



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος

**ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΧΩΡΙΚΗΣ ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗΣ
ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΤΑ
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ:
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗ ΛΕΚΑΝΗ ΤΟΥ ΝΕΔΟΝΤΑ**

Διπλωματική Εργασία
Επαμεινώνδας Κουτσοκέρας

Επιβλέπων: Ανδρέας Ευστρατιάδης, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Συνεπιβλέπων: Παναγιώτης Δήμας, Υποψήφιος Διδάκτωρ Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2024



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος

**ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΧΩΡΙΚΗΣ ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗΣ
ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΤΑ
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ:
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗ ΛΕΚΑΝΗ ΤΟΥ ΝΕΔΟΝΤΑ**

Διπλωματική Εργασία
Επαμεινώνδας Κουτσοκέρας

Επιβλέπων: Ανδρέας Ευστρατιάδης, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Συνεπιβλέπων: Παναγιώτης Δήμας, Υποψήφιος Διδάκτωρ Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2024

Copyright © Επαμεινώνδας Κουτσοκέρας, 2024
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση σε αρχείο πληροφοριών, διανομή, αναπαραγωγή, μετάφραση ή μετάδοση της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό, υπό οποιαδήποτε μορφή και με οποιοδήποτε μέσο επικοινωνίας, ηλεκτρονικό ή μηχανικό, χωρίς την προηγούμενη έγγραφη άδεια του συγγραφέα. Επιτρέπεται η αναπαραγωγή, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον/την συγγραφέα.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από τη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Copyright © Epaμeinondas Koutsokeras, 2024
All Rights Reserved

Neither the whole nor any part of this diploma thesis may be copied, stored in a retrieval system, distributed, reproduced, translated, or transmitted for commercial purposes, in any form or by any means now or hereafter known, electronic or mechanical, without the written permission from the author. Reproducing, storing and distributing this thesis for non-profitable, educational or research purposes is allowed, without prejudice to reference to its source and to inclusion of the present text. Any queries in relation to the use of the present thesis for commercial purposes must be addressed to its author.

Approval of this diploma thesis by the School of Civil Engineering of the National Technical University of Athens (NTUA) does not constitute in any way an acceptance of the views of the author contained herein by the said academic organisation (L. 5343/1932, art. 202).

Επαμεινώνδας Κουτσοκέρας
Επίδραση Χωρικής Διακριτοποίησης Υδρολογικών Μοντέλων στα Χαρακτηριστικά της
Πλημμύρας: Εφαρμογή στη Λεκάνη του Νέδοντα
Διπλωματική Εργασία
Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Αθήνα, 2024

Epameinondas Koutsokeras
Impact of Spatial Discretisation of Hydrological Models on Flood Characteristics:
Application to Nedon River Basin
Diploma Thesis
Department of Water Resources and Environmental Engineering
National Technical University of Athens
Athens, 2024

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Ανδρέα Ευστρατιάδη, Επίκουρο Καθηγητή του Τομέα Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π., που μου έδωσε τη δυνατότητα να εκπονήσω την παρούσα διπλωματική εργασία υπό την επίβλεψή του. Η συνεργασία μας ήταν εξαιρετική και η βοήθεια που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια ήταν καθοριστικής σημασίας για το τελικό αποτέλεσμα. Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον υποψήφιο διδάκτορα, Παναγιώτη Δήμα, που ήταν πάντα πρόθυμος να με βοηθήσει.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένειά μου και τους φίλους μου.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΧΩΡΙΚΗΣ ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗ ΛΕΚΑΝΗ ΤΟΥ ΝΕΛΟΝΤΑ

Επαμεινώνδας Κουτσοκέρας

Επιβλέπων: Ανδρέας Ευστρατιάδης, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Συνεπιβλέπων: Παναγιώτης Δήμας, Υποψήφιος Διδάκτωρ Ε.Μ.Π.

Φεβρουάριος 2024

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται έξαρση ακραίων καιρικών φαινομένων, με την εκδήλωση βροχοπτώσεων ασυνήθιστα υψηλής έντασης να συγκαταλέγεται μεταξύ αυτών. Ακόμα και σήμερα, που είναι πιο εμπεδωμένη σε σχέση με το παρελθόν η κουλτούρα του αντιπλημμυρικού σχεδιασμού, οι ακραίες βροχοπτώσεις προκαλούν πλημμυρικά επεισόδια, τα οποία έχουν πολλές φορές καταστροφικές συνέπειες για την ανθρώπινη ζωή και την οικονομία. Αυτό σημαίνει ότι είναι επιτακτική η ανάγκη διεύρυνσης του αντιπλημμυρικού σχεδιασμού, ώστε να διασφαλιστεί η ανθεκτικότητα των υφιστάμενων και νέων έργων και σχεδίων. Για να επιτευχθεί αυτός ο σκοπός, είναι απαραίτητη η χρήση υδρολογικών και υδραυλικών εργαλείων που παρέχουν ικανοποιητική ακρίβεια στην εκτίμηση των σημαντικών πλημμυρικών μεγεθών, δηλαδή της παροχής αιχμής και του πλημμυρικού όγκου. Η υδρολογική προσομοίωση είναι ιδιαίτερα κρίσιμη, καθώς τα αποτελέσματά της αποτελούν δεδομένο εισόδου του σχεδιασμού των αντιπλημμυρικών έργων. Ο μηχανικός, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής, τις απαιτήσεις του έργου, τα διαθέσιμα δεδομένα και την εμπειρία του, καλείται κάθε φορά να χρησιμοποιήσει εκείνο το υδρολογικό μοντέλο που θα του εξασφαλίσει τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια. Τα μοντέλα αυτά χωρίζονται σε διάφορες κατηγορίες, αλλά αυτό που εξετάζεται στην παρούσα εργασία είναι η χωρική κλίμακα. Ως προς αυτή, τα υδρολογικά μοντέλα διακρίνονται σε αδιαμέριστα, όπου η λεκάνη απορροής αντιμετωπίζεται ενιαία, σε ημικαταμεμημένα, όπου η λεκάνη απορροής διακριτοποιείται σε υπολεκάνες, και σε καταμεμημένα, όπου η λεκάνη απορροής διακριτοποιείται σε φατνία. Τα ημικαταμεμημένα και τα καταμεμημένα μοντέλα είναι πιο προηγμένα, καθώς κάθε υπολεκάνη και φατνίο, αντίστοιχα, αντιμετωπίζεται ανεξάρτητα, άρα λαμβάνεται έτσι υπόψη η χωρική ετερογένεια των χαρακτηριστικών της λεκάνης και της βροχόπτωσης. Η απορροή κάθε στοιχείου διοδεύεται στην έξοδο της λεκάνης με κάποιο μοντέλο διόδευσης, το οποίο, ανεξαρτήτως του είδους του, χαρακτηρίζεται από μεγάλη αβεβαιότητα. Πιο παλιά, λόγω ανεπαρκών υπολογιστικών

συστημάτων, η χρήση τέτοιων μεθόδων ήταν περιορισμένη. Ωστόσο, σήμερα, ο μηχανικός έχει στη διάθεσή του και τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (ΣΓΠ), που αποτελούν ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο κατά την υδρολογική ανάλυση, αλλά και προηγμένα λογισμικά υδρολογικής προσομοίωσης, όπως το HEC-HMS, που μπορούν να επιλύσουν σύνθετα προβλήματα. Ωστόσο, το ενδιαφέρον έχει στραφεί στα καταναμημένα μοντέλα και τα ενδιάμεσης πολυπλοκότητας ημικαταναμημένα μοντέλα, τα οποία, αν και χρησιμοποιούνται πλέον ευρέως, δεν έχουν μελετηθεί όσο θα έπρεπε ως προς όλες τις πτυχές τους. Πιο συγκεκριμένα, δεν έχει διερευνηθεί επαρκώς η επίδραση του επιπέδου της διακριτοποίησης μιας λεκάνης απορροής σε υπολεκάνες. Η αύξηση της διακριτοποίησης έχει εσφαλμένα ταυτιστεί με την αύξηση της παροχής αιχμής και την απόδοση ακριβέστερων εκτιμήσεων. Σε κάποιες μελέτες οι θεωρήσεις αυτές επαληθεύονται, ενώ σε άλλες όχι, συνεπώς κάθε λεκάνη αποτελεί ξεχωριστή περίπτωση και δεν έχει προκύψει κάποιο γενικό συμπέρασμα μέχρι σήμερα. Μάλιστα, εγείρονται σοβαροί προβληματισμοί σχετικά με τις περισσότερες πηγές αβεβαιότητας που χαρακτηρίζουν τα πιο λεπτομερή μοντέλα, με αποτέλεσμα να αμφισβητείται η αξιοπιστία τους σε περίπτωση που δεν είναι διαθέσιμα δεδομένα για βαθμονόμηση. Το πεδίο αυτό είναι, λοιπόν, γενικά ανεξερεύνητο και σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να διερευνηθεί σε θεωρητικό και πρακτικό επίπεδο η επίδραση του επιπέδου της διακριτοποίησης μιας λεκάνης σε υπολεκάνες, λαμβάνοντας υπόψη προχωρημένες μεθόδους για την εκτίμηση υδρολογικών παραμέτρων των μοντέλων. Η εργασία περιλαμβάνει αναλυτική βιβλιογραφική παρουσίαση του προβλήματος και λεπτομερή κατάρτιση των βροχοπτώσεων σχεδιασμού και του μοντέλου διόδευσης. Πραγματοποιήθηκε επεξεργασία των χωρικών δεδομένων με το λογισμικό ArcMap 10.5.1 και η υδρολογική προσομοίωση έγινε με το λογισμικό HEC-HMS 4.9. Αρχικά, εξετάζεται η επίδραση του επιπέδου διακριτοποίησης ενός τυχαίου πεδίου (θεωρητική λεκάνη) στην παραγόμενη απορροή. Η λεκάνη διακριτοποιείται σε 5, 10, 20, 40 και 80 υπολεκάνες και εφαρμόζονται διαφορετικά ύψη βροχής και διαφορετικά σενάρια ετερογένειας του αριθμού καμπύλης CN. Στη συνέχεια, διερευνάται και μια πραγματική λεκάνη απορροής. Επιλέγεται η λεκάνη του Νέδοντα, στην Καλαμάτα, η οποία είναι μεσαίου μεγέθους, έχει ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και έχει βρεθεί πολλές φορές στο ερευνητικό και μελετητικό επίκεντρο. Η λεκάνη διακριτοποιείται σε 4, 7, 10 και 21 υπολεκάνες, ενώ εξετάζεται και ως ενιαία. Σε κάθε μοντέλο εφαρμόζονται διαφορετικά ύψη βροχής και τέλος πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας των μοντέλων μεταβάλλοντας παραμέτρους, των οποίων η εκτίμηση ενέχει μεγάλο βαθμό αβεβαιότητας. Επισημαίνεται ότι στόχος της παρούσας εργασίας δεν είναι η βαθμονόμηση των μοντέλων, αλλά η καταγραφή των διαφορών τους. Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης αναδεικνύεται ο υψηλός βαθμός συσχέτισης τη χωρικής κατανομής του αριθμού καμπύλης CN με το επίπεδο διακριτοποίησης της θεωρητικής λεκάνης και με την παραγόμενη απορροή. Το επίπεδο διακριτοποίησης της λεκάνης του Νέδοντα έχει σημαντική επίδραση στην παροχή αιχμής και στον πλημμυρικό όγκο και από την ανάλυση ευαισθησίας αποδεικνύεται ότι τα πιο λεπτομερή μοντέλα είναι περισσότερο ευαίσθητα. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι πολύ σημαντικά και μπορούν να αποτελέσουν το έναυσμα για λεπτομερέστερη διερεύνηση του ζητήματος της διακριτοποίησης των λεκανών απορροής σε διάφορες περιοχές της Ελλάδας.



