τύπου ΙΙ.

Υπενθυμίζεται ότι οι παραπάνω αναλύσεις αφορούν στο καθαρό πλημμυρογράφημα κάθε λεκάνης, και όχι στο συνολικό υδρογράφημα. Για την αφαίρεση της βασικής ροής από το υδρογράφημα υιοθετήθηκε μια απλούστερη προσέγγιση σε σχέση με αυτή που εφαρμόστηκε στις προκαταρκτικές αναλύσεις στη λεκάνη Λυκορέματος (βλ. 5.3.3). Συγκεκριμένα, ως

βασική ροή ελήφθη η τιμή της παροχής αμέσως πριν την έναρξη του πλημμυρικού επεισοδίου, η οποία μάλιστα θεωρήθηκε σταθερή στη διάρκεια του επεισοδίου. Συνεπώς, για τον διαχωρισμό της επιφανειακής απορροής από τη συνολική απλά αφαιρέθηκε η αρχική τιμή από την παρατηρημένη χρονοσειρά παροχών. Υπενθυμίζεται ότι η προηγούμενη προσέγγιση (βλ. 5.3.3) βασίστηκε στην υπόθεση ότι η πλημμυρική απορροή αποσβένεται πλήρως μετά από χρόνο t_c μετά τη λήξη της βροχής. Ωστόσο, με την υπόθεση αυτή αγνοείται, σε μεγάλο βαθμό, η συνεισφορά της υποδερμικής ροής που, όπως έδειξαν οι αναλύσεις του Κεφαλαίου 2, αποτελεί την πλέον ουσιώδη συνιστώσα των παρατηρημένων πλημμυρογραφημάτων. Όπως είναι εύλογο, η υποδερμική ροή αποσβένεται σε χρόνο πολύ μεγαλύτερο του χρόνου συγκέντρωσης, καθώς η ταχύτητα ροής διαμέσου του εδάφους (ακόρεστη ζώνη) είναι πολύ μικρότερη της ταχύτητας ροής πάνω στην επιφάνεια της λεκάνης[1].

Οι βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων ομαδοποιήθηκαν για κάθε λεκάνη, προκειμένου να εξαχθούν αντιπροσωπευτικές τιμές τους καθώς και εκτιμήσεις της μεταβλητότητάς τους. Στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα συγκεντρωτικά μεγέθη όλων των εξεταζόμενων λεκανών.

5.4.2 Παραμετρικό συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα

Στο Σχήμα 5.11 απεικονίζονται το τροποποιημένο παραμετρικό ΣΜΥ, διάρκειας βροχής d, και τα δύο χαρακτηριστικά χρονικά του μεγέθη, δηλαδή ο χρόνος ανόδου, t_p, και ο χρόνος βάσης, t_b. Ο χρόνος ανόδου εκφράζεται ως:

$$t_p = d / 2 + \beta\, t_c \tag{5.15}$$

ενώ ο χρόνος βάσης δίνεται από τη σχέση:

$$t_b = d + \gamma\, t_c \tag{5.16}$$

όπου t_c ο χρόνος συγκέντρωσης, και β, γ παράμετροι με $0 < \beta < 1$ και $\gamma \geq 1$ (δεν έχει φυσικό νόημα η θεώρηση χρόνου βάσης μικρότερη του χρόνου συγκέντρωσης[2]).

Οι χρόνοι t_p και t_b στρογγυλεύονται ώστε να εκφράζονται ως ακέραιο πολλαπλάσιο της διάρκειας d, ήτοι:

$$T_p = \mathrm{ROUND}(t_p / d)\, d \tag{5.17}$$

$$T_b = \mathrm{ROUND}(t_b / d)\, d \tag{5.18}$$

Για δεδομένες τιμές των t_p και t_b (ή, ισοδύναμα, για δεδομένες τιμές των παραμέτρων β και γ), υπολογίζονται οι τεταγμένες του ΣΜΥ ως εξής:

Για $t \leq T_p$ (ανοδικός κλάδος υδρογραφήματος), οι παροχές υπολογίζονται από τη σχέση:

$$u(t) = q_p\, t / T_p \tag{5.19}$$

όπου q_p η παροχή αιχμής του ΣΜΥ.

---

[1] Στη βιβλιογραφία αναφέρονται ταχύτητες υπεδάφιας απορροής που μετρήθηκαν στη μάζα του εδάφους χωρίς μακροπόρους από 45 έως 46 cm/hr (Dunne and Leopold, 1978), και διαμέσου των μακροπόρων του από 6.1 έως 75.6 m/hr (Mosley, 1979, 1982).

[2] Τονίζεται ότι στις παραπάνω εκφράσεις ο χρόνος συγκέντρωσης θεωρείται μεταβλητός, δηλαδή εξαρτώμενος από την παροχή ή, κατ' αντιστοιχία, την ένταση της βροχής. Εφόσον στο παραμετρικό ΣΜΥ χρησιμοποιείται σε μελέτες σχεδιασμού, συστήνεται να λαμβάνεται ο ανηγμένος χρόνος συγκέντρωσης, που εκτιμάται από την εμπειρική σχέση (3.33), και όχι η τιμή κατά Giandotti, που αναφέρεται σε συνήθη επεισόδια πλημμυρών.

Για $t > T_p$ (καθοδικός κλάδος υδρογραφήματος), οι παροχές υπολογίζονται από την αντίστροφη εκθετική σχέση:

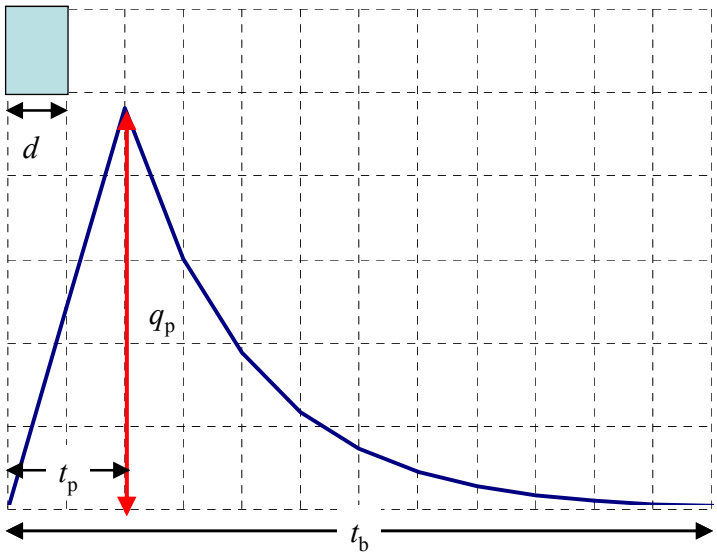
$$u(t) = q_p \exp(-k\, t / T_b) \tag{5.20}$$

όπου k τέτοια ώστε για $t = T_b$ η παροχή να είναι ίση με μια ελάχιστη τιμή q_0, δηλαδή $u(T_b) = q_0$. Από τη σχέση (5.20) προκύπτει ο αναλυτικός υπολογισμός του συντελεστή στείρευσης k:

$$k = -\ln(q_0 / q_p) \tag{5.21}$$

Η παροχή στο πέρας του χρόνου βάσης λαμβάνεται συμβατικά ίση με $q_0 = 0.01$ m^3/s.

Η παροχή αιχμής q_p προκύπτει από την εξίσωση συνέχειας, δηλαδή της εξίσωση του όγκου του ΣΜΥ με τον όγκο της μοναδιαίας βροχής $V_0 = h_0\, A$, όπου $h_0 = 10$ mm το ύψος της μοναδιαίας βροχής και A η έκταση της λεκάνης. Για τον υπολογισμό της παροχής αιχμής q_p δεν υπάρχει αναλυτική σχέση, καθώς από την εξίσωση των όγκων προκύπτει μια πεπλεγμένη σχέση που επιλύεται αριθμητικά.



Σχήμα 5.11: Παραμετρικό συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα διάρκειας βροχής d και χαρακτηριστικά μεγέθη.

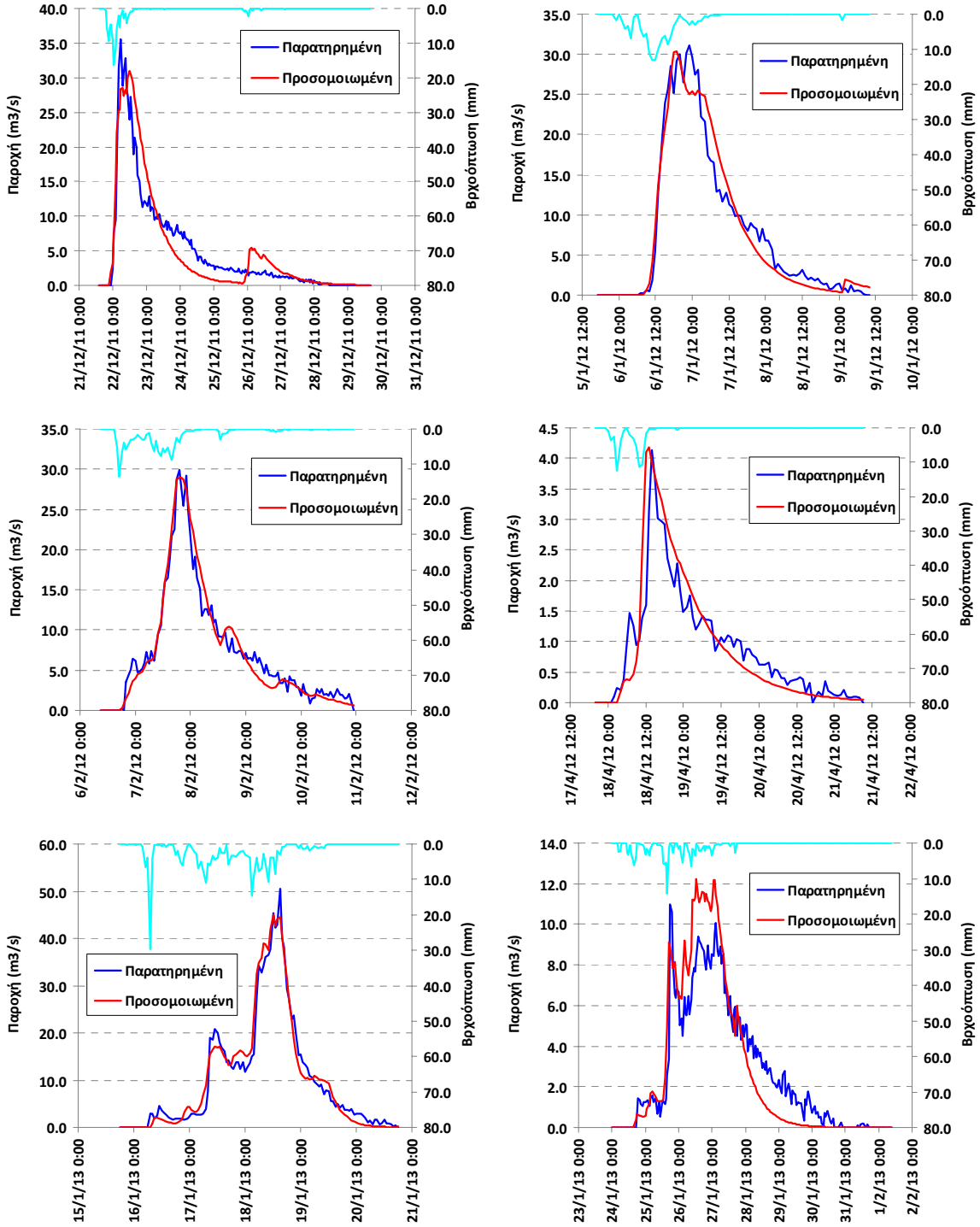
5.5 Σύγκριση παρατηρημένων και προσομοιωμένων υδρογραφημάτων

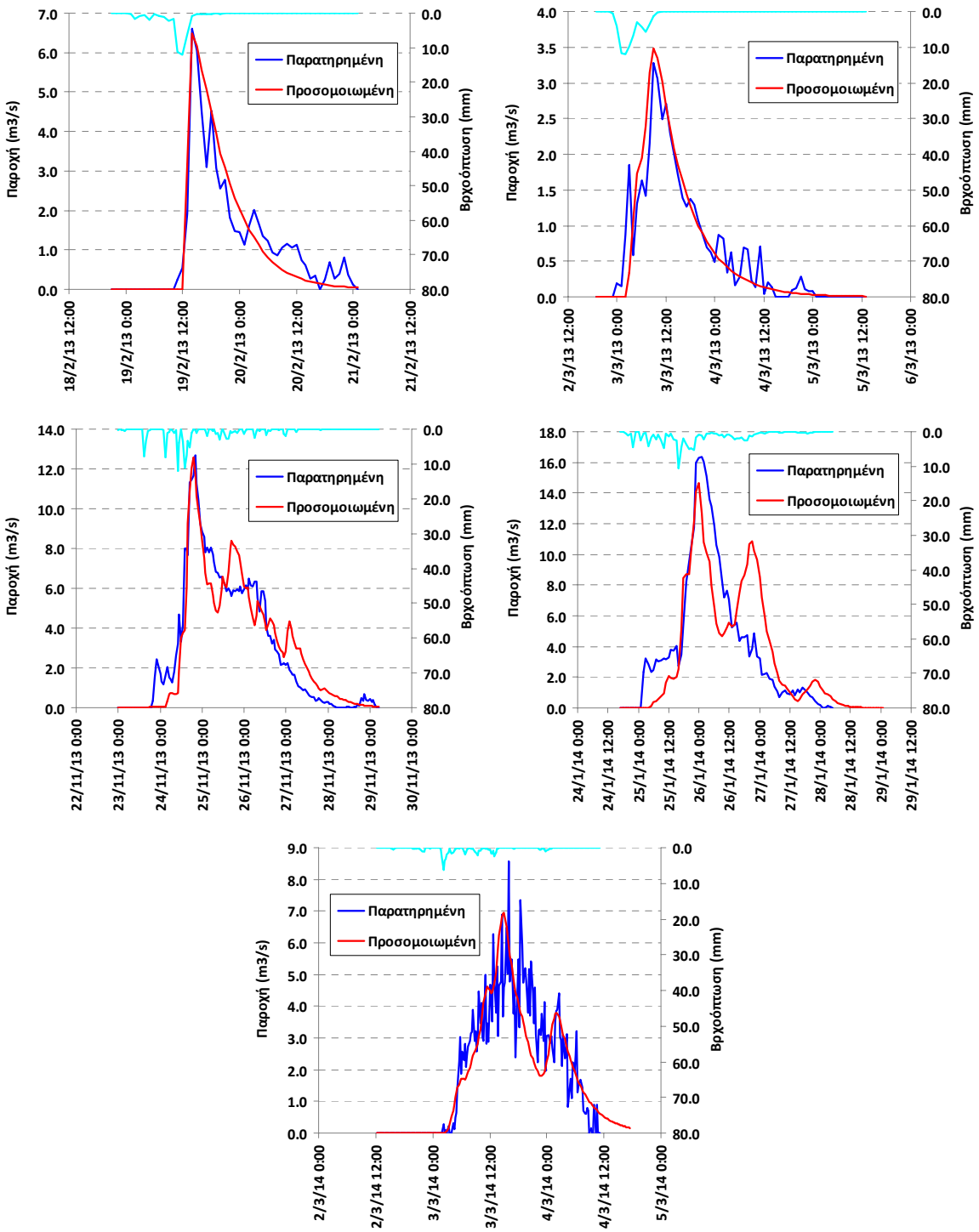
5.5.1 Λεκάνη Νέδοντα

Στο Σχήμα 5.12 συγκρίνονται τα προσομοιωμένα και παρατηρημένα πλημμυρογραφήματα της λεκάνης του Νέδοντα, που αναφέρονται στον υδρομετρικό σταθμό Λατομείο Μπάκα, για 11 επεισόδια που εξετάστηκαν. Στο πάνω μέρος κάθε διαγράμματος απεικονίζεται, ακόμη, το αντίστοιχο επεισόδιο καταιγίδας. Η χρονοσειρά βροχόπτωσης έχει εξαχθεί με επιφανειακή ολοκλήρωση των σημειακών δειγμάτων των βροχομετρικών σταθμών τη λεκάνης. Στις περιπτώσεις ελλείψεων, π.χ. επειδή ο σταθμός δεν ήταν σε λειτουργία την αντίστοιχη περίοδο, έγινε συμπλήρωση των κενών τιμών, με τη διαδικασία που περιγράφεται στη σχετική τεχνική έκθεση (Μαρκόνης *κ.ά.*, 2014).

Η προσομοίωση έγινε με ωριαίο χρονικό βήμα, διαμορφώνοντας το αντίστοιχο παραμετρικό ΣΜΥ (διαφορετικό για κάθε επεισόδιο). Η προτεινόμενη μεθοδολογία επιτυγχάνει πολύ καλή

προσαρμογή στα παρατηρημένα υδρογραφήματα, που γενικά χαρακτηρίζονται από απότομου ανοδικούς κλάδους και αργή απόσβεση. Ειδικότερα, οι παρατηρημένες παροχές αιχμής αναπαράγονται με εξαιρετική ακρίβεια, κάτι που αποτελεί προφανές ζητούμενο μιας τέτοιας ανάλυσης. Η προσέγγιση είναι ικανοποιητική ακόμα και για επεισόδια σύνθετης δομής, τα οποία παράγονται από διακοπτόμενα φαινόμενα καταιγίδας ή εμφανίζουν πολλαπλές αιχμές.



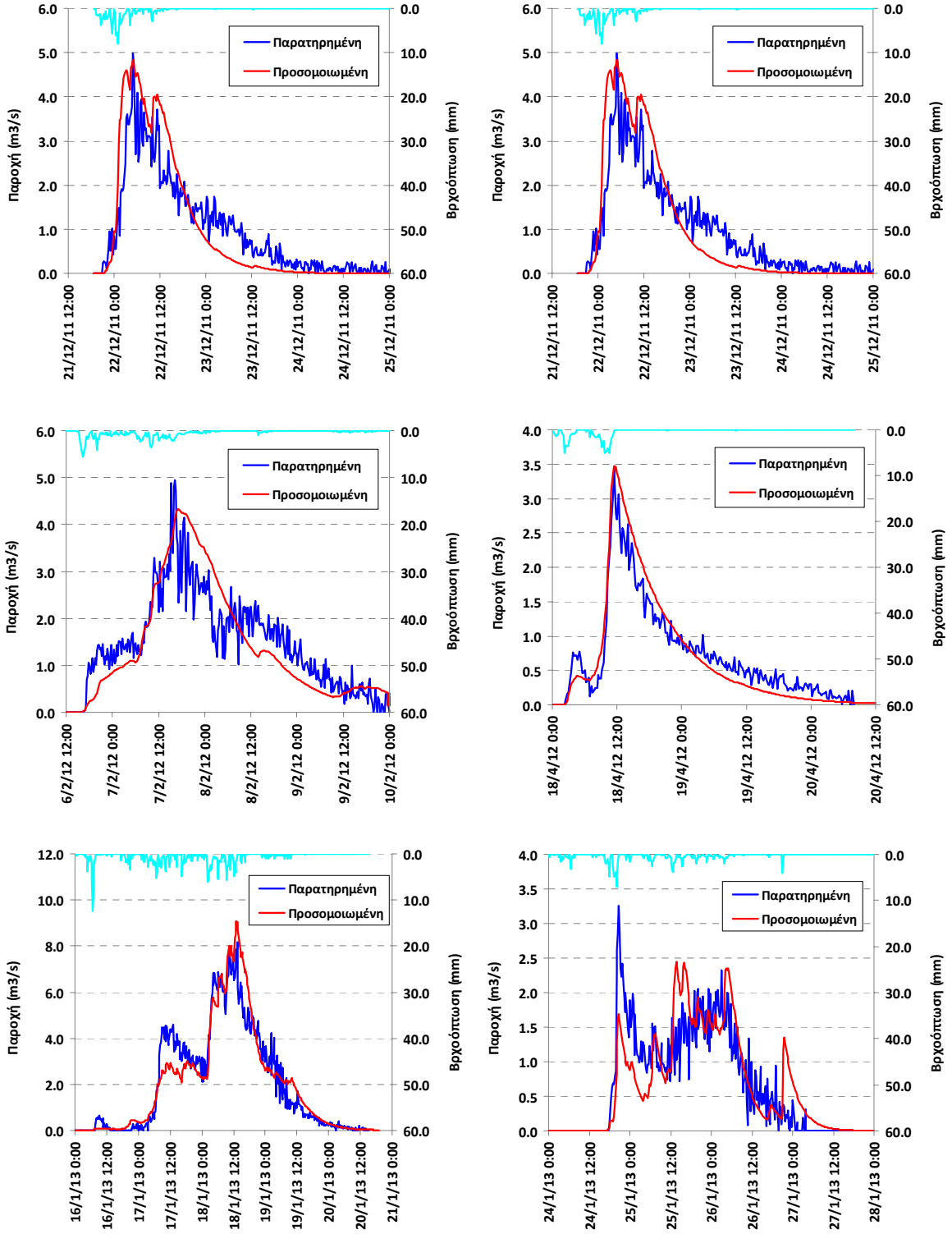


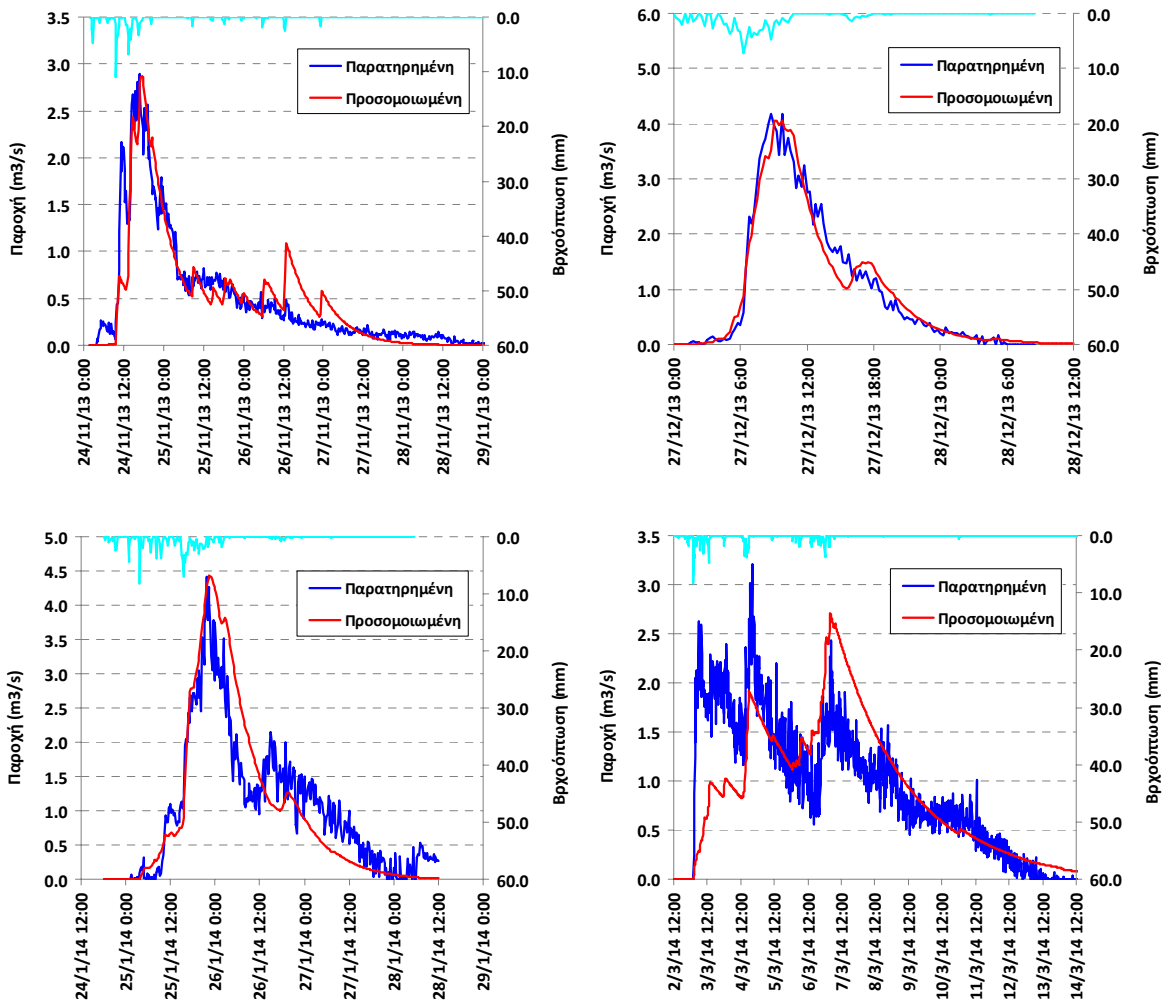
Σχήμα 5.12: Σύγκριση παρατηρημένων και προσομοιωμένων υδρογραφημάτων στην έξοδο της λεκάνης του Νέδοντα (υδρομετρικός σταθμός Λατομείου Μπάκα).

5.5.2 Υπολεκάνη Καρβελιώτη

Στο Σχήμα 5.13 συγκρίνονται τα προσομοιωμένα και παρατηρημένα πλημμυρογραφήματα της υπολεκάνης του Καρβελιώτη (παραπόταμος του Νέδοντα), που αναφέρονται στον υδρομετρικό σταθμό Γέφυρα Καρβελίου, για 10 επεισόδια που εξετάστηκαν. Στο πάνω μέρος απεικονίζεται, ακόμη, το αντίστοιχο επεισόδιο καταιγίδας, που βασίστηκε στα δεδομένα του βροχομετρικού σταθμού Καρβελιώτη.

Η προσομοίωση έγινε για χρονικό βήμα 15 min, διαμορφώνοντας το αντίστοιχο παραμετρικό ΣΜΥ της λεκάνης (διαφορετικό για κάθε επεισόδιο). Η προτεινόμενη μεθοδολογία επιτυγχάνει πολύ καλή προσαρμογή στα παρατηρημένα υδρογραφήματα, ακόμα και αυτά που χαρακτηρίζονται από πολύπλοκη δομή. Στις περισσότερες περιπτώσεις, τα υδρογραφήματα είναι εμφανώς εξομαλυμένα συγκριτικά με τα αντίστοιχα υετογραφήματα, που αποτελεί ισχυρή ένδειξη κυριαρχίας της υποδερμικής ροής, στην αναπαραγωγή της οποίας το προτεινόμενο πλαίσιο δίνει ιδιαίτερη έμφαση.



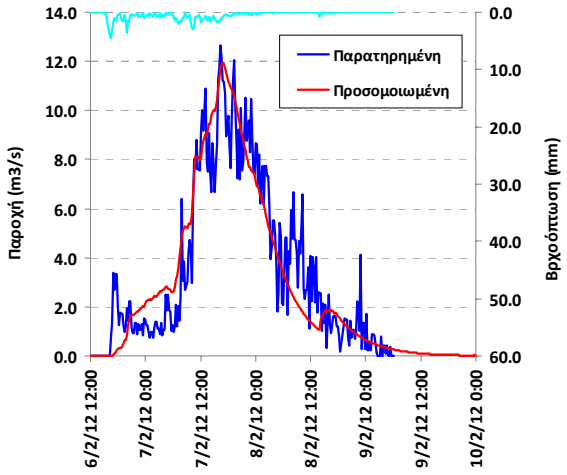


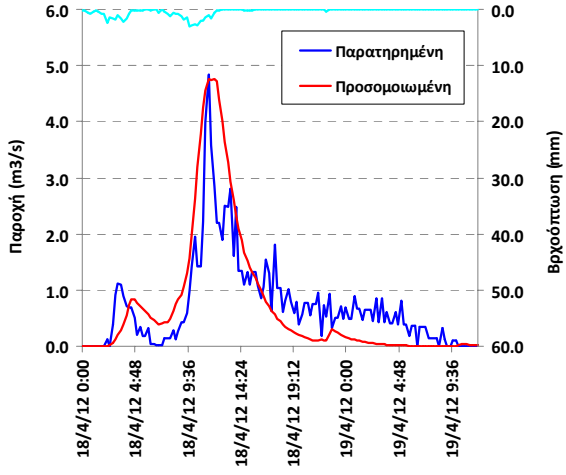
Σχήμα 5.13: Σύγκριση παρατηρημένων και προσομοιωμένων υδρογραφημάτων στην έξοδο της υπολεκάνης Καρβελιώτη (υδρομετρικός σταθμός γέφυρας Καρβελίου).

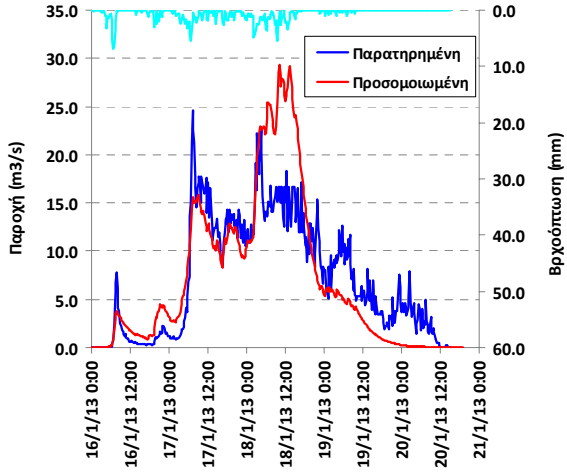
5.5.3 Υπολεκάνη Αλαγονίας

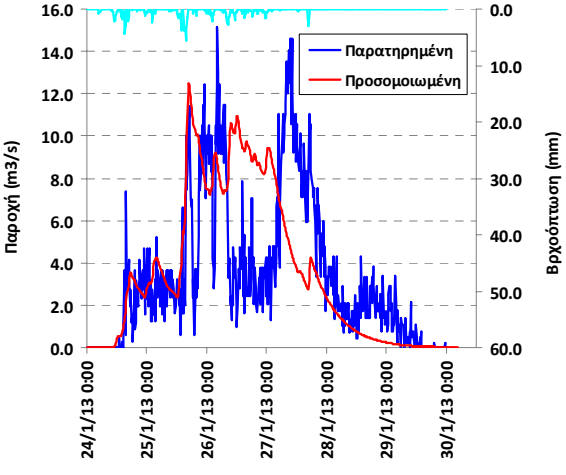
Στο Σχήμα 5.14 συγκρίνονται τα προσομοιωμένα και παρατηρημένα πλημμυρογραφήματα της υπολεκάνης του ρέματος Αλαγονίας (παραπόταμος του Νέδοντα), που αναφέρονται στον υδρομετρικό σταθμό Νερόμυλος Ρεντίφη, για 8 επεισόδια που εξετάστηκαν. Στο πάνω μέρος απεικονίζεται, ακόμη, το αντίστοιχο επεισόδιο καταιγίδας, που προέκυψε από επιφανειακή ολοκλήρωση των δειγμάτων των βροχομετρικών σταθμών Καρβελιώτη, Αλαγονίας και Νέδουσας (Μαρκόνης *κ.ά.*, 2014).

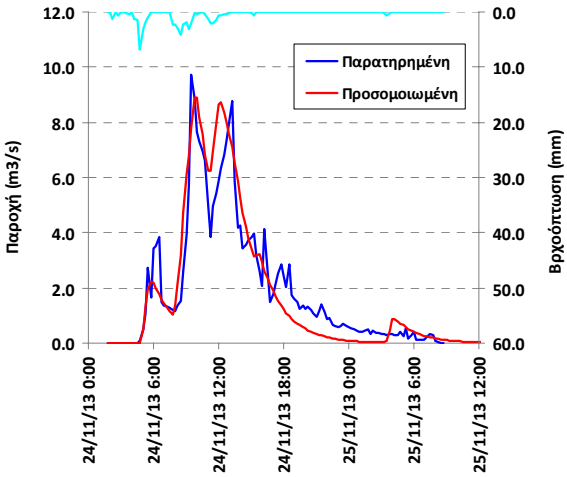
Η προσομοίωση έγινε για χρονικό βήμα 15 min, διαμορφώνοντας το αντίστοιχο παραμετρικό ΣΜΥ ανά επεισόδιο. Σε σύγκριση με τη γειτονική υπολεκάνη του Καρβελιώτη, τα υδρογραφήματα είναι πιο απότομα, και οι παροχές αιχμής σαφώς μεγαλύτερες, παρόλο που και οι δύο λεκάνες έχουν παρεμφερή έκταση (Καρβελιώτης 15.3 km^2, Αλαγονία 20.9 km^2). Η διαφορετική υδρολογική συμπεριφορά, η οποία περιγράφεται με ικανοποιητική ακρίβεια από το συνδυαστικό μοντέλο, οφείλεται στα διαφορετικά φυσιογραφικά χαρακτηριστικά των δύο περιοχών, και ιδιαίτερα στην επίδραση της φυτοκάλυψης. Η διαφοροποίηση αυτή αποτυπώνεται στη μέση τιμή της παραμέτρου CN όπως προέκυψε από τις προσομοιώσεις, που είναι 63 στην υπολεκάνη της Αλαγονίας και μόλις 33 στην υπολεκάνη του Καρβελιώτη (βλ. ενότητα 5.6).

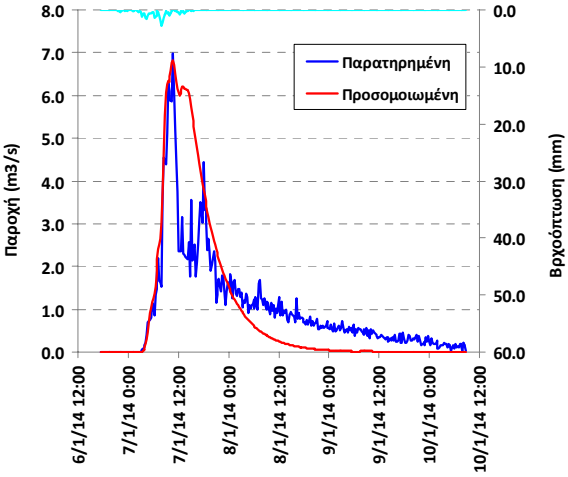

Παρατηρημένη
Προσομοιωμένη
Παροχή (m3/s)
Βροχόπτωση (mm)
14.0
12.0
10.0
8.0
6.0
4.0
2.0
0.0
0.0
10.0
20.0
30.0
40.0
50.0
60.0
6/2/12 12:00
7/2/12 0:00
7/2/12 12:00
8/2/12 0:00
8/2/12 12:00
9/2/12 0:00
9/2/12 12:00
10/2/12 0:00

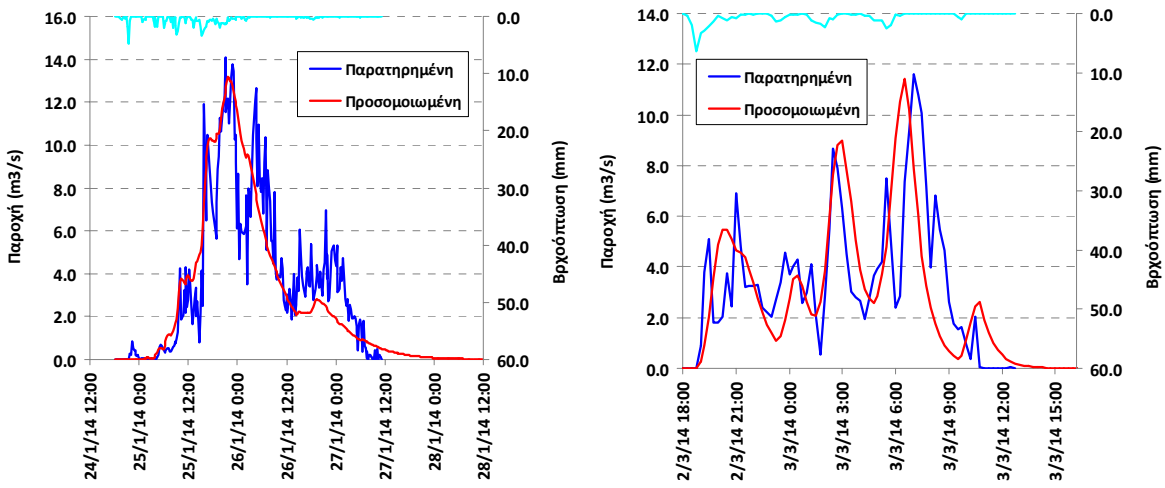

Παρατηρημένη
Προσομοιωμένη
Παροχή (m3/s)
Βροχόπτωση (mm)
6.0
5.0
4.0
3.0
2.0
1.0
0.0
0.0
10.0
20.0
30.0
40.0
50.0
60.0
18/4/12 0:00
18/4/12 4:48
18/4/12 9:36
18/4/12 14:24
18/4/12 19:12
19/4/12 0:00
19/4/12 4:48
19/4/12 9:36


Παρατηρημένη
Προσομοιωμένη
Παροχή (m3/s)
Βροχόπτωση (mm)
35.0
30.0
25.0
20.0
15.0
10.0
5.0
0.0
0.0
10.0
20.0
30.0
40.0
50.0
60.0
16/1/13 0:00
16/1/13 12:00
17/1/13 0:00
17/1/13 12:00
18/1/13 0:00
18/1/13 12:00
19/1/13 0:00
19/1/13 12:00
20/1/13 0:00
20/1/13 12:00
21/1/13 0:00


Παρατηρημένη
Προσομοιωμένη
Παροχή (m3/s)
Βροχόπτωση (mm)
16.0
14.0
12.0
10.0
8.0
6.0
4.0
2.0
0.0
0.0
10.0
20.0
30.0
40.0
50.0
60.0
24/1/13 0:00
25/1/13 0:00
26/1/13 0:00
27/1/13 0:00
28/1/13 0:00
29/1/13 0:00
30/1/13 0:00


Παρατηρημένη
Προσομοιωμένη
Παροχή (m3/s)
Βροχόπτωση (mm)
12.0
10.0
8.0
6.0
4.0
2.0
0.0
0.0
10.0
20.0
30.0
40.0
50.0
60.0
24/11/13 0:00
24/11/13 6:00
24/11/13 12:00
24/11/13 18:00
25/11/13 0:00
25/11/13 6:00
25/11/13 12:00


Παρατηρημένη
Προσομοιωμένη
Παροχή (m3/s)
Βροχόπτωση (mm)
8.0
7.0
6.0
5.0
4.0
3.0
2.0
1.0
0.0
0.0
10.0
20.0
30.0
40.0
50.0
60.0
6/1/14 12:00
7/1/14 0:00
7/1/14 12:00
8/1/14 0:00
8/1/14 12:00
9/1/14 0:00
9/1/14 12:00
10/1/14 0:00
10/1/14 12:00

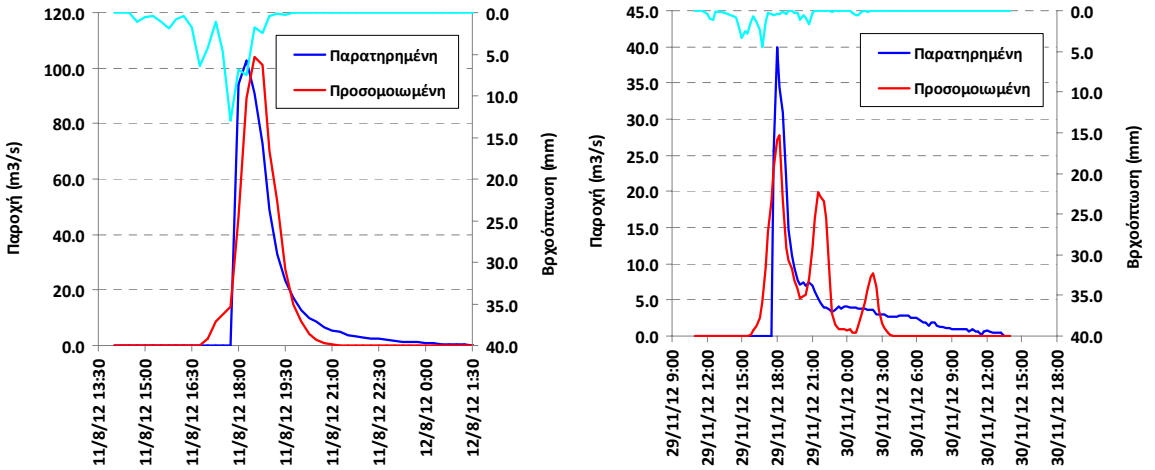


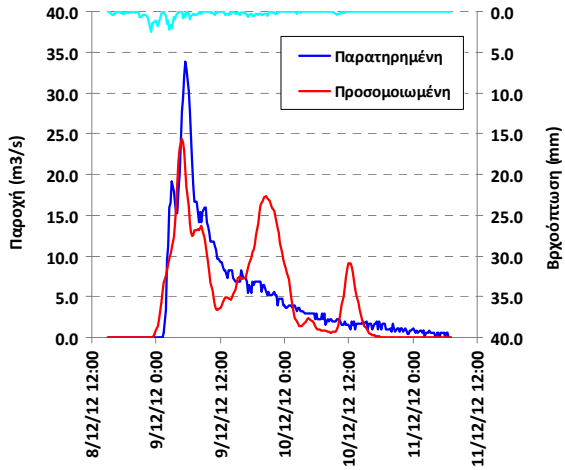
Σχήμα 5.14: Σύγκριση παρατηρημένων και προσομοιωμένων υδρογραφημάτων στην έξοδο της υπολεκάνης Αλαγονίας (υδρομετρικός σταθμός Νερόμυλου Ρεντίφη).