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING
DEPARTMENT OF WATER RESOURCES AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING

DIPLOMA THESIS

IMPACT OF SPATIAL DISCRETISATION OF HYDROLOGICAL MODELS ON FLOOD CHARACTERISTICS: APPLICATION TO NEDON RIVER BASIN

Epameinondas Koutsokeras

Supervisor: Andreas Efstratiadis, Assistant Professor NTUA
Co-supervisor: Panagiotis Dimas, PhD Candidate NTUA

February 2024

ABSTRACT

In recent years there has been an upsurge in extreme weather events, with the occurrence of rainfall of unprecedented intensity being among them. Even today, when the culture of flood planning is more established than in the past, extreme rainfall events still cause flood events, which often have disastrous consequences for human life and the economy. This implies that there is an urgent need to broaden flood planning in order to ensure the resilience of existing and new projects and plans. Accomplishing this goal requires the use of hydrological and hydraulic tools that estimate with high accuracy important flood quantities, namely peak flow and flood volume. Hydrological simulation is particularly critical, as its outcomes drive the design of flood protection projects. The engineer, depending on the characteristics of the river basin, the requirements of the project, the available data and his/her experience, is called to use the hydrological model that will ensure the greatest possible accuracy. Hydrological models are classified according to several features, among them the spatial discretization, which is considered in this thesis. In this context, hydrological models can be divided into lumped, where the basin is treated as an entity, semi-lumped/semi-distributed, where the basin is discretised into sub-basins, and distributed, where the basin is discretised into cells. The semi-distributed and distributed models are more advanced, since each sub-basin and cell, respectively, is treated independently, thus accounting for the spatial heterogeneity of the physiographic characteristics of the basin and the precipitation. The runoff over each element is propagated to the outlet of the basin by a routing model, which, regardless of its type, is characterised by large uncertainty. In the past, due to inadequate computer systems, the use of such methods was limited. However, nowadays, the engineer has at his disposal both Geographic Information Systems (GIS), which are a very useful tool within spatial analyses, and advanced hydrological simulation software, such as HEC-HMS, which can handle complex modelling problems. However, the interest has turned to distributed models and semi-distributed models of intermediate complexity. Both

model types, although widely used, have not been studied as much as they should be in terms of crucial user decisions. More precisely, the effect of the level of discretisation of a basin into sub-basins has not been adequately investigated. An increase in discretisation has been incorrectly associated with an increase in peak flow and the generation of more accurate estimates. In some studies, these assumptions are verified, while in others they are not, therefore each basin should be considered as an individual case and no general conclusion has been reached to date. In fact, serious concerns are raised about the increased sources of uncertainty that characterise the more detailed models, and as a result their reliability is questioned in cases where no data are available for calibration. This field is, therefore, generally unexplored and the aim of this thesis is to investigate, both from a theoretical and practical viewpoint, the effect of the level of discretization of a basin into sub-basins, taking into account advanced methods for the estimation of hydrological model parameters. The thesis includes a brief literature review of the issue and a detailed compilation of the precipitation and routing model. Spatial data processing was carried out with ArcMap 10.5.1 software and hydrological modelling was performed with HEC-HMS 4.9 software. First, the influence of the discretization level of a theoretical basin (random field) on the generated runoff is considered. The domain is discretized into 5, 10, 20, 40 and 80 elements and different rainfall depths and different CN heterogeneity scenarios are applied. The results of the analysis indicate a high degree of correlation between the spatial distribution of the CN curve number and the level of discretization of the theoretical basin and the generated runoff. Then, a real basin is also examined, namely the medium-small size basin of Nedon River, in Kalamata, Greece. This has some specific features and has been in the focus of many researches and studies. In our analyses, the basin is subdivided into 4, 7, 10 and 21 sub-basins, and it is also examined as a lumped system. Different rainfall depths are applied to each model and finally a sensitivity analysis by changing parameters, whose estimation entails a high degree of uncertainty, is carried out. It should be pointed out that the aim is not to calibrate the models, but to identify their differences. The results indicate that the level of discretisation of this basin has a significant effect on peak flow and flood volume and the sensitivity analysis shows that more detailed models are more sensitive. The resulting conclusions are very important and can be a trigger for a more detailed study of the Nedon basin or investigation of other basins in Greece and worldwide.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	ix
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	xi
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Γενική τοποθέτηση.....	1
1.2 Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας	2
1.3 Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας.....	3
2 ΘΕΣΜΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ - ΟΔΗΓΙΑ 2007/60/ΕΚ.....	5
2.1 Βασικές έννοιες	5
2.2 Προκαταρκτική αξιολόγηση κινδύνων πλημμύρας	6
2.3 Χάρτες πλημμυρικής επικινδυνότητας και διακινδύνευσης	6
2.4 Σχέδια διαχείρισης κινδύνων πλημμύρας.....	7
3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ	9
3.1 Υδρολογικά μοντέλα	9
3.2 Επίδραση της διακριτοποίησης της λεκάνης σε υπολεκάνες	10
4 ΛΕΚΑΝΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	15
4.1 Γενικά.....	15
4.2 Λόγοι επιλογής της λεκάνης.....	16
4.3 Γεωμορφολογία λεκάνης.....	19
4.4 Γεωλογία λεκάνης	20
4.4.1 Λιθολογία.....	20
4.4.2 Υδρολιθολογία	22
4.5 Χρήσεις γης.....	23
4.6 Διακριτοποίηση σε υπολεκάνες	25
5 ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ	27
5.1 Όμβριες καμπύλες	27
5.2 Επιφανειακή αναγωγή σημειακής έντασης βροχής.....	30
5.3 Χαρακτηριστικά χρονικά μεγέθη	31
5.3.1 Χρόνος συγκέντρωσης.....	31
5.3.2 Εμπειρικές μέθοδοι εκτίμησης του χρόνου συγκέντρωσης	31
5.3.3 Χρόνος υστέρησης.....	32
5.3.4 Συσχέτιση χρόνου συγκέντρωσης με την ένταση βροχής.....	33
5.3.5 Εφαρμογή στη λεκάνη μελέτης.....	33

5.3.6	Χρονικά μεγέθη υετογραφημάτων.....	36
5.4	Παραγωγή υετογραφημάτων σχεδιασμού.....	36
6	ΑΡΙΘΜΟΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΚΑΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΛΛΕΙΜΜΑΤΩΝ... 39	
6.1	Αριθμός καμπύλης απορροής CN	39
6.2	Μέθοδος απωλειών NRCS-CN	42
6.2.1	Θεωρητικό υπόβαθρο.....	42
6.2.2	Εφαρμογή στη λεκάνη μελέτης.....	43
6.3	Συσχέτιση αριθμού καμπύλης απορροής και συντελεστή απορροής.....	45
7	ΔΙΟΔΕΥΣΗ 47	
7.1	Γενικά.....	47
7.2	Μέθοδος Muskingum	48
7.3	Μέθοδος χρονικής υστέρησης.....	51
7.4	Εφαρμογή στη λεκάνη μελέτης.....	52
8	ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ 55	
8.1	Στόχος ανάλυσης.....	55
8.2	Δεδομένα της αριθμητικής εφαρμογής	55
8.3	Μεθοδολογία	56
8.4	Αποτελέσματα ανάλυσης	58
9	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΛΕΚΑΝΗΣ ΝΕΛΟΝΤΑ..... 63	
9.1	Προσομοίωση στο λογισμικό HEC-HMS.....	63
9.2	Αποτελέσματα	66
10	ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ..... 75	
10.1	Γενικά.....	75
10.2	Μεταβολή πλάτους τραπεζοειδούς διατομής.....	76
10.3	Μεταβολή συντελεστή τραχύτητας κατά Manning.....	79
10.4	Μεταβολή αριθμού καμπύλης απορροής CN.....	81
10.5	Μεταβολή χρονικού βήματος Δt	83
11	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ 85	
11.1	Σύνοψη	85
11.2	Συμπεράσματα.....	86
11.3	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	87
12	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ..... 89	

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 4-1: Παροχές προηγούμενων μελετών στη λεκάνη απορροής του Νέδοντα.....	17
Πίνακας 5-1: Συντεταγμένες των πλησιέστερων σταθμών και παράμετροι των όμβριων καμπυλών τους.....	28
Πίνακας 5-2: Παράμετροι της όμβριας καμπύλης σε επίπεδο λεκάνης.....	28
Πίνακας 5-3: Χρόνοι συγκέντρωσης και συρροής των υπολεκανών του Νέδοντα σε κάθε διακριτοποίηση.....	35
Πίνακας 6-1: Αριθμός καμπύλης απορροής, μέγιστη δυνητική κατακράτηση και αρχικό έλλειμμα των υπολεκανών του Νέδοντα σε κάθε διακριτοποίηση.....	44
Πίνακας 7-1: Υδραυλικά μεγέθη ορθογωνικής και τραπεζοειδούς διατομής.....	52
Πίνακας 10-1: Ποσοστιαία μεταβολή της παροχής αιχμής στην ανάλυση ευαισθησίας του πλάτους διατομής για βροχή με περίοδο επαναφοράς 10 έτη.....	77
Πίνακας 10-2: Ποσοστιαία μεταβολή της παροχής αιχμής στην ανάλυση ευαισθησίας του πλάτους διατομής για βροχή με περίοδο επαναφοράς 50 έτη.....	77
Πίνακας 10-3: Ποσοστιαία μεταβολή της παροχής αιχμής στην ανάλυση ευαισθησίας του πλάτους διατομής για βροχή με περίοδο επαναφοράς 100 έτη.....	77
Πίνακας 10-4: Ποσοστιαία μεταβολή της παροχής αιχμής στην ανάλυση ευαισθησίας του συντελεστή τραχύτητας κατά Manning για βροχή με περίοδο επαναφοράς 10 έτη.....	79
Πίνακας 10-5: Ποσοστιαία μεταβολή της παροχής αιχμής στην ανάλυση ευαισθησίας του συντελεστή τραχύτητας κατά Manning για βροχή με περίοδο επαναφοράς 50 έτη.....	79
Πίνακας 10-6: Ποσοστιαία μεταβολή της παροχής αιχμής στην ανάλυση ευαισθησίας του συντελεστή τραχύτητας κατά Manning για βροχή με περίοδο επαναφοράς 100 έτη.....	79
Πίνακας 10-7: Ποσοστιαία μεταβολή της παροχής αιχμής στην ανάλυση ευαισθησίας του αριθμού CN για βροχή με περίοδο επαναφοράς 10 έτη.....	81
Πίνακας 10-8: Ποσοστιαία μεταβολή της παροχής αιχμής στην ανάλυση ευαισθησίας του αριθμού CN για βροχή με περίοδο επαναφοράς 50 έτη.....	81
Πίνακας 10-9: Ποσοστιαία μεταβολή της παροχής αιχμής στην ανάλυση ευαισθησίας του αριθμού CN για βροχή με περίοδο επαναφοράς 100 έτη.....	81

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1-1: Κύριοι άξονες της εργασίας σε σχέση με την διερεύνηση της διακριτοποίησης της λεκάνης σε υπολεκάνες.....	3
Σχήμα 4-1: Λεκάνη μελέτης.....	15
Σχήμα 4-2: Υδρογραφικό δίκτυο και ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων λεκάνης απορροής Νέδοντα	16
Σχήμα 4-3: Υφιστάμενοι αναβαθμοί στη λεκάνη απορροής του Νέδοντα (πηγή: Κουτσογιάννης 2022).....	18
Σχήμα 4-4: Κλίσεις της λεκάνης απορροής του Νέδοντα σε μούρες	19
Σχήμα 4-5: Υψομετρική καμπύλη της λεκάνης απορροής του Νέδοντα.....	20
Σχήμα 4-6: Λιθολογικοί σχηματισμοί της λεκάνης απορροής του Νέδοντα	21
Σχήμα 4-7: Κατηγορίες υδροπερατότητας των πετρωμάτων της λεκάνης απορροής του Νέδοντα.....	23
Σχήμα 4-8: Χρήσεις γης κατά Corine 2018 στην λεκάνη απορροής του Νέδοντα.....	24
Σχήμα 4-9: Κατανομή χρήσεων γης στην λεκάνη απορροής του Νέδοντα	25
Σχήμα 4-10: Χωρικά μοντέλα της λεκάνης απορροής του Νέδοντα (α) αδιαμέριστη λεκάνη και (β) 4, (γ) 7, (δ) 10, (ε) 21 υπολεκάνες	26
Σχήμα 5-1: Όμβρια καμπύλη της λεκάνης και των πλησιέστερων σταθμών για βροχή με περίοδο επαναφοράς 10 έτη	28
Σχήμα 5-2: Όμβρια καμπύλη της λεκάνης και των πλησιέστερων σταθμών για βροχή με περίοδο επαναφοράς 50 έτη	29
Σχήμα 5-3: Όμβρια καμπύλη της λεκάνης και των πλησιέστερων σταθμών για βροχή με περίοδο επαναφοράς 100 έτη	29
Σχήμα 5-4: Όμβρια καμπύλη της λεκάνης και των πλησιέστερων σταθμών για βροχή με περίοδο επαναφοράς 500 έτη	29
Σχήμα 5-5: Όμβρια καμπύλη της λεκάνης για βροχή με περίοδο επαναφοράς 10, 50, 100 και 500 έτη.....	30
Σχήμα 5-6: Βροχογράφημα με διάρκεια 12 h, χρονικό βήμα 5 min και περίοδο επαναφοράς 10 έτη.....	37
Σχήμα 5-7: Βροχογράφημα με διάρκεια 12 h, χρονικό βήμα 5 min και περίοδο επαναφοράς 50 έτη.....	37
Σχήμα 5-8: Βροχογράφημα με διάρκεια 12 h, χρονικό βήμα 5 min και περίοδο επαναφοράς 100 έτη.....	38
Σχήμα 5-9: Βροχογράφημα με διάρκεια 12 h, χρονικό βήμα 5 min και περίοδο επαναφοράς 500 έτη.....	38
Σχήμα 6-1: Υδρολογικοί τύποι του εδάφους, ανάλογα με τη διαπερατότητά του, στην λεκάνη απορροής του Νέδοντα.....	40

Σχήμα 6-2: Πίνακας της SCS με τιμές του CN (πηγή: ΕΓΥ).....	41
Σχήμα 6-3: Σχέσεις μεταβολής του συντελεστή απορροής συναρτήσει του ολικού ύψους βροχής, για διάφορες τιμές του αριθμού καμπύλης απορροής, για συντελεστή αρχικών ελλειμμάτων $\alpha=0.05$	46
Σχήμα 6-4: Σχέσεις μεταβολής του αριθμού καμπύλης απορροής συναρτήσει της απορροής, για διάφορες τιμές του ολικού ύψους βροχής, για συντελεστή αρχικών ελλειμμάτων $\alpha=0.05$	46
Σχήμα 8-1: Κατανομή αριθμών καμπύλης απορροής στην περίπτωση των 80 υπολεκανών της θεωρητικής λεκάνης, για συντελεστή μεταβλητότητας (α) 5%, (β) 10%, (γ) 15%, (δ) 20% ..	57
Σχήμα 8-2: Ποσοστιαία μεταβολή της απορροής σε σχέση με το ύψος βροχής των διαφορετικών διακριτοποιήσεων ως προς την αδιαμέριστη λεκάνη για συντελεστή μεταβλητότητας του CN 5%	58
Σχήμα 8-3: Ποσοστιαία μεταβολή της απορροής σε σχέση με το ύψος βροχής των διαφορετικών διακριτοποιήσεων ως προς την αδιαμέριστη λεκάνη για συντελεστή μεταβλητότητας του CN 10%	59
Σχήμα 8-4: Ποσοστιαία μεταβολή της απορροής σε σχέση με το ύψος βροχής των διαφορετικών διακριτοποιήσεων ως προς την αδιαμέριστη λεκάνη για συντελεστή μεταβλητότητας του CN 15%	59
Σχήμα 8-5: Ποσοστιαία μεταβολή της απορροής σε σχέση με το ύψος βροχής των διαφορετικών διακριτοποιήσεων ως προς την αδιαμέριστη λεκάνη για συντελεστή μεταβλητότητας του CN 20%	59
Σχήμα 8-6: Ποσοστιαία μεταβολή της απορροής σε σχέση με το ύψος βροχής της περίπτωσης των 80 υπολεκανών ως προς την αδιαμέριστη λεκάνη για διαφορετικούς συντελεστές μεταβλητότητας του CN.....	60
Σχήμα 8-7: Ποσοστιαία μεταβολή της απορροής σε σχέση με το ύψος βροχής της περίπτωσης των 40 υπολεκανών ως προς την αδιαμέριστη λεκάνη για διαφορετικούς συντελεστές μεταβλητότητας του CN.....	60
Σχήμα 8-8: Ποσοστιαία μεταβολή της απορροής σε σχέση με το ύψος βροχής της περίπτωσης των 20 υπολεκανών ως προς την αδιαμέριστη λεκάνη για διαφορετικούς συντελεστές μεταβλητότητας του CN.....	60
Σχήμα 8-9: Ποσοστιαία μεταβολή της απορροής σε σχέση με το ύψος βροχής της περίπτωσης των 10 υπολεκανών ως προς την αδιαμέριστη λεκάνη για διαφορετικούς συντελεστές μεταβλητότητας του CN.....	61
Σχήμα 8-10: Ποσοστιαία μεταβολή της απορροής σε σχέση με το ύψος βροχής της περίπτωσης των 5 υπολεκανών ως προς την αδιαμέριστη λεκάνη για διαφορετικούς συντελεστές μεταβλητότητας του CN.....	61
Σχήμα 9-1: HEC-HMS (α) Δεδομένα εισόδου (Components) και (β) στοιχεία προσομοίωσης της φυσικής λεκάνης	64
Σχήμα 9-2: HEC-HMS (α) Περιγραφή του μοντέλου της υπολεκάνης, (β) Δεδομένα εισόδου του μοντέλου απωλειών και (γ) Δεδομένα εισόδου του μοντέλου απορροής	64

Σχήμα 9-3: HEC-HMS (α) Περιγραφή του μοντέλου του κόμβου, (β) Περιγραφή του μοντέλου του κλάδου και (γ) Δεδομένα εισόδου του μοντέλου διόδευσης στον κλάδο	65
Σχήμα 9-4: Παράδειγμα αποτύπωσης του υδρολογικού μοντέλου της λεκάνης του Νέδοντα στο HEC-HMS	65
Σχήμα 9-5: Πλημμυρογραφήματα της αδιαμέριστης λεκάνης για βροχή με περίοδο επαναφοράς 10, 50, 100 και 500 έτη	66
Σχήμα 9-6: Πλημμυρογραφήματα της διακριτοποίησης με 4 υπολεκάνες για βροχή με περίοδο επαναφοράς 10, 50, 100 και 500 έτη.....	66
Σχήμα 9-7: Πλημμυρογραφήματα της διακριτοποίησης με 7 υπολεκάνες για βροχή με περίοδο επαναφοράς 10, 50, 100 και 500 έτη.....	67
Σχήμα 9-8: Πλημμυρογραφήματα της διακριτοποίησης με 10 υπολεκάνες για βροχή με περίοδο επαναφοράς 10, 50, 100 και 500 έτη.....	67
Σχήμα 9-9: Πλημμυρογραφήματα της διακριτοποίησης με 21 υπολεκάνες για βροχή με περίοδο επαναφοράς 10, 50, 100 και 500 έτη.....	67
Σχήμα 9-10: Πλημμυρογραφήματα της ενιαίας λεκάνης και των διαφορετικών διακριτοποιήσεων για τη βροχή με περίοδο επαναφοράς 10 έτη.....	68
Σχήμα 9-11: Πλημμυρογραφήματα της ενιαίας λεκάνης και των διαφορετικών διακριτοποιήσεων για τη βροχή με περίοδο επαναφοράς 50 έτη.....	69
Σχήμα 9-12: Πλημμυρογραφήματα της ενιαίας λεκάνης και των διαφορετικών διακριτοποιήσεων για τη βροχή με περίοδο επαναφοράς 100 έτη.....	69
Σχήμα 9-13: Πλημμυρογραφήματα της ενιαίας λεκάνης και των διαφορετικών διακριτοποιήσεων για τη βροχή με περίοδο επαναφοράς 500 έτη.....	69
Σχήμα 9-14: Συσχέτιση των παροχών αιχμής και των διαφορετικών διακριτοποιήσεων με λογαριθμική σχέση, για βροχή με περίοδο επαναφοράς (α) 10 έτη, (β) 50 έτη, (γ) 100 έτη, (δ) 500 έτη.....	70
Σχήμα 9-15: Ποσοστιαία μεταβολή της παροχής αιχμής σε σχέση με το πλήθος των υπολεκανών των διαφορετικών διακριτοποιήσεων ως προς την αδιαμέριστη λεκάνη για διάφορα ύψη βροχής	71
Σχήμα 9-16: Ποσοστιαία μεταβολή του πλημμυρικού όγκου σε σχέση με το πλήθος των υπολεκανών των διαφορετικών διακριτοποιήσεων ως προς την αδιαμέριστη λεκάνη για διάφορα ύψη βροχής	71
Σχήμα 9-17: Συσχέτιση της ποσοστιαίας μεταβολής της παροχής αιχμής ως προς την αδιαμέριστη λεκάνη και των διαφορετικών διακριτοποιήσεων με γραμμική σχέση για βροχή με περίοδο επαναφοράς (α) 10 έτη, (β) 50 έτη, (γ) 100 έτη, (δ) 500 έτη.....	72
Σχήμα 9-18: Συσχέτιση της ποσοστιαίας μεταβολής του πλημμυρικού όγκου ως προς την αδιαμέριστη λεκάνη και των διαφορετικών διακριτοποιήσεων με γραμμική σχέση για βροχή με περίοδο επαναφοράς (α) 10 έτη, (β) 50 έτη, (γ) 100 έτη, (δ) 500 έτη.....	73
Σχήμα 10-1: Ανάλυση ευαισθησίας του πλάτους διατομής για βροχή με περίοδο επαναφοράς 10 έτη.....	78

Σχήμα 10-2: Ανάλυση ευαισθησίας του πλάτους διατομής για βροχή με περίοδο επαναφοράς 50 έτη.....	78
Σχήμα 10-3: Ανάλυση ευαισθησίας του πλάτους διατομής για βροχή με περίοδο επαναφοράς 100 έτη.....	78
Σχήμα 10-4: Ανάλυση ευαισθησίας του συντελεστή τραχύτητας κατά Manning για βροχή με περίοδο επαναφοράς 10 έτη	80
Σχήμα 10-5: Ανάλυση ευαισθησίας του συντελεστή τραχύτητας κατά Manning για βροχή με περίοδο επαναφοράς 50 έτη	80
Σχήμα 10-6: Ανάλυση ευαισθησίας του συντελεστή τραχύτητας κατά Manning για βροχή με περίοδο επαναφοράς 100 έτη	80
Σχήμα 10-7: Ανάλυση ευαισθησίας του αριθμού CN για βροχή με περίοδο επαναφοράς 10 έτη	82
Σχήμα 10-8: Ανάλυση ευαισθησίας του αριθμού CN για βροχή με περίοδο επαναφοράς 50 έτη	82
Σχήμα 10-9: Ανάλυση ευαισθησίας του αριθμού CN για βροχή με περίοδο επαναφοράς 100 έτη.....	82
Σχήμα 10-10: Ανάλυση ευαισθησίας του χρονικού βήματος βροχής και προσομοίωσης για βροχή με περίοδο επαναφοράς 50 έτη	83

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενική τοποθέτηση

Τις τελευταίες δεκαετίες οι επιπτώσεις των ακραίων φυσικών φαινομένων (πλημμύρες, πυρκαγιές, σεισμοί) είναι εξαιρετικά σημαντικές στο φυσικό και ανθρωπογενές περιβάλλον. Οι πλημμύρες είναι από τα πιο καταστροφικά φυσικά φαινόμενα που σχετίζονται με το νερό και ευθύνονται για την απώλεια ανθρώπινων ζώων, για ζημιές στις υποδομές και για οικονομικές απώλειες. Σήμερα, παρατηρείται αύξηση της συχνότητας, του μεγέθους και της έντασης των πλημμυρικών φαινομένων, και για αυτό υπάρχει μια παγκόσμια ευαισθητοποίηση για τον μετριασμό των επιπτώσεων των πλημμυρών (Papaioannou et al., 2018). Στη περιοχή της Μεσογείου υπάρχουν πολλές λεκάνες απορροής μικρού και μεσαίου μεγέθους, οι οποίες έχουν σημαντικές υψομετρικές μεταβολές. Πολλές από αυτές τις λεκάνες περιλαμβάνουν αστικές εκτάσεις στις πεδινές περιοχές, οι οποίες είναι ευάλωτες στις πλημμύρες. Σε αυτές τις λεκάνες τα έντονα γεγονότα βροχής συνήθως δημιουργούν πλημμύρες ταχείας απόκρισης (Papaioannou et al., 2018).