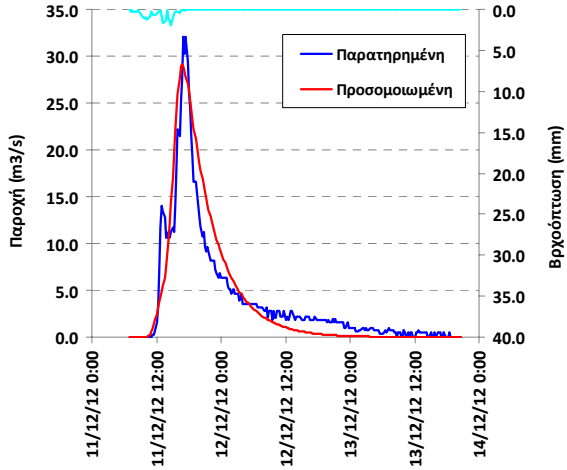
5.5.4 Λεκάνη Λούσιου

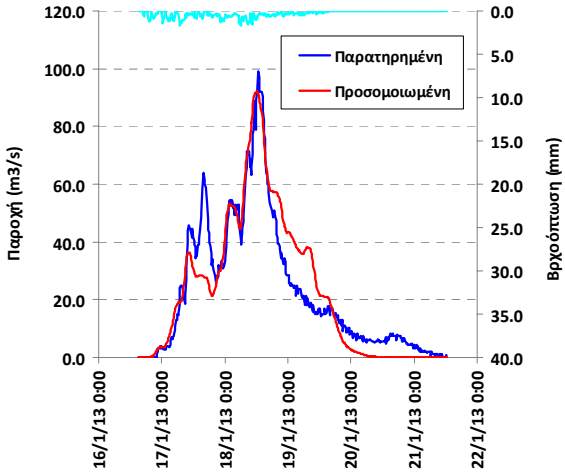
Στο Σχήμα 5.15 συγκρίνονται τα προσομοιωμένα και παρατηρημένα πλημμυρογραφήματα της λεκάνης του Λούσιου, που αναφέρονται στον υδρομετρικό σταθμό της Γέφυρας Ατσίχολου (όπου έχει εγκατασταθεί ροόμετρο), για 11 επεισόδια που εξετάστηκαν. Στο πάνω μέρος κάθε διαγράμματος απεικονίζεται, ακόμη, το αντίστοιχο επεισόδιο καταιγίδας. Η χρονοσειρά βροχόπτωσης έχει εξαχθεί με επιφανειακή ολοκλήρωση των σημειακών δειγμάτων των βροχομετρικών σταθμών της, ανάλογα με την περίοδο λειτουργίας του κάθε σταθμού (Μαρκόνης *κ.ά.*, 2014).

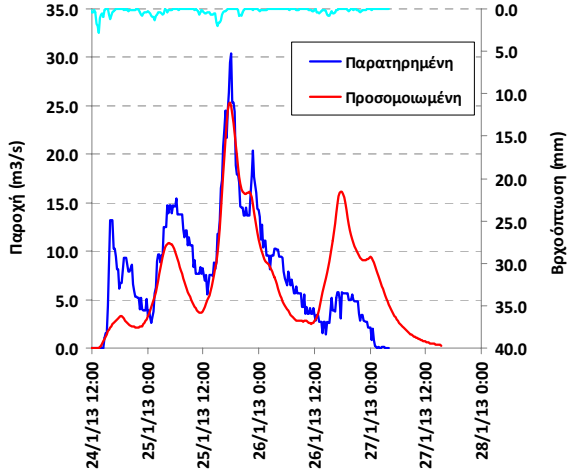
Η προσομοίωση έγινε με χρονικό βήμα 15 min, διαμορφώνοντας το αντίστοιχο παραμετρικό ΣΜΥ ανά επεισόδιο. Αντίθετα με τις άλλες πιλοτικές λεκάνες, ο Λούσιος διατηρεί σημαντική βασική ροή όλες τις περιόδους του έτους, η οποία μάλιστα προέρχεται από την εκφόρτιση μιας ευρύτερης υδρογεωλογικής λεκάνης. Ακόμη, στη λεκάνη του Λούσιου καταγράφονται σαφώς υψηλότεροι συντελεστές απορροής σε σχέση με τις άλλες περιοχές μελέτης. Οι προσομοιώσεις αποσκοπούν, προφανώς, στην αναπαραγωγή της επιφανειακής και μόνο απορροής, που παράγεται στην ίδια υδρολογική λεκάνη. Με ορισμένες εξαιρέσεις, η αναπαραγωγή αυτή είναι ικανοποιητική, ακόμα και για επεισόδια ιδιαίτερα σύνθετης δομής.

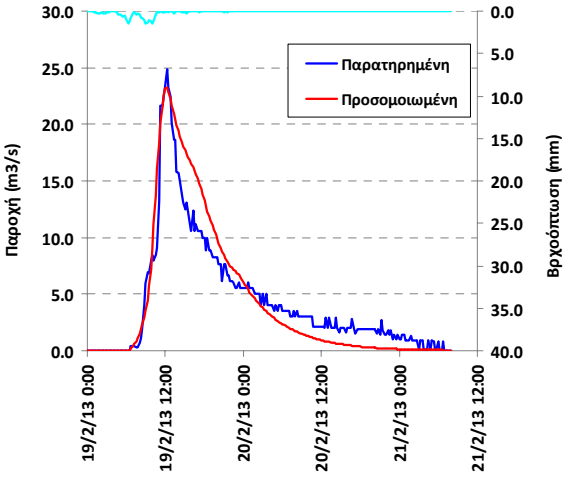


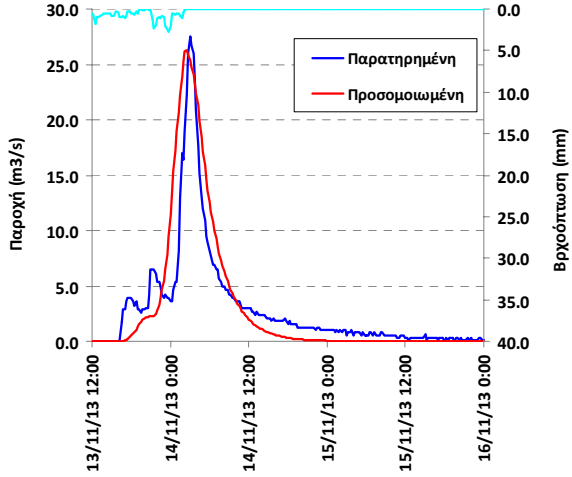

Παρατηρημένη
Προσομοιωμένη
Παροχή (m3/s)
Βροχόπτωση (mm)
8/12/12 12:00
9/12/12 0:00
9/12/12 12:00
10/12/12 0:00
10/12/12 12:00
11/12/12 0:00
11/12/12 12:00

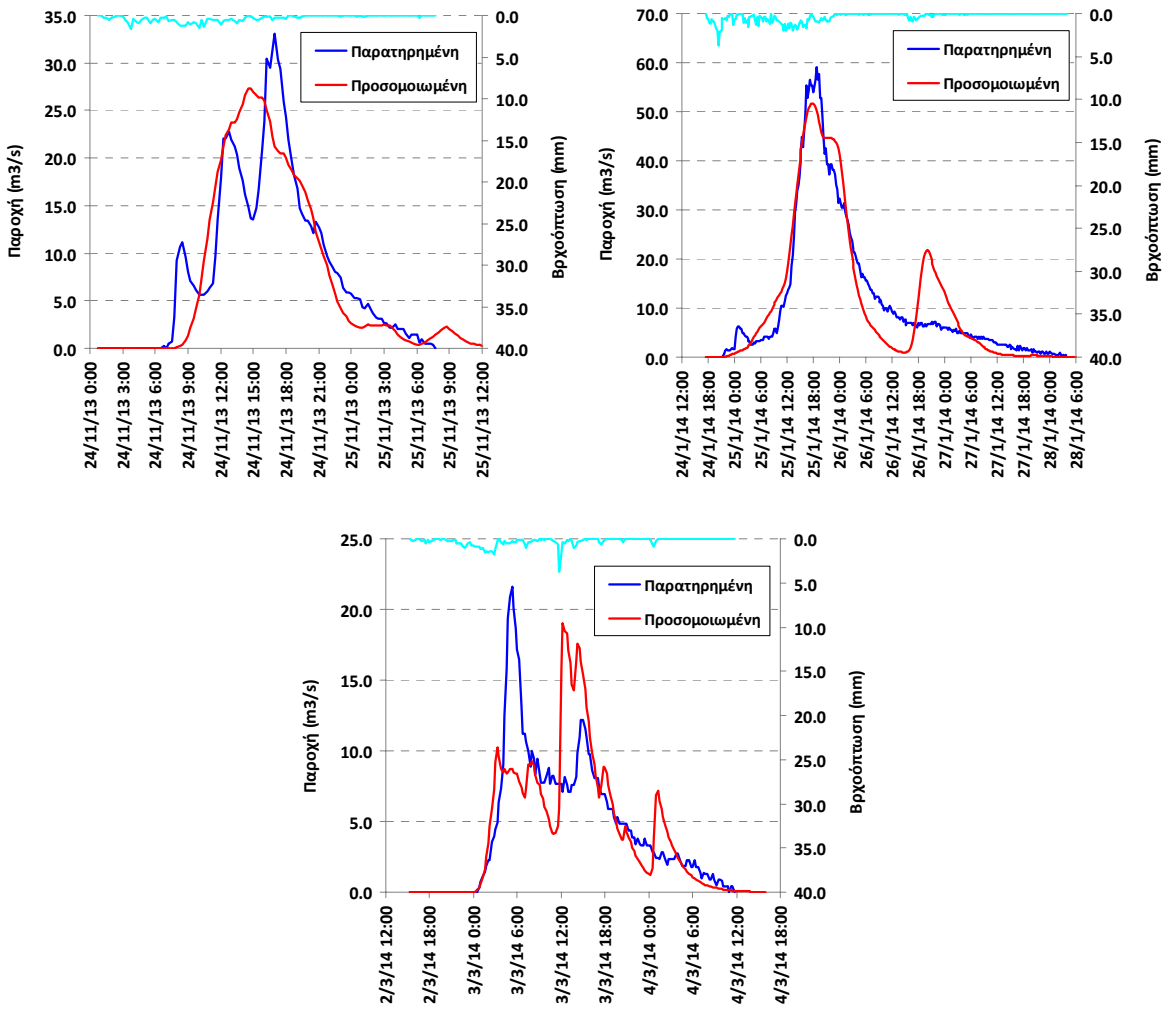

Παρατηρημένη
Προσομοιωμένη
Παροχή (m3/s)
Βροχόπτωση (mm)
11/12/12 0:00
11/12/12 12:00
12/12/12 0:00
12/12/12 12:00
13/12/12 0:00
13/12/12 12:00
14/12/12 0:00


Παρατηρημένη
Προσομοιωμένη
Παροχή (m3/s)
Βροχόπτωση (mm)
16/1/13 0:00
17/1/13 0:00
18/1/13 0:00
19/1/13 0:00
20/1/13 0:00
21/1/13 0:00
22/1/13 0:00


Παρατηρημένη
Προσομοιωμένη
Παροχή (m3/s)
Βροχόπτωση (mm)
24/1/13 12:00
25/1/13 0:00
25/1/13 12:00
26/1/13 0:00
26/1/13 12:00
27/1/13 0:00
27/1/13 12:00
28/1/13 0:00


Παρατηρημένη
Προσομοιωμένη
Παροχή (m3/s)
Βροχόπτωση (mm)
19/2/13 0:00
19/2/13 12:00
20/2/13 0:00
20/2/13 12:00
21/2/13 0:00
21/2/13 12:00


Παρατηρημένη
Προσομοιωμένη
Παροχή (m3/s)
Βροχόπτωση (mm)
13/11/13 12:00
14/11/13 0:00
14/11/13 12:00
15/11/13 0:00
15/11/13 12:00
16/11/13 0:00

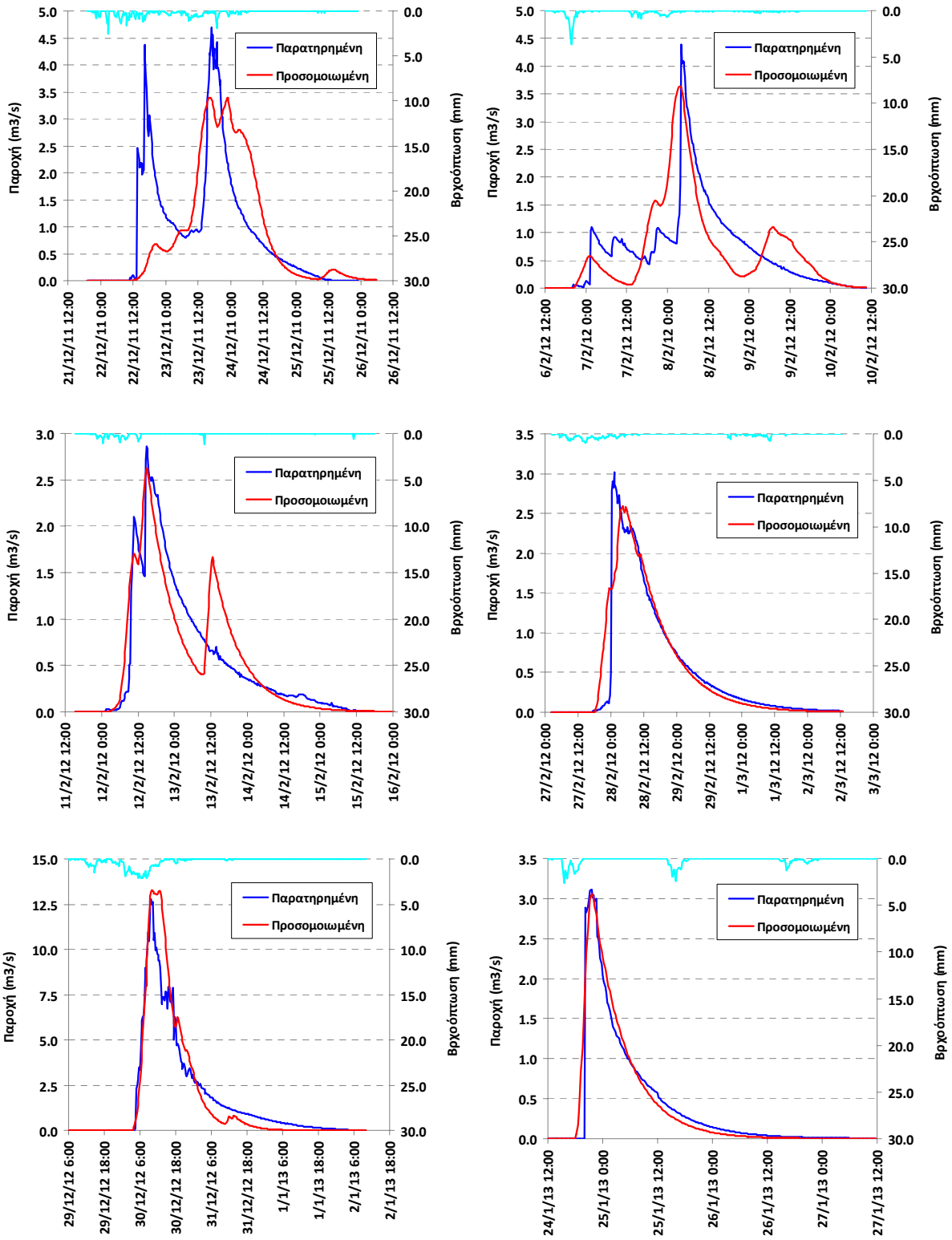


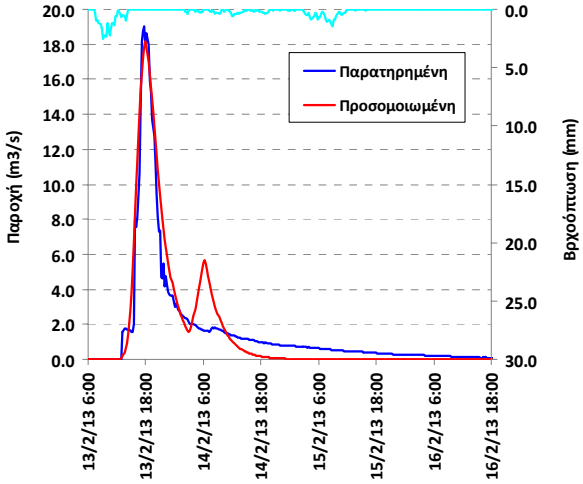
Σχήμα 5.15: Σύγκριση παρατηρημένων και προσομοιωμένων υδρογραφημάτων στην έξοδο της λεκάνης Λούσιου (υδρομετρικός σταθμός Γέφυρας Ατσίχολου).

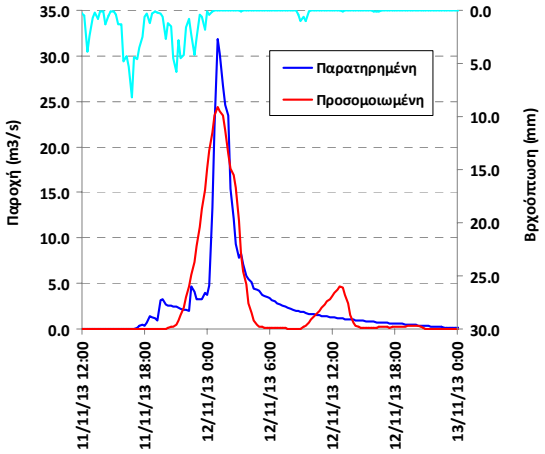
5.5.5 Λεκάνη Σαρανταπόταμου

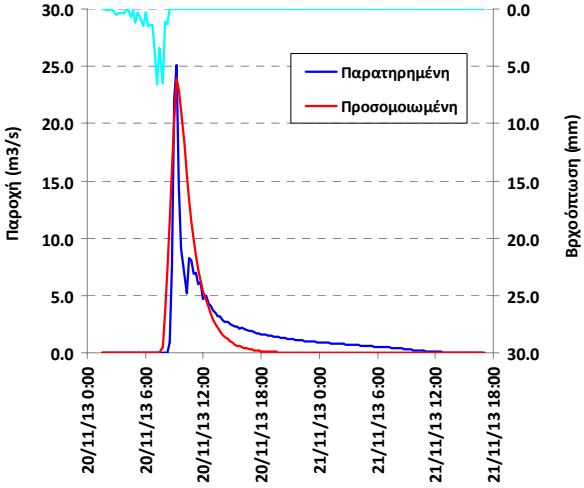
Στο Σχήμα 5.16 συγκρίνονται τα προσομοιωμένα και παρατηρημένα πλημμυρογραφήματα στην έξοδο της λεκάνης του Σαρανταπόταμου, που αναφέρονται στον υδρομετρικό σταθμό της Γύρας Στεφάνης, για 14 επεισόδια που εξετάστηκαν. Στο πάνω μέρος κάθε διαγράμματος απεικονίζεται, ακόμη, το αντίστοιχο επεισόδιο καταιγίδας. Η χρονοσειρά βροχόπτωσης εκτιμήθηκε με επιφανειακή ολοκλήρωση των σημειακών δειγμάτων των βροχομετρικών σταθμών Βίλια, Πράσινο και Μάνδρα, όπως περιγράφεται από τους Μαρκόνη *κ.ά.* (2014).

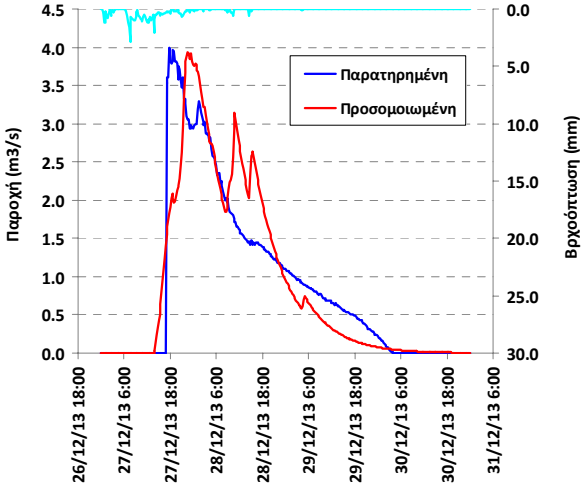
Η προσομοίωση, όπως και στην υπολεκάνη Οινόης, έγινε με χρονικό βήμα 15 min, διαμορφώνοντας το αντίστοιχο παραμετρικό ΣΜΥ ανά επεισόδιο. Παρά την πολυπλοκότητα των αντίστοιχων επεισοδίων βροχής, τα περισσότερα υδρογραφήματα έχουν απλή δομή, δηλαδή έναν απότομο ανοδικό κλάδο και έναν κλάδο πολύ αργής εκφόρτισης, εμφανώς εκθετικής μορφής. Η δομή αυτή υποδηλώνει ότι η λεκάνη έχει πολύ μεγάλη αναρρυθμιστική ικανότητα, η οποία αναπαριστάται επιτυχώς μέσω του μοναδιαίου υδρογραφήματος. Γενικά, στη λεκάνη του Σαρανταπόταμου παράγεται ελάχιστη επιφανειακή απορροή, λόγω της κυριαρχίας των υψηλής περατότητας σχηματισμών (ασβεστόλιθοι, δολομίτες) αλλά και της σημαντικής βλάστησης που αναπτύσσεται (κυρίως πευκοδάση). Τα χαρακτηριστικά αυτά δικαιολογούν τις χαμηλές τιμές του CN, που κατά μέσο όρο φτάνει το 52.

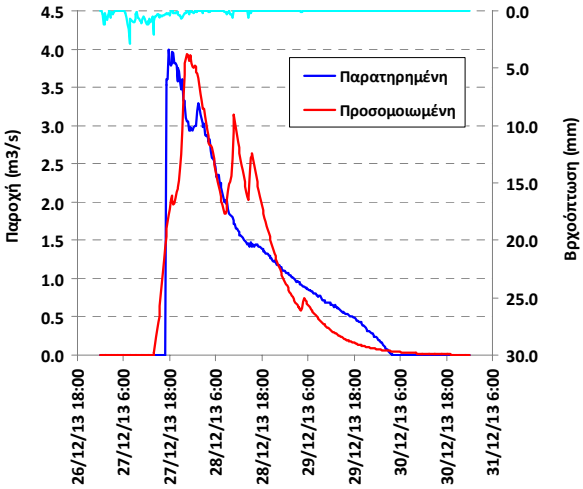

Παρατηρημένη
Προσομοιωμένη
Παροχή (m3/s)
Βροχόπτωση (mm)
21/12/11 12:00
22/12/11 0:00
22/12/11 12:00
23/12/11 0:00
23/12/11 12:00
24/12/11 0:00
24/12/11 12:00
25/12/11 0:00
25/12/11 12:00
26/12/11 0:00
26/12/11 12:00
6/2/12 12:00
7/2/12 0:00
7/2/12 12:00
8/2/12 0:00
8/2/12 12:00
9/2/12 0:00
9/2/12 12:00
10/2/12 0:00
10/2/12 12:00
11/2/12 12:00
12/2/12 0:00
12/2/12 12:00
13/2/12 0:00
13/2/12 12:00
14/2/12 0:00
14/2/12 12:00
15/2/12 0:00
15/2/12 12:00
16/2/12 0:00
27/2/12 0:00
27/2/12 12:00
28/2/12 0:00
28/2/12 12:00
29/2/12 0:00
29/2/12 12:00
1/3/12 0:00
1/3/12 12:00
2/3/12 0:00
2/3/12 12:00
3/3/12 0:00
29/12/12 6:00
29/12/12 18:00
30/12/12 6:00
30/12/12 18:00
31/12/12 6:00
31/12/12 18:00
1/1/13 6:00
1/1/13 18:00
2/1/13 6:00
2/1/13 18:00
24/1/13 12:00
25/1/13 0:00
25/1/13 12:00
26/1/13 0:00
26/1/13 12:00
27/1/13 0:00
27/1/13 12:00

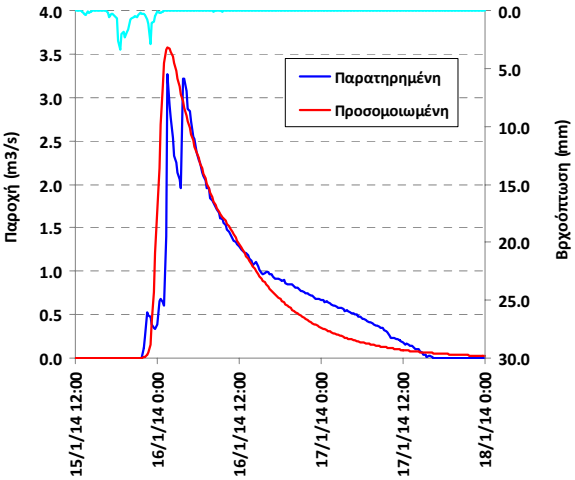

Παρατηρημένη
Προσομοιωμένη
Παροχή (m3/s)
Βροχόπτωση (mm)
20.0
18.0
16.0
14.0
12.0
10.0
8.0
6.0
4.0
2.0
0.0
0.0
5.0
10.0
15.0
20.0
25.0
30.0
13/2/13 6:00
13/2/13 18:00
14/2/13 6:00
14/2/13 18:00
15/2/13 6:00
15/2/13 18:00
16/2/13 6:00
16/2/13 18:00

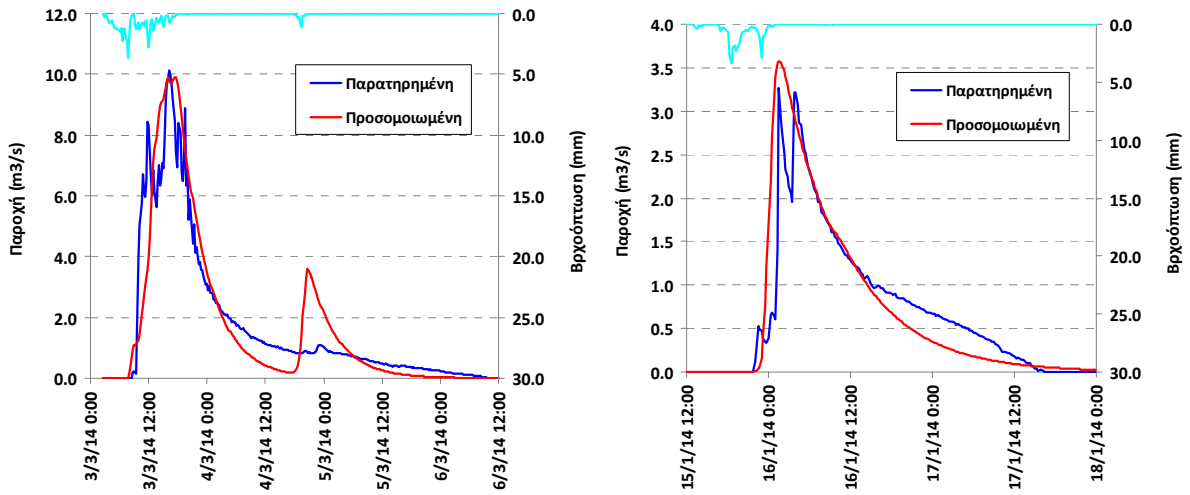

Παρατηρημένη
Προσομοιωμένη
Παροχή (m3/s)
Βροχόπτωση (mm)
35.0
30.0
25.0
20.0
15.0
10.0
5.0
0.0
0.0
5.0
10.0
15.0
20.0
25.0
30.0
11/11/13 12:00
11/11/13 18:00
12/11/13 0:00
12/11/13 6:00
12/11/13 12:00
12/11/13 18:00
13/11/13 0:00


Παρατηρημένη
Προσομοιωμένη
Παροχή (m3/s)
Βροχόπτωση (mm)
30.0
25.0
20.0
15.0
10.0
5.0
0.0
0.0
5.0
10.0
15.0
20.0
25.0
30.0
20/11/13 0:00
20/11/13 6:00
20/11/13 12:00
20/11/13 18:00
21/11/13 0:00
21/11/13 6:00
21/11/13 12:00
21/11/13 18:00


Παρατηρημένη
Προσομοιωμένη
Παροχή (m3/s)
Βροχόπτωση (mm)
4.5
4.0
3.5
3.0
2.5
2.0
1.5
1.0
0.5
0.0
0.0
5.0
10.0
15.0
20.0
25.0
30.0
26/12/13 18:00
27/12/13 6:00
27/12/13 18:00
28/12/13 6:00
28/12/13 18:00
29/12/13 6:00
29/12/13 18:00
30/12/13 6:00
30/12/13 18:00
31/12/13 6:00


Παρατηρημένη
Προσομοιωμένη
Παροχή (m3/s)
Βροχόπτωση (mm)
4.5
4.0
3.5
3.0
2.5
2.0
1.5
1.0
0.5
0.0
0.0
5.0
10.0
15.0
20.0
25.0
30.0
26/12/13 18:00
27/12/13 6:00
27/12/13 18:00
28/12/13 6:00
28/12/13 18:00
29/12/13 6:00
29/12/13 18:00
30/12/13 6:00
30/12/13 18:00
31/12/13 6:00


Παρατηρημένη
Προσομοιωμένη
Παροχή (m3/s)
Βροχόπτωση (mm)
4.0
3.5
3.0
2.5
2.0
1.5
1.0
0.5
0.0
0.0
5.0
10.0
15.0
20.0
25.0
30.0
15/1/14 12:00
16/1/14 0:00
16/1/14 12:00
17/1/14 0:00
17/1/14 12:00
18/1/14 0:00

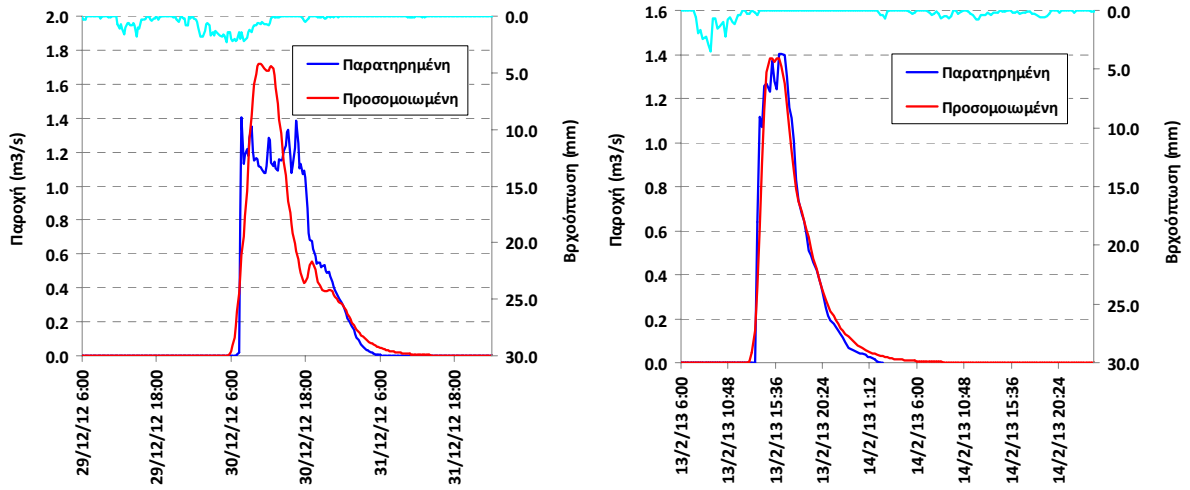


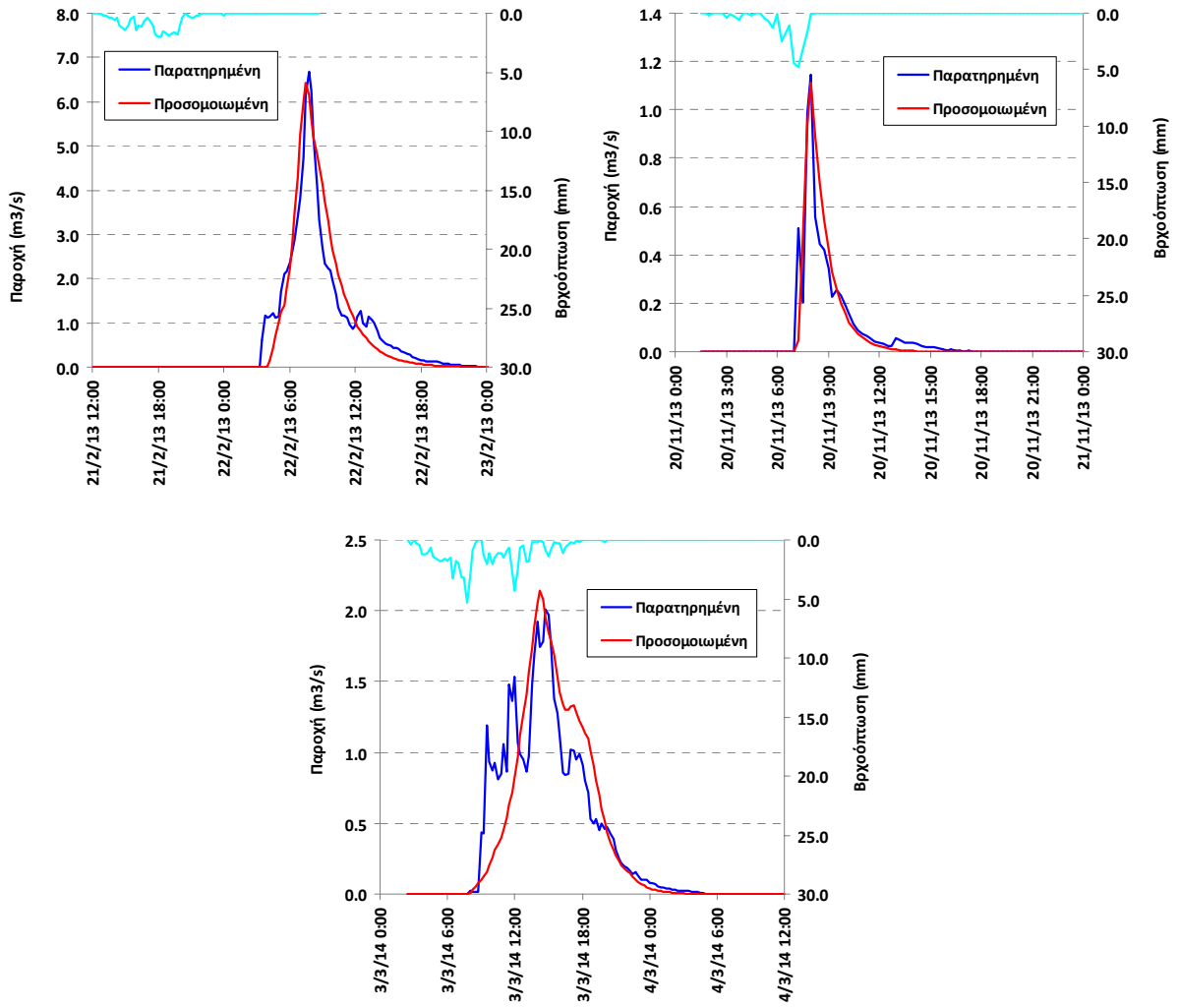
Σχήμα 5.16: Σύγκριση παρατηρημένων και προσομοιωμένων υδρογραφημάτων στην έξοδο της λεκάνης Σαρανταπόταμου (υδρομετρικός σταθμός Γύρας Στεφάνης).

5.5.6 Υπολεκάνη Οινόης

Στο Σχήμα 5.17 συγκρίνονται τα προσομοιωμένα και παρατηρημένα πλημμυρογραφήματα της ανάντη υπολεκάνης του Σαρανταπόταμου, που αναφέρονται στον υδρομετρικό σταθμό Οινόης, για 5 μόλις επεισόδια που εξετάστηκαν. Στο πάνω μέρος απεικονίζεται, ακόμη, το αντίστοιχο επεισόδιο καταιγίδας, εκτιμήθηκε με βάση το σημειακό δείγμα στα Βίλια.

Στην υπολεκάνη αυτή αναλύθηκαν μόλις 5 επεισόδια, καθώς ελάχιστες φορές καταγράφηκε αξιόλογη ροή στον σταθμό (μέγιστη μετρημένη παροχή μόλις 6.7 m^3/s). Όλα τα επεισόδια χαρακτηρίζονται από γρήγορη άνοδο, αρκετά γρήγορη απόσβεση και εξαιρετικά χαμηλές παροχές. Η εικόνα τους διαφέρει από τα πλημμυρογραφήματα στην έξοδο (Γύρα Στεφάνης), κυρίως όσον αφορά στο χρόνο εκφόρτισης. Επιπλέον, τα ύψη πλημμύρας στην Οινόη είναι εξαιρετικά χαμηλά. Γίνεται αντιληπτό ότι στη λεκάνη αυτή δεν παράγεται παρά ελάχιστη επιφανειακή απορροή, ενώ η υποδερμική ροή εκφορτίζεται κατάντη του σταθμού. Σύμφωνα με τα δεδομένα μετρήσεων τριών υδρολογικών ετών, στην εν λόγω υπολεκάνη, που καλύπτει το 35% περίπου της συνολικής (51.2 έναντι 144.6 km^2), παράγεται λιγότερο από το 10% της απορροής (Ζαρκαδούλας, 2014). Η διαφοροποίηση φαίνεται και στις μέσες τιμές των βελτιστοποιημένων παραμέτρων CN (52 στη συνολική λεκάνη και μόλις 31 στην ανάντη).