Η διαχείριση των αστικών πλημμυρών είναι εξαιρετικά δύσκολη λόγω των διαφορετικών μηχανισμών δημιουργίας πλημμυρών και των ποικίλων κλιματικών, τοπογραφικών, υδρολογικών και υδραυλικών συνθηκών. Ειδικότερα, η Ελλάδα είναι μια χώρα με ποικίλες γεωμορφολογικές, φυσιογραφικές και κλιματολογικές συνθήκες, οι οποίες επηρεάζουν τις υδρολογικές διεργασίες και την δημιουργία των πλημμυρών. Σύμφωνα με την βάση δεδομένων EM-DAT, κατά την περίοδο 1900-2020 στην Ελλάδα συνέβησαν 26 μεγάλες πλημμύρες που προκάλεσαν 123 θανάτους, επηρέασαν περίπου 24000 άτομα και κόστισαν 2.4 δισεκατομμύρια δολάρια (Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, 2023). Πιο πρόσφατα παραδείγματα πλημμυρών με καταστροφικές συνέπειες στην Ελλάδα είναι η πλημμύρα της Μάνδρας το 2017, το 2020 στη Θεσσαλία και ξανά στη Θεσσαλία το 2023.

Οι ολοένα αυξανόμενες απαιτήσεις για λεπτομερέστερη υδρολογική και υδραυλική ανάλυση των πλημμυρών προκύπτουν από την ανάγκη ανάπτυξης ανθεκτικότερων αντιπλημμυρικών έργων και αποτελεσματικότερων συστημάτων διαχείρισης του πλημμυρικού κινδύνου. Σε κάθε περίπτωση, σκοπός είναι η όσο το δυνατόν καλύτερη εκτίμηση των σημαντικότερων υδρολογικών και υδραυλικών μεγεθών που χαρακτηρίζουν μια πλημμύρα. Τα μεγέθη αυτά είναι τα εξής:

- η παροχή αιχμής (και η αντίστοιχη στάθμη στο υδατόρευμα)
- ο χρόνος εμφάνισης της αιχμής
- η συνολική απορροή που παράγεται κατά την πλημμύρα
- η χρονική διάρκεια εξέλιξης του φαινομένου
- το μέγιστο βάθος και οι ταχύτητες ροής που αναπτύσσονται κατά μήκος και εγκάρσια του υδατορεύματος
- η κατακλύσιμη έκταση και οι συναφείς επιπτώσεις

Στο πλαίσιο των μέτρων και έργων αντιπλημμυρικής προστασίας, η ανάλυση πραγματοποιείται σε επίπεδο λεκάνης απορροής και κύριος στόχος είναι η εκτίμηση της παροχής αιχμής και του πλημμυρικού όγκου στην έξοδο της λεκάνης, για κάποιο καθορισμένο επεισόδιο βροχής. Για τον σκοπό αυτό έχουν αναπτυχθεί διάφορα μοντέλα που προσομοιώνουν με διαφορετικό τρόπο τη χωρική κατανομή των φυσικών διεργασιών μετασχηματισμού της βροχόπτωσης σε απορροή εντός της εξεταζόμενης λεκάνης. Συνεπώς, η χωρική ανάλυση της λεκάνης είναι άμεσα συνυφασμένη με την εκτίμηση της απορροής, χωρίς, ωστόσο να έχει διερευνηθεί επαρκώς η επίδραση του επιπέδου της διακριτοποίησης μιας λεκάνης απορροής σε υπολεκάνες.

Ωστόσο, στη βιβλιογραφία η έρευνα της επίδρασης της χωρικής ανάλυσης του μοντέλου στην εκτίμηση της πλημμύρας δεν καταλήγει σε ξεκάθαρο συμπέρασμα, αφού υποστηρίζεται τόσο η αδρομερής αντιμετώπιση της λεκάνης απορροής ως ενιαία, όσο και η λεπτομερέστερη προσέγγιση με διαχωρισμό σε υπολεκάνες ή φατνία. Άρα υπάρχει ένα σημαντικό επιστημονικό κενό στο συγκεκριμένο θέμα. Η αύξηση της διακριτοποίησης έχει εσφαλμένα ταυτιστεί με την αύξηση της παροχής αιχμής και την απόδοση ακριβέστερων εκτιμήσεων. Σε κάποιες μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί οι θεωρήσεις αυτές επαληθεύονται, ενώ σε άλλες όχι, συνεπώς κάθε λεκάνη αποτελεί ξεχωριστή περίπτωση και δεν έχει προκύψει κάποιο γενικό συμπέρασμα μέχρι σήμερα. Μάλιστα, εγείρονται σοβαροί προβληματισμοί σχετικά με τις περισσότερες πηγές αβεβαιότητας που χαρακτηρίζουν τα πιο λεπτομερή μοντέλα, με αποτέλεσμα να αμφισβητείται η αξιοπιστία τους στη συνήθη περίπτωση που δεν είναι διαθέσιμα δεδομένα για βαθμονόμηση.

1.2 Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση της χωρικής ανάλυσης της λεκάνης απορροής του ποταμού Νέδοντα στην εκτίμηση κρίσιμων πλημμυρικών μεγεθών για διάφορα ύψη βροχής. Συγκρίνονται μοντέλα με διαφορετικό πλήθος υπολεκανών και πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας δεδομένων εισόδου, των οποίων η εκτίμηση χαρακτηρίζεται από υψηλή αβεβαιότητα.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να διερευνηθεί σε θεωρητικό και πρακτικό επίπεδο η επίδραση του επιπέδου της διακριτοποίησης σε υπολεκάνες στην εκτίμηση πλημμυρικών μεγεθών, για διάφορα ύψη βροχής, λαμβάνοντας υπόψη προχωρημένες μεθόδους για την εκτίμηση υδρολογικών και υδραυλικών παραμέτρων των μοντέλων.

Αρχικά, εξετάζεται η επίδραση του επιπέδου διακριτοποίησης μιας θεωρητικής λεκάνης στον πλημμυρικό όγκο. Η λεκάνη διακριτοποιείται σε 5, 10, 20, 40 και 80 υπολεκάνες και εφαρμόζονται διαφορετικά ύψη βροχής και διαφορετικά σενάρια ετερογένειας του αριθμού καμπύλης απορροής CN. Στη συνέχεια, διερευνάται και μια πραγματική λεκάνη απορροής. Επιλέγεται η λεκάνη απορροής του Νέδοντα, στην Καλαμάτα, η οποία είναι μεσαίου μεγέθους, έχει ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και έχει βρεθεί πολλές φορές στο ερευνητικό και μελετητικό επίκεντρο. Στην περίπτωση της λεκάνης του Νέδοντα, η λεκάνη διακριτοποιείται σε 4, 7, 10 και 21 υπολεκάνες, ενώ εξετάζεται και ως ενιαία. Σε κάθε μοντέλο εφαρμόζονται διαφορετικά ύψη βροχής και τέλος πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας μεταβάλλοντας παραμέτρους, των οποίων η εκτίμηση ενέχει μεγάλο βαθμό αβεβαιότητας (Σχήμα 1-1). Επισημαίνεται ότι στόχος της παρούσας εργασίας δεν είναι η βαθμονόμηση των μοντέλων, αλλά η καταγραφή των διαφορών τους.



Σχήμα 1-1: Κύριοι άξονες της εργασίας σε σχέση με την διερεύνηση της διακριτοποίησης της λεκάνης σε υπολεκάνες

1.3 Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια γενικότερη τοποθέτηση του προβλήματος και των λόγων για τους οποίους είναι σημαντική η διερεύνησή του. Παρουσιάζονται συνοπτικά ο σκοπός και οι βασικοί άξονες της παρούσας εργασίας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται εκτενής παρουσίαση του θεσμικού πλαισίου, δηλαδή της Οδηγίας 2007/60/ΕΚ, που σχετίζεται με τις πλημμύρες. Ορίζονται βασικές έννοιες και αναλύεται το μεθοδολογικό πλαίσιο που προτείνεται στην οδηγία. Το πλαίσιο περιλαμβάνει την προκαταρκτική αξιολόγηση των κινδύνων πλημμύρας, τους χάρτες επικινδυνότητας πλημμύρας και τους χάρτες κινδύνων πλημμύρας και, τέλος, τα σχέδια διαχείρισης των κινδύνων πλημμύρας.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρατίθεται εκτενής βιβλιογραφική επισκόπηση σχετικά με τα υδρολογικά μοντέλα και την επίδραση της διακριτοποίησης σε υπολεκάνες σε διάφορα υδρολογικά μεγέθη.

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά η γεωμορφολογία, η γεωλογία και η κατανομή των χρήσεων γης της λεκάνης μελέτης. Εξηγούνται αναλυτικά οι λόγοι για τους οποίους επιλέγεται η λεκάνη του Νέδοντα για τη συγκεκριμένη μελέτη.

Στο πέμπτο κεφάλαιο καταρτίζεται το μοντέλο της βροχόπτωσης σχεδιασμού για τη λεκάνη μελέτης. Πριν την τελική παραγωγή των υετογραφημάτων για περίοδο επαναφοράς 10, 50, 100 και 500 έτη αναλύεται το θεωρητικό υπόβαθρο της παραγωγής τους με χρήση των όμβριων καμπυλών και ορίζονται βασικά χρονικά μεγέθη, δηλαδή ο χρόνος συγκέντρωσης, ο χρόνος συρροής (ή χρόνος συγκέντρωσης), που αποτελούν χαρακτηριστικά των υπολεκανών, η διάρκεια βροχόπτωσης και η χρονική διακριτοποίησης της βροχής.

Στο έκτο κεφάλαιο ορίζεται ο αριθμός καμπύλης απορροής CN και αναλύεται η εφαρμογή του στον υπολογισμό των αρχικών ελλειμμάτων της βροχής με τη μέθοδο NRCS-CN. Επίσης, αναδεικνύεται η συσχέτιση του αριθμού καμπύλης απορροής με τον συντελεστή απορροής.

Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συνήθη μοντέλα διόδευσης που εφαρμόζονται στα υδρολογικά μοντέλα. Στην λεκάνη μελέτης εφαρμόζεται η μέθοδος χρονικής υστέρησης και αναλύεται η υδραυλική προσέγγιση της μεθόδου.

Στο όγδοο κεφάλαιο αναπτύσσεται το παράδειγμα της τυχαίας, θεωρητικής λεκάνης (μορφής τυχαίου πεδίου), στην οποία εξετάζεται η συσχέτιση του πλήθους των υπολεκανών, της ετερογένειας του CN και των διαφορετικών υψών βροχής με την παραγόμενη απορροή.

Στο ένατο κεφάλαιο ορίζονται τα δεδομένα εισόδου της λεκάνης του Νέδοντα στο υδρολογικό μοντέλο HEC-HMS και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των βασικών αναλύσεων.

Στο δέκατο κεφάλαιο παρατίθεται η ανάλυση ευαισθησίας των μοντέλων της λεκάνης του Νέδοντα στη μεταβολή κρίσιμων παραμέτρων.

Τέλος, στο ενδέκατο κεφάλαιο συνοψίζονται οι στόχοι της παρούσας εργασίας και παρατίθενται τα βασικά συμπεράσματα των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν.

2 ΘΕΣΜΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ - ΟΔΗΓΙΑ 2007/60/ΕΚ

2.1 Βασικές έννοιες

Το έντονο ενδιαφέρον που παρατηρείται παγκοσμίως για τις επιπτώσεις των πλημμυρικών φαινομένων, σε συνδυασμό με μια σειρά πρόσφατων καταστροφικών πλημμυρών στην Ευρώπη (κυρίως οι πλημμύρες του Δούναβη και του Έλβα το καλοκαίρι του 2002), οι οποίες προκάλεσαν μείζονες υλικές καταστροφές και απώλειες ανθρώπινων ζώων, συνέβαλε στο να αναδειχθεί με εμφατικό τρόπο η κρισιμότητα του προβλήματος. Για την μείωση των κινδύνων από τις πλημμύρες και των συνεπειών τους, το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και το Συμβούλιο εξέδωσαν την Οδηγία 2007/60/ΕΚ για την αξιολόγηση και διαχείριση της πλημμυρικής διακινδύνευσης (assessment and management of flood risk). Ο σχετικός νόμος ψηφίστηκε στις 23/10/2007 και τέθηκε σε ισχύ από τις 26/11/2007. Η Οδηγία θέτει ως κεντρικό στόχο τη μείωση των αρνητικών συνεπειών που συνδέονται με την πλημμύρα όσον αφορά στην ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον, την πολιτιστική κληρονομιά και τις οικονομικές δραστηριότητες.

Στο Άρθρο 2 της οδηγίας ορίζονται δύο κομβικές έννοιες:

- Ως πλημμύρα (flood) ορίζεται η προσωρινή κάλυψη από νερό εδάφους το οποίο, υπό φυσιολογικές συνθήκες, δεν καλύπτεται από νερό. Αυτός ο ορισμός περιλαμβάνει πλημμύρες από ποτάμια, ορεινούς χείμαρρους, εφήμερα ρεύματα της Μεσογείου και πλημμύρες από τη θάλασσα σε παράκτιες περιοχές, δύναται δε να εξαιρεί πλημμύρες από συστήματα αποχέτευσης.
- Ως κίνδυνος πλημμύρας ή πλημμυρική διακινδύνευση (flood risk) ορίζεται ο συνδυασμός της πιθανότητας να λάβει χώρα πλημμύρα και των δυνητικών αρνητικών συνεπειών για την ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον, την πολιτιστική κληρονομιά και τις οικονομικές δραστηριότητες, που συνδέονται με αυτή την πλημμύρα.

Το μεθοδολογικό πλαίσιο που προτείνεται στην οδηγία αποτελείται από τα εξής τμήματα:

- Η προκαταρκτική αξιολόγηση των κινδύνων πλημμύρας
- Οι χάρτες επικινδυνότητας πλημμύρας και οι χάρτες κινδύνων πλημμύρας
- Τα σχέδια διαχείρισης των κινδύνων πλημμύρας

2.2 Προκαταρκτική αξιολόγηση κινδύνων πλημμύρας

Η δραστηριότητα αυτή περιγράφεται στο Άρθρο 4 και, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, έχει ήδη ολοκληρωθεί. Σύμφωνα με το εν λόγω άρθρο, για κάθε περιοχή λεκάνης απορροής ποταμού ή τμήμα διεθνούς περιοχής λεκάνης απορροής ποταμού που βρίσκεται στην επικράτειά τους, τα κράτη μέλη διεξάγουν προκαταρκτική αξιολόγηση κινδύνων πλημμύρας. Η προκαταρκτική εκτίμηση βασίζεται σε διαθέσιμες και γενικά εύκολα υπολογιζόμενες πληροφορίες, και περιλαμβάνει:

- Χάρτες σε κατάλληλη κλίμακα, που απεικονίζουν τα όρια των λεκανών (ή παράκτιων ζωνών), τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά τους και τις χρήσεις γης.
- Περιγραφικά δεδομένα πλημμυρών που σημειώθηκαν κατά το παρελθόν και είχαν σημαντικές αρνητικές επιπτώσεις στις ανθρώπινες ζωές, στις οικονομικές δραστηριότητες και στο περιβάλλον, εφόσον υπάρχει ακόμη πιθανότητα παρόμοιων μελλοντικών συμβάντων (στην περιγραφή αναφέρονται η έκταση της πλημμύρας, οι οδοί αποστράγγισης και οι σχετικές επιπτώσεις).
- Αξιολόγηση των δυνητικών αρνητικών συνεπειών μελλοντικών πλημμυρών, με βάση στοιχεία όπως η τοπογραφία, η θέση και τα όρια των υδατορευμάτων, τα υδρολογικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά τους, η αποτελεσματικότητα των υφιστάμενων αντιπλημμυρικών έργων, η θέση των κατοικημένων περιοχών και των περιοχών οικονομικής δραστηριότητας καθώς και οι μακροπρόθεσμες δυνητικές εξελίξεις.

2.3 Χάρτες πλημμυρικής επικινδυνότητας και διακινδύνευσης

Στο Άρθρο 6 ορίζεται ότι για τις περιοχές που χαρακτηρίζονται, με βάση την προκαταρκτική εκτίμηση της πλημμυρικής διακινδύνευσης του Άρθρου 4, ως δυνητικές περιοχές υψηλής διακινδύνευσης, καταρτίζονται χάρτες επικινδυνότητας και χάρτες κινδύνων πλημμύρας, σε κατάλληλη κλίμακα.

Συγκεκριμένα, οι χάρτες επικινδυνότητας πλημμύρας (flood hazard maps) προσδιορίζουν τις γεωγραφικές περιοχές που πλημμυρίζουν, σύμφωνα με τα ακόλουθα σενάρια:

- πλημμύρες χαμηλής πιθανότητας υπέρβασης (δηλαδή ακραία φαινόμενα)
- πλημμύρες μέσης πιθανότητας υπέρβασης (με περίοδο επαναφοράς της τάξης των 100 ετών)
- πλημμύρες υψηλής πιθανότητας υπέρβασης (δηλαδή συχνά φαινόμενα)

Στους χάρτες πλημμυρικής επικινδυνότητας περιγράφονται τα ακόλουθα υδραυλικά μεγέθη, ανά σενάριο:

- η έκταση της πλημμύρας
- ο χρόνος παραμονής των υδάτων σε χαρακτηριστικές θέσεις
- τα βάθη ροής ή η απόλυτη στάθμη νερού σε χαρακτηριστικές θέσεις
- η ταχύτητα ροής ή η σχετική ροή των υδάτων, εφόσον κρίνεται αναγκαίο

Αντίστοιχα, στους χάρτες κινδύνων πλημμύρας (flood risk maps) απεικονίζονται οι δυνητικές αρνητικές επιπτώσεις αρνητικών των πλημμυρών, που αναφέρονται στα τρία σενάρια επικινδυνότητας. Στους χάρτες δίνονται οι ακόλουθες πληροφορίες, ανά σενάριο:

- ο ενδεικτικός αριθμός κατοίκων που ενδέχεται να πληγούν

- ο τύπος της οικονομικής δραστηριότητας στην περιοχή που ενδέχεται να πληγεί
- οι εγκαταστάσεις που ενδέχεται να προκαλέσουν τυχαία ρύπανση σε περίπτωση πλημμύρας και προστατευόμενες περιοχές που ενδέχεται να πληγούν
- οι περιοχές στις οποίες υπάρχει το ενδεχόμενο πλημμυρών με αυξημένο ποσοστό μεταφερόμενων ιζημάτων και πλημμυρών που μπορεί να προκαλέσουν ροή λάσπης ή κατολισθήσεις
- πληροφορίες για πιθανές άλλες σημαντικές πηγές ρύπανσης

Για τις παράκτιες περιοχές, στις οποίες παρέχεται επαρκές επίπεδο προστασίας, καθώς και τις περιοχές με πλημμύρες οφειλόμενες σε υπόγεια ύδατα, η κατάσταση χαρτών πλημμυρικής επικινδυνότητας περιορίζεται σενάριο που αναφέρεται σε ακραία φαινόμενα.

2.4 Σχέδια διαχείρισης κινδύνων πλημμύρας

Με βάση τους χάρτες επικινδυνότητας και κινδύνου, καταρτίζονται συντονισμένα σχέδια διαχείρισης, σε κατάλληλη κλίμακα, όπως προδιαγράφεται στα Άρθρα 7 και 8. Ειδικότερα, στο Άρθρο 8 ρυθμίζονται ζητήματα διαχείρισης πλημμυρών και κατάρτισης σχετικών σχεδίων σε διακρατικές λεκάνες. Γενικά, τα σχέδια διαχείρισης του πλημμυρικού κινδύνου αποσκοπούν στη μείωση των δυνητικών αρνητικών συνεπειών για την ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον, την πολιτιστική κληρονομιά και την οικονομική δραστηριότητα, προωθώντας μη κατασκευαστικά μέτρα και δράσεις για τη διαχείριση της διακινδύνευσης ή/και για τη μείωση της πιθανότητας εμφάνισης πλημμύρας. Για το σκοπό αυτό λαμβάνονται υπόψη συναφείς πτυχές, όπως:

- τα οικονομικά μεγέθη (κόστη και οφέλη)
- τα υδραυλικά χαρακτηριστικά της πλημμύρας (κατακλύσιμη έκταση, διαδρομές και περιοχές αποστράγγισης, περιοχές ανάσχεσης)
- οι περιβαλλοντικοί στόχοι του άρθρου 4 της Οδηγίας 2000/60/ΕΚ
- η διαχείριση του εδάφους και των υδατικών πόρων
- ο χωροταξικός σχεδιασμός, οι χρήσεις γης, και οι προστατευόμενες περιοχές
- η ναυσιπλοΐα και οι λιμενικές υποδομές

Τα σχέδια διαχείρισης εστιάζουν στο τρίπτυχο πρόληψη, προστασία και ετοιμότητα, και για το σκοπό αυτό εξάλλου προβλέπουν την ανάπτυξη συστημάτων πρόγνωσης πλημμυρών και συστημάτων έγκαιρης προειδοποίησης. Σύμφωνα με την Οδηγία, στα σχέδια δίνεται έμφαση στις ακόλουθες συνιστώσες:

- την προώθηση βιώσιμων πρακτικών χρήσης γης
- τη βελτίωση της αναχαίτισης υδάτων
- την ελεγχόμενη κατάκλυση συγκεκριμένων περιοχών

Επισημαίνεται ότι, με βάση το Άρθρο 7, κάθε παρέμβαση, έργο ή μέτρο που σχετίζεται με τη διαχείριση των πλημμυρών οφείλει να εντάσσονται στο συντονισμένο αυτό σχέδιο. Επιπλέον, υπό το πρίσμα της αρχής της αλληλεγγύης (solidarity), το πλαίσιο που θεσπίζει ένα κράτος μέλος δεν επιτρέπεται να περιλαμβάνει μέτρα που αυξάνουν σημαντικά την πλημμυρική διακινδύνευση, ανάντη ή κατάντη, σε άλλες χώρες στην ίδια λεκάνη ή υπολεκάνη απορροής ποταμού, εκτός αν έχει γίνει συντονισμός των μέτρων αυτών και έχει βρεθεί συμφωνημένη λύση μεταξύ των ενδιαφερόμενων κρατών μελών.