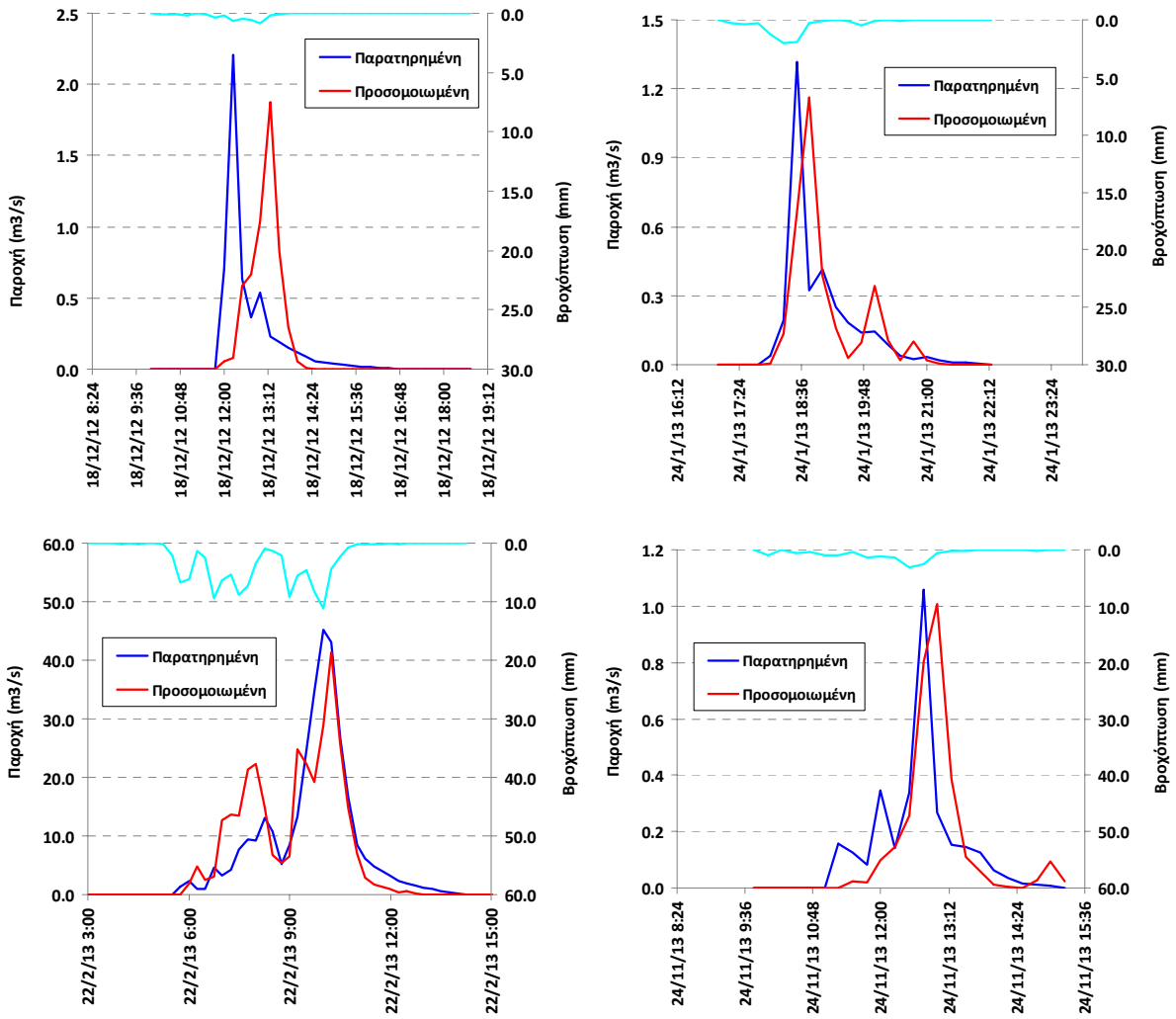


Σχήμα 5.17: Σύγκριση παρατηρημένων και προσομοιωμένων υδρογραφημάτων στην ανάντη υπολεκάνη του Σαρανταπόταμου (υδρομετρικός σταθμός Οινόης).

5.5.7 Λεκάνη ρέματος Χαλανδρίου

Στο Σχήμα 5.18 συγκρίνονται τα προσομοιωμένα και παρατηρημένα πλημμυρογραφήματα της λεκάνης του ρέματος Χαλανδρίου, για 4 επεισόδια που εξετάστηκαν. Στο πάνω μέρος απεικονίζεται, ακόμη, το αντίστοιχο επεισόδιο καταιγίδας, εκτιμήθηκε με βάση τα σημειακά δείγματα βροχόπτωσης στους μετεωρολογικούς σταθμούς Παλαιάς και Νέας Πεντέλης.

Η προσομοίωση έγινε με χρονικό βήμα 15 min, διαμορφώνοντας το αντίστοιχο παραμετρικό ΣΜΥ ανά επεισόδιο. Τα τρία από τα επεισόδια που εξετάστηκαν είναι μικρού μεγέθους, χαρακτηριστικά μιας λεκάνης τέτοιας κλίμακας (5.2 km^2). Αντίθετα, το επεισόδιο της 22/2/2013 είναι εξαιρετικά σημαντικό, αφού προήλθε από μια βροχόπτωση ύψους 112 mm, παράγοντας ύψος απορροής 56 mm. Τόσο υψηλός συντελεστής απορροής, της τάξης του 50%, δεν παρατηρήθηκε σε κανένα από τα επεισόδια που εξετάστηκαν στις πιλοτικές λεκάνες του έργου. Σε κάθε περίπτωση, τόσο το επεισόδιο αυτό όσο και τα υπόλοιπα μικρού μέγεθος επεισόδια αναπαρίστανται αρκετά ικανοποιητικά από το προτεινόμενο σχήμα προσομοίωσης.

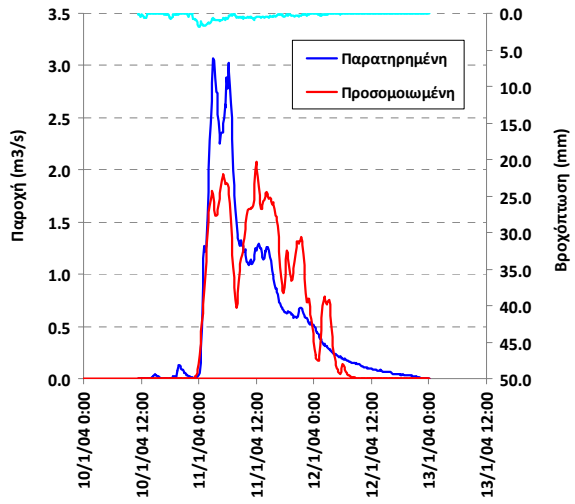


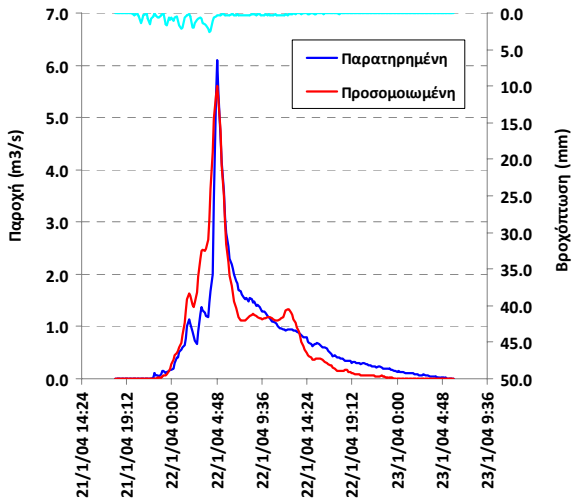
Σχήμα 5.18: Σύγκριση παρατηρημένων και προσομοιωμένων υδρογραφημάτων στην λεκάνη ρέματος Χαλανδρίου (υδρομετρικός σταθμός Ν. Πεντέλης).

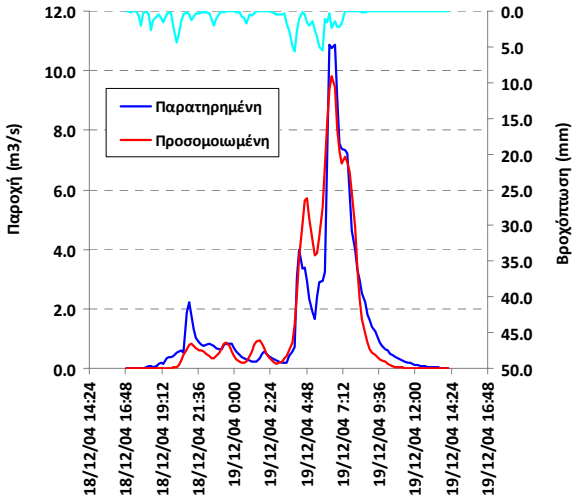
5.5.8 Λεκάνη Λυκορέματος Ραφήνας (υδρ. σταθμός Ντράφι)

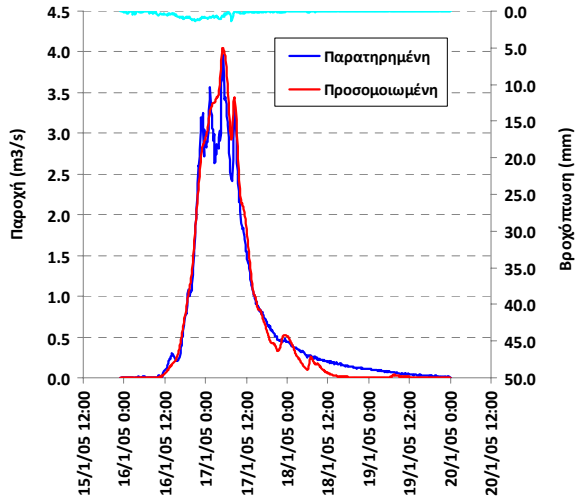
Στο Σχήμα 5.19 συγκρίνονται τα προσομοιωμένα και παρατηρημένα πλημμυρογραφήματα της λεκάνης Λυκορέματος Ραφήνας ανάντη του υδρομετρικού σταθμού Ντράφι, για 16 επεισόδια που εξετάστηκαν. Στο πάνω μέρος απεικονίζεται, ακόμη, το αντίστοιχο επεισόδιο καταιγίδας, εκτιμήθηκε με βάση τα δείγματα βροχόπτωσης από τέσσερις μετεωρολογικούς σταθμούς της περιοχής. Υπενθυμίζεται ότι στα υδρομετρικά δεδομένα της λεκάνης βασίστηκαν οι προκαταρκτικές αναλύσεις της ενότητας 5.3, που κατέληξαν στην απόρριψη των συνήθων ΣΜΥ της βιβλιογραφίας, και στη διαμόρφωση του νέου παραμετρικού ΣΜΥ, που προσαρμόζεται ικανοποιητικά στα χαρακτηριστικά τέτοιων λεκανών.

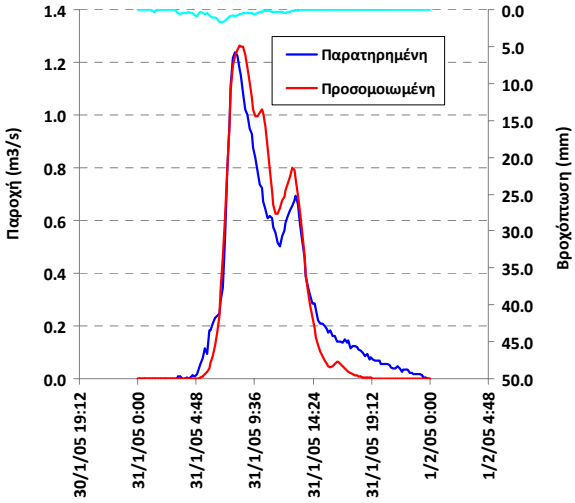
Η προσομοίωση έγινε με χρονικό βήμα 10 min, διαμορφώνοντας το αντίστοιχο παραμετρικό ΣΜΥ ανά επεισόδιο. Τα υδρογραφήματα που εξετάζονται ποικίλουν ως προς τη μορφή, καθώς παράγονται από επεισόδια βροχής διαφορετικής πολυπλοκότητας. Η προτεινόμενη συνδυαστική τεχνική φαίνεται ότι αναπαράγει καλά όλους τους τύπους υδρογραφημάτων, αν και σε ορισμένες περιπτώσεις υποεκτιμά κάπως τις παροχές αιχμής.

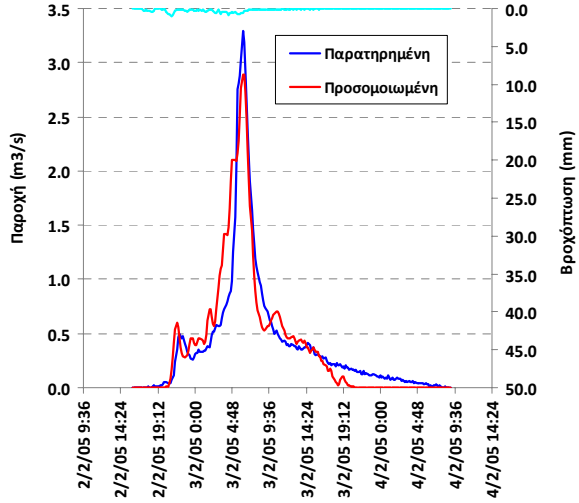

Παρατηρημένη
Προσομοιωμένη
Παροχή (m3/s)
Βροχόπτωση (mm)
3.5
3.0
2.5
2.0
1.5
1.0
0.5
0.0
0.0
5.0
10.0
15.0
20.0
25.0
30.0
35.0
40.0
45.0
50.0
10/1/04 0:00
10/1/04 12:00
11/1/04 0:00
11/1/04 12:00
12/1/04 0:00
12/1/04 12:00
13/1/04 0:00
13/1/04 12:00

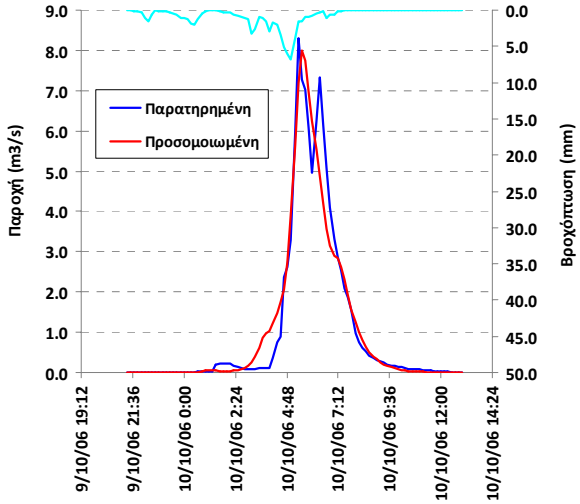

Παρατηρημένη
Προσομοιωμένη
Παροχή (m3/s)
Βροχόπτωση (mm)
7.0
6.0
5.0
4.0
3.0
2.0
1.0
0.0
0.0
5.0
10.0
15.0
20.0
25.0
30.0
35.0
40.0
45.0
50.0
21/1/04 14:24
21/1/04 19:12
22/1/04 0:00
22/1/04 4:48
22/1/04 9:36
22/1/04 14:24
22/1/04 19:12
23/1/04 0:00
23/1/04 4:48
23/1/04 9:36

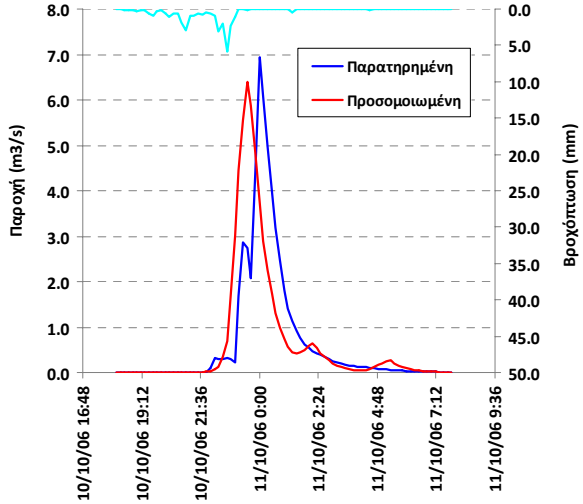

Παρατηρημένη
Προσομοιωμένη
Παροχή (m3/s)
Βροχόπτωση (mm)
12.0
10.0
8.0
6.0
4.0
2.0
0.0
0.0
5.0
10.0
15.0
20.0
25.0
30.0
35.0
40.0
45.0
50.0
18/12/04 14:24
18/12/04 16:48
18/12/04 19:12
18/12/04 21:36
19/12/04 0:00
19/12/04 2:24
19/12/04 4:48
19/12/04 7:12
19/12/04 9:36
19/12/04 12:00
19/12/04 14:24
19/12/04 16:48

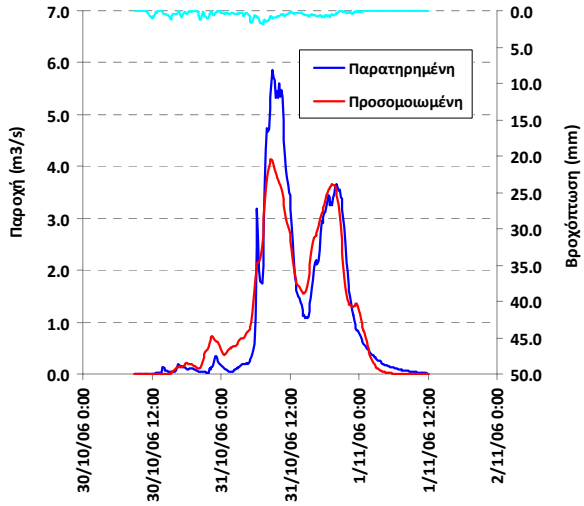

Παρατηρημένη
Προσομοιωμένη
Παροχή (m3/s)
Βροχόπτωση (mm)
4.5
4.0
3.5
3.0
2.5
2.0
1.5
1.0
0.5
0.0
0.0
5.0
10.0
15.0
20.0
25.0
30.0
35.0
40.0
45.0
50.0
15/1/05 12:00
16/1/05 0:00
16/1/05 12:00
17/1/05 0:00
17/1/05 12:00
18/1/05 0:00
18/1/05 12:00
19/1/05 0:00
19/1/05 12:00
20/1/05 0:00
20/1/05 12:00

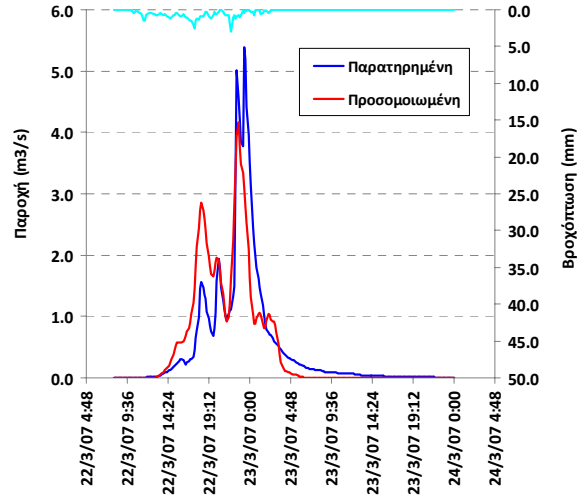

Παρατηρημένη
Προσομοιωμένη
Παροχή (m3/s)
Βροχόπτωση (mm)
1.4
1.2
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
0.0
5.0
10.0
15.0
20.0
25.0
30.0
35.0
40.0
45.0
50.0
30/1/05 19:12
31/1/05 0:00
31/1/05 4:48
31/1/05 9:36
31/1/05 14:24
31/1/05 19:12
1/2/05 0:00
1/2/05 4:48

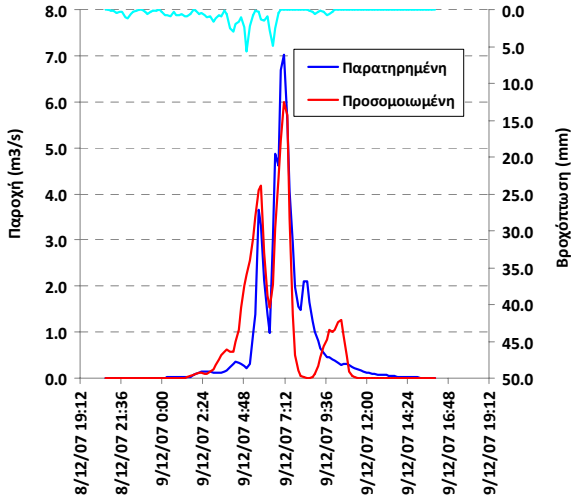

Παρατηρημένη
Προσομοιωμένη
Παροχή (m3/s)
Βροχόπτωση (mm)
3.5
3.0
2.5
2.0
1.5
1.0
0.5
0.0
0.0
5.0
10.0
15.0
20.0
25.0
30.0
35.0
40.0
45.0
50.0
2/2/05 9:36
2/2/05 14:24
2/2/05 19:12
3/2/05 0:00
3/2/05 4:48
3/2/05 9:36
3/2/05 14:24
3/2/05 19:12
4/2/05 0:00
4/2/05 4:48
4/2/05 9:36
4/2/05 14:24

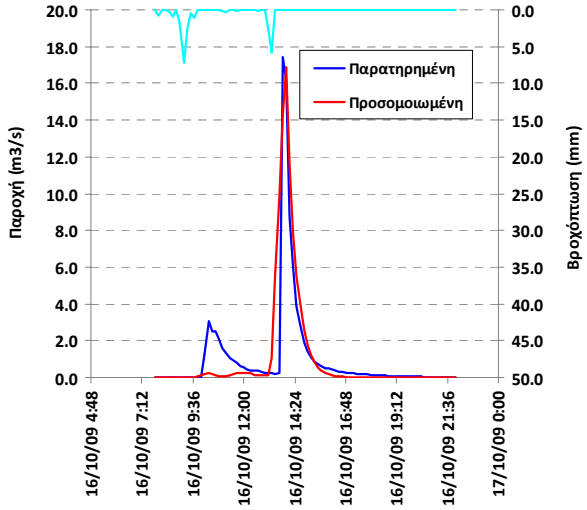

Παρατηρημένη
Προσομοιωμένη
Παροχή (m3/s)
Βροχόπτωση (mm)
9/10/06 19:12
9/10/06 21:36
10/10/06 0:00
10/10/06 2:24
10/10/06 4:48
10/10/06 7:12
10/10/06 9:36
10/10/06 12:00
10/10/06 14:24

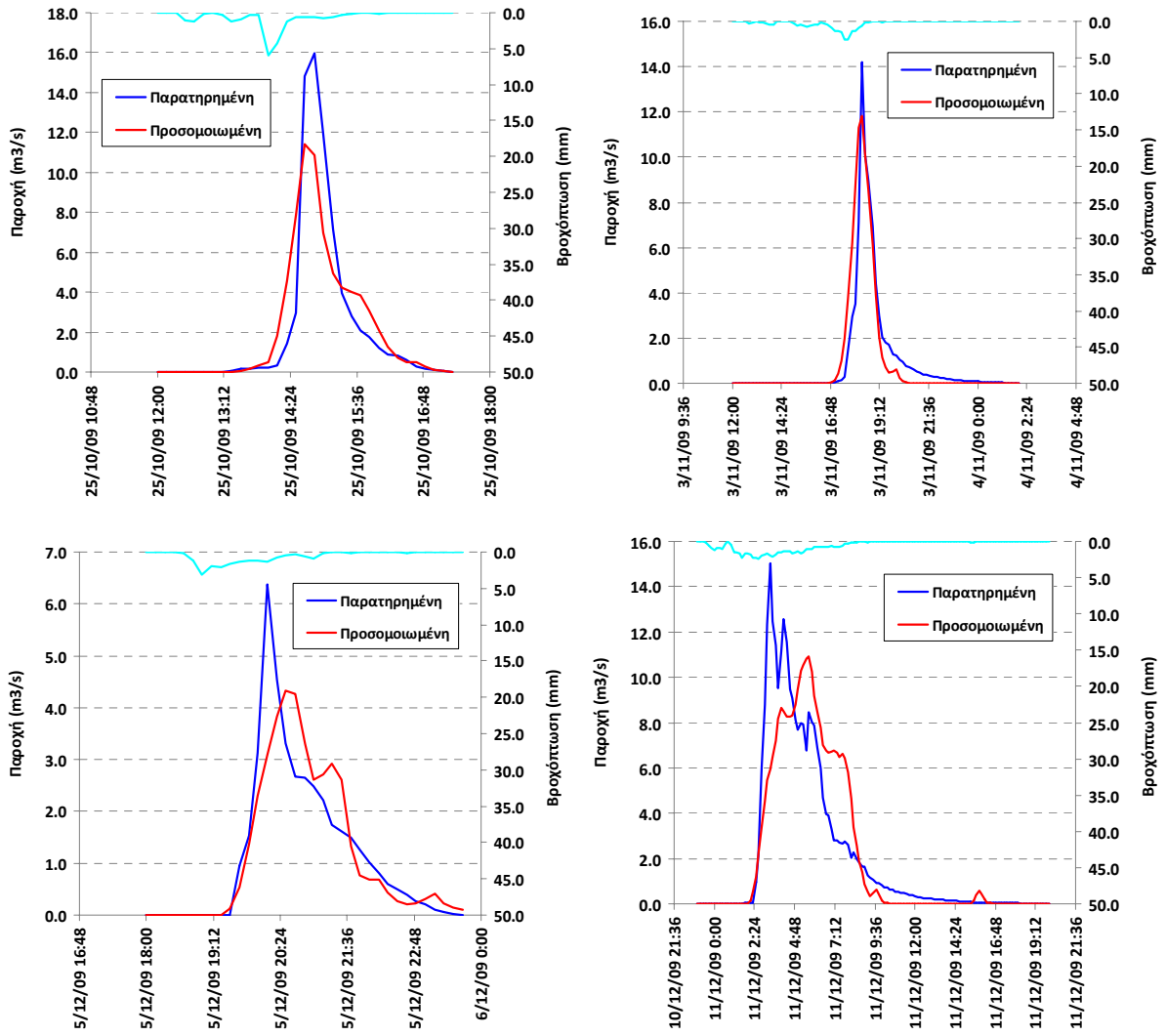

Παρατηρημένη
Προσομοιωμένη
Παροχή (m3/s)
Βροχόπτωση (mm)
10/10/06 16:48
10/10/06 19:12
10/10/06 21:36
11/10/06 0:00
11/10/06 2:24
11/10/06 4:48
11/10/06 7:12
11/10/06 9:36


Παρατηρημένη
Προσομοιωμένη
Παροχή (m3/s)
Βροχόπτωση (mm)
30/10/06 0:00
30/10/06 12:00
31/10/06 0:00
31/10/06 12:00
1/11/06 0:00
1/11/06 12:00
2/11/06 0:00


Παρατηρημένη
Προσομοιωμένη
Παροχή (m3/s)
Βροχόπτωση (mm)
22/3/07 4:48
22/3/07 9:36
22/3/07 14:24
22/3/07 19:12
23/3/07 0:00
23/3/07 4:48
23/3/07 9:36
23/3/07 14:24
23/3/07 19:12
24/3/07 0:00
24/3/07 4:48


Παρατηρημένη
Προσομοιωμένη
Παροχή (m3/s)
Βροχόπτωση (mm)
8/12/07 19:12
8/12/07 21:36
9/12/07 0:00
9/12/07 2:24
9/12/07 4:48
9/12/07 7:12
9/12/07 9:36
9/12/07 12:00
9/12/07 14:24
9/12/07 16:48
9/12/07 19:12


Παρατηρημένη
Προσομοιωμένη
Παροχή (m3/s)
Βροχόπτωση (mm)
16/10/09 4:48
16/10/09 7:12
16/10/09 9:36
16/10/09 12:00
16/10/09 14:24
16/10/09 16:48
16/10/09 19:12
16/10/09 21:36
17/10/09 0:00

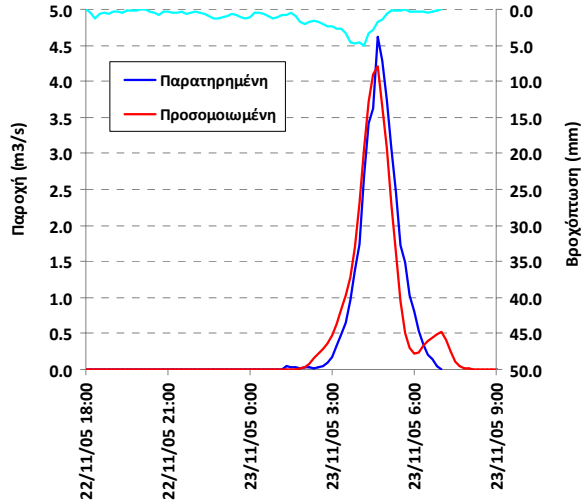


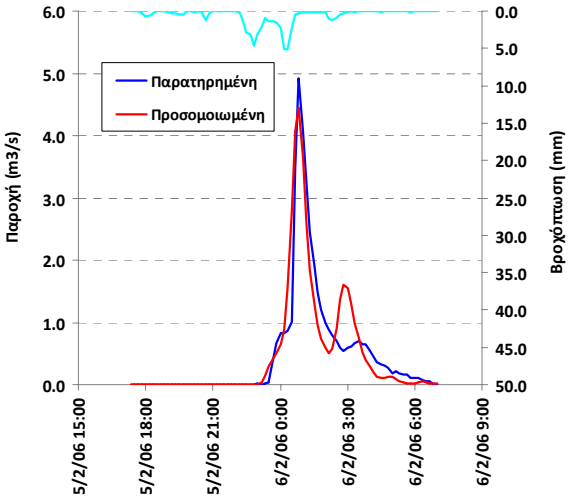
Σχήμα 5.19: Σύγκριση παρατηρημένων και προσομοιωμένων υδρογραφημάτων στη λεκάνη Λυκορέματος Ραφήνας (υδρομετρικός σταθμός Ντράφι).

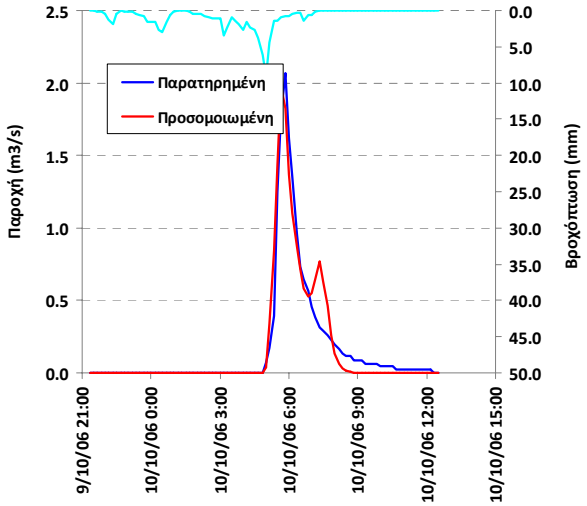
5.5.9 Υπολεκάνη Λυκορέματος (υδρ. σταθμός Λυκόρεμα)

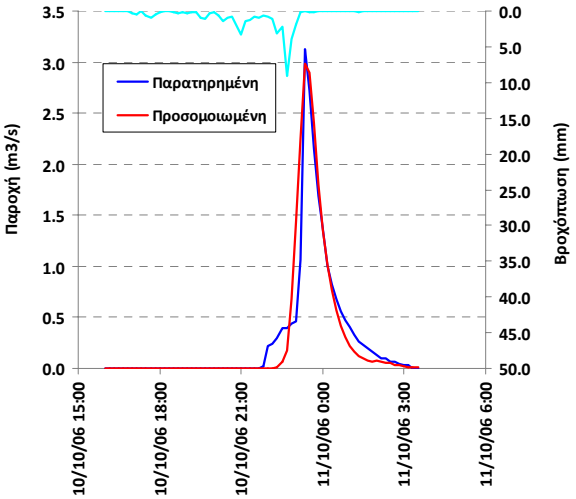
Στο Σχήμα 5.20 συγκρίνονται τα προσομοιωμένα και παρατηρημένα πλημμυρογραφήματα της ανάντη υπολεκάνης του Λυκορέματος Ραφήνας, ανάντη του ομώνυμου υδρομετρικού σταθμού, για 15 επεισόδια που εξετάστηκαν. Στο πάνω μέρος απεικονίζεται, ακόμη, το αντίστοιχο επεισόδιο καταιγίδας, εκτιμήθηκε με βάση τα δείγματα βροχόπτωσης από τέσσερις μετεωρολογικούς σταθμούς της περιοχής.

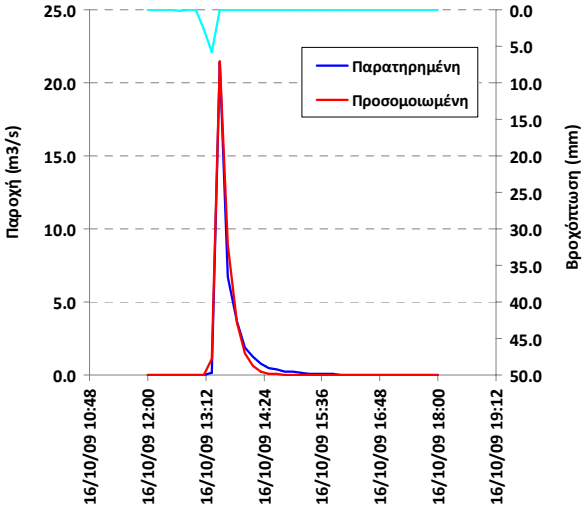
Η προσομοίωση έγινε με χρονικό βήμα 10 min, διαμορφώνοντας το αντίστοιχο παραμετρικό ΣΜΥ ανά επεισόδιο. Αντίθετα με τη συνολική λεκάνη του Λυκορέματος, τα παρατηρημένα υδρογραφήματα της ανάντη υπολεκάνης έχουν πιο απλό σχήμα, και χαρακτηρίζονται από γρήγορη απόσβεση, χαρακτηριστική της περιορισμένης συμβολής της υποδερμικής ροής. Η μέση τιμή της βελτιστοποιημένης παραμέτρου CN είναι αρκετά υψηλή (71), ενώ η τιμή της συνολικής λεκάνης είναι 44. Η διαφοροποίηση αυτή υποδηλώνει έντονη ετερογένεια στα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά των δύο περιοχών, η οποία αναπαριστάται επιτυχώς από το συνδυαστικό μοντέλο.

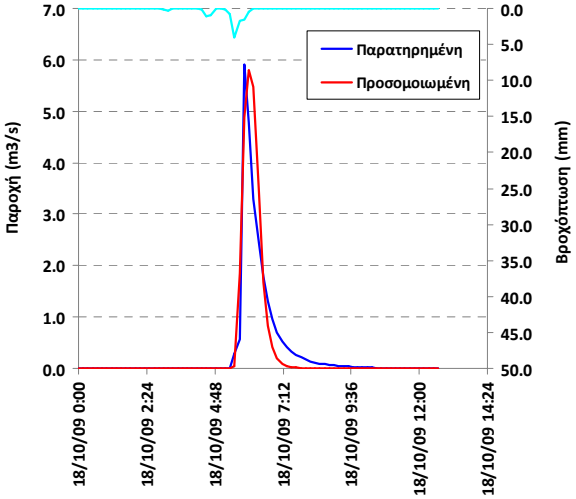

Παρατηρημένη
Προσομοιωμένη
Παροχή (m3/s)
Βροχόπτωση (mm)
22/11/05 18:00
22/11/05 21:00
23/11/05 0:00
23/11/05 3:00
23/11/05 6:00
23/11/05 9:00

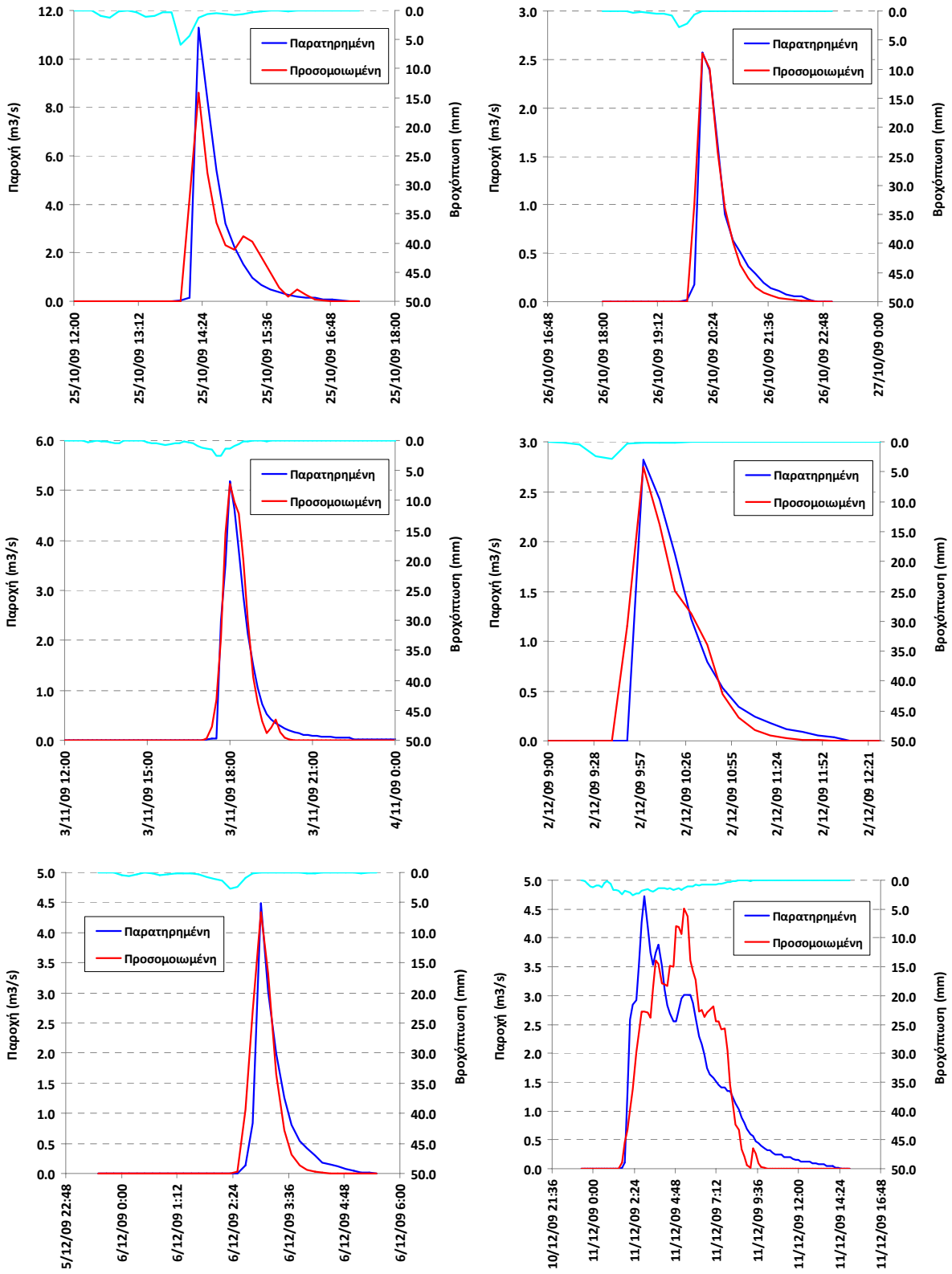

Παρατηρημένη
Προσομοιωμένη
Παροχή (m3/s)
Βροχόπτωση (mm)
5/2/06 15:00
5/2/06 18:00
5/2/06 21:00
6/2/06 0:00
6/2/06 3:00
6/2/06 6:00
6/2/06 9:00

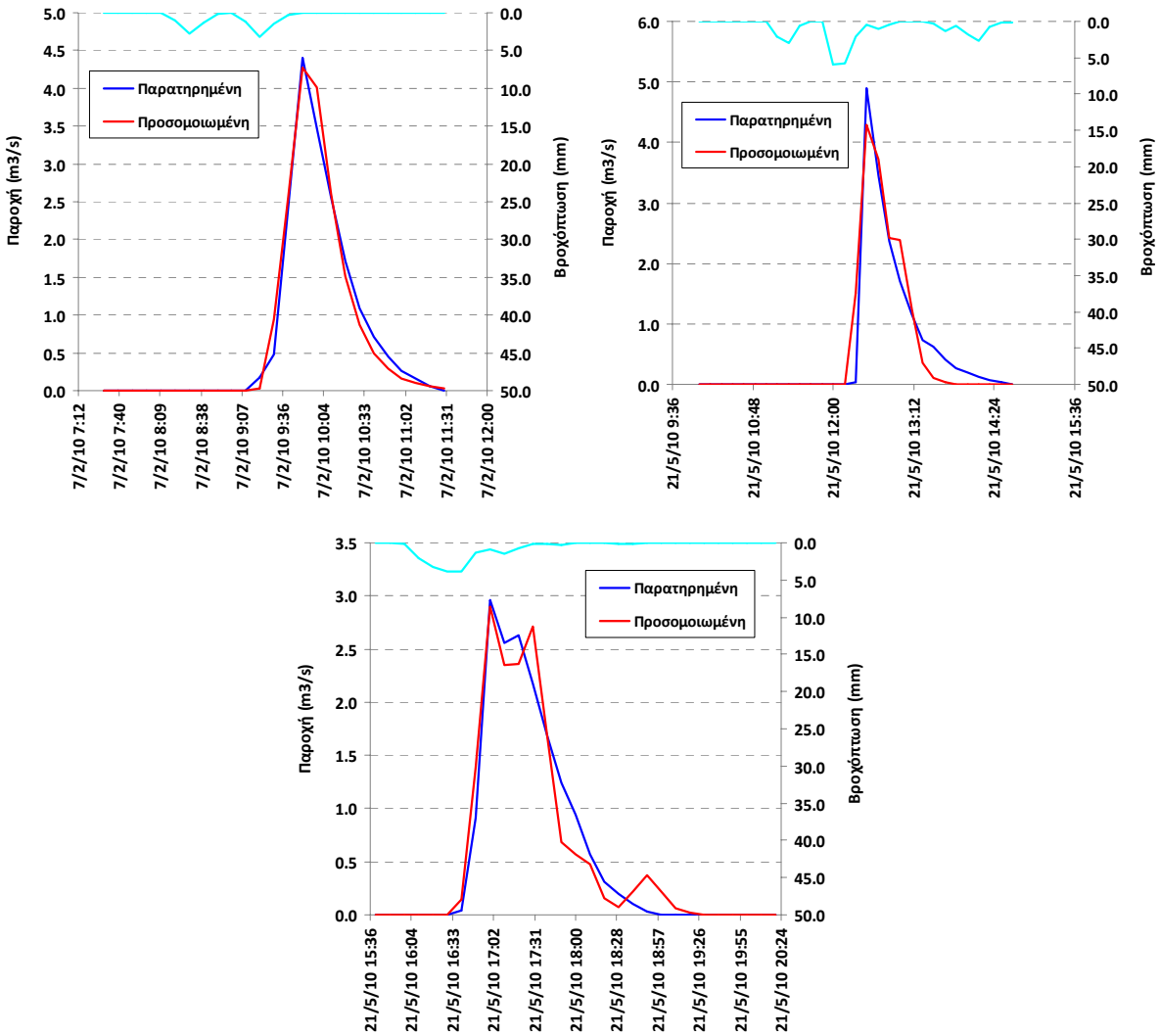

Παρατηρημένη
Προσομοιωμένη
Παροχή (m3/s)
Βροχόπτωση (mm)
9/10/06 21:00
10/10/06 0:00
10/10/06 3:00
10/10/06 6:00
10/10/06 9:00
10/10/06 12:00
10/10/06 15:00


Παρατηρημένη
Προσομοιωμένη
Παροχή (m3/s)
Βροχόπτωση (mm)
10/10/06 15:00
10/10/06 18:00
10/10/06 21:00
11/10/06 0:00
11/10/06 3:00
11/10/06 6:00


Παρατηρημένη
Προσομοιωμένη
Παροχή (m3/s)
Βροχόπτωση (mm)
16/10/09 10:48
16/10/09 12:00
16/10/09 13:12
16/10/09 14:24
16/10/09 15:36
16/10/09 16:48
16/10/09 18:00
16/10/09 19:12


Παρατηρημένη
Προσομοιωμένη
Παροχή (m3/s)
Βροχόπτωση (mm)
18/10/09 0:00
18/10/09 2:24
18/10/09 4:48
18/10/09 7:12
18/10/09 9:36
18/10/09 12:00
18/10/09 14:24


Παρατηρημένη
Προσομοιωμένη
Παροχή (m3/s)
Βροχόπτωση (mm)
25/10/09 12:00
25/10/09 13:12
25/10/09 14:24
25/10/09 15:36
25/10/09 16:48
25/10/09 18:00
26/10/09 16:48
26/10/09 18:00
26/10/09 19:12
26/10/09 20:24
26/10/09 21:36
26/10/09 22:48
27/10/09 0:00
3/11/09 12:00
3/11/09 15:00
3/11/09 18:00
3/11/09 21:00
4/11/09 0:00
2/12/09 9:00
2/12/09 9:28
2/12/09 9:57
2/12/09 10:26
2/12/09 10:55
2/12/09 11:24
2/12/09 11:52
2/12/09 12:21
5/12/09 22:48
6/12/09 0:00
6/12/09 1:12
6/12/09 2:24
6/12/09 3:36
6/12/09 4:48
6/12/09 6:00
10/12/09 21:36
11/12/09 0:00
11/12/09 2:24
11/12/09 4:48
11/12/09 7:12
11/12/09 9:36
11/12/09 12:00
11/12/09 14:24
11/12/09 16:48



Σχήμα 5.20: Σύγκριση παρατηρημένων και προσομοιωμένων υδρογραφημάτων στην υπολεκάνη Λυκορέματος Ραφήνας (υδρομετρικός σταθμός Λυκόρεμα).

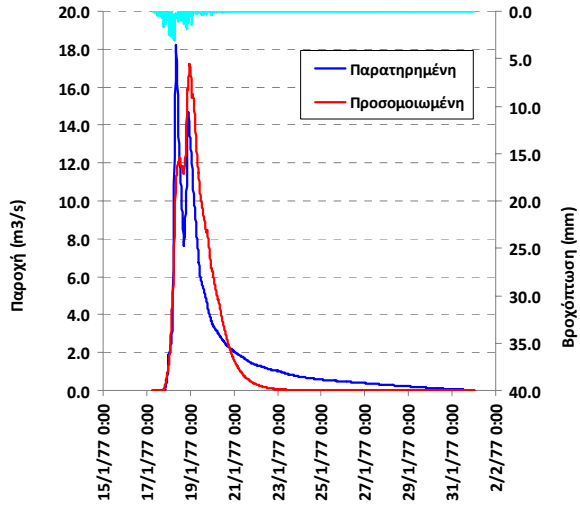
5.5.10 Λεκάνη Περιστερώνα

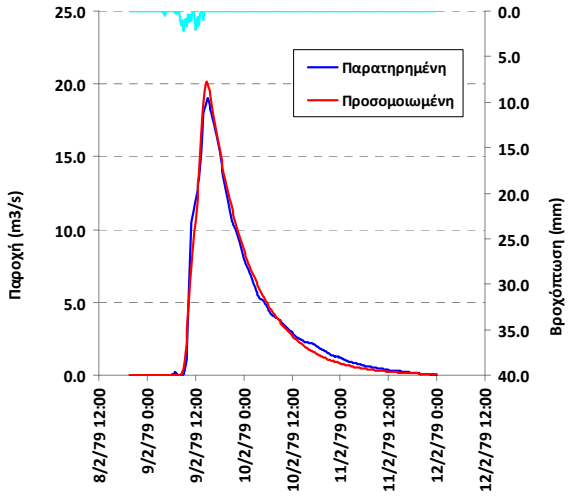
Στο Σχήμα 5.21 συγκρίνονται τα προσομοιωμένα και παρατηρημένα πλημμυρογραφήματα της λεκάνης Περιστερώνα, ανάντη του υδρομετρικού σταθμού Γεφύρι Παναγίας, για 14 επεισόδια που εξετάστηκαν. Στο πάνω μέρος απεικονίζεται, ακόμη, το αντίστοιχο επεισόδιο καταιγίδας, εκτιμήθηκε με βάση τα δείγματα βροχόπτωσης από τρεις μετεωρολογικούς σταθμούς της περιοχής (Άλωνα, Απλίκι, Γεφύρι Παναγίας)[1].

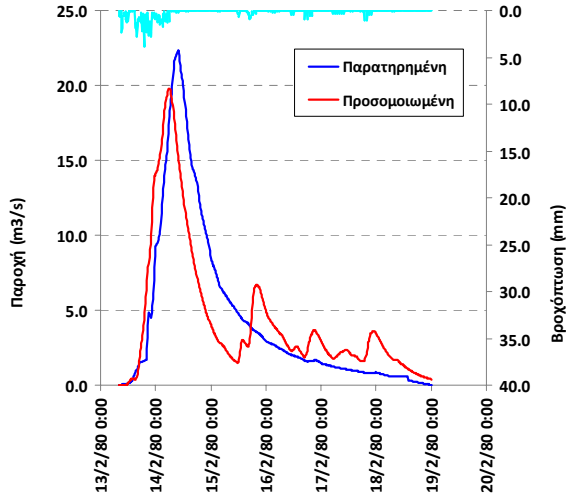
Η προσομοίωση έγινε με χρονικό βήμα 15 min, διαμορφώνοντας το αντίστοιχο παραμετρικό ΣΜΥ ανά επεισόδιο. Όπως φαίνεται από τη σύγκριση των υδρογραφημάτων, η συνδυαστική τεχνική επιτυγχάνει εξαιρετικά καλή προσομοίωση των παρατηρημένων υδρογραφημάτων, και σχεδόν τέλεια αναπαραγωγή των παροχών αιχμής. Στη λεκάνη αυτή έχουν καταγραφεί τα μεγαλύτερα πλημμυρικά επεισόδια σε όλη την Κύπρο, και γενικά καταγράφονται υψηλές

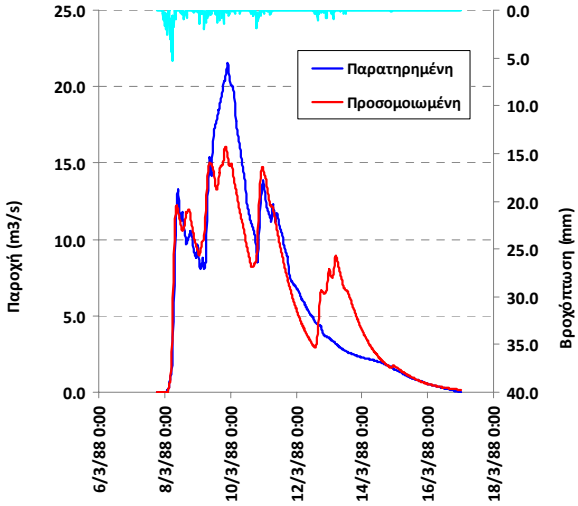
[1] Επισημαίνεται ότι στις δύο λεκάνες της Κύπρου (Περιστερώνα και Ξερού), τα υδρολογικά δεδομένα δόθηκαν σε αναλογική μορφή, και απαιτήθηκε η ψηφιοποίησή τους. Συγκεκριμένα, από τη Μετεωρολογική Υπηρεσία Κύπρου δόθηκαν οι πρωτεγενείς ταινίες των βροχογράφων, ενώ από το Τμήμα Ανάπτυξης Υδάτων δόθηκαν, σε επεξεργασμένη έντυπη μορφή, οι παροχές των δύο υδρομετρικών σταθμών, με χρονική διακριτότητα 15 min.

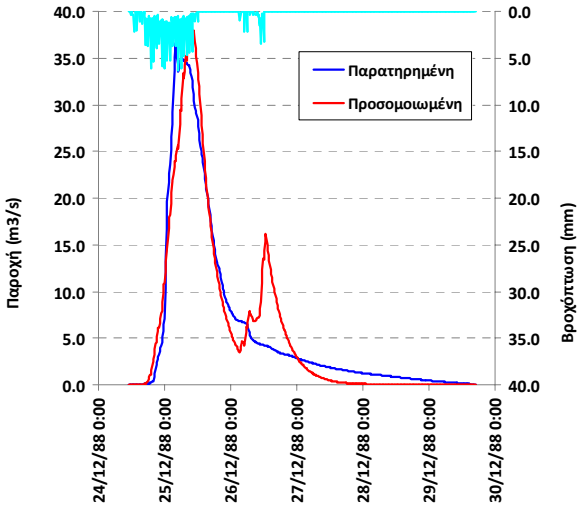
πλημμυρικές παροχές, ως συνέπεια της κυριαρχίας γεωλογικών σχηματισμών χαμηλής περατότητας, π.χ. βασάλτης (Μαστροθεόδωρος, 2013). Η μέση τιμή της βελτιστοποιημένης παραμέτρου CN είναι 63.

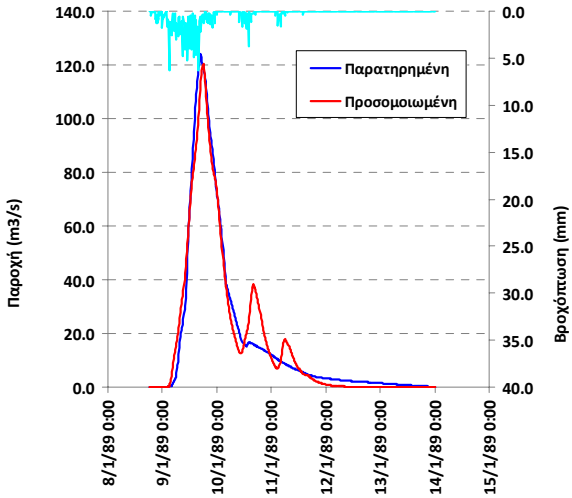


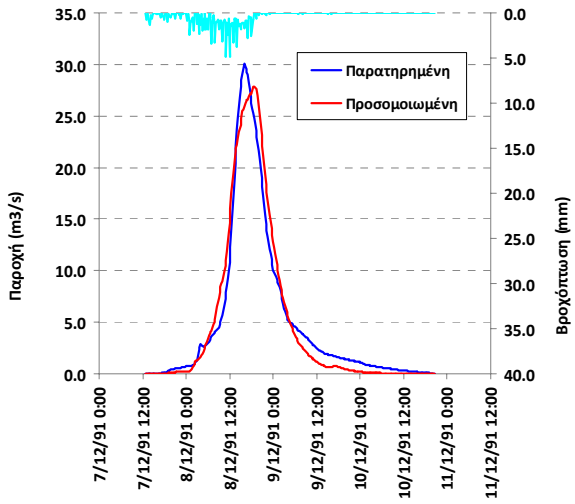


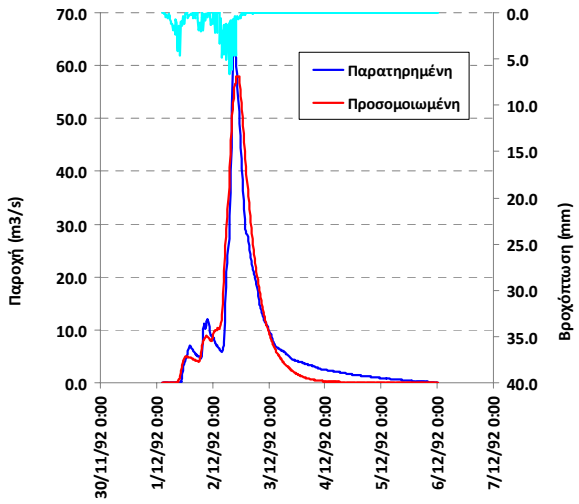


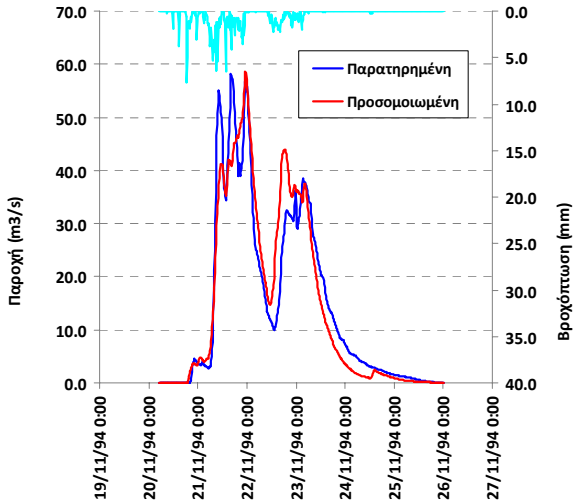


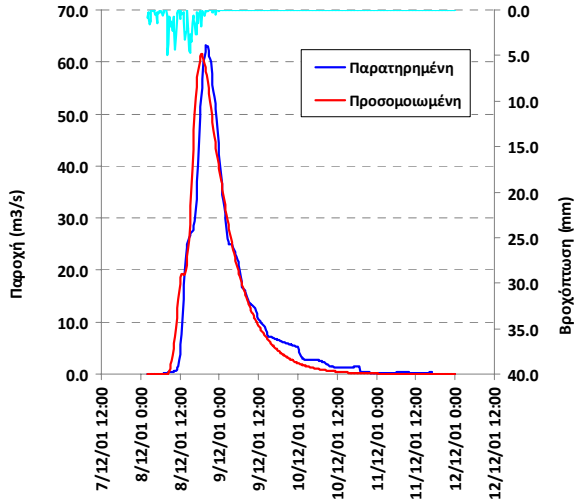


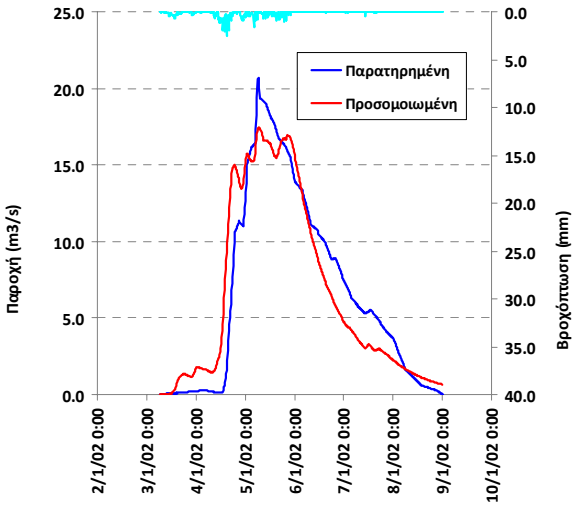


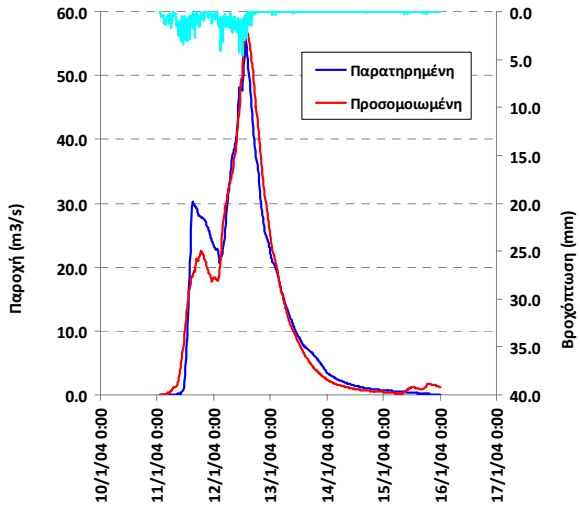

Παρατηρημένη
Προσομοιωμένη
Παροχή (m3/s)
Βροχόπτωση (mm)
35.0
30.0
25.0
20.0
15.0
10.0
5.0
0.0
0.0
5.0
10.0
15.0
20.0
25.0
30.0
35.0
40.0
7/12/91 0:00
7/12/91 12:00
8/12/91 0:00
8/12/91 12:00
9/12/91 0:00
9/12/91 12:00
10/12/91 0:00
10/12/91 12:00
11/12/91 0:00
11/12/91 12:00

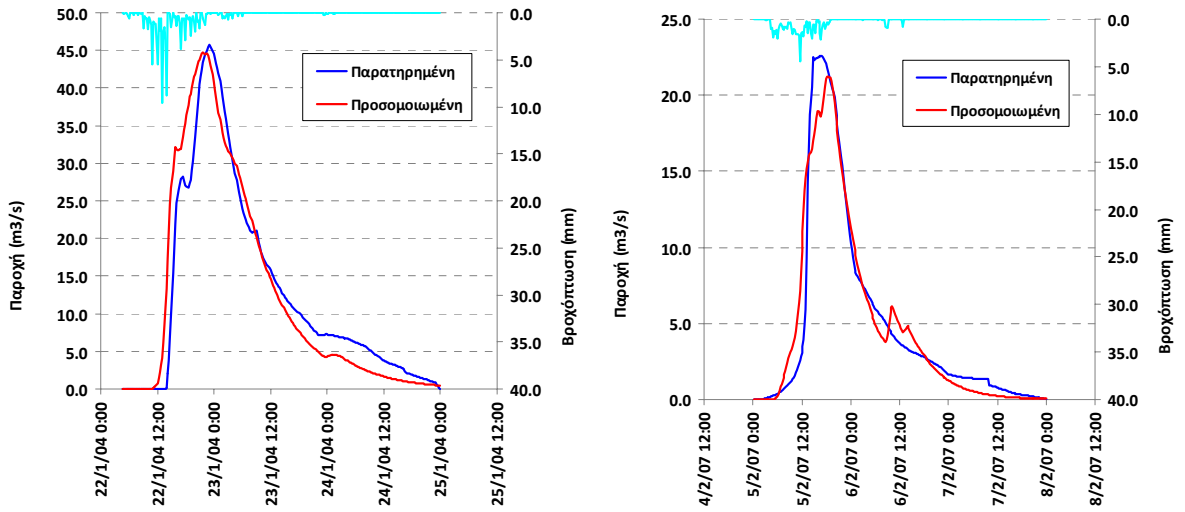

Παρατηρημένη
Προσομοιωμένη
Παροχή (m3/s)
Βροχόπτωση (mm)
70.0
60.0
50.0
40.0
30.0
20.0
10.0
0.0
0.0
5.0
10.0
15.0
20.0
25.0
30.0
35.0
40.0
30/11/92 0:00
1/12/92 0:00
2/12/92 0:00
3/12/92 0:00
4/12/92 0:00
5/12/92 0:00
6/12/92 0:00
7/12/92 0:00


Παρατηρημένη
Προσομοιωμένη
Παροχή (m3/s)
Βροχόπτωση (mm)
70.0
60.0
50.0
40.0
30.0
20.0
10.0
0.0
0.0
5.0
10.0
15.0
20.0
25.0
30.0
35.0
40.0
19/11/94 0:00
20/11/94 0:00
21/11/94 0:00
22/11/94 0:00
23/11/94 0:00
24/11/94 0:00
25/11/94 0:00
26/11/94 0:00
27/11/94 0:00


Παρατηρημένη
Προσομοιωμένη
Παροχή (m3/s)
Βροχόπτωση (mm)
70.0
60.0
50.0
40.0
30.0
20.0
10.0
0.0
0.0
5.0
10.0
15.0
20.0
25.0
30.0
35.0
40.0
7/12/01 12:00
8/12/01 0:00
8/12/01 12:00
9/12/01 0:00
9/12/01 12:00
10/12/01 0:00
10/12/01 12:00
11/12/01 0:00
11/12/01 12:00
12/12/01 0:00
12/12/01 12:00


Παρατηρημένη
Προσομοιωμένη
Παροχή (m3/s)
Βροχόπτωση (mm)
25.0
20.0
15.0
10.0
5.0
0.0
0.0
5.0
10.0
15.0
20.0
25.0
30.0
35.0
40.0
2/1/02 0:00
3/1/02 0:00
4/1/02 0:00
5/1/02 0:00
6/1/02 0:00
7/1/02 0:00
8/1/02 0:00
9/1/02 0:00
10/1/02 0:00


Παρατηρημένη
Προσομοιωμένη
Παροχή (m3/s)
Βροχόπτωση (mm)
60.0
50.0
40.0
30.0
20.0
10.0
0.0
0.0
5.0
10.0
15.0
20.0
25.0
30.0
35.0
40.0
10/1/04 0:00
11/1/04 0:00
12/1/04 0:00
13/1/04 0:00
14/1/04 0:00
15/1/04 0:00
16/1/04 0:00
17/1/04 0:00

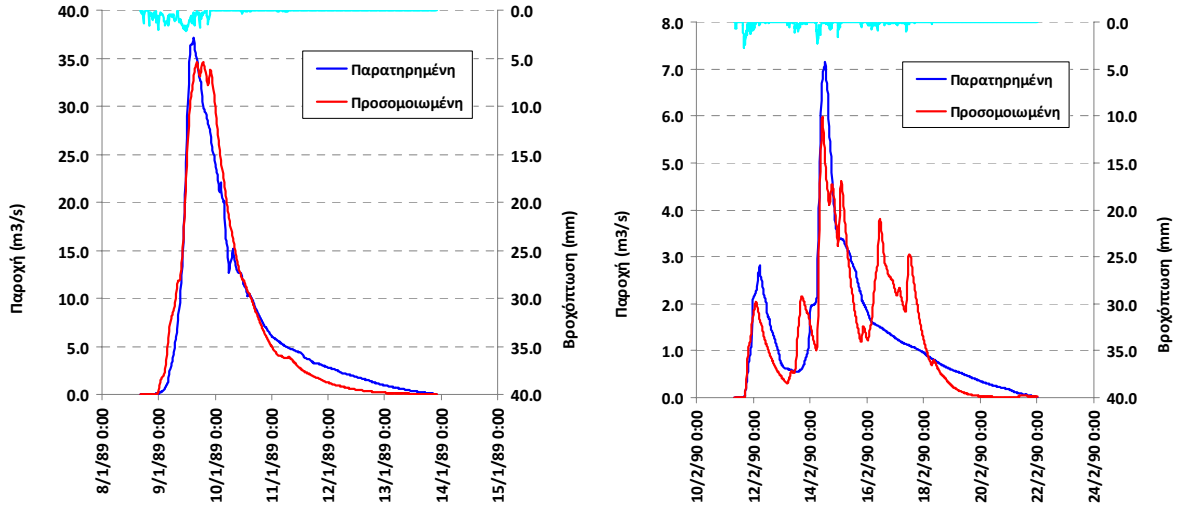


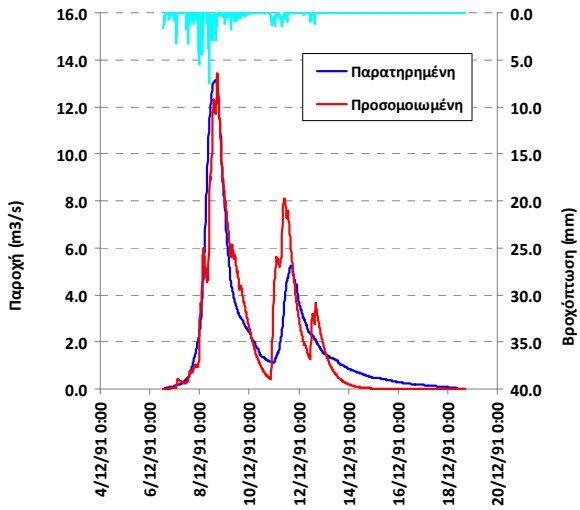
Σχήμα 5.21: Σύγκριση παρατηρημένων και προσομοιωμένων υδρογραφημάτων στην λεκάνη του ποταμού Περιστερώνα της Κύπρου.

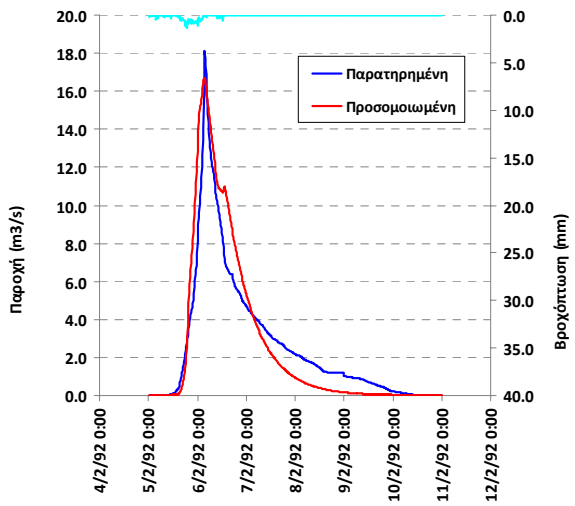
5.5.11 Λεκάνη Ξερού

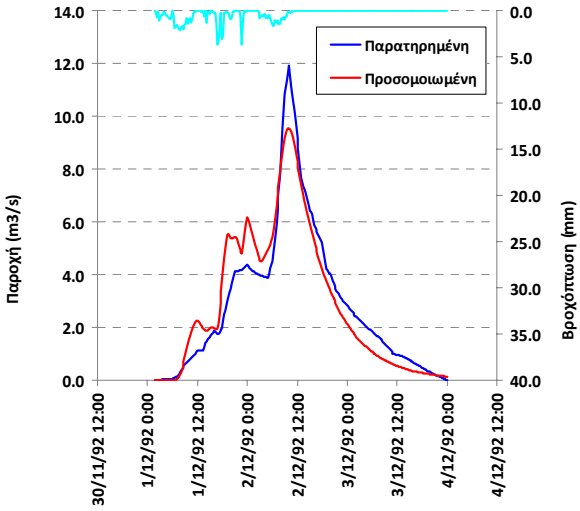
Στο Σχήμα 5.22 συγκρίνονται τα προσομοιωμένα και παρατηρημένα πλημμυρογραφήματα της λεκάνης του ποταμού Ξερού, ανάντη του υδρομετρικού σταθμού Λαζαρίδες, για 9 επεισόδια που εξετάστηκαν. Στο πάνω μέρος απεικονίζεται, ακόμη, το αντίστοιχο επεισόδιο καταιγίδας, εκτιμήθηκε με βάση τα δείγματα βροχόπτωσης από τρεις μετεωρολογικούς σταθμούς της περιοχής (Μούττη Αγγαστίνας, Πάνω Βρύση, Αλωνούδι).

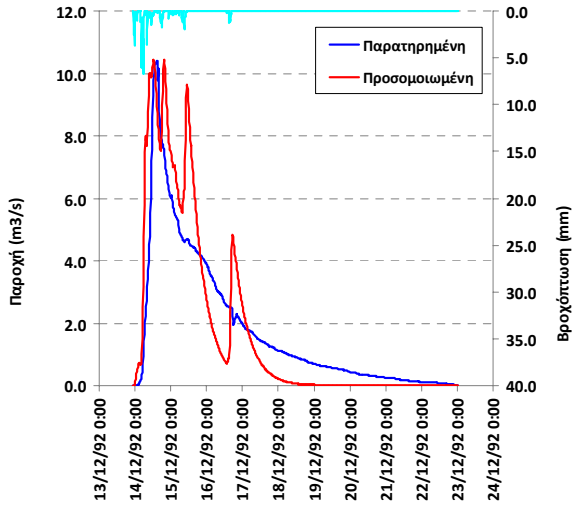
Η προσομοίωση έγινε με χρονικό βήμα 15 min, διαμορφώνοντας το αντίστοιχο παραμετρικό ΣΜΥ ανά επεισόδιο. Όπως φαίνεται από τη σύγκριση των υδρογραφημάτων, και στη λεκάνη αυτή επιτυγχάνεται πολύ καλή αναπαραγωγή των υδρογραφημάτων, και ικανοποιητική προσέγγιση των παροχών αιχμής. Οι χαμηλότερες απορροές που καταγράφονται σε σχέση με την αντίστοιχης έκτασης λεκάνη Περιστερώνας θα πρέπει μάλλον να αποδοθεί στα χαρακτηριστικά βλάστησης των δύο περιοχών. Πράγματι, ενώ η λεκάνη Περιστερώνας χαρακτηρίζεται από ήπια βλάστηση (αμπελώνες, μακία βλάστηση, κτλ.), η λεκάνη του Ξερού καλύπτεται στο σύνολό της από υψηλά δάση, που έχουν μεγαλύτερη δυνατότητα κατακράτησης αλλά και ανάσχεσης της απορροής (Μαστροθεόδωρος, 2013). Η διαφορά αυτή αποτυπώνεται στη μέση βελτιστοποιημένη τιμή της παραμέτρου CN, που είναι 56.

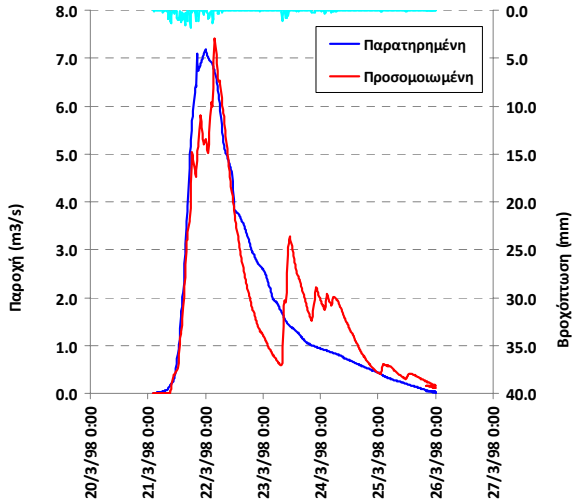


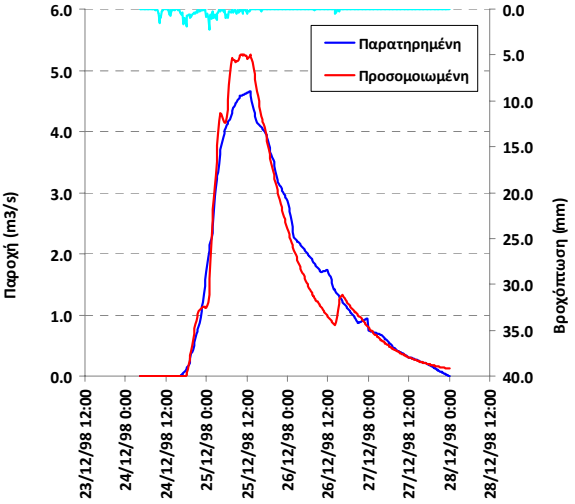

Παρατηρημένη
Προσομοιωμένη
Παροχή (m3/s)
Βροχόπτωση (mm)
16.0
14.0
12.0
10.0
8.0
6.0
4.0
2.0
0.0
0.0
5.0
10.0
15.0
20.0
25.0
30.0
35.0
40.0
4/12/91 0:00
6/12/91 0:00
8/12/91 0:00
10/12/91 0:00
12/12/91 0:00
14/12/91 0:00
16/12/91 0:00
18/12/91 0:00
20/12/91 0:00

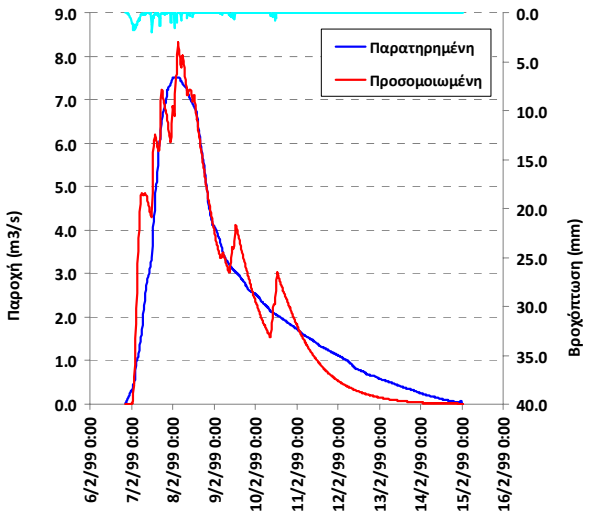

Παρατηρημένη
Προσομοιωμένη
Παροχή (m3/s)
Βροχόπτωση (mm)
20.0
18.0
16.0
14.0
12.0
10.0
8.0
6.0
4.0
2.0
0.0
0.0
5.0
10.0
15.0
20.0
25.0
30.0
35.0
40.0
4/2/92 0:00
5/2/92 0:00
6/2/92 0:00
7/2/92 0:00
8/2/92 0:00
9/2/92 0:00
10/2/92 0:00
11/2/92 0:00
12/2/92 0:00


Παρατηρημένη
Προσομοιωμένη
Παροχή (m3/s)
Βροχόπτωση (mm)
14.0
12.0
10.0
8.0
6.0
4.0
2.0
0.0
0.0
5.0
10.0
15.0
20.0
25.0
30.0
35.0
40.0
30/11/92 12:00
1/12/92 0:00
1/12/92 12:00
2/12/92 0:00
2/12/92 12:00
3/12/92 0:00
3/12/92 12:00
4/12/92 0:00
4/12/92 12:00


Παρατηρημένη
Προσομοιωμένη
Παροχή (m3/s)
Βροχόπτωση (mm)
12.0
10.0
8.0
6.0
4.0
2.0
0.0
0.0
5.0
10.0
15.0
20.0
25.0
30.0
35.0
40.0
13/12/92 0:00
14/12/92 0:00
15/12/92 0:00
16/12/92 0:00
17/12/92 0:00
18/12/92 0:00
19/12/92 0:00
20/12/92 0:00
21/12/92 0:00
22/12/92 0:00
23/12/92 0:00
24/12/92 0:00


Παρατηρημένη
Προσομοιωμένη
Παροχή (m3/s)
Βροχόπτωση (mm)
8.0
7.0
6.0
5.0
4.0
3.0
2.0
1.0
0.0
0.0
5.0
10.0
15.0
20.0
25.0
30.0
35.0
40.0
20/3/98 0:00
21/3/98 0:00
22/3/98 0:00
23/3/98 0:00
24/3/98 0:00
25/3/98 0:00
26/3/98 0:00
27/3/98 0:00


Παρατηρημένη
Προσομοιωμένη
Παροχή (m3/s)
Βροχόπτωση (mm)
6.0
5.0
4.0
3.0
2.0
1.0
0.0
0.0
5.0
10.0
15.0
20.0
25.0
30.0
35.0
40.0
23/12/98 12:00
24/12/98 0:00
24/12/98 12:00
25/12/98 0:00
25/12/98 12:00
26/12/98 0:00
26/12/98 12:00
27/12/98 0:00
27/12/98 12:00
28/12/98 0:00
28/12/98 12:00



Σχήμα 5.22: Σύγκριση παρατηρημένων και προσομοιωμένων υδρογραφημάτων στην λεκάνη του ποταμού Ξερού της Κύπρου (υδρ. σταθμός Λαζαρίδες).

5.6 Φυσική ερμηνεία βελτιστοποιημένων παραμέτρων

5.6.1 Εκτίμηση χαρακτηριστικών μεγεθών πλημμυρικών επεισοδίων

Σε κάθε λεκάνη ενδιαφέροντος υπολογίστηκαν τα ακόλουθα μεγέθη, για κάθε επεισόδιο:

- Ολικό ύψος βροχής
- Ολικό ύψος πλημμυρικής απορροής (μετά την αφαίρεση της βασικής ροής)
- Συντελεστής απορροής επεισοδίου (λόγος ύψος απορροής προς ύψος βροχής)
- Αθροιστικό ύψος βροχόπτωσης προηγούμενων πέντε ημερών και αντίστοιχος τύπος αρχικών συνθηκών υγρασίας, σύμφωνα με την τυποποίηση της SCS (βλ. 4.2)
- Τιμή αναφοράς παραμέτρου CN, για ποσοστό αρχικών απωλειών $\alpha = 0.20$
- Βελτιστοποιημένες τιμές μέγιστης δυνητικής κατακράτησης S (mm), ποσοστού αρχικών απωλειών α, και χρονικών παραμέτρων β και γ που αναφέρονται στον χρόνο ανόδου και χρόνο βάσης, αντίστοιχα, του παραμετρικού ΣΜΥ
- Παράμετρος CN που προκύπτει με βάση την αντίστοιχη βέλτιστη τιμή μέγιστης δυνητικής κατακράτησης, και ανηγμένη τιμή της CN για τις επικρατούσες συνθήκες υγρασίας[1].