3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

3.1 Υδρολογικά μοντέλα

Ο όρος υδρολογικό μοντέλο αναφέρεται σε ένα ευρύ φάσμα μαθηματικών μετασχηματισμών που χρησιμοποιούν δεδομένα πεδίου και εύλογες υποθέσεις σχετικά με τους φυσικούς μηχανισμούς, με στόχο την ποσοτική εκτίμηση υδρολογικών μεταβλητών (Ευστρατιάδης κ.ά., 2012). Τα μοντέλα αυτά είτε περιγράφουν:

- Μεμονωμένα γεγονότα, όπως ένα υδρογράφημα ή την αιχμή μιας πλημμύρας. Η αναπαράσταση του γεγονότος γίνεται μέσω εμπειρικών, συνήθως, προσεγγίσεων (π.χ. ορθολογική μέθοδος, μοναδιαίο υδρογράφημα), χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι διεργασίες του υδρολογικού κύκλου που δεν αφορούν στη μελέτη, όπως η εξατμοδιαπνοή και η διήθηση.
- Τη διαχρονική εξέλιξη του υδρολογικού κύκλου σε μια πεπερασμένη χωρική ενότητα (π.χ. μια λεκάνη απορροής). Η προσέγγιση διέπεται, εν μέρει από κάποιο φυσικό ή εννοιολογικό υπόβαθρο, αναπαριστώντας σε συνεχή χρόνο τις κύριες, τουλάχιστον, διεργασίες που επηρεάζουν τον κύκλο του νερού, με τη χρήση εργαλείων προσομοίωσης.

Η ποσότητα αλλά και η ποιότητα των διαθέσιμων δεδομένων αποτελεί, συχνά, τον κύριο περιοριστικό παράγοντα σε μια μελέτη. Αυτό συμβαίνει, διότι η επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας, που θεωρητικά εξασφαλίζεται από τη χρήση αναλυτικότερων σχημάτων προσομοίωσης, προσκρούει στην ανεπάρκεια υδρολογικών μετρήσεων και άλλων δεδομένων.

Γενικά, τα υδρολογικά μοντέλα κατατάσσονται σε επιμέρους κατηγορίες, ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής τους, τη χωρική τους κλίμακα, τη μαθηματική τους δομή και τη χρονική διακριτότητα. Το πεδίο εφαρμογής μπορεί να είναι μια λεκάνη απορροής ή ένας υπόγειος υδροφορέας. Όσον αφορά στη χρονική κλίμακα, μεγάλης χρονικής διακριτότητας μοντέλα χρησιμοποιούνται, γενικά, για διαχειριστικούς σκοπούς υδατικών πόρων σε μηνιαία ή ημερήσια κλίμακα, ενώ αντίθετα στα μοντέλα μικρής χρονικής διακριτότητας εφαρμόζεται ωριαίο ή μικρότερο χρονικό βήμα. Ανάλογα με τη μαθηματική δομή τα μοντέλα διακρίνονται σε μοντέλα φυσικής βάσης, εννοιολογικά, στατιστικά-στοχαστικά και μοντέλα μαύρου κουτιού. Τα μοντέλα φυσικής βάσης αναπαριστούν τις υδρολογικές διεργασίες μικρής κλίμακας, βασιζόμενα σε φυσικούς νόμους και ημιεμπειρικές σχέσεις. Τα εννοιολογικά μοντέλα χρησιμοποιούν μαθηματικά ανάλογα για την αναπαράσταση των υδρολογικών

διεργασιών. Τα στατιστικά-στοχαστικά μοντέλα προσεγγίζουν πιθανοτικά τις υδρολογικές διεργασίες. Τέλος, τα μοντέλα μαύρου κουτιού αναπτύσσουν δομή και παραμέτρους που δεν έχουν φυσική ερμηνεία αλλά προκύπτουν από μια αυτοματοποιημένη διαδικασία.

Ανάλογα με τη χωρική κλίμακα τα μοντέλα διακρίνονται σε αδιαμέριστα ή συγκεντρωτικά (lumped), ημικατανεμημένα (semi-distributed), ημιδιαμέριστα (semi-lumped) και κατανεμημένα (distributed). Στα αδιαμέριστα μοντέλα αναπαρίσταται το υδατικό ισοζύγιο σε μία ενιαία λεκάνη απορροής για την εκτίμηση της απορροής στην έξοδο της. Σε όλη την επιφάνεια της λεκάνης οι παράμετροι και χρονοσειρές φόρτισης είναι ενιαίες. Στα ημικατανεμημένα μοντέλα η λεκάνη απορροής διακριτοποιείται σε υπολεκάνες, όπου η κάθε μία υπολεκάνη έχει διαφορετικά υδρολογικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά. Στη περίπτωση αυτή, η απορροή στην έξοδο της λεκάνης υπολογίζεται εφαρμόζοντας μεθόδους διόδευσης. Ανάμεσα στα αδιαμέριστα και ημικατανεμημένα μοντέλα θεωρούνται τα ημιδιαμέριστα. Σε αυτά εφαρμόζονται διακριτές χωρικές ενότητες με διαφορετικές φορτίσεις. Τόσο στα ημικατανεμημένα όσο και στα ημιδιαμέριστα η φόρτιση μπορεί να είναι διαφορετική στις διάφορες υπολεκάνες και υπολογίζεται η απορροή που παράγεται από κάθε επιμέρους υπολεκάνη. Η διακριτοποίηση της λεκάνης απορροής σε φατνία οδηγεί στη θεώρηση των κατανεμημένων μοντέλων, όπως το κινηματικό κύμα. Σε κάθε φατνίο είναι δυνατό να εφαρμοστεί διαφορετική φόρτιση και διαφορετικές τιμές παραμέτρων. Η ανάλυση της διακριτοποίησης επιλέγεται από τον μελετητή. Γενικά, όσο πιο αδρομερής είναι η σχηματοποίηση της λεκάνης, τόσο πιο ταχεία είναι η προσομοίωση (Ευστρατιάδης κ.ά., 2012).

3.2 Επίδραση της διακριτοποίησης της λεκάνης σε υπολεκάνες

Τα αδιαμέριστα μοντέλα χρησιμοποιούνταν για περισσότερα από πενήντα χρόνια ως υδρολογικά εργαλεία εκτίμησης απορροής στην έξοδο της λεκάνης. Ωστόσο, η τεχνική αυτή απαιτεί πολλές υποθέσεις και γενικεύσεις που συχνά στρεβλώνουν τα υδρολογικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης. Για παράδειγμα, λαμβάνεται ενιαίος εδαφικός τύπος και ενιαία χρήση γης σε όλη την έκταση της λεκάνης, με αποτέλεσμα οι μέσοι όροι των παραμέτρων αυτών να μην αποτελούν αντιπροσωπευτικές τιμές.

Τα κατανεμημένα μοντέλα λαμβάνουν υπόψη την χωρική ετερογένεια των υδρολογικών και γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών μιας λεκάνης. Για αυτόν τον λόγο, έχει επικρατήσει η άποψη ότι αυτά τα μοντέλα αναμένεται να εκτιμούν με καλύτερη ακρίβεια τις απορροές πλημμυρικών γεγονότων. Η υπόθεση, όμως, ότι τα ημικατανεμημένα και κατανεμημένα μοντέλα, που έχουν μεγαλύτερη χωρική ανάλυση, είναι πιο ακριβή σε σχέση με τα αδιαμέριστα δεν έχει τεκμηριωθεί επαρκώς βιβλιογραφικά, καθώς σε λίγες μόνο περιπτώσεις έχει φανεί η υπεροχή τους. Η ακρίβεια αυτών των μοντέλων εξαρτάται κυρίως από την ποιότητα της προσομοίωσης της διόδευσης και, μάλιστα, δεν έχει αναπτυχθεί έως σήμερα μια επαρκής στρατηγική βαθμονόμησης των παραμέτρων της διόδευσης για αυτά τα μοντέλα.

Αναφορικά με το επίπεδο λεπτομέρειας της υδρολογικής προσομοίωσης, οι Loague and Freeze (1985) επισημαίνουν ότι οι απλούστερες προσομοιώσεις φαίνεται να αποδίδουν καλύτερα από τις συνθετότερες μεθόδους. Σύμφωνα με τους Hromadka II and DeVries (1986), η αυθαίρετη διακριτοποίηση σε υπολεκάνες πρέπει γενικά να αποφεύγεται. Επισημαίνουν πως η αύξηση του πλήθους των υπολεκανών δεν συνεπάγεται απαραίτητα και αύξηση της ακρίβειας της προσομοίωσης. Θεωρούν ότι η αξιοπιστία του μοντέλου μειώνεται, όταν αυξάνονται οι κλάδοι

διόδευσης μεταξύ των υπολεκανών, λόγω των αβεβαιοτήτων που προέρχονται από τα μοντέλα διόδευσης.

Οι Wood et al. (1988) διερεύνησαν τη σχέση μεταξύ του πλήθους των υπολεκανών και της απορροής στη λεκάνη του ποταμού Coweeta στην Βόρεια Καρολίνα των ΗΠΑ. Η συνολική λεκάνη έχει έκταση 16.8 km² και την διακριτοποίησαν σε 3, 19, 39 και 87 υπολεκάνες. Το ΨΜΕ που χρησιμοποίησαν είχε ανάλυση 30 m. Από τη μελέτη τους προέκυψε πως, για κατώφλι μικρότερο του 1 km², το υδρολογικό προσομοίωμα παρουσίαζε μεγάλη ευαισθησία με την αύξηση των υπολεκανών. Αντίθετα, για κατώφλι μεγαλύτερο του 1 km², η αύξηση των υπολεκανών δεν είχε σημαντική επίδραση στα αποτελέσματα.

Οι Sasowsky and Gardner (1991) εφάρμοσαν το μοντέλο SPUR σε μια λεκάνη 145 km² στην Αριζόνα των ΗΠΑ. Το μοντέλο SPUR λειτουργεί με ημερήσιο χρονικό βήμα και σχεδιάστηκε για επίπεδες λεκάνες απορροής. Η διακριτοποίηση σε υπολεκάνες πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον ΣΓΠ, με βάση την κατάταξη του υδρογραφικού δικτύου. Από την διαδικασία αυτή προέκυψαν 3 διαφορετικές διακριτοποιήσεις της λεκάνης με 3, 37 και 66 υπολεκάνες. Ακολουθώντας, βαθμονόμησαν το μοντέλο τους με βάση πραγματικές μετρήσεις βροχής-απορροής που είχαν διαθέσιμες. Τελικά, συμπέραναν ότι οι αναλύσεις ήταν πολύ ευαίσθητες στο επίπεδο διακριτοποίησης της λεκάνης.