Για τα παραπάνω μεγέθη υπολογίστηκε η μέση τιμή τους για τα επεισόδια που εξετάστηκαν, και επιχειρήθηκε η ερμηνεία τους, με βάση τα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά κάθε λεκάνης.

5.6.2 Λεκάνη Νέδοντα

Στους Πίνακες 5.2 και 5.3 συνοψίζονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη των 11 πλημμυρικών επεισοδίων της λεκάνης του Νέδοντα και οι αντίστοιχες βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της προσομοίωσης. Η μέση τιμή της βελτιστοποιημένης παραμέτρου CN ανέρχεται σε 28, ενώ με τη διόρθωση λόγω των συνθηκών αρχικής υγρασίας αυξάνει ελάχιστα (που σημαίνει ότι οι συνθήκες τύπου II είναι αρκετά αντιπροσωπευτικές της λεκάνης). Η πολύ χαμηλή αυτή τιμή

[1] Τονίζεται ότι στις δυο λεκάνες της Κύπρου δεν ήταν διαθέσιμες οι πλήρεις χρονοσειρές ημερήσιας βροχόπτωσης, οπότε δεν ήταν δυνατή η ταυτοποίηση των συνθηκών αρχικής υγρασίας κάθε επισοδίου, και συνακόλουθα η εκτίμηση της διορθωμένης τιμής του CN.

οφείλεται στην κυριαρχία των καρστικών σχηματισμών, που καλύπτουν περίπου τα 2/3 της λεκάνης (Ζωγάκης, 2013), ενώ σημαντικό ρόλο παίζουν και οι απώλειες λόγω διήθησης στον κατάντη ρου του Νέδοντα, που απομειώνουν την απορροή που παράγεται από τις ανάντη υπολεκάνες (Νέδουσα, Καρβελιώτης, Αλαγονία). Ακόμη, σε όλα τα επεισόδια προκύπτουν εξαιρετικά χαμηλές αρχικές απώλειες, καθώς η μέση τιμή του εν λόγω ποσοστού είναι μόλις α = 0.025. Η μέση τιμή της παραμέτρου του χρόνου ανόδου του ΣΜΥ είναι β = 0.315, που σημαίνει ότι μετά τη λήξη της μοναδιαίας βροχής, η παροχή αιχμής εμφανίζεται περίπου στο 30% του χρόνου συγκέντρωσης της λεκάνης. Από την άλλη πλευρά, η αντίστοιχη μέση τιμή της παραμέτρου του χρόνου βάσης του ΣΜΥ είναι γ = 23.5, που σημαίνει ότι μια μέση πλημμύρα αποσβένεται σε διάστημα 20 και πλέον φορές μεγαλύτερο του χρόνου συγκέντρωσης, καθώς η κυρίαρχη συνιστώσα της πλημμυρικής ροής είναι η υποδερμική.

Πίνακας 5.2: Χαρακτηριστικά μεγέθη πλημμυρικών επεισοδίων λεκάνης Νέδοντα.

Επεισόδιο	Ύψος βροχής (mm)	Ύψος απορροής (mm)	Συντελ. απορροής	Αθρ. ύψος βροχής 5 ημερών (mm)	Τύπος συνθηκών υγρασίας	Τιμή αναφοράς $CN_{II,20}$
N12_2011	102.6	28.7	0.280	129.7	III	66.4
N1_2012	136.4	21.0	0.154	0.2	I	49.6
N2_2012	155.0	24.0	0.155	26.0	II	46.5
N4_2012	60.2	2.3	0.038	29.7	I	57.1
N1_2013a	262.9	36.4	0.138	33.8	II	32.6
N1_2013b	142.0	16.3	0.115	33.9	II	45.0
N2_2013	43.3	1.8	0.042	5.6	I	65.4
N3_2013	63.2	1.3	0.020	6.4	I	52.8
N11_2013	108.9	13.1	0.120	47.7	III	52.1
N1_2014b	106.2	10.3	0.097	20.6	II	50.4
N3_2014	66.1	11.3	0.172	58.1	III	68.4
Μέση τιμή			0.121			53.3

Πίνακας 5.3: Βελτιστοποιημένες τιμές παραμέτρων στη λεκάνη του Νέδοντα.

Επεισόδιο	S (mm)	α	β	γ	CN	$CN_{II,a}$
N12_2011	228.8	0.026	0.213	37.6	52.6	32.6
N1_2012	541.4	0.035	0.285	26.5	31.9	52.8
N2_2012	756.6	0.010	0.436	27.5	25.1	25.1
N4_2012	1039.1	0.010	0.285	35.0	19.6	36.8
N1_2013a	1372.3	0.015	0.445	14.9	15.6	15.6
N1_2013b	876.5	0.016	0.172	29.2	22.5	22.5
N2_2013	219.7	0.102	0.165	16.7	53.6	73.4
N3_2013	1641.9	0.010	0.104	21.1	13.4	26.9
N11_2013	654.2	0.015	0.319	25.0	28.0	14.4
N1_2014b	833.5	0.010	0.434	11.1	23.4	23.4
N3_2014	804.0	0.021	0.592	13.5	24.0	12.1
Μέση τιμή	815.3	0.025	0.314	23.5	28.2	30.5

5.6.3 Υπολεκάνη Καρβελιώτη

Στους Πίνακες 5.4 και 5.5 συνοψίζονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη των δέκα πλημμυρικών επεισοδίων της υπολεκάνης Καρβελιώτη και οι αντίστοιχες βέλτιστες τιμές των παραμέτρων. Όπως και στη συνολική λεκάνη του Νέδοντα, η μέση τιμή του CN είναι χαμηλή (CN = 33), με μικρές διακυμάνσεις. Αυτό αποδίδεται στην πυκνή δασώδη βλάστηση της περιοχής, που εμποδίζει την παραγωγή επιφανειακής απορροής παρά τις ευνοϊκές συνθήκες περατότητας (κυριαρχία φλύσχη). Ομοίως, το ποσοστό των αρχικών απωλειών είναι εξαιρετικά χαμηλό, μόλις 0.027, χωρίς ουσιώδη διαφοροποίηση μεταξύ των επεισοδίων που εξετάστηκαν. Η μέση τιμή της παραμέτρου του χρόνου ανόδου του ΣΜΥ είναι πολύ χαμηλή (β = 0.226), ενώ αντίθετα η παράμετρος του χρόνου βάσης ανέρχεται στο εντυπωσιακό γ = 45, που υποδηλώνει εξαιρετικά μεγάλη αναρρυθμιστική ικανότητα της λεκάνης. Τα παραπάνω αιτιολογούν πλήρως τις πολύ χαμηλές πλημμυρικές παροχές και, ειδικότερα, τις πολύ χαμηλές παροχές αιχμής της λεκάνης, συγκριτικά με το μέγεθός της.

Πίνακας 5.4: Χαρακτηριστικά μεγέθη πλημμυρικών επεισοδίων υπολεκάνης Καρβελιώτη.

Επεισόδιο	Ύψος βροχής (mm)	Ύψος απορροής (mm)	Συντελ. απορροής	Αθρ. ύψος βροχής 5 ημερών (mm)	Τύπος συνθηκών υγρασίας	Τιμή αναφοράς $CN_{II,20}$
N12_2011	107.1	18.0	0.168	144.7	III	56.9
N1_2012	161.7	18.9	0.117	0.0	I	42.0
N2_2012	156.7	29.0	0.185	25.5	II	48.8
N4_2012	71.6	9.6	0.135	35.4	II	63.6
N1_2013a	279.0	52.7	0.189	34.8	II	35.2
N1_2013b	141.0	14.7	0.104	57.4	III	44.1
N11_2013	88.0	13.9	0.158	51.0	III	60.8
N12_2013	95.6	7.9	0.083	5.2	I	51.4
N1_2014b	127.6	22.8	0.178	25.4	II	53.4
N3_2014	159.6	62.0	0.389	66.2	III	63.7
Μέση τιμή			0.171			52.0

Πίνακας 5.5: Βελτιστοποιημένες τιμές παραμέτρων στην υπολεκάνη του Καρβελιώτη.

Επεισόδιο	S (mm)	α	β	γ	CN	$CN_{II,a}$
N12_2011	386.2	0.037	0.120	30.0	39.7	22.2
N1_2012	720.3	0.049	0.461	34.0	26.1	45.6
N2_2012	630.8	0.010	0.263	49.3	28.7	28.7
N4_2012	368.5	0.019	0.218	40.0	40.8	40.8
N1_2013a	906.9	0.036	0.143	31.0	21.9	21.9
N1_2013b	853.1	0.025	0.155	19.1	22.9	11.5
N11_2013	384.9	0.020	0.119	35.2	39.8	22.3
N12_2013	868.0	0.010	0.132	17.3	22.6	41.1
N1_2014b	497.0	0.029	0.549	40.0	33.8	33.8
N3_2014	217.0	0.039	0.100	159.0	53.9	33.7
Μέση τιμή	583.3	0.027	0.226	45.5	33.0	30.2

5.6.4 Υπολεκάνη Αλαγονίας

Στους Πίνακες 5.6 και 5.7 συνοψίζονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη των οκτώ πλημμυρικών επεισοδίων της υπολεκάνης Αλαγονίας και οι αντίστοιχες βέλτιστες τιμές των παραμέτρων. Αντίθετα με τη συνολική λεκάνη αλλά και τη γειτονική υπολεκάνη του Καρβελιώτη, η μέση τιμή της βελτιστοποιημένης παραμέτρου CN είναι αρκετά υψηλή (CN = 63, που διορθώνεται σε 61 εφόσον ληφθούν υπόψη οι συνθήκες αρχικής υγρασίας), καθώς η παραγωγή της απορροής ευνοείται όχι μόνο από την κυριαρχία του φλύσχη, αλλά και από τις συνθήκες βλάστησης. Μάλιστα, ο μέσος (στην κλίμακα του πλημμυρικού επεισοδίου) συντελεστής απορροής φτάνει στα επίπεδα του 35%, έναντι 17% στον Καρβελιώτη και μόνο 12% στη συνολική λεκάνη του Νέδοντα. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι αξιόλογο τμήμα της υπολεκάνης Αλαγονίας, το οποίο καλυπτόταν από δάση, κάηκε στις μεγάλες πυρκαγιές του 2007. Όσον αφορά στο μέσο ποσοστό αρχικών απωλειών, είναι και εδώ πολύ χαμηλότερο της τυπικής τιμής εφαρμογής (α = 0.049). Η μέση τιμή της βελτιστοποιημένης παραμέτρου του χρόνου ανόδου του ΣΜΥ είναι β = 0.294, ενώ η αντίστοιχη μέση τιμή της παραμέτρου του χρόνου βάσης είναι γ = 23.8, που είναι πολύ κοντά στις εκτιμήσεις για τη συνολική λεκάνη του Νέδοντα.

Πίνακας 5.6: Χαρακτηριστικά μεγέθη πλημμυρικών επεισοδίων υπολεκάνης Αλαγονίας.

Επεισόδιο	Ύψος βροχής (mm)	Ύψος απορροής (mm)	Συντελ. απορροής	Αθρ. ύψος βροχής 5 ημερών (mm)	Τύπος συνθηκών υγρασίας	Τιμή αναφοράς $CN_{II,20}$
N2_2012	126.6	40.8	0.322	21.3	II	64.5
N4_2012	52.7	4.5	0.086	26.6	II	66.1
N1_2013a	272.6	138.3	0.507	36.2	II	59.6
N1_2013b	143.7	86.2	0.600	25.6	II	79.2
N11_2013	51.1	10.7	0.210	58.2	III	76.1
N1_2014a	36.2	15.0	0.415	21.7	II	89.3
N1_2014b	94.8	42.6	0.449	23.3	II	78.0
N3_2014	52.6	11.0	0.209	48.6	II	75.5
Μέση τιμή			0.350			73.5

Πίνακας 5.7: Βελτιστοποιημένες τιμές παραμέτρων στην υπολεκάνη της Αλαγονίας.

Επεισόδιο	S (mm)	α	β	γ	CN	$CN_{II,a}$
N2_2012	193.2	0.079	0.082	30.0	56.8	56.8
N4_2012	464.6	0.010	0.271	11.4	35.3	35.3
N1_2013a	252.4	0.017	0.153	24.1	50.2	50.2
N1_2013b	84.8	0.010	0.368	45.0	75.0	75.0
N11_2013	161.4	0.024	0.239	12.1	61.1	40.6
N1_2014a	39.1	0.086	0.417	30.0	86.7	86.7
N1_2014b	87.2	0.102	0.225	33.0	74.4	74.4
N3_2014	131.0	0.067	0.600	4.8	66.0	66.0
Μέση τιμή	176.7	0.049	0.294	23.8	63.2	60.6

5.6.5 Λεκάνη Λούσιου

Στους Πίνακες 5.8 και 5.9 συνοψίζονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη των 11 πλημμυρικών επεισοδίων της λεκάνης του Λούσιου και οι αντίστοιχες βέλτιστες τιμές των παραμέτρων. Η μέση τιμή του βελτιστοποιημένης CN είναι 52, αλλά με τη διόρθωση λόγω των συνθηκών αρχικής υγρασίας μειώνεται σε μόλις 45. Η τιμή αυτή αιτιολογείται λόγω της περατότητας των γεωλογικών σχηματισμών και της δασώδους βλάστησης. Ακόμη, παρατηρείται πολύ χαμηλή τιμή του ποσοστού αρχικών απωλειών (α = 0.053). Η παράμετρος του χρόνου ανόδου του ΣΜΥ είναι λίγο υψηλότερη σε σχέση με το Νέδοντα (β = 0.425), ενώ η παράμετρος του χρόνου βάσης είναι αρκετά πιο μικρή (γ = 6.8), πιθανόν και λόγω της ταχείας απόκρισης του καρστικού συστήματος, το οποίο ευνοεί την ανάπτυξη υψηλών ταχυτήτων υπεδάφιας ροής.

Πίνακας 5.8: Χαρακτηριστικά μεγέθη πλημμυρικών επεισοδίων λεκάνης Λούσιου.

Επεισόδιο	Ύψος βροχής (mm)	Ύψος απορροής (mm)	Συντελ. απορροής	Αθρ. ύψος βροχής 5 ημερών (mm)	Τύπος συνθηκών υγρασίας	Τιμή αναφοράς $CN_{II,20}$
L8_2012	57.0	3.0	0.053	0.0	I	60.6
L11_2012	38.1	2.1	0.055	3.7	I	69.9
L12_2012a	54.4	6.7	0.123	91.0	III	68.8
L12_2012b	25.9	5.4	0.209	74.9	III	86.2
L1_2013a	141.9	57.4	0.405	24.1	II	67.4
L1_2013b	65.5	11.2	0.171	49.2	III	68.5
L2_2013	24.3	5.3	0.218	9.1	I	87.3
L11_2013a	51.9	4.0	0.076	44.1	III	65.4
L11_2013b	39.4	5.6	0.143	73.0	III	76.6
L1_2014	115.0	20.1	0.175	20.4	II	55.7
L3_2014	48.5	4.4	0.091	198.5	III	68.4
Μέση τιμή			0.156			70.4

Πίνακας 5.9: Βελτιστοποιημένες τιμές παραμέτρων στη λεκάνη του Λούσιου.

Επεισόδιο	S (mm)	α	β	γ	CN	$CN_{II,a}$
L8_2012	758.9	0.010	0.115	1.0	25.1	44.3
L11_2012	1043.6	0.055	0.351	1.0	19.6	36.7
L12_2012a	270.0	0.031	0.500	2.8	48.5	29.0
L12_2012b	57.8	0.092	0.408	12.6	81.5	65.6
L1_2013a	201.1	0.010	0.500	6.8	55.8	55.8
L1_2013b	289.1	0.010	0.500	9.9	46.8	27.6
L2_2013	46.2	0.125	0.468	14.3	84.6	92.9
L11_2013a	257.1	0.070	0.600	8.0	49.7	30.0
L11_2013b	113.9	0.098	0.587	3.8	69.0	49.2
L1_2014	364.3	0.052	0.599	8.0	41.1	41.1
L3_2014	311.7	0.030	0.053	6.0	44.9	26.2
Μέση τιμή	337.6	0.053	0.425	6.8	51.5	45.3

5.6.6 Λεκάνη Σαρανταπόταμου

Στους Πίνακες 5.10 και 5.11 συνοψίζονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη των 12 πλημμυρικών επεισοδίων της λεκάνης του Σαρανταπόταμου, στη θέση Γύρα Στεφάνης, και οι αντίστοιχες βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της διαδικασίας προσομοίωσης. Στη λεκάνη παράγονται πολύ χαμηλές απορροές, λόγω της περατότητας των γεωλογικών σχηματισμών της λεκάνης και της δασώδους βλάστησης. Οι μέσες τιμές των βελτιστοποιημένων παραμέτρων είναι CN = 52 (διορθωμένη τιμή 63), $\alpha = 0.125$, $\beta = 0.316$ και $\gamma = 8.2$.

Πίνακας 5.10: Χαρακτηριστικά μεγέθη πλημμυρικών επεισοδίων λεκάνης Σαρανταπόταμου.

Επεισόδιο	Ύψος βροχής (mm)	Ύψος απορροής (mm)	Συντελ. απορροής	Αθρ. ύψος βροχής 5 ημερών (mm)	Τύπος συνθηκών υγρασίας	Τιμή αναφοράς $CN_{II,20}$
S12_2011	74.1	2.2	0.030	21.2	II	50.6
S2_2012a	40.8	1.6	0.039	5.7	I	66.5
S2_2012b	22.5	1.3	0.059	40.4	III	65.2
S2_2012c	35.3	1.3	0.038	11.2	I	69.5
S12_2012	94.5	4.2	0.044	0.0	I	46.8
S1_2013	21.4	0.7	0.033	2.4	I	65.1
S2_2013b	46.5	3.4	0.074	19.0	II	79.6
S11_2013a	100.8	2.6	0.026	3.0	I	67.6
S11_2013b	34.1	1.6	0.047	1.6	I	42.3
S12_2013	49.4	2.2	0.044	3.6	I	71.3
S1_2014	32.0	1.0	0.032	3.6	I	62.7
S3_2014a	58.9	3.5	0.059	13.6	I	60.6
Μέση τιμή			0.044			62.3

Πίνακας 5.11: Βελτιστοποιημένες τιμές παραμέτρων στη λεκάνη του Σαρανταπόταμου.

Επεισόδιο	S (mm)	α	β	γ	CN	$CN_{II,a}$
S12_2011	1160.3	0.019	0.591	7.7	18.0	18.0
S2_2012a	440.4	0.030	0.600	6.5	36.6	57.9
S2_2012b	185.9	0.029	0.356	12.3	57.7	37.3
S2_2012c	155.7	0.130	0.064	16.1	62.0	79.5
S12_2012	789.7	0.045	0.063	6.7	24.3	43.4
S1_2013	70.7	0.199	0.409	9.8	78.2	89.5
S2_2013b	126.2	0.190	0.460	5.0	66.8	66.8
S11_2013a	886.4	0.058	0.598	1.1	22.3	40.6
S11_2013b	95.8	0.218	0.222	2.7	72.6	86.3
S12_2013	124.2	0.259	0.061	11.1	67.2	83.0
S1_2014	80.1	0.280	0.242	12.0	76.0	88.3
S3_2014a	409.9	0.047	0.123	7.9	38.3	59.6
Μέση τιμή	377.1	0.125	0.316	8.2	51.7	62.5

5.6.7 Υπολεκάνη Οινόης

Στους Πίνακες 5.12 και 5.13 συνοψίζονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη των έξι μόλις πλημμυρικών επεισοδίων της υπολεκάνης Οινόης, και οι αντίστοιχες βέλτιστες τιμές των παραμέτρων. Στη λεκάνη παράγονται εντυπωσιακά χαμηλές απορροές (μέσος συντελεστής απορροής μόλις 1.2%), το οποίο ερμηνεύεται, πέραν από την περατότητα των γεωλογικών σχηματισμών, από το γεγονός ότι σχεδόν όλη η περιοχή καλύπτεται από πευκοδάση. Οι μέσες τιμές των βελτιστοποιημένων παραμέτρων είναι CN = 27 (διορθωμένη τιμή 34), α = 0.073, β = 0.241 και γ = 4.8. Η χαμηλή τιμή της τελευταίας παραμέτρου υποδηλώνει ότι η ελάχιστη ροή που παράγεται περιστασιακά (και μόνο σε πολύ μεγάλα επεισόδια βροχής) αποχετεύεται ως επί το πλείστον επιφανειακά, και όχι διαμέσου του εδάφους, δηλαδή ως υποδερμική ροή.

Πίνακας 5.12: Χαρακτηριστικά μεγέθη πλημμυρικών επεισοδίων υπολεκάνης Οινόης.

Επεισόδιο	Ύψος βροχής (mm)	Ύψος απορροής (mm)	Συντελ. απορροής	Αθρ. ύψος βροχής 5 ημερών (mm)	Τύπος συνθηκών υγρασίας	Τιμή αναφοράς $CN_{II,20}$
S12_2012	93.1	1.1	0.012	0.0	I	41.3
S2_2013a	32.8	0.5	0.015	46.0	III	67.2
S2_2013b	76.8	1.8	0.023	24.6	II	48.5
S11_2013a	92.2	0.2	0.002	2.0	I	37.8
S11_2013b	24.0	0.1	0.005	1.8	I	71.3
S3_2014a	75.2	0.9	0.012	27.2	I	46.5
Μέση τιμή			0.012			52.1

Πίνακας 5.13: Βελτιστοποιημένες τιμές παραμέτρων στην υπολεκάνη της Οινόης.

Επεισόδιο	S (mm)	α	β	γ	CN	$CN_{II,a}$
S12_2012	1639.0	0.030	0.225	7.5	13.4	27.0
S2_2013a	160.1	0.148	0.287	6.2	61.3	40.8
S2_2013b	753.3	0.047	0.231	5.4	25.2	25.2
S11_2013a	445.8	0.187	0.052	3.2	36.3	57.6
S11_2013b	1207.8	0.010	0.062	2.7	17.4	33.4
S3_2014a	2159.6	0.014	0.585	3.9	10.5	21.9
Μέση τιμή	1060.9	0.073	0.241	4.8	27.4	34.3

5.6.8 Λεκάνη ρέματος Χαλανδρίου

Στους Πίνακες 5.14 και 5.15 συνοψίζονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη των τεσσάρων πλημμυρικών επεισοδίων της λεκάνης του ρέματος Χαλανδρίου, και οι αντίστοιχες βέλτιστες τιμές των παραμέτρων. Λόγω του πολύ μικρού αριθμού των επεισοδίων, μεταξύ των οποίων το ακραίο της 22/2/2013 (CH2_2013), δεν μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι οι μέσες τιμές των παραμέτρων είναι CN = 74 (διορθωμένη τιμή 76), α = 0.026, β = 0.109 και γ = 1.1. Η τελευταία τιμή είναι σχεδόν ίδια και στα τέσσερα επεισόδια που εξετάστηκαν, που υποδηλώνει ότι η πλημμυρική απορροή στη λεκάνη είναι επιφανειακή. Οι αντίστοιχες τιμές για το «ακραίο» επεισόδιο της 22/2/2013, είναι CN = 70 (αναφέρεται σε συνθήκες τύπου II), α = 0.020, β = 0.109 και γ = 1.326. Υπενθυμίζεται ότι η

πλημμύρα αυτή προήλθε από βροχόπτωση μεγάλης περιόδου επαναφοράς (συνολικό ύψος βροχής 112 mm σε διάστημα περίπου 8 ώρες), σε αντίθεση με τα υπόλοιπα υδρογραφήματα που προέρχονται από πολύ μικρά επεισόδια καταιγίδων.

Πίνακας 5.14: Χαρακτηριστικά μεγέθη πλημμυρικών επεισοδίων λεκάνης ρ. Χαλανδρίου.

Επεισόδιο	Ύψος βροχής (mm)	Ύψος απορροής (mm)	Συντελ. απορροής	Αθρ. ύψος βροχής 5 ημερών (mm)	Τύπος συνθηκών υγρασίας	Τιμή αναφοράς $CN_{II,20}$
CH12_2012	3.8	0.9	0.252	13.9	II	98.0
CH1_2013	7.3	0.6	0.077	2.6	I	93.1
CH2_2013	112.0	55.6	0.496	23.8	II	77.6
CH11_2013	14.7	0.5	0.036	35.2	II	84.4
Μέση τιμή			0.215			88.3

Πίνακας 5.15: Βελτιστοποιημένες τιμές παραμέτρων στη λεκάνη του ρέματος Χαλανδρίου.

Επεισόδιο	S (mm)	α	β	γ	CN	$CN_{II,a}$
CH12_2012	7.9	0.064	0.069	1.077	97.0	97.0
CH1_2013	71.0	0.010	0.113	1.000	78.1	89.5
CH2_2013	107.2	0.020	0.109	1.326	70.3	70.3
CH11_2013	262.1	0.010	0.145	1.000	49.2	49.2
Μέση τιμή	112.1	0.026	0.109	1.101	73.7	76.5

5.6.9 Υπολεκάνη ρέματος Ραφήνας ανάντη υδρ. σταθμού Ντράφι

Στους Πίνακες 5.16 και 5.17 συνοψίζονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη των 16 πλημμυρικών επεισοδίων της λεκάνης Λυκορέματος στη θέση Ντράφι, και οι αντίστοιχες βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της προσομοίωσης. Στη λεκάνη παράγονται χαμηλές πλημμυρικές παροχές (μέσος συντελεστής απορροής 9.4%). Οι μέσες τιμές των βελτιστοποιημένων παραμέτρων είναι CN = 44 (που ωστόσο αυξάνει σε 66, με αναγωγή στις μέσες συνθήκες εδαφικής υγρασίας), α = 0.07, β = 0.297 και γ = 2.741. Σε σχέση με τις άλλες λεκάνες, προκύπτουν παρόμοια συμπεράσματα για τις παραμέτρους α και β, ενώ όσον αφορά στην παράμετρο γ που αναφέρεται στον χρόνο βάσης του ΣΜΥ, η τιμή της είναι χαμηλή, που όπως και στην περίπτωση του ρέματος Χαλανδρίου υποδηλώνει υπεροχή της επιφανειακής ροής.

Πίνακας 5.16: Χαρακτηριστικά μεγέθη πλημμυρικών επεισοδίων λεκάνης Λυκορέματος Ραφήνας ανάντη του υδρομετρικού σταθμού Ντράφι.

Επεισόδιο	Ύψος βροχής (mm)	Ύψος απορροής (mm)	Συντελ. απορροής	Αθρ. ύψος βροχής 5 ημερών (mm)	Τύπος συνθηκών υγρασίας	Τιμή αναφοράς $CN_{II,20}$
R1_2004a	99.7	7.9	0.079	3.9	I	39.2
R1_2004b	62.1	5.9	0.095	0.1	I	56.4
R12_2004	94.5	7.0	0.074	19.1	II	21.2
R1_2005a	119.0	14.3	0.120	0.2	I	44.4
R1_2005b	36.1	1.5	0.042	3.4	I	51.3

R2_2005	35.6	3.8	0.106	41.7	III	30.1
R10_2006a	71.3	3.9	0.054	14.9	II	22.5
R10_2006b	31.8	2.1	0.066	87.9	III	41.9
R10_2006c	117.7	12.9	0.110	0.0	I	42.5
R3_2007	70.8	4.6	0.065	0.8	I	43.2
R12_2007	63.2	2.9	0.047	5.8	I	39.4
R10_2009a	24.4	3.4	0.138	7.8	I	96.7
R10_2009b	20.8	2.7	0.129	12.4	I	84.6
R11_2009	21.6	3.1	0.141	10.8	I	90.3
R12_2009a	18.8	1.5	0.081	28.1	II	75.1
R12_2009c	63.9	10.3	0.161	21.9	II	56.5
Μέση τιμή			0.094			52.2

Πίνακας 5.17: Βελτιστοποιημένες τιμές παραμέτρων στη λεκάνη του Λυκορέματος.

Επεισόδιο	S (mm)	α	β	γ	CN	$CN_{II,a}$
R1_2004a	939.6	0.010	0.223	3.160	21.3	50.0
R1_2004b	467.6	0.014	0.386	3.191	35.2	63.3
R12_2004	943.9	0.010	0.366	2.258	21.2	50.8
R1_2005a	756.9	0.010	0.322	9.782	25.1	49.9
R1_2005b	574.8	0.010	0.248	3.543	30.6	69.5
R2_2005	256.7	0.010	0.203	2.095	49.7	75.9
R10_2006a	875.1	0.013	0.201	3.216	22.5	55.3
R10_2006b	153.3	0.084	0.344	2.784	62.4	74.6
R10_2006c	817.3	0.010	0.351	4.535	23.7	49.1
R3_2007	794.5	0.010	0.396	2.120	24.2	56.8
R12_2007	930.2	0.010	0.341	1.018	21.4	57.2
R10_2009a	20.9	0.677	0.315	2.148	92.4	83.8
R10_2009b	110.4	0.020	0.315	1.000	69.7	85.5
R11_2009	65.3	0.090	0.259	1.000	79.6	85.6
R12_2009a	84.0	0.080	0.244	1.000	75.1	84.3
R12_2009c	195.5	0.070	0.234	1.000	56.5	68.3
Μέση τιμή	499.1	0.070	0.297	2.741	44.4	66.2

5.6.10 Υπολεκάνη ρέματος Ραφήνας ανάντη Λυκορέματος

Στους Πίνακες 5.18 και 5.19 συνοψίζονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη των 15 πλημμυρικών επεισοδίων της ανάντη υπολεκάνης του Λυκορέματος, στην ομώνυμη θέση του μετρητικού σταθμού, και οι αντίστοιχες βέλτιστες τιμές των παραμέτρων. Οι μέσες τιμές των εν λόγω παραμέτρων είναι CN = 71 (διορθωμένη τιμή 73), α = 0.230, β = 0.227 και γ = 1.747. Γενικά, υπάρχουν εμφανείς διαφορές συγκριτικά με τη συνολική λεκάνη, χαρακτηριστικό της έντονης ετερογένειας των υδρολογικών διεργασιών, ακόμα και σε μια έκταση της τάξης των 15 km^2. Η πιο εμφανής διαφοροποίηση αφορά στην παράμετρο αρχικών απωλειών, που σε αντίθεση με όλες τις άλλες περιοχές που εξετάστηκαν εμφανίζει τιμή στα επίπεδα του 20%.

Πίνακας 5.18: Χαρακτηριστικά μεγέθη πλημμυρικών επεισοδίων υπολεκάνης Λυκορέματος Ραφήνας ανάντη του ομώνυμου υδρομετρικού σταθμού.

Επεισόδιο	Ύψος βροχής (mm)	Ύψος απορροής (mm)	Συντελ. απορροής	Αθρ. ύψος βροχής 5 ημερών (mm)	Τύπος συνθηκών υγρασίας	Τιμή αναφοράς $CN_{II,20}$
Rl11_2005	85.0	3.1	0.036	19.9	II	48.2
Rl2_2006	48.8	3.0	0.061	6.5	I	65.2
Rl10_2006a	78.5	1.2	0.015	17.6	II	46.1
Rl10_2006b	43.5	1.5	0.035	96.2	III	64.4
Rl10_2009a	8.6	2.9	0.332	23.6	II	96.5
Rl10_2009b	11.4	1.9	0.165	34.0	II	92.5
Rl10_2009c	20.8	2.7	0.130	12.4	I	85.5
Rl10_2009d	8.2	0.8	0.094	47.0	III	92.8
Rl11_2009	21.6	2.4	0.110	10.8	I	84.0
Rl12_2009a	6.8	0.8	0.121	6.3	I	94.6
Rl12_2009c	12.3	0.5	0.045	51.6	III	86.7
Rl12_2009d	66.6	8.4	0.127	24.1	II	64.6
Rl2_2010	11.4	1.4	0.120	26.9	II	91.2
Rl5_2010a	21.4	1.2	0.057	5.8	I	80.6
Rl5_2010b	18.7	1.2	0.067	35.0	I	83.4
Μέση τιμή			0.101			78.4

Πίνακας 5.19: Βελτιστοποιημένες τιμές παραμέτρων στην υπολεκάνη Λυκορέματος Ραφήνας ανάντη του ομώνυμου υδρομετρικού σταθμού.

Επεισόδιο	S (mm)	α	β	γ	CN	$CN_{II,a}$
Rl11_2005	1043.6	0.026	0.276	1.427	19.6	19.6
Rl2_2006	294.5	0.059	0.260	2.652	46.3	67.2
Rl10_2006a	639.1	0.079	0.383	1.762	28.4	28.4
Rl10_2006b	320.1	0.064	0.374	3.466	44.2	25.7
Rl10_2009a	10.7	0.138	0.100	1.193	96.0	96.0
Rl10_2009b	30.0	0.084	0.344	2.784	89.4	89.4
Rl10_2009c	76.3	0.066	0.104	1.009	76.9	88.8
Rl10_2009d	7.9	0.672	0.205	2.348	97.0	93.3
Rl11_2009	63.0	0.129	0.209	1.235	80.1	90.6
Rl12_2009a	84.0	0.721	0.168	1.631	75.1	87.8
Rl12_2009c	10.4	0.800	0.266	1.469	96.1	91.4
Rl12_2009d	312.2	0.035	0.110	1.031	44.9	44.9
Rl2_2010	17.9	0.318	0.260	2.133	93.4	93.4
Rl5_2010a	6.7	0.177	0.172	1.046	97.4	98.9
Rl5_2010b	90.9	0.081	0.166	1.021	73.6	86.9
Μέση τιμή	200.5	0.230	0.227	1.747	70.6	73.5

5.6.11 Λεκάνη Περιστερώνα

Στους Πίνακες 5.20 και 5.21 συνοψίζονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη των πλημμυρικών επεισοδίων της λεκάνης του ποταμού Περιστερώνα της Κύπρου, στη θέση Γέφυρα Παναγιάς, και οι αντίστοιχες βέλτιστες τιμές των παραμέτρων. Στη λεκάνη παράγονται αρκετά μεγάλες πλημμυρικές παροχές, όπως υποδηλώνεται και από τη μέση τιμή του συντελεστή απορροής (40.7%). Οι μέσες τιμές των παραμέτρων είναι παρεμφερείς με αυτές που εκτιμήθηκαν στις ελληνικές λεκάνες, συγκεκριμένα CN = 64, α = 0.060, β = 0.356 και γ = 21.4.

Πίνακας 5.20: Χαρακτηριστικά μεγέθη πλημμυρικών επεισοδίων λεκάνης Περιστερώνα.

Επεισόδιο	Ύψος βροχής (mm)	Ύψος απορροής (mm)	Συντελ. απορροής	Τιμή αναφοράς $CN_{II,20}$
P_1_1977	86.4	29.1	0.337	73.6
P_2_1979	24.9	12.9	0.518	94.4
P_2_1980	94.9	28.0	0.295	69.1
P_3_1988	108.7	65.3	0.601	83.5
P_12_1988	164.2	35.2	0.214	50.1
P_1_1989	166.3	103.8	0.624	78.2
P_12_1991a	109.4	18.3	0.167	56.2
P_12_1992	143.6	39.4	0.275	58.1
P_11_1994	246.4	94.3	0.383	52.8
P_12_2001	84.0	40.9	0.487	81.8
P_1_2002	66.0	42.4	0.643	90.7
P_1_2004a	152.5	67.4	0.442	68.3
P_1_2004b	84.3	39.6	0.470	81.0
P_2_2007	65.9	16.1	0.244	73.3
Μέση τιμή			0.407	72.2

Πίνακας 5.21: Βελτιστοποιημένες τιμές παραμέτρων στη λεκάνη Περιστερώνα.

Επεισόδιο	S (mm)	α	β	γ	CN
P_1_1977	138.4	0.048	0.271	30.8	64.7
P_2_1979	20.2	0.053	0.462	21.4	92.6
P_2_1980	193.4	0.031	0.350	22.0	56.8
P_3_1988	54.0	0.150	0.438	40.0	82.5
P_12_1988	556.3	0.010	0.203	14.8	31.3
P_1_1989	78.7	0.130	0.492	12.5	76.3
P_12_1991a	493.4	0.010	0.399	11.4	34.0
P_12_1992	293.4	0.049	0.280	14.9	46.4
P_11_1994	362.4	0.026	0.271	17.4	41.2
P_12_2001	62.2	0.147	0.423	18.0	80.3
P_1_2002	35.4	0.011	0.435	38.5	87.8
P_1_2004a	182.7	0.014	0.203	21.2	58.2

P_1_2004b	65.5	0.150	0.448	20.3	79.5
P_2_2007	188.8	0.012	0.305	16.1	57.4
Μέση τιμή	194.6	0.060	0.356	21.4	63.5

5.6.12 Λεκάνη Ξερού

Στους Πίνακες 5.22 και 5.23 συνοψίζονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη των πλημμυρικών επεισοδίων της λεκάνης του ποταμού Ξερού της Κύπρου, στη θέση Λαζαρίδες, και οι αντίστοιχες βέλτιστες τιμές των παραμέτρων. Στη λεκάνη αυτή παράγονται πιο χαμηλές απορροές σε σχέση με την Περιστερώνα, λόγω της κυριαρχίας της δασώδους βλάστησης. Επισημαίνεται ότι οι δύο λεκάνες έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά περατότητας (και οι δύο εδράζονται στα ηφαιστειογενή πετρώματα του Τρόοδος), και η μόνη εμφανής διαφοροποίησή τους αφορά στη φυτοκάλυψη. Οι μέσες τιμές των βελτιστοποιημένων παραμέτρων της λεκάνης του Ξερού είναι CN = 56 (χαμηλότερη από τη Περιστερώνα, όπως είναι εύλογο), $\alpha = 0.039$, $\beta = 0.359$ και $\gamma = 33.0$.

Πίνακας 5.22: Χαρακτηριστικά μεγέθη πλημμυρικών επεισοδίων λεκάνης Ξερού.

Επεισόδιο	Ύψος βροχής (mm)	Ύψος απορροής (mm)	Συντελ. απορροής	Τιμή αναφοράς $CN_{II,20}$
L_1_1989	97.6	47.7	0.489	79.6
L_2_1990	105.6	17.7	0.168	57.2
L_12_1991a	193.1	30.7	0.159	41.5
L_2_1992	37.5	20.1	0.535	92.1
L_12_1992a	96.6	10.7	0.110	54.1
L_12_1992b	84.5	20.5	0.243	68.1
L_3_1998	45.2	11.7	0.259	80.8
L_12_1998	47.3	7.4	0.157	74.2
L_2_1999	60.1	23.2	0.387	82.3
Μέση τιμή			0.279	70.0

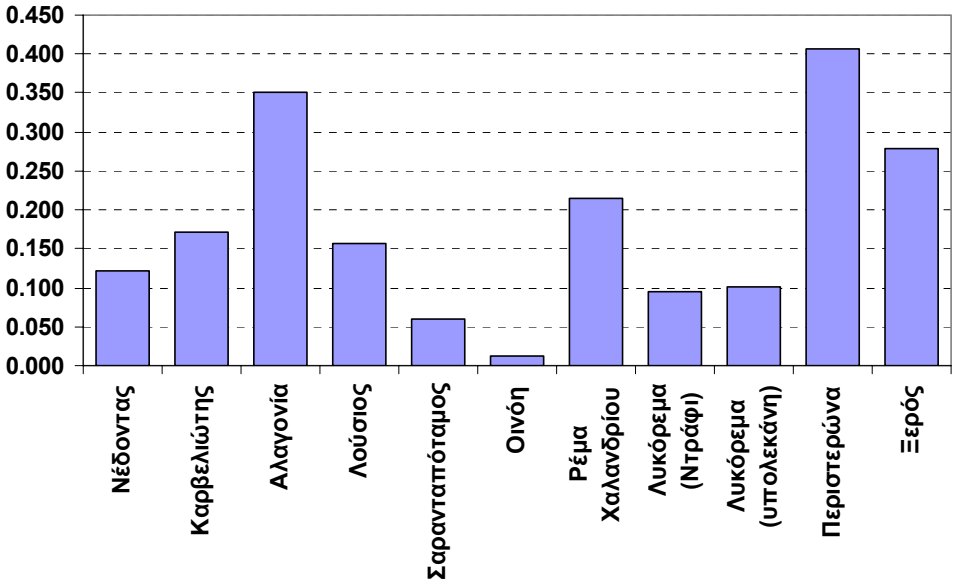
Πίνακας 5.23: Βελτιστοποιημένες τιμές παραμέτρων στη λεκάνη Ξερού.

Επεισόδιο	S (mm)	α	β	γ	CN
L_1_1989	77.4	0.108	0.335	33.5	76.6
L_2_1990	476.0	0.010	0.596	31.8	34.8
L_12_1991a	917.1	0.010	0.272	30.0	21.7
L_2_1992	25.1	0.118	0.403	37.0	91.0
L_12_1992a	668.5	0.010	0.421	25.0	27.5
L_12_1992b	245.9	0.010	0.428	27.5	50.8
L_3_1998	121.1	0.010	0.204	27.8	67.7
L_12_1998	150.5	0.066	0.366	34.1	62.8
L_2_1999	91.4	0.012	0.201	50.0	73.5
Μέση τιμή	308.1	0.039	0.359	33.0	56.3

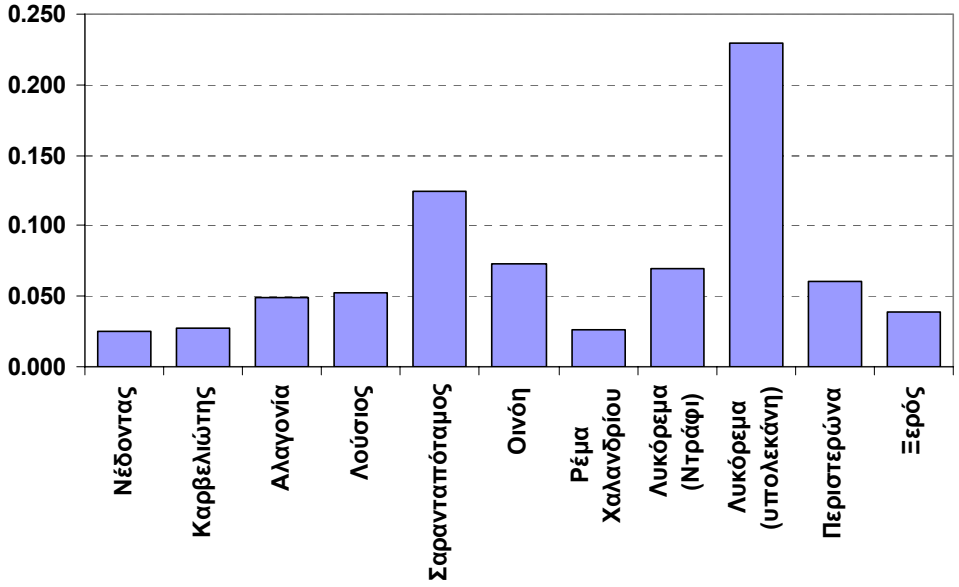
5.7 Συγκεντρωτικά μεγέθη

Στα διαγράμματα που ακολουθούν απεικονίζονται, σε κάθε λεκάνη ενδιαφέροντος, οι μέσες τιμές των συντελεστών απορροής και των παραμέτρων της μεθόδου SCS-CN&MY. Τα γενικότερα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι:

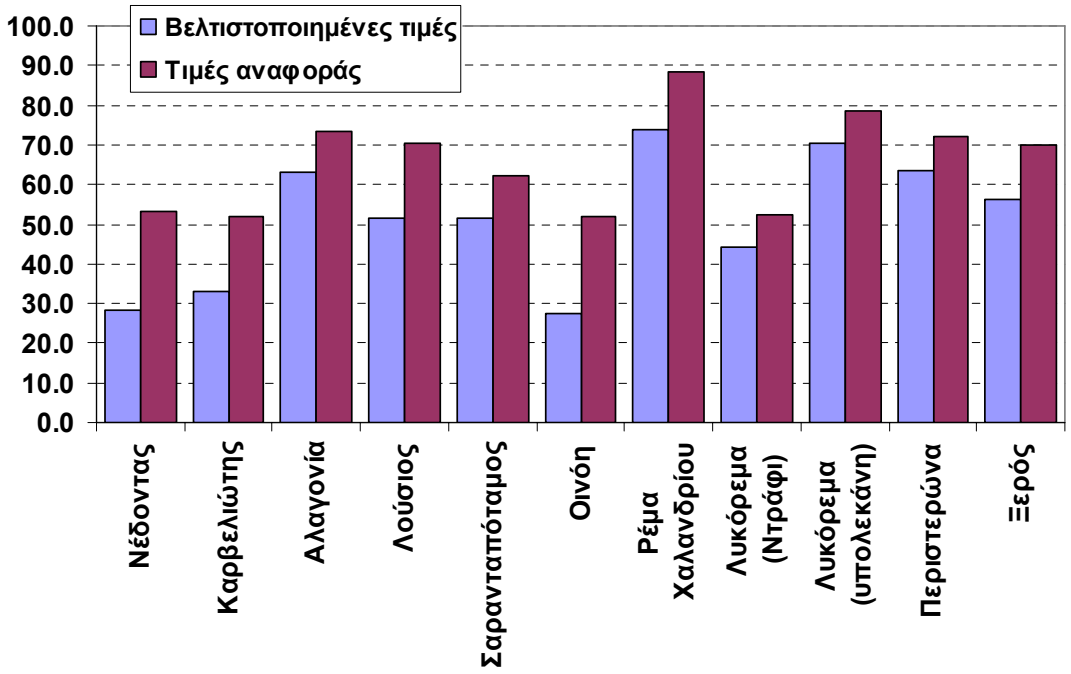
- Οι λεκάνες ποικίλουν σημαντικά ως προς την υδρολογική τους συμπεριφορά, όπως αποτυπώνεται από το εύρος τιμών των μέσων συντελεστών απορροής, που κυμαίνεται από μόλις 1%, στην υπολεκάνη Οινόης, έως 41%, στην Περιστερώνα (Σχήμα 5.23).
- Σε 9 από τις 11 λεκάνες, το μέσο ποσοστό αρχικών απωλειών κυμαίνεται από 2-5%, ενώ μόνο στην ανάντη υπολεκάνη του Λυκορέματος Ραφήνας το εν λόγω ποσοστό φτάνει στα επίπεδα της τυπικής τιμής 20% που εφαρμόζεται στις μελέτες πλημμυρών (Σχήμα 5.24).
- Η βελτιστοποιημένη παράμετρος CN παρουσιάζει έντονη μεταβλητότητα από επεισόδιο σε επεισόδιο, λόγω της ισχυρής εξάρτησής του από τις αρχικές απώλειες και τις αρχικές συνθήκες υγρασίας. Σε τρεις από τις πιλοτικές περιοχές εμφανίζει εξαιρετικά χαμηλές τιμές (~30), ενώ κατά κανόνα κυμαίνεται σε επίπεδα του 50-60, που είναι χαρακτηριστική λεκανών με μέτριο υδατικό δυναμικό. Σε όλες τις περιπτώσεις, οι μέσες βελτιστοποιημένς τιμές είναι χαμηλότερες από τις τιμές αναφοράς (Σχήμα 5.25).
- Η παράμετρος του χρόνου ανόδου του ΣΜΥ κυμαίνεται στα επίπεδα του 1/3 του χρόνου συγκέντρωσης κατά Giandotti, χωρίς ιδιαίτερη διαφορά ούτε από επεισόδιο σε επεισόδιο ούτε από περιοχή σε περιοχή, καθώς, λόγω των μεγάλων κλίσεων των λεκανών που εξετάστηκαν, παρατηρείται γρήγορη εμφάνιση των αιχμών (Σχήμα 5.26).
- Αντίθετα, η παράμετρος του χρόνου βάσης του ΣΜΥ εμφανίζει σημαντική μεταβλητότητα από περιοχή σε περιοχή. Σε πέντε λεκάνες, στις οποίες κυριαρχεί εμφανώς η υποδερμική ροή έναντι της επιφανειακής η μέση τιμή του χρόνου βάσης είναι πάνω από μία τάξη μεγέθους (20-45 φορές) μεγαλύτερη του χρόνου συγκέντρωσης κατά Giandotti. Στις υπόλοιπες λεκάνες, ο χρόνος βάσης του ΣΜΥ είναι πιο μικρός, με τη σχετική παράμετρο γ να κυμαίνεται από 1 (που υποδηλώνει αποκλειστική παραγωγή επιφανειακής ροής και διόδευσή της σε χρόνο ίσο με τον χρόνο συγκέντρωσης της λεκάνης) έως 5, σε λεκάνες με συμβολή τόσο της επιφανειακής όσο και της υποδερμικής απορροής (Σχήμα 5.27).



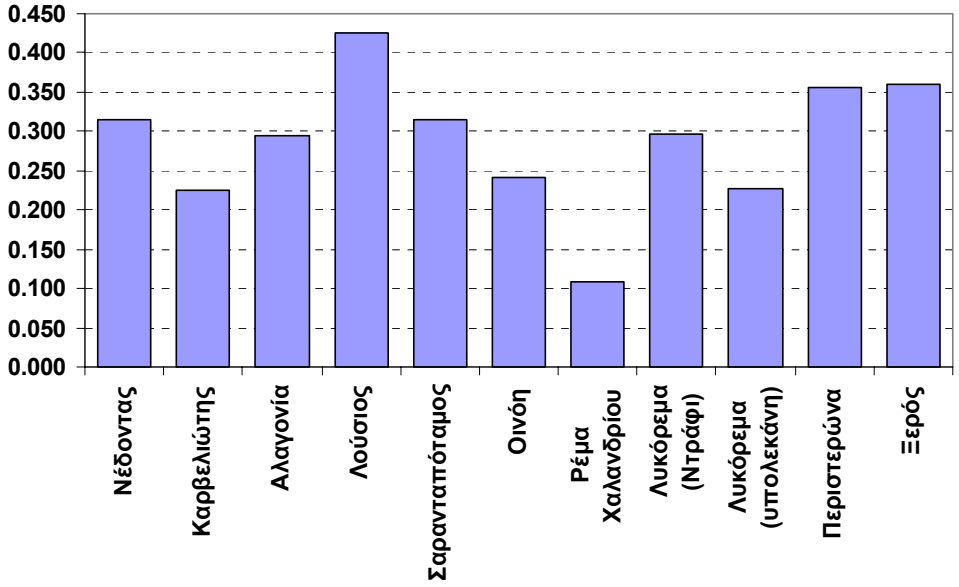
Σχήμα 5.23: Μέσες τιμές συντελεστών απορροής λεκανών.



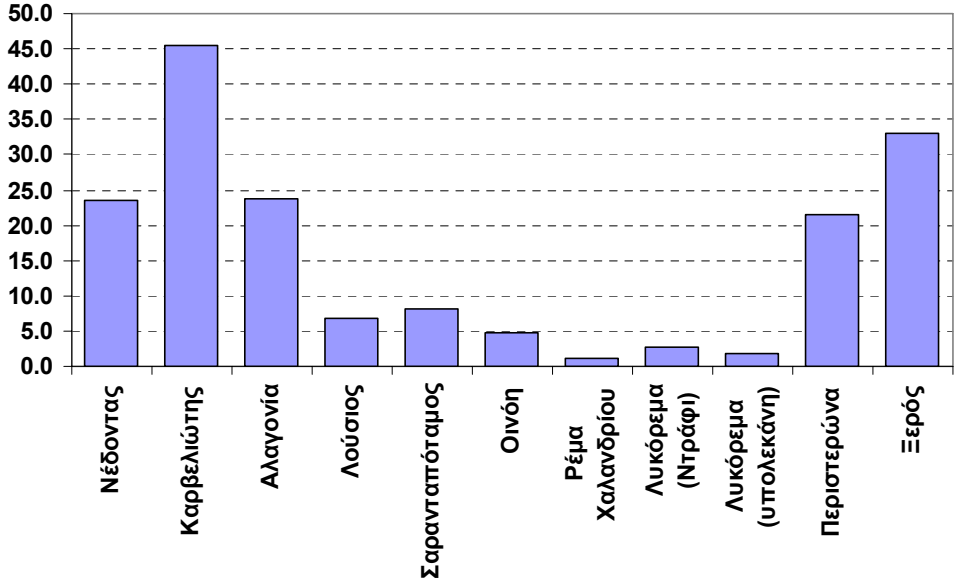
Σχήμα 5.24: Μέσες τιμές ποσοστού αρχικών απωλειών.



Σχήμα 5.25: Μέσες τιμές αριθμού καμπύλης απορροής (βελτιστοποιημένες τιμές για τις εκάστοτε αρχικές απώλειες και χωρίς αναγωγή στις μέσες συνθήκες υγρασίας, και τιμές αναφοράς, για συνθήκες υγρασίας τύπου ΙΙ και αρχικές απώλειες $\alpha = 0.20$).



Σχήμα 5.26: Μέσες τιμές παραμέτρου χρόνου ανόδου ΣΜΥ.



Σχήμα 5.27: Μέσες τιμές παραμέτρου χρόνου βάσης ΣΜΥ.

5.8 Τελικές παρατηρήσεις

5.8.1 Χειρισμός παραμέτρου CN ως τυχαία μεταβλητή

Ο συνήθης χειρισμός της παραμέτρου CN ως σταθεράς, η οποία αναφέρεται σε κάποιες μέσες συνθήκες υγρασίας, δημιουργεί την παραπλανητική εντύπωση μιας μονοσήμαντης σχέσης μεταξύ του CN και την παραγόμενης απορροής. Στην πραγματικότητα, πρόκειται για *τυχαία μεταβλητή*, εξαρτώμενη από τις προηγούμενες συνθήκες υγρασίας της λεκάνης (Efstratiadis *et al.*, 2014). Εκτός από τις συνθήκες υγρασίας, η παράμετρος CN συσχετίζεται και με τις αρχικές απώλειες της λεκάνης, που πρέπει επίσης να θεωρηθούν ως τυχαίες μεταβλητές.

Ο χειρισμός των παραμέτρων των μοντέλων ως τυχαίων μεταβλητών διερευνήθηκε από τον Μαστροθεόδωρο (2012), με βάση τα πλημμυρικά δεδομένα στις πιλοτικές λεκάνες Περιστερώνα και Ξερού. Στις λεκάνες προσαρμόστηκαν απλά εννοιολογκά μοντέλα τύπου υδραυλικού αναλόγου, οι παράμετροι των οποίων βελτιστοποιήθηκαν ξεχωριστά σε κάθε επεισόδιο (όπως έγινε και στις αναλύσεις του παρόντος κεφαλαίου, με εφαρμογή της μεθόδου SCS-CN&ΜΥ). Για κάθε παράμετρο προέκυψε ένα δείγμα τιμών, στο οποίο προσαρμόστηκε μια κατανομή πιθανοτήτων. Για τον υδρολογικό σχεδιασμό, υιοθετήθηκε μια προσέγγιση τύπου Monte Carlo, με την οποία παρήχθησαν τυχαίοι συνδυασμοί παραμέτρων από τις αντίστοιχες κατανομές τους (έχοντας προηγουμένως εξασφαλίσει στατιστική ανεξαρτησία των εν λόγω παραμέτρων). Με τον τρόπο αυτό, για δεδομένα υετογράφημα σχεδιασμού, παρήχθησαν πολλαπλά σενάρια υδρογραφημάτων, που αντανακλούν της αβεβαιότητα στην εκτίμηση των παραμέτρων των μοντέλων, που αποτελεί μία από τις θεμελιώδεις συνιστώσες αβεβαιότητας του υδρολογικού σχεδιασμού (Efstratiadis *et al.*, 2013).

5.8.2 Εκτίμηση ποσοστού αρχικών απωλειών μεθόδου SCS-CN

Η παράμετρος αρχικών απωλειών δίνεται ως ποσοστό της μέγιστης δυνητικής κατακράτησης του εδάφους. Το ποσοστό αυτό παρουσιάζει μεγάλο εύρος διακύμανσης, με τυπική τιμή α = 20%, που, ως γνωστόν, έχει προκύψει ως μέσος όρος ενός μεγάλου δείγματος παρατηρήσεων από αγροτικές, κυρίως, λεκάνες στις ΗΠΑ. Στις αντιπλημμυρικές μελέτες, υιοθετείται ακρίτως η παραπάνω τυπική τιμή. Ωστόσο, όπως φάνηκε στις αναλύσεις των πλημμυρικών επεισοδίων στις λεκάνες ενδιαφέροντος, το ποσοστό αυτό είναι ιδιαίτερα υψηλό, και δεν ανταποκρίνεται στην υδρολογική συμπεριφορά των λεκανών που εξετάστηκαν, στις οποίες η εμφάνιση της πλημμυρικής απορροής ήταν πολύ ταχύτερη. Μάλιστα, στα περισσότερα επεισόδια η εκτίμηση του ποσοστού απωλειών ήταν της τάξης του 5% ή λιγότερο (βλ. Σχήμα 5.24), το οποίο υποδηλώνει ταχεία απόκριση της αντίστοιχης λεκάνης στην βροχόπτωση. Κατά συνέπεια, σε επίπεδο σχεδιασμού, απαιτείται αναθεώρηση των εφαρμοζόμενων τιμών της παραμέτρου αρχικών απωλειών.

Είναι εύλογο να υποθέσουμε ότι οι αρχικές απώλειες εξαρτώνται από τη δυνατότητα κατακράτησης της βροχόπτωσης από τη χλωρίδα και το ανάγλυφο, καθώς και τη διηθητικότητα του εδάφους. Για την εκτίμηση του ποσοστού α προτείνονται οι τιμές του Πίνακα 5.24. Οι τιμές αυτές είναι συνεπείς με τα αποτελέσματα των αναλύσεων στις πιλοτικές λεκάνες, που γενικά χαρακτηρίζονται από υψηλές κλίσεις

Πίνακας 5.24: Προτεινόμενες τιμές ποσοστού αρχικών απωλειών (%).

α (%)	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

5.8.3 Εκτίμηση παραμέτρων ΣΜΥ

Το προτεινόμενο ΣΜΥ περιλαμβάνει δύο αδιάστατες χρονικές παραμέτρους, β και γ, που σχετίζονται με τον χρόνο ανόδου και τον χρόνο βάσης, αντίστοιχα. Μετά τις αναλύσεις των πλημμυρικών επεισοδίων, για την παράμετρο του χρόνου ανόδου προτείνεται η τιμή β = 0.30 (για μεγάλες και μέτριες κλίσεις, όπως στις λεκάνες που εξετάστηκαν) και β = 0.50 (για μικρές και ήπιες κλίσεις).

Όσον αφορά στην παράμετρο γ του χρόνου βάσης, προτείνονται οι τιμές του Πίνακα 5.25. Οι χαμηλές τιμές αναφέρονται σε λεκάνες χαμηλής περατότητας, με περιορισμένη παραγωγή υποδερμικής ροής σε σχέση με την επιφανειακή, ενώ οι υψηλές τιμές αφορούν σε λεκάνες με κυριαρχία της υποδερμικής ροής σε σχέση με την επιφανειακή. Στην ακραία περίπτωση που η απορροή είναι εξ ολοκλήρου επιφανειακή (π.χ., σε αστικές περιοχές πολύ πυκνής δόμησης), προτείνεται η παράμετρος γ να λαμβάνεται εξ ορισμού ίση με τη μονάδα.

Πίνακας 5.25: Προτεινόμενες τιμές παραμέτρου χρόνου βάσης ΣΜΥ.

γ	Τύπος λεκάνης
1	Αστικές λεκάνες πυκνής δόμησης, με ανεπτυγμένο δίκτυο ομβρίων
5	Λεκάνες χαμηλής περατότητας, με περιορισμένη παραγωγή υποδερμικής ροής
10	Λεκάνες μέτριας ως υψηλής υδατοπερατότητας
20	Καρστικές λεκάνες, με κυριαρχία υποδερμικής ροής

6 Μεθοδολογία εκτίμησης αριθμού καμπύλης απορροής αναφοράς σε περιβάλλον ΣΓΠ

6.1 Σκοπός και μεθοδολογία

Ως γνωστόν, ο *αριθμός καμπύλης απορροής* (curve number, CN) είναι μια χαρακτηριστική παράμετρος της λεκάνης απορροής, που επιχειρεί να συμπυκνώσει τα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά της λεκάνης σε μια μοναδική αντιπροσωπευτική τιμή, από 0 μέχρι 100. Η παράμετρος αυτή χρησιμοποιείται στον υπολογισμό διαφόρων υδρολογικών μεγεθών, με τυπικότερη περίπτωση τη φερώνυμη μέθοδο της SCS (που στη συνέχεια θα αναφέρεται ως SCS-CN). Ως γνωστό, η μέθοδος SCS-CN εκτιμά τα υδρολογικά ελλείμματα (ή, ισοδύναμα, την ενεργό βροχόπτωση) που προκύπτουν για δεδομένο επεισόδιο βροχόπτωσης (βλ. 4.2). Στο πλαίσιο της SCS-CN εκτιμάται έμμεσα, ήτοι ως συνάρτηση του CN, η *αποθηκευτική ικανότητα* της λεκάνης, που είναι η βασικότερη παράμετρος του μοντέλου.

Η έμμεση εκτίμηση της αποθηκευτικής ικανότητας της λεκάνης (σε αντιδιαστολή με την αναλυτική της εκτίμηση, που είναι δυνατή όταν είναι γνωστά το ολικό ύψος βροχής και το αντίστοιχο ύψος απορροής του πλημμυρικού επεισοδίου) επιτρέπει την εφαρμογή της μεθόδου SCS-CN σε λεκάνες χωρίς μετρήσεις. Συνεπώς, κομβικό στοιχείο της αξιοπιστίας της μεθόδου αποτελεί η ρεαλιστική εκτίμηση της παραμέτρου CN, με βάση εύκολα ανακτώμενη γεωγραφική πληροφορία. Στις τυπικές μελέτες πλημμυρών, χρησιμοποιούνται πινακοποιημένες τιμές της SCS, που συσχετίζουν την παράμετρο CN με τις συνθήκες εδάφους, τις χρήσεις γης, και τις προηγούμενες συνθήκες εδαφικής υγρασίας στη λεκάνη απορροής (βλ. 4.2.3). Ωστόσο, η κατηγοριοποίηση των φυσιογραφικών χαρακτηριστικών των πινάκων της βιβλιογραφίας δεν καλύπτει επαρκώς το φάσμα των ιδιοτήτων των ελληνικών λεκανών, με αποτέλεσμα στις αντιστοιχήσεις να εισάγεται ο υποκειμενικός παράγοντας, που, όπως έχει δείξει η εμπειρία, συνήθως οδηγεί σε υπερεκτιμήσεις των τιμών της παραμέτρου.

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται μια ημι-αυτοματοποιημένη διαδικασία εκτίμησης του CN, σε περιβάλλον ΣΓΠ, και εφαρμογής του στα πλαίσια της μεθόδου SCS-CN. Η διαδικασία αποσκοπεί στην παραγωγή χαρτών κατανεμημένων τιμών του λεγόμενου CN αναφοράς, που αναφέρονται σε συνθήκες υγρασίας τύπου II και αρχικές απώλειες 20%. Στην εν λόγω διαδικασία, η εκτίμηση του CN γίνεται με βάση τρία χαρακτηριστικά επίπεδα χωρικής πληροφορίας που αναφέρονται στους κυριότερους παράγοντες που αλληλεπιδρούν στην παραγωγή της πλημμυρικής απορροής. Οι εκτιμήσεις επαληθεύονται από τις μετρήσεις στις πιλοτικές λεκάνες, για τις οποίες δίνονται αντιπροσωπευτικές τιμές του CN.

6.2 Αναθεωρημένο πλαίσιο εκτίμησης παραμέτρου CN

6.2.1 Γεωγραφικά δεδομένα εισόδου

Η εκτίμησης του CN βασίζεται στην κατηγοριοποίηση τριών βασικών φυσιογραφικών χαρακτηριστικών του εδάφους σε κλάσεις (υδατοπερατότητα, φυτοκάλυψη, αποστραγγιστική ικανότητα). Τα πρωτογενή γεωγραφικά δεδομένα που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή

των σχετικών θεματικών επιπέδων είναι υδρολιθολογικός ή εδαφολογικός χάρτης, χάρτης χρήσεων γης, χάρτης κλίσεων εδάφους και κάθε άλλη συναφής πληροφορία. Σε αστικές ή ημιαστικές λεκάνες, απαιτείται, ακόμη, η γνώση των χαρακτηριστικών δόμησης και άλλων συναφών πολεοδομικών στοιχείων.

6.2.2 Κατηγοριοποίηση υδατοπερατότητας

Σε φυσικές (μη αστικές) 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. Με βάση υδρολιθολογικό ή εδαφολογικό χάρτη και ανάλογα με τον κυρίαρχο τύπο εδαφών, υποκείμενων γεωλογικών σχηματισμών και δόμησης (για αστικές ή ημιαστικές λεκάνες), επιλέγεται η κλάση υδατοπερατότητας της υπολεκάνης, με βάση τον Πίνακα 6.1. Σε αστικές λεκάνες, η αντίστοιχη κατηγοριοποίηση ορίζεται με βάση την πυκνότητα της δόμησης και την ανάπτυξη ελεύθερων χώρων.

Πίνακας 6.1: Κλάσεις υδατοπερατότητας με βάση τα εδαφικά και γεωλογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης και τον κυρίαρχο τύπο δόμησης.

Κλάση περατότητας	Εδαφικά χαρακτηριστικά	Γεωλογικά ή υδρολιθολογικά χαρακτηριστικά	Χαρακτηριστικά δόμησης
Πολύ υψηλή	Πολύ ελαφριά και καλά αποστραγγιζόμενα εδάφη	Ανθρακικοί σχηματισμοί έντονα καρστικοποιημένοι, εκτεταμένης ανάπτυξης, π.χ. 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

6.2.3 Κατηγοριοποίηση βλάστησης

Η κατηγοριοποίηση της βλάστησης αφορά στα χαρακτηριστικά που σχετίζονται με τους μηχανισμούς κατακράτησης της βροχόπτωσης, την τραχύτητα του εδάφους και της διηθητικής του ικανότητας, π.χ. λόγω ανάπτυξης του ριζοστρώματος. Με βάση σχετικό χάρτη (π.χ. CORINE), επιλέγεται η κλάση βλάστησης της υπολεκάνης, σύμφωνα με τον Πίνακα 6.2. Προτείνεται οι καμένες εκτάσεις να κατατάσσονται μία κατηγορία κάτω από την αρχική τους κατάσταση (π.χ. καμένο δάσος κωνοφόρων χαρακτηρίζεται ως «μεσαία βλάστηση»).

Πίνακας 6.2: Κλάσεις βλάστησης με βάση τα χαρακτηριστικά κάλυψης γης.

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 δόμηση
Μηδενική	Γυμνό ή βραχώδες έδαφος, τεχνητές επιφάνειες (δρόμοι, κτήρια)

6.2.4 Κατηγοριοποίηση αποστραγγιστικής ικανότητας 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). Η σχετική κατηγοριοποίηση γίνεται σύμφωνα με τον Πίνακα 6.3.

Πίνακας 6.3: Κλάσεις αποστραγγιστικής ικανότητας με βάση τη μέση κλίση και τα συναφή χαρακτηριστικά του εδάφους.

Κλάση αποστραγγιστικής ικανότητας	Μέση κλίση εδάφους(1)	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

(1) 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.

6.2.5 Εκτίμηση αριθμού καμπύλης απορροής αναφοράς

Ως τιμή αναφοράς της παραμέτρου CN θεωρείται αυτή που αντιστοιχεί σε μέσες συνθήκες υγρασίας (τύπου II) και ποσοστό αρχικών απωλειών 20%, και συμβολίζεται $CN_{II,20}$. Η τιμή αυτή εκτιμάται με βάση τις κυρίαρχες κλάσεις υδατοπερατότητας, βλάστησης και αποστραγγιστικής ικανότητας της επιφάνειας αναφοράς (π.χ., λεκάνη απορροής), σύμφωνα με την εμπειρική σχέση:

$$CN_{II,20} = 10 + 9 \times i_{PERM} + 6 \times i_{VEG} + 3 \times i_{SLOPE} \quad (6.1)$$

όπου i_{PERM} , i_{VEG} και i_{SLOPE} κωδικοί που λαμβάνουν τιμές [1…5] και υποδηλώνουν κάθε μία από τις παραπάνω κλάσεις, σύμφωνα με τον Πίνακα 3.5. Σύμφωνα με την παραπάνω σχέση, η ελάχιστη τιμή του CN αναφοράς είναι 28, ενώ η μέγιστη 100. Η ελάχιστη τιμή λαμβάνεται στην οριακή περίπτωση λεκανών πολύ υψηλής περατότητας, πυκνής βλάστησης και αμελητέας αποστραγγιστικής ικανότητας.

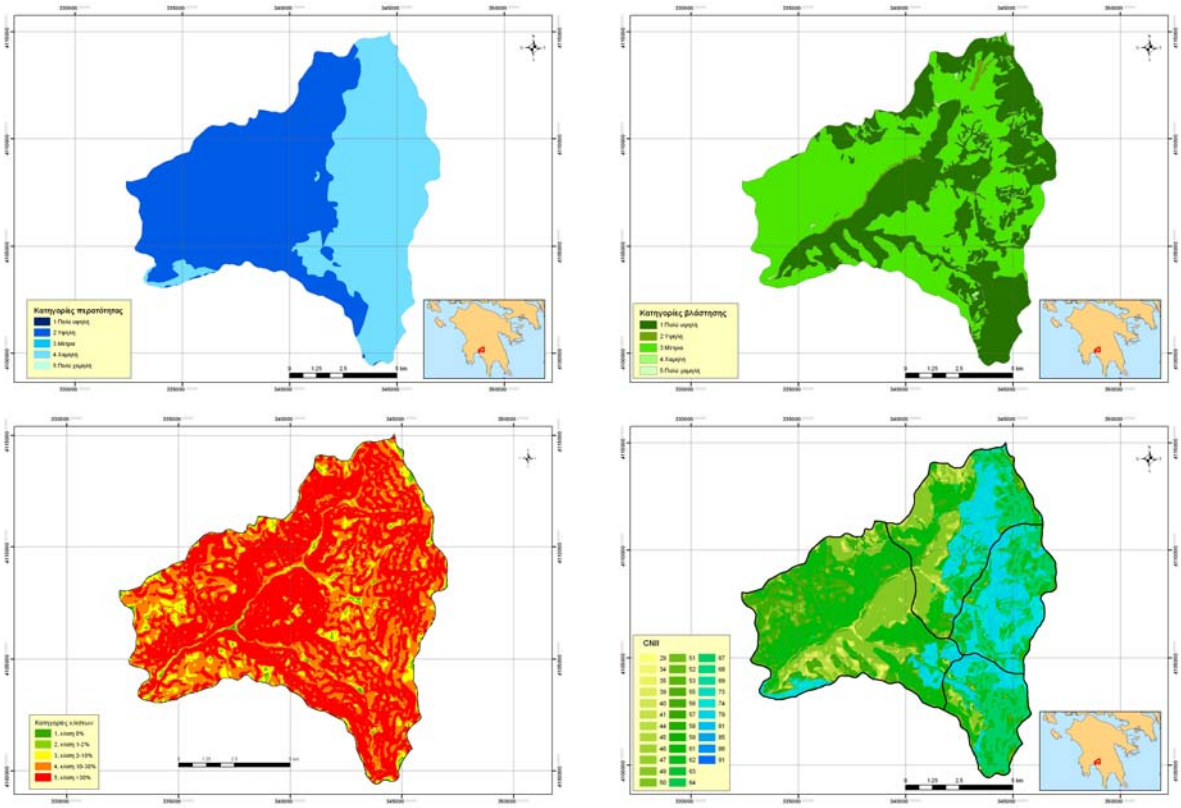
Η επιλογή της τιμής του CN αναφοράς βασίζεται στην κυρίαρχη κλάση από κάθε κατηγορία φυσιογραφικών χαρακτηριστικών. Αν η υπολεκάνη παρουσιάζει χωρική ανομοιογένεια ως προς τα εν λόγω χαρακτηριστικά, λαμβάνεται ένας σταθμισμένος μέσος αριθμός καμπύλης απορροής, με βάση την έκταση που καταλαμβάνει κάθε 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. Υπενθυμίζεται ότι στις αστικές λεκάνες, η επιλογή της κλάσης υδατοπερατότητας και του αντίστοιχου κωδικού βασίζεται κυρίως στα χαρακτηριστικά της δόμησης (Πίνακας 6.1, στήλη 4), και όχι στα εδαφολογικά ή υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής. Τέλος, στην περίπτωση υδάτινων σωμάτων (ποτάμια, λίμνες, κτλ.), ο συντελεστής CN είναι εξ ορισμού ίσος με 100, καθώς όλη η προσπίπτουσα βροχόπτωση μετατρέπεται σε απορροή.

Πίνακας 6.4: Κωδικοποίηση φυσιογραφικών χαρακτηριστικών για την εκτίμηση της τιμής αναφοράς της παραμέτρου CN ($CN_{II,20}$).

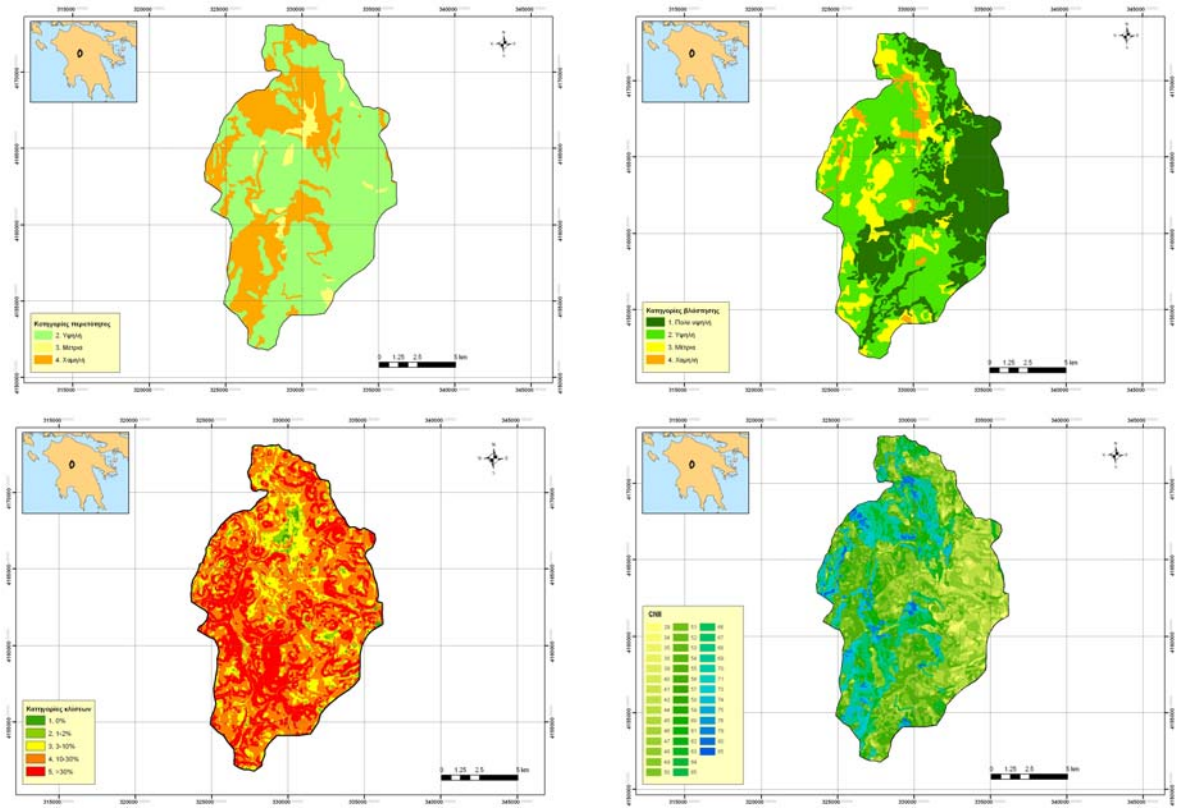
Κλάση περατότητας	i_{PERM}	Κλάση βλάστησης	i_{VEG}	Κλάση αποστραγγιστικής ικανότητας	i_{SLOPE}
Πολύ υψηλή	1	Πυκνή	1	Αμελητέα	1
Υψηλή	2	Μεσαία	2	Χαμηλή	2
Μέτρια	3	Χαμηλή	3	Μέτρια	3
Χαμηλή	4	Αραιή	4	Υψηλή	4
Πολύ χαμηλή	5	Μηδενική	5	Πολύ υψηλή	5

6.3 Εφαρμογή στις πιλοτικές λεκάνες

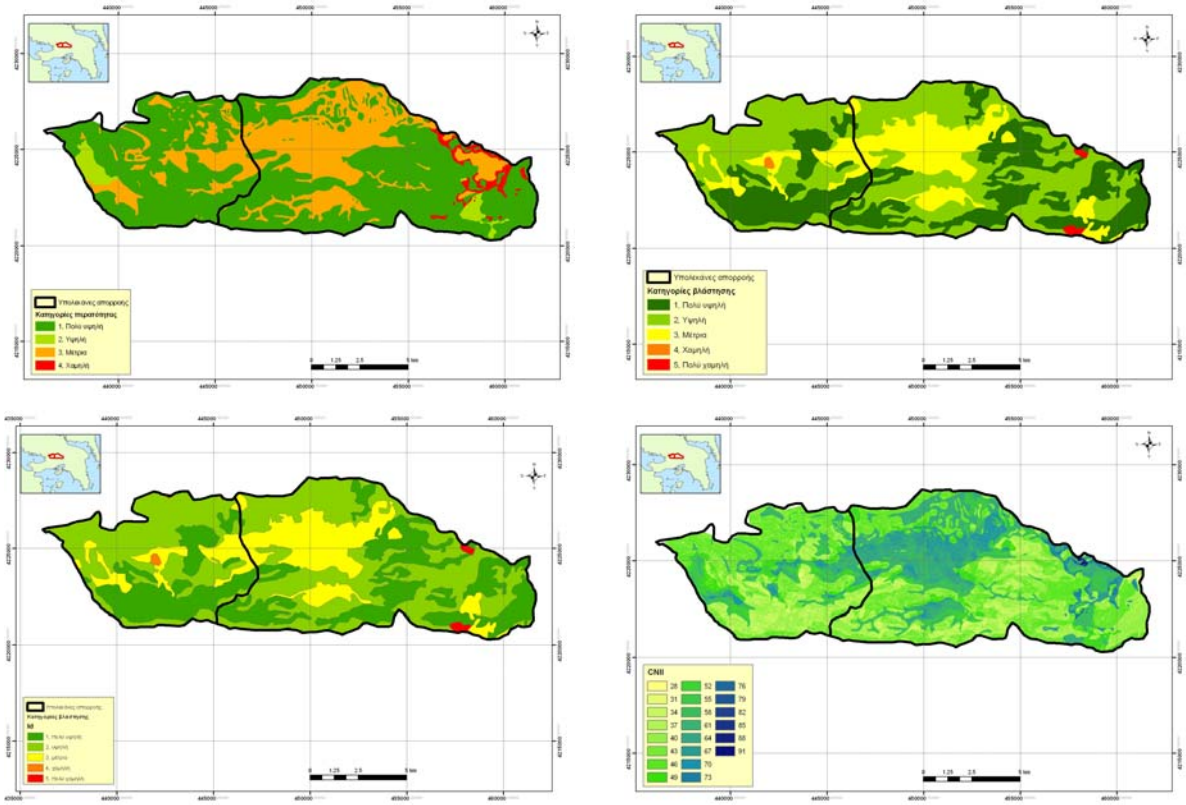
Η διαδικασία εκτίμησης του CN αναφοράς εφαρμόστηκε σε όλες τις πιλοτικές λεκάνες. Για τις χωρικές επεξεργασίες χρησιμοποιήθηκαν υδρολιθολογικοί ή γεωλογικοί χάρτες, από τους οποίους προέκυψαν οι διάφορες κλάσεις υδατοπερατότητας, χάρτες χρήσεων γης CORINE ή αντίστοιχοι, από τους οποίους προέκυψαν οι διάφορες κλάσεις φυτοκάλυψης, και χάρτες κλίσεων, που παρήχθησαν από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους κάθε λεκάνης. Τέλος, με βάση τους χάρτες κατανεμημένων τιμών του CN αναφοράς, εκτιμήθηκε η μέση τιμή του σε κάθε λεκάνη και υπολεκάνη ενδιαφέροντος.