Οι Norris and Haan (1993) χρησιμοποίησαν το MYG κατά SCS (NRCS σήμερα) για να μελετήσουν την επίδραση της διακριτοποίησης σε υπολεκάνες στην εκτίμηση της απορροής. Εξέτασαν την λεκάνη απορροής Little Washita που βρίσκεται κοντά στην Chickasha της Οκλαχόμα των ΗΠΑ και έχει έκταση περίπου 152 km². Η λεκάνη διακριτοποιήθηκε σε 2, 5, 10 και 15 υπολεκάνες, ενώ μελετήθηκε και ως ενιαία. Χρησιμοποιήθηκε υετογράφημα διάρκειας 24 ωρών και περιόδου επαναφοράς 50 ετών. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων έδειξαν ότι η αύξηση των υπολεκανών επιφέρει έντονη αύξηση της παροχής αιχμής. Απέδειξαν ότι η διακριτοποίηση σε υπολεκάνες έχει σημαντική επίδραση στην εκτίμηση της παροχής αιχμής, αφού η μετάβαση από την ενιαία λεκάνη στην περίπτωση των 5 και 15 υπολεκανών είχε ως αποτέλεσμα να αυξηθεί η παροχή αιχμής κατά 30% και 40%, αντίστοιχα. Ωστόσο, παρατήρησαν ότι η επίδραση της διακριτοποίησης στην παροχή αιχμής μειωνόταν με την αύξηση των υπολεκανών, αλλά επειδή το μοντέλο τους δεν ήταν βαθμονομημένο, δεν κατέληξαν σε κάποιο συμπέρασμα για την επιλογή της κατάλληλης διακριτοποίησης. Στο ίδιο συμπέρασμα κατέληξαν και οι Mamillapalli et al. (1996) που και αυτοί διερεύνησαν την επίδραση της διακριτοποίησης σε υπολεκάνες στην εκτίμηση της παροχής αιχμής εφαρμόζοντας το μοντέλο SWAT (Soil and Water Analysis Tool) της NRCS. Συμπέραναν πως, γενικά, η πυκνότερη διακριτοποίηση της λεκάνης αυξάνει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων, ωστόσο, στην ανάλυσή τους έδειξαν ότι υπάρχει ένα επίπεδο διακριτοποίησης πέραν του οποίου η ακρίβεια δεν βελτιώνεται με την αύξηση των υπολεκανών. Απέδειξαν, δηλαδή, ότι η λεπτομερέστερη προσομοίωση δεν οδηγεί αναγκαστικά σε πιο ακριβή αποτελέσματα.

Οι Tripathi et al. (2006) εφάρμοσαν το μοντέλο SWAT (Soil and Water Assessment Tool) στη λεκάνη απορροής Nagwan, στην ανατολική Ινδία. Η λεκάνη έχει έκταση 90 km² και διακριτοποιήθηκε σε 12 και 22 υπολεκάνες, ενώ μελετήθηκε και ως ενιαία. Το μοντέλο βαθμονομήθηκε με βάση μετρήσεις παλαιότερων ετών και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η επίδραση της διακριτοποίησης είναι μικρή στην παροχή αιχμής. Ωστόσο, άλλες υδρολογικές μεταβλητές, όπως η εξατμισοδιαπνοή, αυξάνονταν με την αύξηση της διακριτοποίησης.

Οι Thompson and Cleveland (2009) εξέτασαν την επίδραση της διακριτοποίησης σε υπολεκάνες στην περιοχή του Τέξας. Από τα αποτελέσματα της μελέτης τους προέκυψε ότι σε γενικές γραμμές η πυκνότερη διακριτοποίηση των εξεταζόμενων λεκανών απορροής δεν επέφερε παρά μικρή βελτίωση στην εκτίμηση της παροχής αιχμής. Αντίστοιχα ελάχιστη ή και μηδενική ήταν και η μεταβολή του πλημμυρικού όγκου στις διαφορετικές διακριτοποιήσεις. Επισημαίνουν ότι πρέπει να αποφεύγεται η υπερβολική διακριτοποίηση της λεκάνης, καθώς η προσομοίωση καθίσταται πιο πολύπλοκη και χρονοβόρα. Συνιστούν η διακριτοποίηση να είναι τόσο πυκνή ώστε να αναπαριστά τις πραγματικές συνθήκες στη λεκάνη απορροής. Χαρακτηρίζουν τη διόδευση μεταξύ των υπολεκανών ως σημαντική πηγή αβεβαιότητας, άρα το μεγάλο πλήθος των κλάδων διόδευσης στη περίπτωση της πυκνής διακριτοποίησης αυξάνει την ευαισθησία του προσομοιώματος. Γενικά, κατέληξαν ότι η διακριτοποίηση δεν οδηγεί σε βελτίωση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων και δεν πρέπει τα αναλυτικότερα προσομοιώματα να θεωρούνται άκριτα καλύτερα των απλούστερων.

Ο Braud (2009) στην εργασία του εξέτασε την επίδραση της διακριτοποίησης δύο λεκανών με πολύ ήπιες κλίσεις. Οι λεκάνες μελέτης βρίσκονται στις ΗΠΑ και πιο συγκεκριμένα στον ποταμό Μισισσιπή. Και οι δύο λεκάνες διακριτοποιήθηκαν σε 5 και >40 υπολεκάνες, ενώ αναλύθηκαν και ως ενιαίες. Από την μελέτη προέκυψε ότι η αύξηση της διακριτοποίησης έχει σημαντική επίδραση στα αποτελέσματα της ανάλυσης, με την παροχή αιχμής να αυξάνεται και τον χρόνο εμφάνισής της να μειώνεται. Μάλιστα, η μεταβολή των μεγεθών αυτών διαπιστώθηκε πως είναι μεγαλύτερη όσο μικρότερη είναι η περίοδος επαναφοράς της βροχής σχεδιασμού. Η μετάβαση από την ενιαία λεκάνη στη περίπτωση των 5 υπολεκανών επέφερε αύξηση του πλημμυρικού όγκου κατά μόλις 0.2% για βροχή με περίοδο επαναφοράς 10 έτη και 0.1% για βροχή με περίοδο επαναφοράς 100 έτη.

Οι Yu et al. (2012) διερεύνησαν την επίδραση της διακριτοποίησης μιας λεκάνης της Νότιας Κορέας στην απορροή της πλημμύρας. Πιο συγκεκριμένα, μελέτησαν την λεκάνη απορροής του ποταμού Pyeongchang που έχει έκταση περίπου 1800 km². Η μέση κλίση της λεκάνης είναι σχεδόν 40% και το μέσο υψόμετρο περίπου 592 m. Για την προσομοίωση χρησιμοποίησαν το λογισμικό HEC-HMS και εφάρμοσαν τη μέθοδο ModClark για την απορροή. Χρησιμοποίησαν τρεις χρονοσειρές βροχόπτωσης βασισμένες σε πραγματικές μετρήσεις και με τη μέθοδο αντίστροφων αποστάσεων (IDW) τις κατένειμαν σε όλη τη λεκάνη. Σε περιβάλλον ΣΓΠ διαμόρφωσαν ένα πυκνό υδρογραφικό δίκτυο και ακολούθως διακριτοποίησαν τη λεκάνη σε 3, 5, 6, 7, 9, 10, 12 και 15 υπολεκάνες, ενώ τη μελέτησαν και ως ενιαία. Σε κάθε περίπτωση διακριτοποίησης φρόντισαν οι υπολεκάνες να έχουν ίδιο εμβαδόν. Από την ανάλυση προέκυψε ότι όσο η διακριτοποίηση αυξανόταν η παροχή αιχμής αυξανόταν και ο χρόνος εμφάνισής της μειωνόταν. Ωστόσο, στις πολύ πυκνές διακριτοποιήσεις το πλημμυρογράφημα παρουσίαζε ανωμαλίες. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι συμπερασματικά προτείνουν δύο διαφορετικές διακριτοποιήσεις ως τις καταλληλότερες, με τη μια να αφορά στη βέλτιστη εκτίμηση της παροχής αιχμής και την άλλη να αφορά στο χρόνο εμφάνισης της αιχμής.

Οι Sordo-Ward et al. (2012) ασχολήθηκαν με τη μελέτη της λεκάνης απορροής του ποταμού Manzanares στην Ισπανία. Η συγκεκριμένη λεκάνη έχει έκταση 1242 km². Από την ανάλυση που έκαναν κατέληξαν στο συμπέρασμα πως, όταν σε κάποιο σημείο του υδρογραφικού δικτύου η ανάντη λεκάνη απορροής είναι μικρότερη των 600 km², τότε είναι μεγάλη η επίδραση της διακριτοποίησης της συνολικής λεκάνης σε υπολεκάνες. Η τάση αυτή παρατηρείται σε όλες τις εξεταζόμενες περιόδους επαναφοράς (100-10000 έτη).

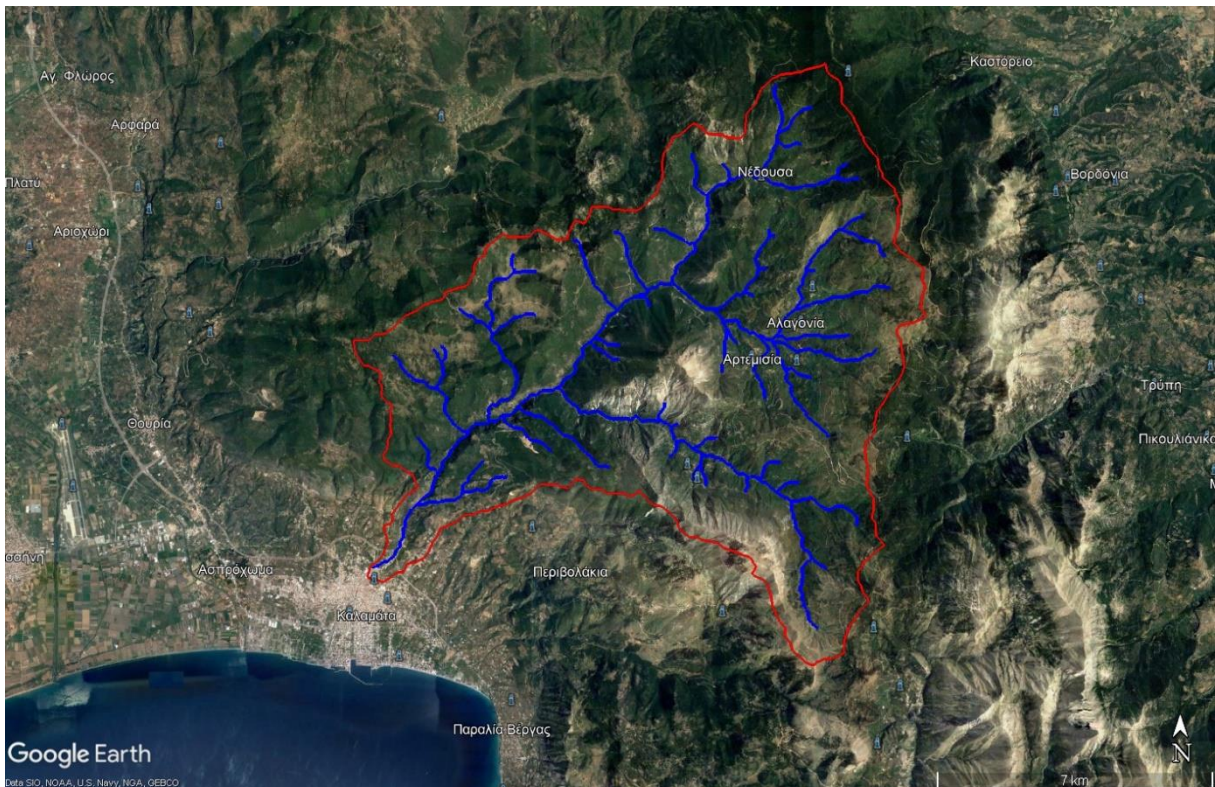
Κατά τους Sun et al. (2017) οι αβεβαιότητες των χωρικών δεδομένων της λεκάνης, που σχετίζονται με την τοπογραφία, το υδρογραφικό δίκτυο και τις χρήσεις γης επηρεάζουν την πλημμυρική απορροή. Συσχέτισαν τις αβεβαιότητες αυτές με την ανάλυση του ψηφιακού μοντέλου εδάφους και με την διακριτοποίηση σε υπολεκάνες. Μάλιστα, κατέληξαν πως το πλήθος των υπολεκανών είναι κρισιμότερος παράγοντας από την χωρική ανάλυση του ψηφιακού μοντέλου εδάφους. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποίησαν πλήθος σεναρίων στη λεκάνη απορροής του ποταμού Kaidu στην Κίνα. Πρόκειται για μια ορεινή λεκάνη με μεγάλη έκταση και έντονη τοπογραφία. Απέδειξαν πως η αύξηση του πλήθους των υπολεκανών οδηγεί σε αύξηση της παροχής αιχμής, γεγονός που οφείλεται στην αύξηση του συνολικού μήκους των κλάδων σύνδεσης των υπολεκανών. Η μεταβολή στην παροχή αιχμής φάνηκε να είναι πολύ εντονότερη όσο μεγάλωνε η ανάλυση του ΨΜΕ. Για μικρό αριθμό υπολεκανών παρατηρήθηκε μια αναλογία μεταξύ του ποσοστού αύξησης των υπολεκανών και του ποσοστού αύξησης της αιχμής, ενώ διαπιστώθηκε πως ο ρυθμός αύξησης της παροχής αιχμής μειώνεται όσο αυξάνει το πλήθος των υπολεκανών. Από τη βαθμονόμηση του μοντέλου, συμπέραναν πως η λεπτομερής χωρική διακριτοποίηση σε υπολεκάνες καθιστά το προσομοίωμα ρεαλιστικότερο, όμως η υπερβολικά λεπτομερής διακριτοποίηση δεν φάνηκε να έχει σημαντικά οφέλη.