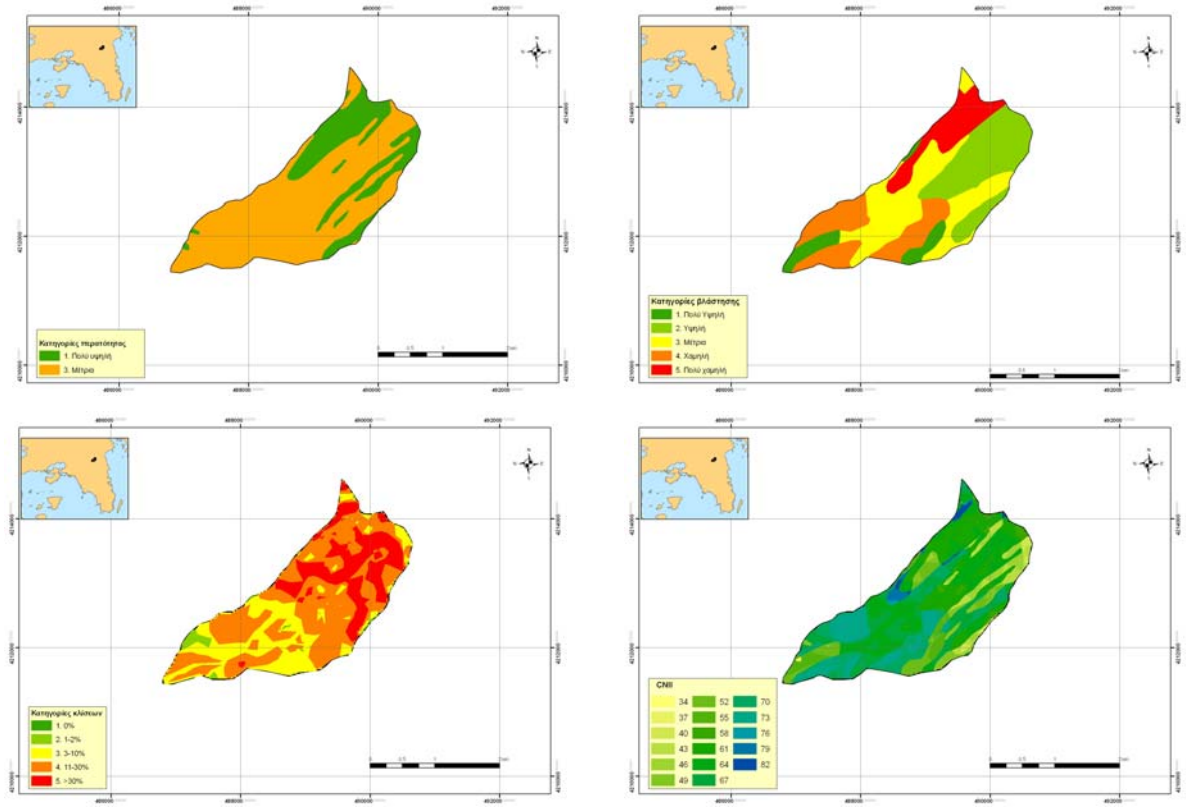
Σχήμα 6.1: Λεκάνη Νέδοντα: κλάσεις περατότητας (πάνω αριστερά), κλάσεις φυτοκάλυψης (πάνω δεξιά), κλάσεις κλίσεων (κάτω αριστερά), κλάσεις CN (κάτω δεξιά).



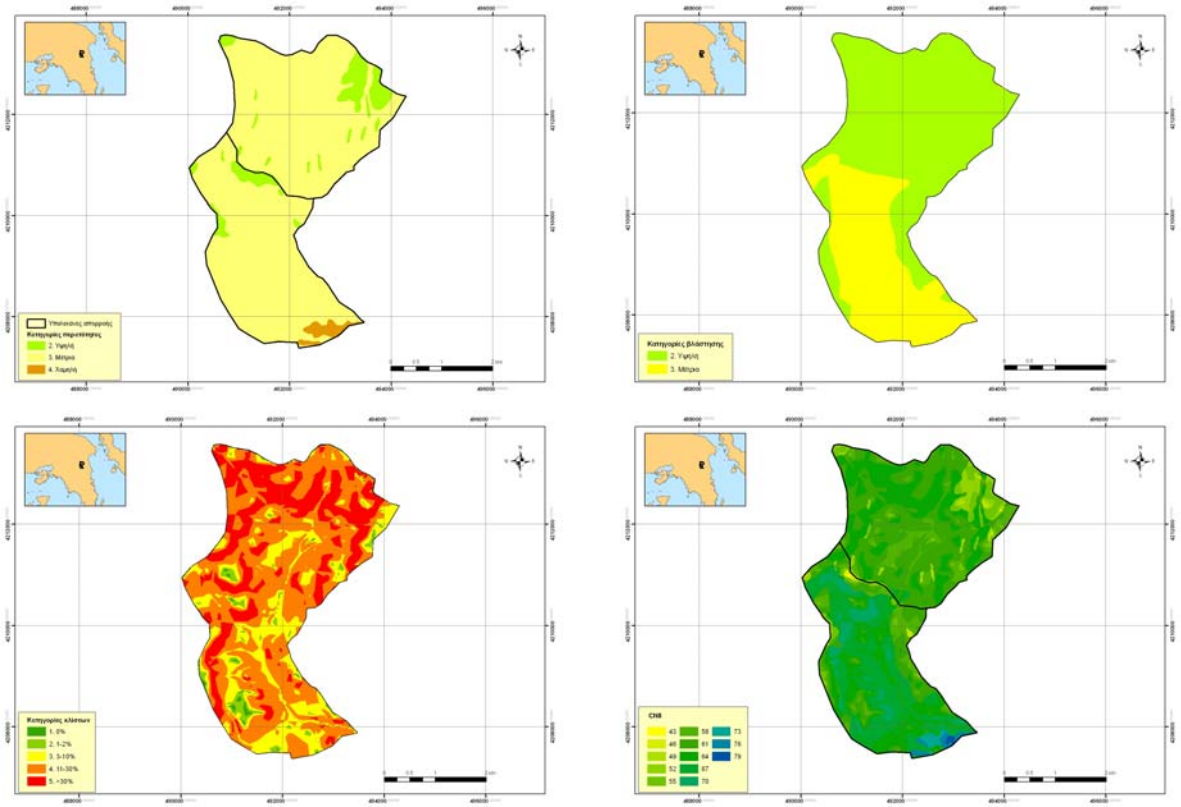
Σχήμα 6.2: Λεκάνη Λούσιου: κλάσεις περατότητας (πάνω αριστερά), κλάσεις φυτοκάλυψης (πάνω δεξιά), κλάσεις κλίσεων (κάτω αριστερά), κλάσεις CN (κάτω δεξιά).



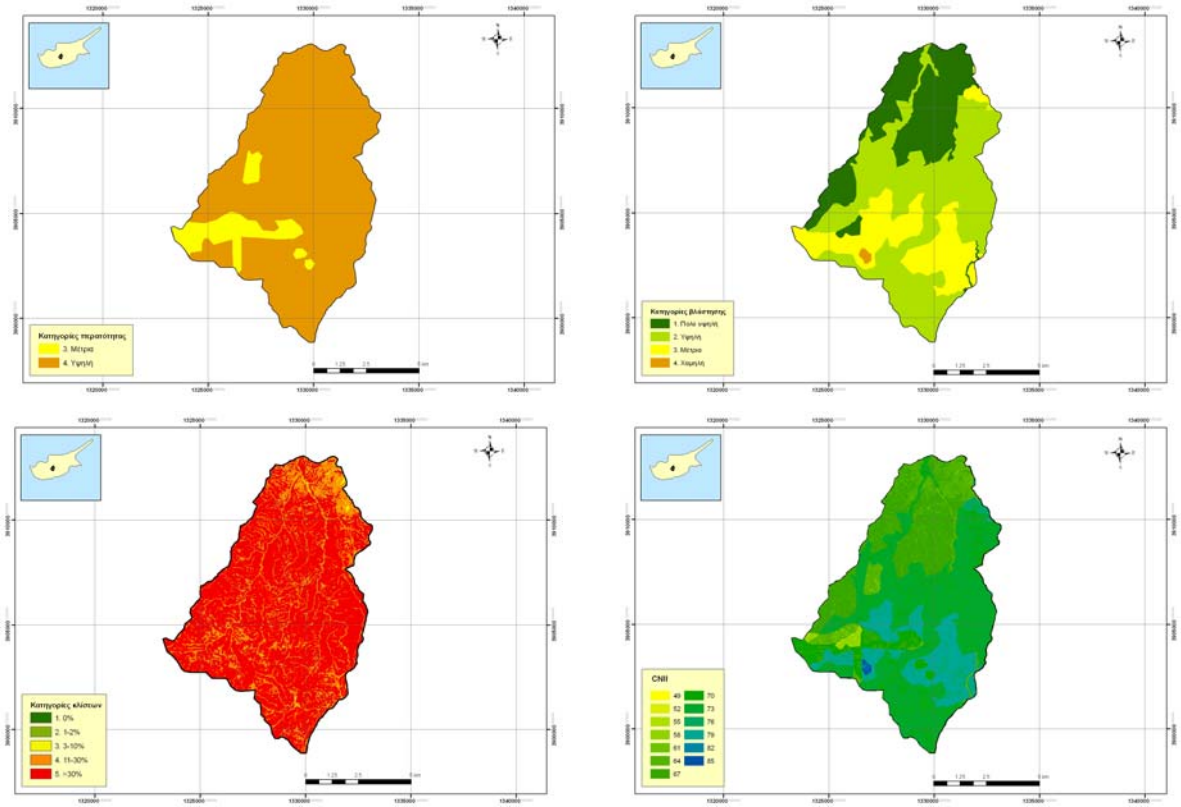
Σχήμα 6.3: Λεκάνη Σαρανταπόταμου: κλάσεις περατότητας (πάνω αριστερά), κλάσεις φυτοκάλυψης (πάνω δεξιά), κλάσεις κλίσεων (κάτω αριστερά), κλάσεις CN (κάτω δεξιά).



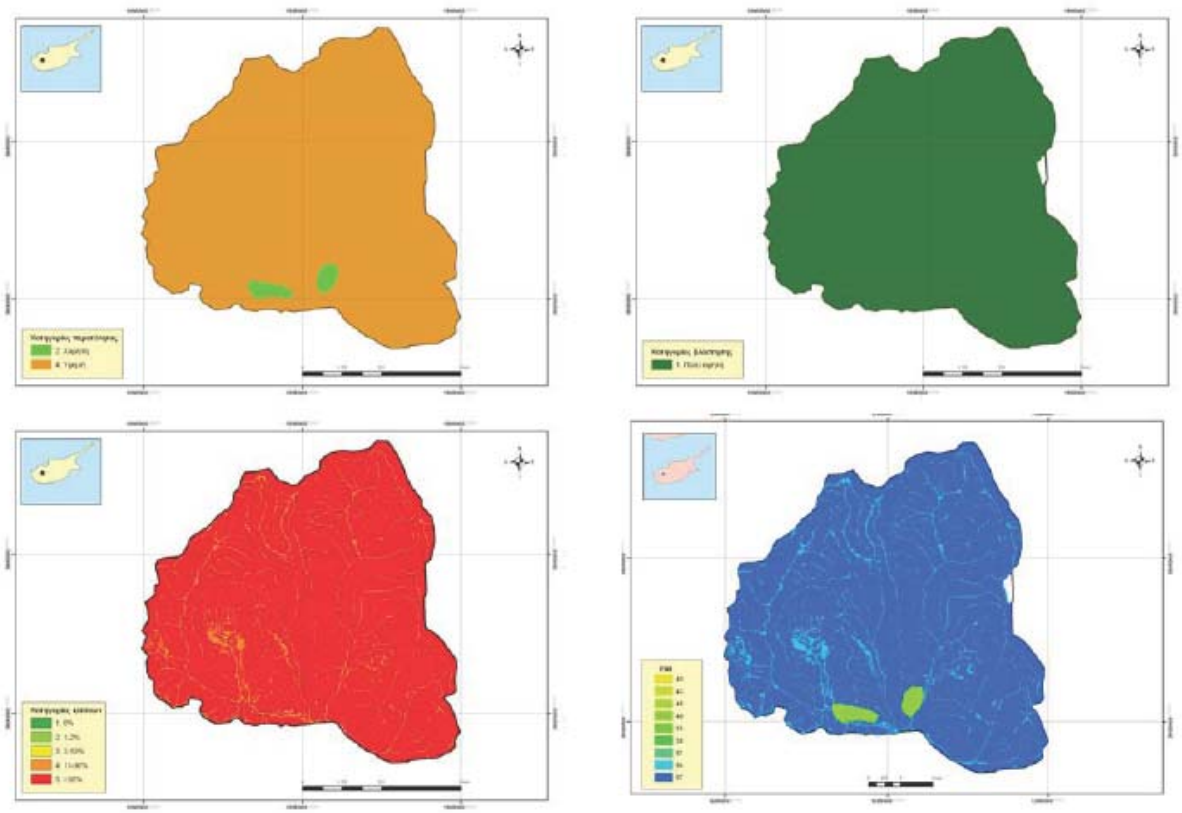
Σχήμα 6.4: Λεκάνη ρέματος Χαλανδρίου: κλάσεις περατότητας (πάνω αριστερά), κλάσεις φυτοκάλυψης (πάνω δεξιά), κλάσεις κλίσεων (κάτω αριστερά), κλάσεις CN (κάτω δεξιά).



Σχήμα 6.5: Λεκάνη Λυκορέματος Ραφήνας: κλάσεις περατότητας (πάνω αριστερά), κλάσεις φυτοκάλυψης (πάνω δεξιά), κλάσεις κλίσεων (κάτω αριστερά), κλάσεις CN (κάτω δεξιά).



Σχήμα 6.6: Λεκάνη Περιστερώνα: κλάσεις περατότητας (πάνω αριστερά), κλάσεις φυτοκάλυψης (πάνω δεξιά), κλάσεις κλίσεων (κάτω αριστερά), κλάσεις CN (κάτω δεξιά).



Σχήμα 6.7: Λεκάνη ρέματος Ξερού: κλάσεις περατότητας (πάνω αριστερά), κλάσεις φυτοκάλυψης (πάνω δεξιά), κλάσεις κλίσεων (κάτω αριστερά), κλάσεις CN (κάτω δεξιά).

6.4 Σύγκριση θεωρητικών και εκτιμημένων CN αναφοράς

Στον Πίνακα 6.5 δίνονται, για κάθε λεκάνη ή υπολεκάνη ενδιαφέροντος, τα εξής μεγέθη:

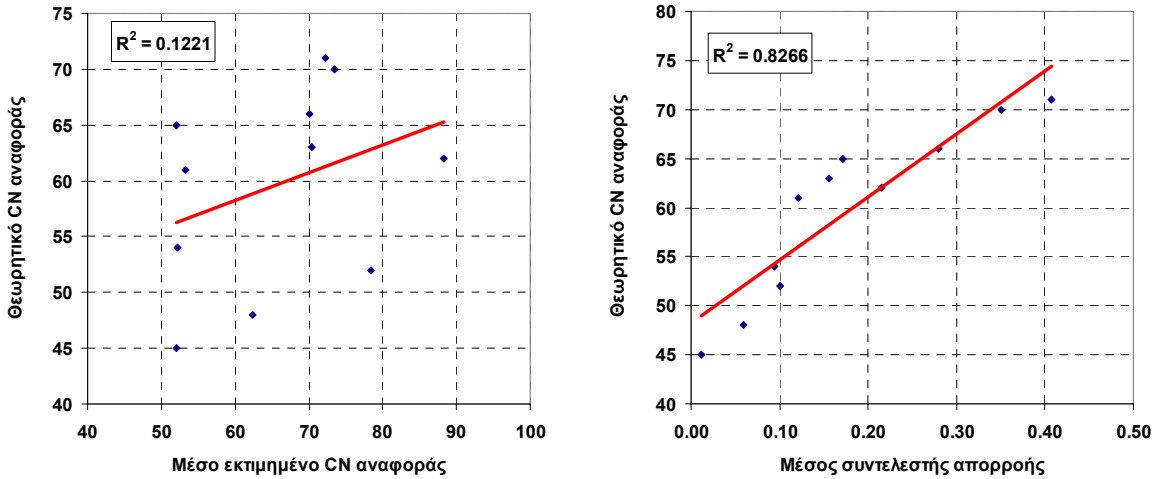
- Η θεωρητική τιμή αναφοράς του CN, όπως εκτιμήθηκε με βάση την προαναφερθείσα μέθοδο και τις σχετικές γεωγραφικές επεξεργασίες
- Η μέση τιμή αναφοράς του CN, για ποσοστό αρχικών απωλειών 20%, που υπολογίστηκε με βάση τα μετρημένα ύψη βροχής και πλημμυρικής απορροής, για τα επεισόδια που εξετάστηκαν στο Κεφάλαιο 5.
- Ο μέσος συντελεστής απορροής, που επίσης υπολογίστηκε με βάση τα μετρημένα ύψη βροχής και πλημμυρικής απορροής των επεισοδίων κάθε λεκάνης.
- Η μέση βελτιστοποιημένη τιμή του CN, που προέκυψε από τις αναλύσεις του Κεφαλαίου 5, όπου σε κάθε επεισόδιο εκτιμήθηκε διαφορετική τιμή αρχικών απωλειών.
- Η ανηγμένη μέση τιμή που προήλθε με διόρθωση κάθε επιμέρους βελτιστοποιημένου CN στις εκτιμώμενες συνθήκες υγρασίας του αντίστοιχου επεισοδίου (όπου ήταν εφικτό).

Από τη σύγκριση των παραπάνω μεγεθών προκύπτει ότι οι θεωρητικές τιμές αναφοράς είναι σχετικά κοντά στις εκτιμημένες. Επιπλέον, από τα διαγράμματα διασποράς του Σχήματος 6.8 φαίνεται ότι οι θεωρητικές τιμές συσχετίζονται ικανοποιητικά με τους μέσους συντελεστές απορροής, όχι όμως και με τις μέσες τιμές αναφοράς που εκτιμώνται από τα επεισόδια. Το γεγονός αυτό δεν προκαλεί έκπληξη, και εξηγείται από το μικρό δείγμα των επεισοδίων που εξετάστηκαν αλλά και την αβεβαιότητα στην αντιστοίχιση των κλάσεων υδατοπερατότητας, με βάση τους γεωλογικούς χάρτες που χρησιμοποιήθηκαν, οι οποίοι είναι αρκετά αδρομερείς.

Πίνακας 6.5: Σύγκριση θεωρητικών τιμών αναφοράς του CN με διάφορα μέσα μεγέθη που εκτιμήθηκαν από τα παρατηρημένα πλημμυρικά επεισόδια.

Λεκάνη / υπολεκάνη	Θεωρητικό CN αναφοράς	Μέσο CN αναφοράς	Μέσος συντ. απορροής	Βέλτιστο CN	Ανηγμένο CN (συνθήκες II)
Νέδοντας	61	53	0.121	28	31
Καρβελιώτης	65	52	0.171	33	30
Αλαγονία	70	74	0.350	63	61
Λούσιος	63	70	0.156	52	45
Σαρανταπόταμος	48	62	0.059	52	63
Οινόη	45	52	0.012	27	34
Ρ. Χαλανδρίου	62	88	0.215	74	77
Ντράφι	54	52	0.094	44	66
Λυκόρεμα	52	78	0.101	71	74
Περιστερώνα	71	72	0.407	64	-
Ξερός	66	70	0.279	56	-

Η μάλλον κακή συσχέτιση μεταξύ των θεωρητικών και εκτιμημένων τιμών αναφοράς του CN οφείλεται κυρίως από το γεγονός ότι τα περισσότερα υδρογραφήματα που μελετήθηκαν προέρχονται από σχετικά μικρά επεισόδια βροχής, που δεν είναι αντιπροσωπευτικά για τον υδρολογικό σχεδιασμό. Επιπλέον, όπως φάνηκε στις θεωρητικές αναλύσεις του εδαφίου 4.3.1, η παράμετρος CN είναι αρκετά αβέβαιη όταν εκτιμάται από τέτοια επεισόδια, καθώς παρουσιάζει έντονη μεταβλητότητα στην περιοχή των χαμηλών υψών βροχής. Από την άλλη πλευρά, στις δύο λεκάνες της Κύπρου οι θεωρητικές και εκτιμημένες τιμές είναι πολύ κοντά, καθώς τα επεισόδια που ελήφθησαν προέρχονται από μεγάλου μήκους δείγματα, σε αντίθεση με τις ελληνικές λεκάνες, από όπου ελήφθησαν δείγματα τριών μόνο υδρολογικών περιόδων. Σε βάθος χρόνου, εφόσον συλλεχθούν περισσότερα ισχυρά επεισόδια πλημμυρών από τις πιλοτικές λεκάνες, θα είναι δυνατή η εξαγωγή ασφαλέστερων συμπερασμάτων σχετικά με την παράμετρο CN, που είναι από τις πλέον κρίσιμες του υδρολογικού σχεδιασμού.



Σχήμα 6.8: Διαγράμματα διασποράς μεταξύ εκτιμημένων και θεωρητικών CN αναφοράς στις (αριστερά) και μεταξύ μέσων συντελεστών απορροής και θεωρητικών CN (δεξιά).

7 Πιθανοτική θεώρηση καταστάσεων αρχικής εδαφικής υγρασίας

7.1 Σκοπός και μεθοδολογία

Ως προς το φυσικό πλαίσιο, η παραγωγή της πλημμύρας είναι συνδυαστικό αποτέλεσμα πολλαπλών παραγόντων, με κυριότερα: (α) το συνολικό ύψος βροχής που δέχεται η λεκάνη στη διάρκεια του επεισοδίου καταιγίδας, (β) τη χρονική κατανομή του επεισοδίου, (γ) την ποσότητα νερού που έχει κατακρατηθεί στην επιφάνεια του εδάφους και τη βλάστηση, από προηγούμενα επεισόδια βροχής και δεν έχει προλάβει να εξατμιστεί ή να διηθηθεί στο εδάφους, και (δ) την αποθηκευμένη υγρασία στην ακόρεστη ζώνη του εδάφους. Για την προσομοίωση ενός πραγματικού επεισοδίου, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη όλοι οι παραπάνω παράγοντες καθώς και οι υφιστάμενες συνθήκες ροής, που οφείλεται στην εκφόρτιση νερού που έχει αποθηκευτεί στην κορεσμένη και ακόρεστη ζώνη του εδάφους, και προέρχεται από προηγούμενα επεισόδια βροχής.

Η συνεπής ερμηνεία της πλημμυρικής διακινδύνευσης ως *συνδυασμένης πιθανότητας* όλων των υδρολογικών μεταβλητών που αλληλοσχετίζονται στην παραγωγή της απορροής καθιστά αναγκαία τη χρήση μοντέλων συνεχούς υδρολογικής προσομοίωσης, που τροφοδοτούνται από συνθετικές χρονοσειρές βροχόπτωσης (Efstratiadis and Papalexiou, 2010). Ωστόσο, τέτοιου είδους μοντέλα είναι δύσκολα αξιοποιήσιμα στον «καθημερινό» υδρολογικό σχεδιασμό, καθώς απαιτούν υψηλή ερευνητική εμπειρία και μεγάλο αριθμό δεδομένων εισόδου, μεταξύ των οποίων μετρήσεις παροχών για την βαθμονόμηση των παραμέτρων των μοντέλων και δείγματα βροχόπτωσης λεπτής χρονικής διακριτότητας, για την εκτίμηση των στατιστικών χαρακτηριστικών των συνθετικών χρονοσειρών.

Από την άλλη πλευρά, στις συνήθεις μελέτες πλημμυρών που χρησιμοποιούν προσεγγίσεις επεισοδίου (όπως η μέθοδος SCS-CN&MY), θεωρείται ότι η πιθανότητα πραγματοποίησης του πλημμυρικού επεισοδίου, και κάθε επιμέρους πτυχής του που ενδιαφέρει στο σχεδιασμό, π.χ. η παροχή αιχμής, ταυτίζεται με την αντίστοιχη πιθανότητα της βροχόπτωσης σχεδιασμού, όπως αυτή ορίζεται με βάση την περίοδο επαναφοράς. Όσον αφορά στους άλλους παράγοντες που αλληλεπιδρούν στην παραγωγή της πλημμυρικής απορροής, υιοθετείται μια πλήρως ντετερμινιστική προσέγγιση, συνήθως υποθέτοντας ένα «δυσμενές» σχήμα υετογραφήματος και «μέσες» συνθήκες εδαφικής υγρασίας. Επιπλέον, η υφιστάμενη ροή αντιμετωπίζεται συνήθως ως μια σταθερή ποσότητα, που προστίθεται στο πλημμυρογράφημα σχεδιασμού ως βασική ροή. Είναι προφανές ότι οι παραπάνω υποθέσεις δεν μπορούν να εξασφαλίσουν αμφιμονοσήμαντη αντιστοιχία μεταξύ της πιθανότητας πραγματοποίησης της καταιγίδας σχεδιασμού και των παραγόμενων πλημμυρικών μεγεθών. Αντίθετα, με τη θεώρηση μη αντιπροσωπευτικών (κατά κανόνα δυσμενών) συνθηκών, η πραγματική περίοδος επαναφοράς των υπόψη πλημμυρικών μεγεθών είναι σαφώς μεγαλύτερη της περιόδου επαναφοράς της βροχόπτωσης σχεδιασμού.

Από τους παράγοντες που αναφέρθηκαν παραπάνω, έχει αποδειχθεί ότι ο πλέον κρίσιμος αφορά στις συνθήκες εδαφικής υγρασίας κατά την έναρξη της βροχόπτωσης (βλ. και Schröter *et al.*, 2014). Για τον λόγο αυτό, ο χειρισμός της έννοιας των προηγούμενων συνθηκών

υγρασίας στη μέθοδο SCS-CN έχει αποτελέσει αντικείμενο ισχυρής κριτικής τα τελευταία χρόνια, ενώ έχουν προταθεί διάφορα βελτιωμένα σχήματα που επιτρέπουν συνεπέστερη αναπαράσταση των σχετικών διεργασιών (π.χ., Ponce and Hawkins, 1996· Michel *et al.*, 2005· Sahu *et al.*, 2007· Camici *et al.*, 2011). Σύμφωνα με την τυπική εκδοχή της μεθόδου, η τιμή της παραμέτρου CN και, συνακόλουθα, τα μεγέθη του υδρολογικού σχεδιασμού που προκύπτουν, διαφοροποιούνται δραματικά αν θεωρηθούν διαφορετικές συνθήκες υγρασίας αντί των μέσων, με την απόκλιση να είναι πιο έντονη στις μεσαίες τιμές του CN, της τάξης του 40 έως 60 (βλ. Σχήμα 4.2). Επισημαίνεται ότι τέτοιες τιμές είναι αντιπροσωπευτικές περιοχών με φυσιογραφικά χαρακτηριστικά αντίστοιχα των πιλοτικών λεκανών του έργου.

Στο κεφάλαιο αυτό διατυπώνεται μια απλή και, κατά το δυνατόν, συνεπής πιθανοτική προσέγγιση, που λαμβάνει υπόψη την πιθανότητα εμφάνισης κάθε μίας από τις τρεις τυπικές συνθήκες υγρασίας της μεθόδου SCS-CN. Σύμφωνα με τον ορισμό της SCS, οι συνθήκες αυτές προσδιορίζονται με βάση την αθροιστική βροχόπτωση των τελευταίων πέντε ημερών. Κατά συνέπεια, η πιθανότητα κάθε κατάστασης υγρασίας μπορεί να εκτιμηθεί με βάση ημερήσια δείγματα βροχής της περιοχής μελέτης, εντοπίζοντας τις επικρατούσες συνθήκες την ημέρα πραγματοποίησης του μεγαλύτερου ύψους βροχής κάθε έτους. Στη συνέχεια, εφαρμόζοντας τις τιμές του CN που αναφέρονται σε κάθε κατάσταση υγρασίας, παράγεται το πλημμυρογράφημα και εκτιμώνται τα σχετικά μεγέθη ενδιαφέροντος (π.χ., παροχή αιχμής, όγκος πλημμύρας), ενώ τα τελικά μεγέθη σχεδιασμού εκτιμώνται σταθμίζοντας κάθε επιμέρους μέγεθος με την αντίστοιχη πιθανότητα.

Προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα για το σύνολο της ελληνικής επικράτειας, εκτιμήθηκαν οι πιθανότητες εμφάνισης κάθε τύπου υγρασίας με βάση ημερήσια δείγματα μεγάλου μήκους από 125 βροχομετρικούς σταθμούς στην ηπειρωτική Ελλάδα και την Κρήτη. Τέλος, με επιφανειακή ολοκλήρωση των σημειακών εκτιμήσεων, παρήχθησαν χάρτες ισοτιμικών καμπυλών των πιθανοτήτων υγρασίας για επιχειρησιακή χρήση (Ποντικός, 2014).

7.2 Υπολογιστική διαδικασία

7.2.1 Εκτίμηση πιθανοτήτων κατάστασης υγρασίας

Για την εκτίμηση των πιθανοτήτων κατάστασης υγρασίας απαιτείται η χρήση δειγμάτων ημερήσιων υψών βροχής ικανού μήκους, καθώς οι συνθήκες υγρασίας προσδιορίζονται με βάση την αθροιστική βροχόπτωση των πέντε προηγούμενων ημερών (βλ. 4.2.3). Με συνάθροιση των ημερήσιων τιμών λαμβάνεται η χρονοσειρά αθροιστικών υψών βροχής πέντε ημερών, P_5, και προσδιορίζεται η αντίστοιχη κατάσταση υγρασίας. Σύμφωνα με τον ορισμό της SCS, εφαρμόζονται διαφορετικά (πιο υψηλά) όρια την περίοδο ανάπτυξης της βλάστησης σε σχέση με την περίοδο μη ανάπτυξης, που κυρίως αφορά στους χειμερινούς μήνες. Για απλούστευση, θεωρούμε τα χαμηλά όρια, που είναι προς την πλευρά της ασφαλείας, δηλαδή $P_5 \leq 13$ mm για συνθήκες τύπου I, $13 < P_5 < 38$ mm για συνθήκες τύπου II και $P_5 \geq 38$ mm για συνθήκες τύπου III. Στη συνέχεια, καταμετράται το πλήθος των ημερών που αντιστοιχούν στις τρεις συνθήκες υγρασίας, που συμβολίζονται n_{I}, n_{II} και n_{III}, αντίστοιχα. Τότε, η πιθανότητα εμφάνισης κάθε κατάστασης υγρασίας εκτιμάται εμπειρικά ως $p_{\mathrm{I}} = n_{\mathrm{I}} / n$, $p_{\mathrm{II}} = n_{\mathrm{II}} / n$, και $p_{\mathrm{III}} = n_{\mathrm{III}} / n$, όπου n το μέγεθος του δείγματος, δηλαδή $n_{\mathrm{I}} + n_{\mathrm{II}} + n_{\mathrm{III}}$.

Κατ' αντιστοιχία, μπορούν να εκτιμηθούν οι πιθανότητες που αναφέρονται στην ημέρα με το μεγαλύτερο ύψος βροχής κάθε έτους. Στην περίπτωση αυτή, το συνολικό δείγμα είναι ίσο με τον αριθμό των υδρολογικών ετών. Για κάθε έτος, εντοπίζεται η ημέρα με την υψηλότερη τιμή βροχόπτωσης, για την οποία εκτιμάται η αντίστοιχη κατάσταση υγρασίας. Από το δείγμα

που προκύπτει εκτιμώνται οι αντίστοιχες πιθανότητες εμφάνισης κάθε κατάστασης, που αφορούν στις ετήσιες μέγιστες βροχοπτώσεις. Όπως είναι προφανές, στην περίπτωση αυτή οι τιμές που αντιστοιχούν σε μέσες και υγρές συνθήκες είναι αυξημένες, σε σχέση με την προηγούμενη προσέγγιση, που αναφέρεται σε συνεχή χρόνο και συνεπώς λαμβάνει υπόψη του περιόδου με μηδενικές ή πολύ χαμηλές βροχοπτώσεις, κατά τις οποίες ωστόσο είναι εξαιρετικά σπάνιο να πραγματοποιηθεί πλημμύρα αξιόλογου μεγέθους.

Τονίζεται για μία ακόμη φορά ότι η πραγματοποίηση της πλημμύρας εξαρτάται μερικώς και μόνο από το ύψος βροχής. Όπως έδειξαν και οι αναλύσεις των υδρολογικών δεδομένων στις πιλοτικές λεκάνες, πολύ ισχυρές καταιγίδες που πραγματοποιήθηκαν σε περιόδους ξηρών συνθηκών του εδάφους (π.χ. στις αρχές του φθινοπώρου), έδωσαν πολύ χαμηλές πλημμυρικές παροχές, ενώ αντίθετα μετρίου μεγέθους καταιγίδες που έλαβαν χώρα σε συνθήκες υψηλής υγρασίας του εδάφους παρήγαγαν σημαντικές πλημμύρες.

7.2.2 Εκτίμηση πλημμυρικών μεγεθών σχεδιασμού

Για τις μελέτες πλημμυρών, προτείνεται η εξής διαδικασία συνεπούς εκτίμησης των μεγεθών σχεδιασμού: Αν q_{pI}, q_{pII}, και q_{pIII} είναι οι παροχές αιχμής που προκύπτουν για τις καταστάσεις αρχικής υγρασίας τύπου I, II και III, και p_I, p_{II} και p_{III} είναι οι αντίστοιχες πιθανότητες εμφάνισης της κάθε κατάστασης την ημέρα που πραγματοποιείται η μέγιστη βροχόπτωση του έτους, τότε ως παροχή σχεδιασμού λαμβάνεται η συνδυασμένη πιθανότητα πραγματοποίησης των επιμέρους παροχών αιχμής, δηλαδή:

$$q_p^* = p_I\, q_{pI} + p_{II}\, q_{pII} + p_{III}\, q_{pIII} \tag{7.1}$$

Κατ' αντιστοιχία με την παροχή αιχμής, αν V_I, V_{II}, και V_{III} είναι οι πλημμυρικοί όγκοι που προκύπτουν για τις καταστάσεις αρχικής υγρασίας τύπου I, II και III, τότε ως όγκος σχεδιασμού λαμβάνεται η ποσότητα:

$$V^* = p_I\, V_I + p_{II}\, V_{II} + p_{III}\, V_{III} \tag{7.2}$$

Είναι προφανές ότι η παραπάνω προσέγγιση ενδεχομένως οδηγεί σε πολύ διαφοροποιημένα μεγέθη σχεδιασμού, σε σχέση με την τυπική προσέγγιση στην οποία θεωρούνται οι μέσες συνθήκες υγρασίας. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η διαφοροποίηση αναμένεται να είναι πιο έντονη στην ενδιάμεση περιοχή των CN (40-60), όπου μεγιστοποιούνται οι αποκλίσεις μεταξύ των CN_I, CN_{II} και CN_{III}, και, συνακόλουθα, των εκτιμώμενων πλημμυρικών μεγεθών.

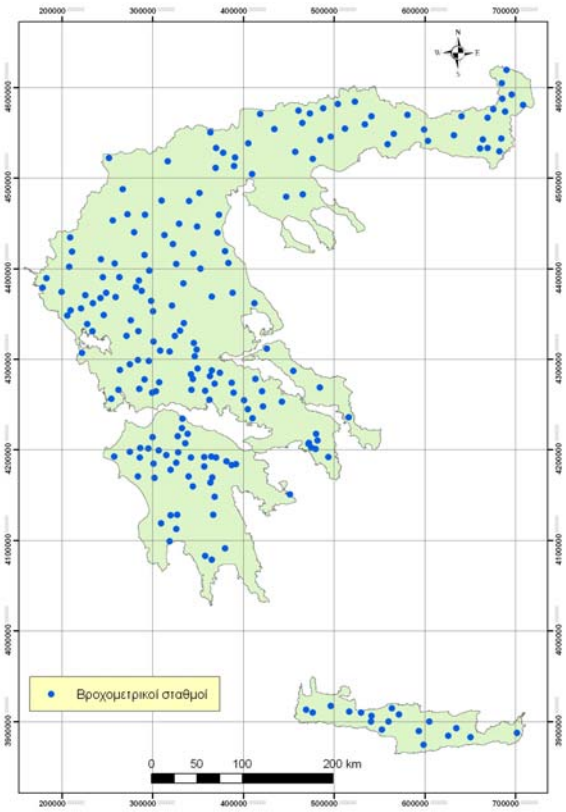
7.3 Εκτίμηση πιθανοτήτων κατάστασης υγρασίας στην Ελλάδα

Για την εκτίμηση των εμπειρικών πιθανοτήτων p_I, p_{II} και p_{III} στην Ελλάδα, συλλέχθηκαν δείγματα ημερήσιων υψών βροχής από 125 σταθμούς της ηπειρωτικής χώρας και της Κρήτης. Οι θέσεις των σταθμών φαίνονται στο χάρτη του Σχήματος 7.1. Εφαρμόστηκε η διαδικασία του εδαφίου 7.2.1, δηλαδή για κάθε σταθμό υπολογίστηκαν οι πιθανότητες πραγματοποίησης των τριών καταστάσεων υγρασίας, τόσο σε κλίμακα ημέρας όσο και σε κλίμακα υδρολογικού έτους (με αναφορά στις ετήσιες μέγιστες βροχοπτώσεις). Οι εν λόγω πιθανότητες διαφέρουν σημαντικά μεταξύ των τριών συνθηκών υγρασίας. Για παράδειγμα, από το δείγμα ημερήσιων βροχοπτώσεων του Λόφου Νυμφών στο Θησείο (το μεγαλύτερο στην Ελλάδα) προκύπτει ότι συνθήκες τύπου I, II και III έχουν πιθανότητα εμφάνισης 88.9, 9.7 και 1.4%, αντίστοιχα. Κατά συνέπεια, στο κέντρο της Αθήνας επικρατούν οι ξηρές συνθήκες, με μέση συχνότητα 9 στις 10 ημέρες του έτους. Αντίθετα, υγρές συνθήκες εδάφους εμφανίζονται μόλις 2 ή 3 φορές το χρόνο, κατά μέσο όρο. Οι αντίστοιχες πιθανότητες για το σταθμό Μακρυνίτσας στο Πήλιο, όπου το κλίμα είναι σαφώς πιο υγρό σε σχέση με την Αττική, είναι 44.4, 31.1, 24.5%. Στην

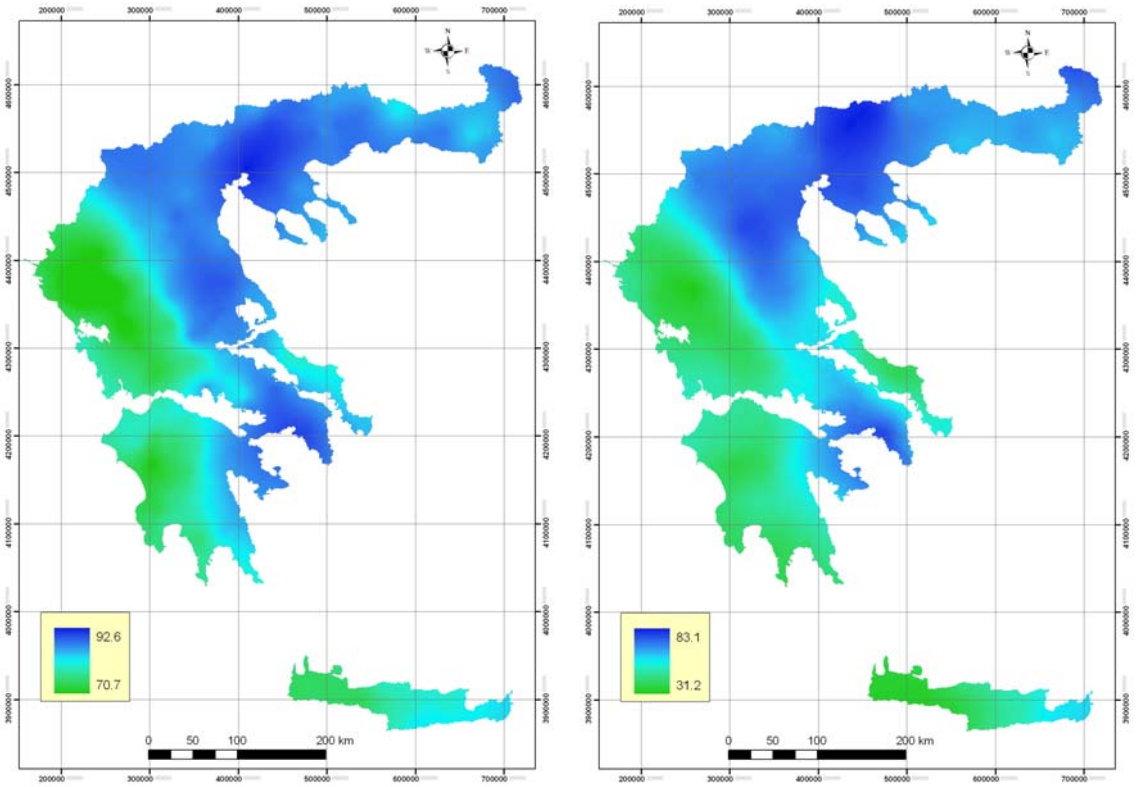
περιοχή αυτή, η συχνότητα εμφάνισης υγρών συνθηκών είναι αρκετά υψηλή, καθώς τέτοιες συνθήκες επικρατούν το 1/4 περίπου του χρόνου.

Για την αποτύπωση της χωρικής μεταβλητότητας των πιθανοτήτων εδαφικής υγρασίας στην ηπειρωτική Ελλάδα και την Κρήτη, παρήχθησαν 2 × 3 = 6 χάρτες χωρικής παρεμβολής των σημειακών εκτιμήσεων των 125 σταθμών, που φαίνονται στα Σχήματα 7.2 έως 7.4. Είναι φανερό ότι η χώρα περιλαμβάνει δύο ζώνες, με εντελώς διαφορετικά χαρακτηριστικά ως προς την συχνότητα εμφάνισης κάθε τύπου συνθηκών υγρασίας. Η πρώτη περιλαμβάνει τη Δυτική Ελλάδα, το μεγαλύτερο τμήμα της Πελοποννήσου και μεγάλα τμήματα της Κρήτης και της Εύβοιας, όπου η πιθανότητα εμφάνισης υγρών συνθηκών φτάνει μέχρι και το 50%. Στην περίπτωση αυτή, εφόσον έχουν σχεδιαστεί έργα για μέσες συνθήκες υγρασίας, σύμφωνα με την κοινή πρακτική, τα μεγέθη σχεδιασμού είναι υποεκτιμημένα, καθώς έχουν εφαρμοστεί χαμηλότερες τιμές του CN, που αναφέρονται σε συνθήκες υγρασίας τύπου II. Βεβαίως, επειδή στις περιοχές αυτές αναπτύσσονται λεκάνες με υψηλές τιμές του CN, οι αποκλίσεις δεν αναμένονται να είναι σημαντικές, όπως εξηγήθηκε παραπάνω. Η δεύτερη ζώνη καλύπτει το υπόλοιπο τμήμα της ηπειρωτικής χώρας (Ανατολική Στερεά Ελλάδα, Αττική, Θεσσαλία, Μακεδονία, Θράκη), όπου κατά κανόνα επικρατούν ξηρές συνθήκες. Στη ζώνη αυτή, τα έργα που έχουν σχεδιαστεί με την υπόθεση «αντιπροσωπευτικών» συνθηκών τύπου II σαφώς υπερδιαστασιολογημένα, αφού η πιθανότητα πραγματοποίησης ισχυρών βροχοπτώσεων σε μέσες (και πολύ περισσότερο υγρές) συνθήκες εδαφικής υγρασίας είναι χαμηλές.

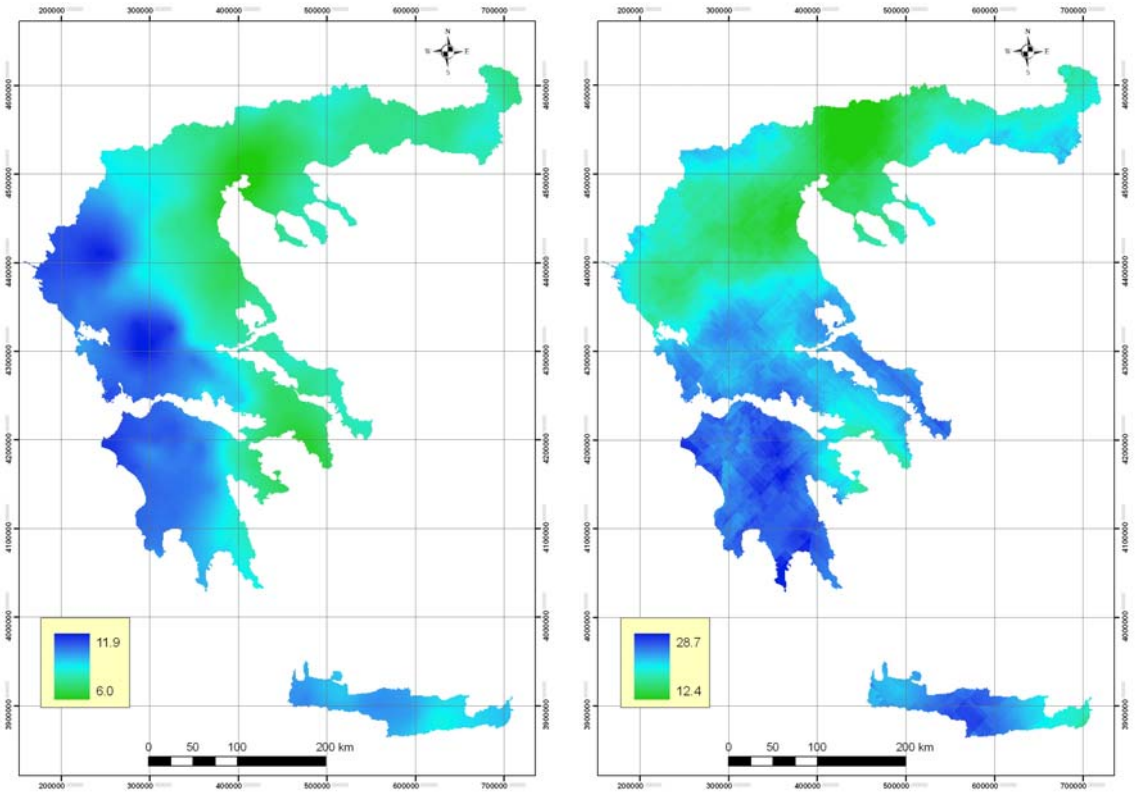
Από τα παραπάνω καθίσταται προφανές ότι το ζήτημα της συνδυαστικής αξιοποίησης των πιθανοτικών μεγεθών που σχετίζονται με τη βροχόπτωση σχεδιασμού και τις συνθήκες αρχικής εδαφικής υγρασίας, βάσει των οποίων εφαρμόζονται τα μοντέλα σχεδιασμού, αυτό χρήζει περαιτέρω διερεύνησης, καθώς συναρτάται τόσο με το κόστος των αντιπλημμυρικών έργων όσο και με το πραγματικό επίπεδο προστασίας που εξασφαλίζουν.



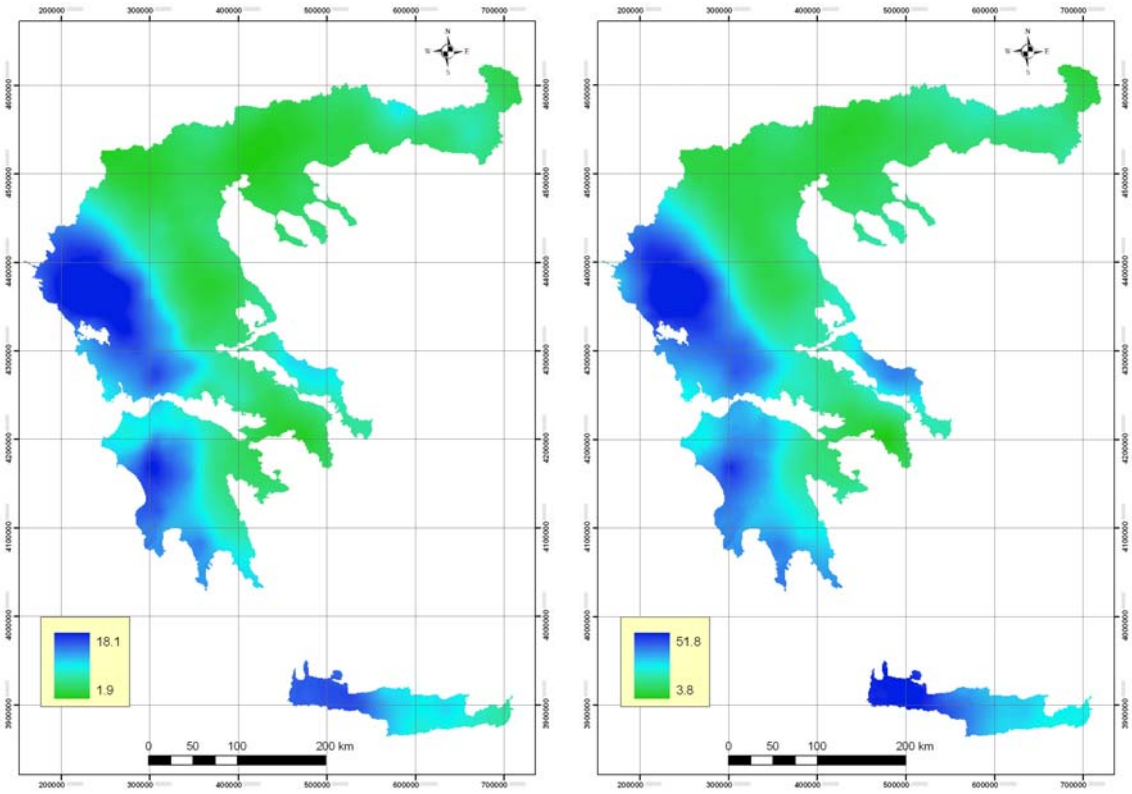
Σχήμα 7.1: Σταθμοί από τους οποίους ελήφθησαν τα δείγματα ημερήσιων βροχοπτώσεων.



Σχήμα 7.2: Πιθανότητα εμφάνισης ξηρών συνθηκών υγρασίας (τύπου Ι) σε κλίμακα ημέρας (αριστερά) και υδρολογικού έτους (δεξιά).



Σχήμα 7.3: Πιθανότητα εμφάνισης μέσων συνθηκών υγρασίας (τύπου ΙΙ) σε κλίμακα ημέρας (αριστερά) και υδρολογικού έτους (δεξιά).



Σχήμα 7.4: Πιθανότητα εμφάνισης υγρών συνθηκών υγρασίας (τύπου ΙΙΙ) σε κλίμακα ημέρας (αριστερά) και υδρολογικού έτους (δεξιά).

8 Συμπεράσματα

Στην έκθεση αυτή εξετάστηκε το πλαίσιο υδρολογικού σχεδιασμού με χρήση μοντέλων επεισοδίου, που βασίζεται στη συνδυαστική εφαρμογή της μεθόδου SCS-CN για την εκτίμηση των υδρολογικών ελλειμμάτων και του συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος (ΣΜΥ) για την μετατροπή της επιφανειακής απορροής σε πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης. Διερευνήθηκαν όλες οι πτυχές της μεθόδου, τόσο σε θεωρητικό επίπεδο όσο και σε επίπεδο εφαρμογής. Για τον σκοπό αυτό, συλλέχθηκαν και αξιολογήθηκαν τα σημαντικότερα επεισόδια πλημμυρών στις πιλοτικές λεκάνες του έργου και τις υπολεκάνες τους (Νέδοντας, Καρβελιώτης, Αλαγονία, Λούσιος, Σαρανταπόταμος, Οινόη, ρέμα Χαλανδρίου, Λυκόρεμα Ραφήνας – δύο θέσεις, Περιστερώνα, Ξερός). Εξετάστηκαν περισσότερα από 100 επεισόδια στις 11 θέσεις ενδιαφέροντος, για τα οποία καταρτίστηκαν τα αντίστοιχα υετογραφήματα και υπολογίστηκαν χαρακτηριστικά τους μεγέθη. Πρόκειται για τη σημαντικότερη και εκτενέστερη υδρολογική έρευνα που έχει γίνει στην Ελλάδα, η οποία κατέληξε σε ριζική αναθεώρηση των έως τώρα εφαρμοζόμενων πρακτικών υδρολογικού σχεδιασμού σε λεκάνες χωρίς μετρήσεις και κωδικοποιήθηκε ως πλαίσιο τεχνικών προδιαγραφών, στα πλαίσια της Ενότητας Εργασίας 6.

Οι βασικές συνιστώσες της έρευνας και τα αντίστοιχα συμπεράσματα είναι τα εξής:

- Το αρχικό σκέλος των αναλύσεων αφορά στις περιοχικές σχέσεις εκτίμησης του χρόνου συγκέντρωσης, που αποτελεί το σημαντικότερο χρονικό μέγεθος της υδρολογίας πλημμυρών. Ειδικότερα, διερευνήθηκε η χρήση του χρόνου συγκέντρωσης ως δεδομένο εισόδου της ορθολογικής μεθόδου, με βάση τα δεδομένα ετήσιων μέγιστων παροχών σε ένα μεγάλο αριθμό λεκανών της Κύπρου. Στο πλαίσιο αυτό, εξετάστηκε η καταλληλότητα τυπικών εμπειρικών σχέσεων εκτίμησης που προτείνει η βιβλιογραφία, απ' όπου προέκυψε η σαφής υπεροχή της μεθόδου Giandotti. Αντίθετα, άλλες γνωστές περιοχικές σχέσεις, όπως του Kirpich και της SCS, εμφανίζουν απαράδεκτα χαμηλή προγνωστική ικανότητα, και ειδικότερα υπερεκτιμούν σημαντικά (έως και 100%) τις παροχές αιχμής. Βεβαίως, με προσαρμογή των συντελεστών που εισάγονται στις εν λόγω σχέσεις, η προγνωστική τους ικανότητα βελτιώνεται δραστικά. Αυτό καταδεικνύει ότι ενώ οι περιοχικές σχέσεις του χρόνου συγκέντρωσης έχουν ορθή παραμετροποίηση, δεν μπορούν να εφαρμοστούν με γενικευμένες τιμές παραμέτρων σε όλο το εύρος των υδρολογικών λεκανών, παρά πρέπει να προσαρμοστούν στις τοπικές ιδιαιτερότητες κάθε περιοχής.
- Για τις λεκάνες της Κύπρου, αναπτύχθηκαν βελτιωμένες εκδοχές της ορθολογικής μεθόδου, όπου τόσο στην εκτίμηση του χρόνου συγκέντρωσης όσο και του συντελεστή απορροής εισάγεται ως παράμετρος η περίοδος επαναφοράς. Η προσέγγιση αυτή είναι συνεπής με το φυσικό πλαίσιο των πλημμυρικών διεργασιών, καθώς και τα δύο παραπάνω μεγέθη εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του επεισοδίου, συγκεκριμένα ο χρόνος συγκέντρωσης είναι φθίνουσα συνάρτηση της παροχής, ενώ ο συντελεστής απορροής είναι αύξουσα συνάρτηση της έντασης βροχής. Η χρήση της περιόδου επαναφοράς εισάγεται ως υποκατάστατο μέγεθος, ώστε να αποφευχθεί η διατύπωση πολύπλοκων μη γραμμικών σχέσεων πεπλεγμένης μορφής.
- Για γενικότερη χρήση στον υδρολογικό σχεδιασμό, διατυπώθηκε μια εμπειρική σχέση αναγωγής του χρόνου συγκέντρωσης που εκτιμάται κατά Giandotti με βάση την κρίσιμη

ένταση βροχόπτωσης. Η σχέση αυτή εδραιώνεται σε κάποιες απλοποιητικές θεωρητικές υποθέσεις, θεωρώντας την επιφανειακή απορροή στη λεκάνη ως ομοιόμορφη ροή σε αγωγό πολύ μεγάλου πλάτους και μικρού βάθους, και υποθέτοντας ότι ο λόγος των πλημμυρικών παροχών είναι ίσος με τον λόγο των αντίστοιχων εντάσεων βροχής.

- Πραγματοποιήθηκε εκτενής επισκόπηση και θεωρητική διερεύνηση της μεθόδου SCS-CN για την εκτίμηση των υδρολογικών ελλειμμάτων. Στο πλαίσιο αυτό, αναπτύχθηκε μια διαδικασία αναλυτικής εκτίμησης της παραμέτρου CN για τυχαίες αρχικές απώλειες και δεδομένες συνθήκες υγρασίας.
- Το σημαντικότερο σκέλος της έρευνας αφορά στην αξιολόγηση της προγνωστικής ικανότητας της συνδυαστική μεθόδου SCS-CN και ΣΜΥ, με βάση τα επεισόδια πλημμυρών που συλλέχθηκαν από τις πιλοτικές λεκάνες. Αρχικά αξιολογήθηκε η προγνωστική ικανότητα τη τυποποιημένης, σύμφωνα με την κοινή πρακτική, διαδικασίας, με χρήση δύο τυπικών ΣΜΥ της βιβλιογραφίας (Snyder και Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας), για την αναπαραγωγή των παρατηρημένων επεισοδίων πλημμυρών στη λεκάνη Λυκορέματος Ραφήνας και την ανάντη υπολεκάνη της. Γενικά, η προσαρμογή των μοντέλων ήταν ανεπιτυχής, το οποίο ανέδειξε την ανάγκη αναθεώρησης μια εκ των βασικών υποθέσεων της μεθόδου SCS-CN, δηλαδή της εφαρμογής ποσοστού αρχικών απωλειών 20%, καθώς και της διαμόρφωσης συνθετικών ΣΜΥ διαφορετικής δομής. Για το σκοπό αυτό, εξετάστηκαν εναλλακτικές δομές παραμετρικών ΣΜΥ, που αναπαράγουν καλύτερα τη μορφή των πλημμυρογραφημάτων στην υπόψη λεκάνη.
- Η έρευνα κατέληξε σε μια τελική εκδοχή του ΣΜΥ, που αποτελείται από έναν γραμμικό ανοδικό κλάδο και έναν καθοδικό κλάδο, που περιγράφεται από μια αρνητική εκθετική σχέση. Ο καθοδικός κλάδος προσομοιάζει τη λειτουργία ενός γραμμικού ταμιευτήρα, αναπαριστώντας τις διεργασίες στείρευσης, και ειδικότερα την υποδερμική ροή, που, όπως τονίζεται στη βιβλιογραφία, είναι η κυρίαρχη διεργασία της πλημμυρικής απορροής. Το ΣΜΥ περιλαμβάνει δύο παραμέτρους, που εκφράζουν τους χρόνους ανόδου και βάσης συναρτήσει του χρόνου συγκέντρωσης της λεκάνης.
- Για την αναπαραγωγή των παρατηρημένων πλημμυρογραφημάτων σε όλες τις πιλοτικές λεκάνες του έργου (11 θέσεις) επιχειρήθηκε η βέλτιστη προσαρμογή των δύο χρονικών παραμέτρων του ΣΜΥ, ταυτόχρονα με τις δύο παραμέτρους της μεθόδου SCS-CN (μέγιστη δυνητική κατακράτηση και ποσοστό αρχικών απωλειών), μέσω βαθμονόμησης. Στη συντριπτική πλειονότητα των περιπτώσεων, η προσαρμογή των προσομοιωμένων στα παρατηρημένα πλημμυρογραφήματα ήταν πολύ καλή, και αντίστοιχα καλή ήταν η αναπαραγωγή των παροχών αιχμής.
- Από την ανάλυση των βελτιστοποιημένων παραμέτρων προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με την επιλογή αντιπροσωπευτικών τιμών τους, εφόσον εφαρμόζονται για την εκτίμηση πλημμυρογραφημάτων σχεδιασμού σε λεκάνες με παρεμφερή φυσιογραφικά χαρακτηριστικά. Συγκεκριμένα:
    - Στις περισσότερες λεκάνες, το ποσοστό αρχικών απωλειών δεν υπερβαίνει το 5%, το οποίο έρχεται σε αισθητή αντίθεση με την τυπική τιμή 20% που εφαρμόζεται στις μελέτες πλημμυρών.
    - Η παράμετρος CN παρουσιάζει έντονη μεταβλητότητα, λόγω της ισχυρής εξάρτησής του από τις αρχικές απώλειες και τις αρχικές συνθήκες υγρασίας.
    - Η παράμετρος του χρόνου ανόδου του ΣΜΥ κυμαίνεται στα επίπεδα του 1/3 του χρόνου συγκέντρωσης κατά Giandotti, χωρίς ιδιαίτερη διαφορά από περιοχή σε

περιοχή, καθώς, λόγω των μεγάλων κλίσεων των λεκανών που εξετάστηκαν, παρατηρείται γρήγορη εμφάνιση των αιχμών.

  - Η παράμετρος του χρόνου βάσης του ΣΜΥ εμφανίζει σημαντική μεταβλητότητα, και είναι κατά κανόνα μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερος του χρόνου συγκέντρωσης κατά Giandotti, καθώς στις περισσότερες περιοχές φαίνεται ότι κυριαρχεί η υποδερμική ροή έναντι της επιφανειακής. Ωστόσο, σε κάποιες λεκάνες η τιμή του είναι πολύ πιο χαμηλή, που υποδηλώνει ότι η ροή πραγματοποιείται κυρίως πάνω στο έδαφος και δεν αναρρυθμίζεται στην ακόρεστη ζώνη.

- Γενικά, και για τις τέσσερις παραμέτρους της μεθόδου προέκυψε ένα ευρύ φάσμα τιμών μεταξύ των διαφορετικών επεισοδίων κάθε λεκάνης, καθώς αυτές εξαρτώνται και από τα επιμέρους χαρακτηριστικά του επεισοδίου (π.χ. ένταση βροχής, αρχικές συνθήκες υγρασίας). Κατά συνέπεια, για την εκτίμηση των πλημμυρικών μεγεθών σχεδιασμού σε λεκάνες χωρίς μετρήσεις, μείζονα ρόλο έχει η ορθή αποτύπωση της αβεβαιότητας των κρίσιμων αυτών παραμέτρων της υπολογιστικής διαδικασίας, οι οποίες θα πρέπει να αντιμετωπίζονται ως τυχαίες μεταβλητές παρά ως σταθερές.
- Για την αξιόπιστη εκτίμηση της παραμέτρου CN και εφαρμογή της στο πλαίσιο της μεθόδου SCS-CN, αναπτύχθηκε μια ημι-αυτοματοποιημένη διαδικασία σε περιβάλλον ΣΓΠ. Η διαδικασία αυτή αποσκοπεί στην παραγωγή χαρτών κατανεμημένων τιμών του λεγόμενου CN αναφοράς, που αναφέρονται σε συνθήκες εδαφικής υγρασίας τύπου ΙΙ και αρχικές απώλειες 20%. Για τον σκοπό αυτό, διαμορφώνονται κλάσεις τιμών για τρία χαρακτηριστικά επίπεδα χωρικής πληροφορίας που σχετίζονται με την παραγωγή της πλημμυρικής απορροής (υδατοπερατότητα, φυτοκάλυψη, αποστραγγιστική ικανότητα). Οι εκτιμήσεις επαληθεύτηκαν από τις μετρήσεις στις πιλοτικές λεκάνες, στις οποίες δόθηκαν αντιπροσωπευτικές τιμές του CN.
- Το τελευταίο σκέλος της έρευνας αφορά στην πιθανοθεωρητική θεώρηση των τριών τυπικών καταστάσεων αρχικής υγρασίας που υποθέτει η μέθοδος SCS-CN. Για το σκοπό αυτό, συλλέχθηκαν και αναλύθηκαν δείγματα ημερήσιων βροχοπτώσεων μεγάλου μήκους από όλη την Ελλάδα, για τα οποία έγιναν εκτενείς στατιστικές επεξεργασίες, και διαμορφώθηκαν χάρτες ισοτιμικών τιμών των πιθανοτήτων εμφάνισης κάθε κατάστασης. Ειδικότερα, η πιθανότητα εμφάνισης κάθε τύπου υγρασίας εκτιμήθηκε από τα ημερήσια δείγματα βροχής, εξετάζοντας τις επικρατούσες συνθήκες την ημέρα πραγματοποίησης του μεγαλύτερου ύψους βροχής κάθε έτους. Από τις αναλύσεις προέκυψε ότι μόνο στη Δυτική Ελλάδα και τις ορεινές περιοχές, οι συνθήκες ΙΙ μπορούν να θεωρηθούν αντιπροσωπευτικές της μέσης κατάστασης υγρασίας του εδάφους. Αντίθετα, στις σχετικά ξηρές περιοχές της ελληνικής επικράτειας (π.χ. Ανατολική Ελλάδα, Μακεδονία), η πιθανότητα εμφάνισης ακόμα και μέσων συνθηκών (τύπου ΙΙ) είναι μικρή, ενώ η εμφάνιση συνθηκών τύπου ΙΙΙ είναι εξαιρετικά χαμηλή.
- Στις μελέτες πλημμυρών συνήθως θεωρείται ένα «δυσμενές» σχήμα υετογραφήματος και κάποιες «μέσες» (αλλά, όπως αποδείχθηκε μη αντιπροσωπευτικές) συνθήκες υγρασίας. Ως αποτέλεσμα, τα μεγέθη σχεδιασμού είναι έντονα υπερεκτιμημένα, καθώς η πραγματική πιθανότητα εμφάνισής τους είναι πολύ μικρότερη (ενδεχομένως και τάξη μεγέθους) από την πιθανότητα πραγματοποίησης της βροχόπτωσης σχεδιασμού, όπως ορίζεται με βάση την περίοδο επαναφοράς. Ο συνεπής χειρισμός απαιτεί μοντέλα συνεχούς υδρολογικής προσομοίωσης, που τροφοδοτούνται από συνθετικές χρονοσειρές βροχόπτωσης. Εναλλακτικά, προτείνεται η πολύ απλούστερη προσέγγιση SCS-CN&ΜΥ, με χρήση συνθετικών επεισοδίων βροχής για κάθε τύπο υγρασίας, και την εκτίμηση των τελικών μεγεθών ως συνδυασμένη πιθανότητα των τύπων Ι, ΙΙ και ΙΙΙ.

Αναφορές

Γαλιούνα, Ε., *Διερεύνηση εμπειρικών σχέσεων για την εκτίμηση των πλημμυρικών αιχμών στην Κύπρο*, Μεταπτυχιακή εργασία, 169 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Φεβρουάριος 2011.

Ζαρκαδούλας, Α., *Ανάπτυξη μοντέλου υδρομετεωρολογικής πρόγνωσης στη χειμαρρική λεκάνη του Σαρανταπόταμου*, Διπλωματική εργασία, 210 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ιούλιος 2014.

Κουτσογιάννης, Δ., και Θ. Ξανθόπουλος, *Τεχνική Υδρολογία*, Έκδοση 3, 418 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1999.

Κουτσογιάννης, Δ., *Σχεδιασμός Αστικών Δικτύων Αποχέτευσης*, Έκδοση 4, 180 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2011.

Μαθιουδάκη, Μ., *Διερεύνηση παραμέτρων υδρολογικού σχεδιασμού με χρήση συνθετικών μοναδιαίων υδρογραφημάτων, μέσω ανάλυσης χαρακτηριστικών πλημμυρικών επεισοδίων στην πειραματική λεκάνη Λυκορέματος Πεντέλης*, Μεταπτυχιακή εργασία, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Μάρτιος 2012.

Μαρκόνης, Ι., Σ. Λυκούδης, Α. Ευστρατιάδης, και Α. Κουκουβίνος, Τεχνική έκθεση περιγραφής βροχομετρικών και μετεωρολογικών δεδομένων και επεξεργασιών, *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, 54 σελίδες, Σεπτέμβριος 2014.

Μαστροθεόδωρος, Θ., *Εφαρμογή της προσομοίωσης Monte Carlo για την παραγωγή πλημμυρικών υδρογραφημάτων σε Μεσογειακές λεκάνες*, Διπλωματική εργασία, 148 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Δεκέμβριος 2013.

Μιχαηλίδη, Ε., *Διερεύνηση προσομοίωσης πλημμύρας για το σχεδιασμό σε λεκάνες χειμαρρικής δίαιτας - Εφαρμογή στη λεκάνη του Σαρανταπόταμου*, Διπλωματική εργασία, 140 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Δεκέμβριος 2013.

Μπαλούτσος, Γ., και Α. Ρούσσος, Μηχανισμοί σχηματισμού απορροής σε δασικές λεκάνες και η συμβολή τους στην αξιοποίηση του νερού και στην προστασία του ορεινού φυσικού περιβάλλοντος, *Γεωτεχνικά Επιστημονικά Θέματα*, ΓΕΩΤΕΕ, 2014.

Οδηγίες Μελετών Οδικών Έργων (ΟΜΟΕ), *Τεύχος 8: Αποχέτευση-Στράγγιση-Υδραυλικά Έργα Οδών*, ΥΠΕΧΩΔΕ, 2002.

Πασιαρδής Σ., Κατάρτιση Όμβριων Καμπυλών στην Κύπρο, *Σειρά Μετεωρολογικών Σημειωμάτων Αρ.15*, Μετεωρολογική Υπηρεσία Κύπρου, 2009.

Ποντικός, Σ., *Πιθανοτική διερεύνηση καταστάσεων εδαφικής υγρασίας στην ελληνική επικράτεια για χρήση τους σε μελέτες πλημμυρών με τη μέθοδο SCS-CN*, Διπλωματική

εργασία, 140 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Οκτώβριος 2014.

Τσακίρης, Γ., Πλημμυρικές απορροές, *Υδατικοί Πόροι: 1. Τεχνική Υδρολογία*, Κεφ. 11, 393–423, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, 1995.

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, Μάρτιος 2013.

Baltas, E. A., N. A. Dervos, and M. A. Mimikou, Technical Note: Determination of the SCS initial abstraction ratio in an experimental watershed in Greece, *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, 1825-1829, 2007.

Betson, R. P., What is watershed runoff? *Journal of Geophysical Research*, 69(8), 1541–1552, 1964.

Beven, K. J., and P. Germann, P., Macropores and water flow in soils, *Water Resources Research*, 18(5), 1311–1325, 1982.

Beven, K. J., Uniqueness of places and process representations in hydrological modelling, *Hydrology and Earth System Sciences*, 4, 203–213, 2000.

Camici, S., A. Tarpanelli, L. Brocca, F. Melone, and T. Moramarco, Design soil moisture estimation by comparing continuous and storm-based rainfall-runoff modelling, *Water Resources Research*, 47, W05527, 2011.

Dunne, T., and L. B. Leopold, *Water in Environmental Planning*, W.H. Freeman and Company, San Francisco, pp. 818, 1978.

Dunne, T., and R. D. Black, Partial area contributions to storm runoff in a small New England watershed, *Water Resources Research*, 6(5), 1296–131, 1970.

Efstratiadis, A., A. D. Koussis, D. Koutsoyiannis, and N. Mamassis, Flood design recipes vs. reality: can predictions for ungauged basins be trusted?, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14, 1417–1428, doi:10.5194/nhess-14-1417-2014, 2014.

Efstratiadis, A., A. Koukouvinos, P. Dimitriadis, A. Tegos, N. Mamassis, and D. Koutsoyiannis, A stochastic simulation framework for flood engineering, *5th EGU Leonardo Conference – Hydrofractals 2013 – STAHY '13*, Kos Island, Greece, European Geosciences Union, International Association of Hydrological Sciences, International Union of Geodesy and Geophysics, 2013.

Efstratiadis, A., and S.M. Papalexiou, The quest for consistent representation of rainfall and realistic simulation of process interactions in flood risk assessment, *European Geosciences Union General Assembly 2010, Geophysical Research Abstracts, Vol. 12*, Vienna, 11101, European Geosciences Union, 2010.

Freeze, R. A., The role of subsurface flow in the generation of surface runoff. 2. Upstream source areas, *Water Resources Research*, 8(5), 1272, 1972.

Galiouna, E., A. Efstratiadis, N. Mamassis, and K. Aristeidou, Investigation of extreme flows in Cyprus: empirical formulas and regionalization approaches for peak flow estimation,

European Geosciences Union General Assembly 2011, Geophysical Research Abstracts, Vol. 13, Vienna, 2077, European Geosciences Union, 2011.

Grimaldi, S., A. Petroseli, and N. Romano, Green-Ampt Curve-Number mixed procedure as an empirical tool for rainfall–runoff modelling in small and ungauged basins, *Hydrological Processes*, 27(8), 1253–1264, 2013.

Grimaldi, S., A. Petroseli, F. Tauro, and M. Porfiri, Time of concentration: A paradox in modern hydrology, *Hydrological Sciences Journal*, 57(2), 217–228, 2012.

Hewlett, J. D., and A. R. Hibbert, Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas, *Forest Hydrology*, edited by W. E. Sopper and H. L. Lull, Pergamon, Oxford, 275–290, 1967.

Hewlett, J. D., *Watershed management*, Report for 1961 Southeastern Forest Experiment Station, U.S. Forest Service, Ashville, N.C., 1961.

Horton, R. E., The field, scope, and status of the science of hydrology, *Trans. AGU, Reports and Papers*, Hydrology, National Research Council, Washington, D.C., 1931.

Huber, W. C., Discussion of "Estimating urban time of concentration" by R. H. McCuen et al., *Journal of Hydrologic Engineering*, 113(1), 122–124, 1987.

Kirpich, Z. P.: Time of concentration of small agricultural watersheds, *Civil Eng.*, 10(6), 362, 1940.

Knisel, W. G., Comments on "Role of subsurface flow in generating surface runoff" by R. A. Freeze, *Water Resources Research*, 9(4), 1107, 1973.

Koussis, A. D., An assessment review of the hydraulics of storage flood routing 70 years after the presentation of the Muskingum method, *Hydrological Sciences Journal*, 54(1), 43–61, 2009.

Koussis, A. D., Reply to the Discussion of "Assessment and review of the hydraulics of storage flood routing 70 years after the presentation of the Muskingum method" by M. Perumal, *Hydrological Sciences Journal*, 55(8), 1431–1441, 2010.

Koutsoyiannis, D., and Th. Xanthopoulos, On the parametric approach to unit hydrograph identification, *Water Resources Management*, 3(2), 107–128, 1989.

Koutsoyiannis, D., D. Kozonis, and A. Manetas, A mathematical framework for studying rainfall intensity-duration-frequency relationships, *Journal of Hydrology,* 206(1-2), 118–135, 1998.

Mathioudaki, M., A. Efstratiadis, and N. Mamassis, Investigation of hydrological design practices based on historical flood events in an experimental basin of Greece (Lykorema, Penteli), *Advanced methods for flood estimation in a variable and changing environment*, Volos, University of Thessaly, 2012.

McCuen, R.H., Uncertainty analyses of watershed time parameters, *Journal of Hydrologic Engineering*, 14(5), 490–498, 2009.

McDonnell, J. J., Where does water go when it rains? Moving beyond the variable source area concept of rainfall-runoff response, *Hydrological Processes*, 17, 1869–1875, 2003.

Michaelidi, E., T. Mastrotheodoros, A. Efstratiadis, A. Koukouvinos, and D. Koutsoyiannis, Flood modelling in river basins with highly variable runoff, *5th EGU Leonardo*

Conference – Hydrofractals 2013 – STAHY '13, Kos Island, Greece, European Geosciences Union, International Association of Hydrological Sciences, International Union of Geodesy and Geophysics, 2013.

Michel, C., V. Andréassian, and C. Perrin, Soil Conservation Service Curve Number method: How to mend a wrong soil moisture accounting procedure? *Water Resources Research*, 41, W02011, 2005.

Mosley, M. P., Streamflow generation in a forested watershed, New Zealand, *Water Resources Research*, 15(4), 795-806, 1979.

Mosley, M. P., Subsurface flow velocities through selected forest soils, South Island, New Zealand, *Journal of Hydrology*, 55, 65-92, 1982.

Natural Resources Conservation Service (NRCS), *Part 630 Hydrology, National Engineering Handbook*, U.S. Department of Agriculture, Washington, DC, 208.

Ponce V.M., and R. H. Hawkins, Runoff Curve Number: has it reached maturity? *Journal of Hydrologic Engineering*, 1(1), 11–19, 1996.

Sahu, R. K., S. K. Mishra, T. I. Eldho, and M. K. Jain, An advanced soil moisture accounting procedure for SCS curve number method, *Hydrological Processes*, 21(21), 2872–2881, 2007.

Soil Conservation Service (SCS), *National Engineering Handbook, Section 4, Hydrology (NEH-4)*, U.S. Department of Agriculture, Washington, DC, 1972.

Schröter, K., M. Kunz, F. Elmer, B. Mühr, and B. Merz, What made the June 2013 flood in Germany an exceptional event? A hydro-meteorological evaluation, *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 11, 8125-8166, 2014.

Sutcliffe J.V., *Methods of Flood Estimation - A Guide to Flood Studies Report*, Report No 49, Institute of Hydrology, UK, 1978.

Tromp-van Meerveld, H. J., and J. J. McDonnell, Threshold relations in subsurface stormflow: 2. The fill and spill hypothesis, *Water Resources Research*, 42, W02411, 2006.

U.K. National Environmental Research Council (UK-NERC), *Flood Studies Report*, Institute of Hydrology, Wallingford, 1975.

U.S. Army Corps of Engineers, *Flood-Runoff Analysis*, Technical Engineering and Design Studies, No. 19, ASCE, 1997.

Wagener, T., M. Sivapalan, P. Troch, and R. Woods, Catchment classification and hydrologic similarity, *Geography Compass*, 1(4), 901–931, 2007.

Wright-McLaughlin Engineers, *Urban Storm Drainage Criteria Manual*, Denver Region Council of Governments, Denver, Colorado, 1969.