Οι Fernandes et al. (2019), μελετώντας την λεκάνη απορροής του ποταμού Uberaba στη Βραζιλία, συμπέραναν πως το πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης παρέμεινε σχεδόν αμετάβλητο στις διαφορετικές περιπτώσεις διακριτοποίησης της λεκάνης. Αξιίζει να επισημανθεί πως η λεκάνη αυτή έχει γενικά μικρές κλίσεις.

4 ΛΕΚΑΝΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

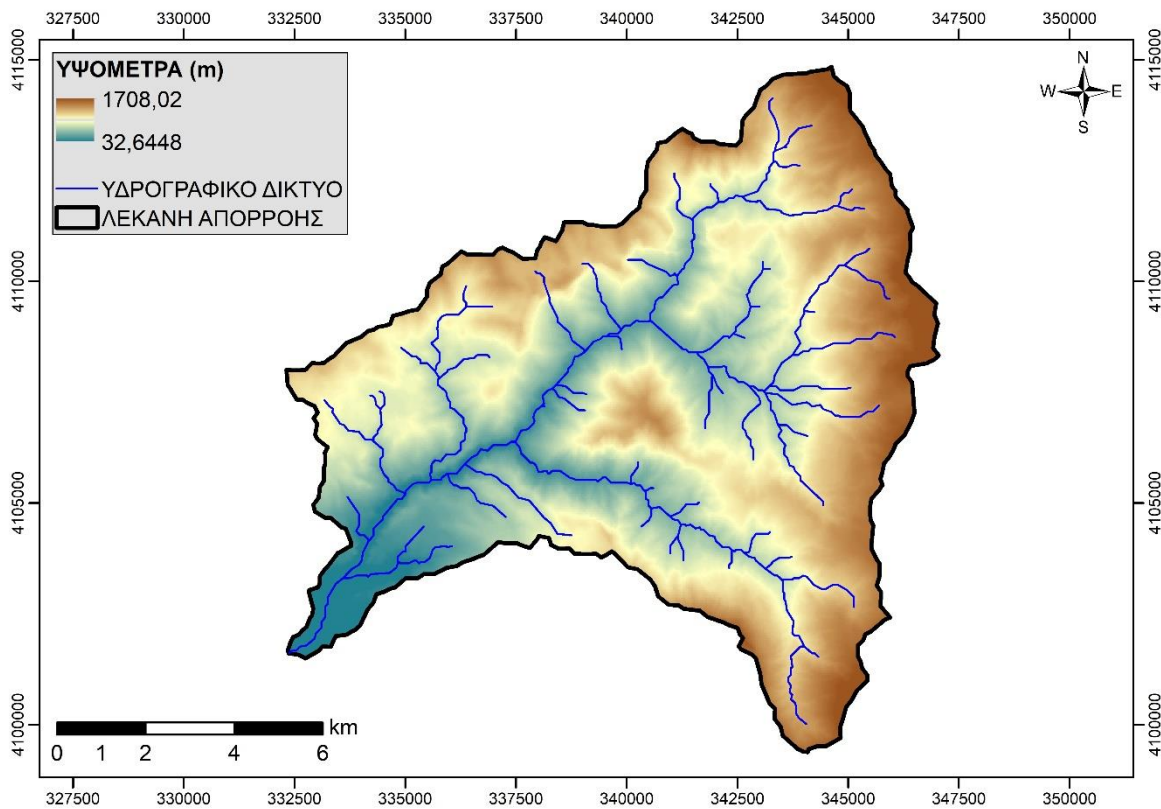
4.1 Γενικά

Στη παρούσα διπλωματική εργασία, η λεκάνη που επιλέγεται προς διερεύνηση της επίδρασης του επιπέδου διακριτοποίησής της στα πλημμυρικά μεγέθη είναι η λεκάνη απορροής του ποταμού Νέδοντα στην Καλαμάτα. Λόγω των ιδιοτεροτήτων της και των πλημμυρών που έχουν συμβεί στην περιοχή, η συγκεκριμένη λεκάνη έχει αποτελέσει αντικείμενο εκτεταμένης ερευνητικής δραστηριότητας και πλήθους μελετών αντιπλημμυρικής προστασίας. Συνεπώς, αξιολογείται ως σημαντική η διερεύνηση της επίδρασης της διακριτοποίησης της λεκάνης στα χαρακτηριστικά της πλημμύρας. Η λεκάνη του Νέδοντα έχει έκταση 121.25 km² και ανήκει διοικητικά στην Περιφερειακή Ενότητα της Μεσσηνίας, στον Δήμο Καλαμάτας. Διοικητικά, η λεκάνη μελέτης ανήκει στο Υδατικό Διαμέρισμα Δυτικής Πελοποννήσου (EL01).



Σχήμα 4-1: Λεκάνη μελέτης

Ο ποταμός Νέδων είναι από τα σημαντικότερα υδάτινα σώματα του Υδατικού Διαμερίσματος Δυτικής Πελοποννήσου. Ο ποταμός ξεκινά από ορεινή περιοχή βόρεια του Μαχαλά και κινείται νοτιοδυτικά μέσα από δασώδη έκταση. Περνά δυτικά από τους οικισμούς Μαχαλάς και Αλαγονία και στη συνέχεια κατευθύνεται βορειοδυτικά και έπειτα νοτιοδυτικά μέσα από δασώδεις εκτάσεις, ακολουθώντας την εθνική οδό Σπάρτης-Πύλου. Στη συνέχεια εισέρχεται στην Ζώνη Δυνητικά Υψηλού Κινδύνου Πλημμύρας (ΖΔΥΚΠ), περίπου 1 km πριν συναντήσει τον αυτοκινητόδρομο Τρίπολης-Καλαμάτας στα βόρεια της πόλης. Αφού διασχίσει τον αυτοκινητόδρομο, κινείται νοτιοδυτικά για περίπου 500 m και στη συνέχεια εισέρχεται στο αστικό τμήμα της πόλης της Καλαμάτας. Για τα υπόλοιπα 3.20 km μέχρι την εκβολή του ο ποταμός Νέδων διασχίζει την πόλη της Καλαμάτας με διευθετημένη κοίτη από σκυρόδεμα και αρκετά τεχνικά. Η πορεία του ακολουθεί την εθνική οδό Τρίπολης-Καλαμάτας. Σημειώνεται ότι σε ορισμένα τμήματα η διατομή είναι κλειστή και από πάνω έχουν διαμορφωθεί χώροι στάθμευσης. Η εκβολή του στη θάλασσα γίνεται δίπλα από τη μαρίνα της Καλαμάτας.



Σχήμα 4-2: Υδρογραφικό δίκτυο και ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων λεκάνης απορροής Νέδοντα

4.2 Λόγοι επιλογής της λεκάνης

Η λεκάνη του Νέδοντα αποτέλεσε μέρος του ερευνητικού προγράμματος «Δευκαλίων». Σκοπός του ερευνητικού ήταν η ανάπτυξη φυσικά εδραιωμένου εννοιολογικού-πιθανοτικού πλαισίου και υπολογιστικών εργαλείων για την εκτίμηση πλημμυρικών ροών στην Ελλάδα, σε συνθήκες υδροκλιματικής μεταβλητότητας. Για τις ανάγκες του ερευνητικού έργου αναπτύχθηκε ένα δίκτυο υδρομετρικών σταθμών σε χαρακτηριστικές θέσεις στη λεκάνη του Νέδοντα, για την ποιοτικότερη καταγραφή των χαρακτηριστικών μεγεθών. Το πλήθος των

δεδομένων που έχει συλλεχθεί είναι διαθέσιμο και ελεύθερα προσβάσιμο στο διαδίκτυο. Αυτές οι καταγραφές καθιστούν εύκολη την βαθμονόμηση και βελτιστοποίηση των μοντέλων.

Επιπλέον, η λεκάνη του Νέδοντα έχει βρεθεί στο επίκεντρο πλήθους υδραυλικών μελετών και έργων στην ευρύτερη περιοχή. Ενδεικτικά, τα έργα αυτά αφορούν την αποχέτευση των όμβριων υδάτων στον αστικό ιστό της Καλαμάτας, την κατασκευή οχετών για την εκτροπή όμορων ρεμάτων στη λεκάνη του Νέδοντα και την αποχέτευση των όμβριων υδάτων σε κοντινά συγκοινωνιακά έργα μείζονος σημασίας. Φυσικά, η μελέτη της λεκάνης του Νέδοντα, όπως και όλες οι λεκάνες της χώρας, συμπεριλήφθηκε στο Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας (ΣΔΚΠ).

Πίνακας 4-1: Παροχές προηγούμενων μελετών στη λεκάνη απορροής του Νέδοντα

Θέση	Μελέτη	Q ₅₀ (m ³ /s)	Q ₁₀₀ (m ³ /s)
Γέφυρα Σπάρτης	ΥΠΕΧΩΔΕ (Ιούνιος 2000)	259.7	316.7
Γέφυρα Σπάρτης	ΥΠΕΧΩΔΕ (Υδρολογία, 1999)	389.1	427.5
Γέφυρα Περιμετρικής	ΥΔΡΟΕΞΥΓΙΑΝΤΙΚΗ Α.Ε.-ΣΥΣΤΑΣ Α.Ε	451.7	568
Γέφυρα ΟΣΕ	ΟΣΕ (2014)-ΚΚ	292.5	-
Γέφυρα ΟΣΕ	ΟΣΕ (2014)-ΚΥ	488.0	-
Γέφυρα ΟΣΕ	ΟΣΕ (2014)-ΚΣ	440.2	-
Γέφυρα ΟΣΕ	ΥΔΡΟΕΞΥΓΙΑΝΤΙΚΗ Α.Ε.-ΣΥΣΤΑΣ Α.Ε	462.9	581.6
Εκβολή	ΥΠΕΧΩΔΕ (Ιούνιος 2000)	313.1	375.3
Εκβολή	ΣΔΚΠ	318.7	430.5
Εκβολή	ΥΠΕΧΩΔΕ (Υδρολογία, 1999)	390.3	429.4
Εκβολή	ΥΠΕΧΩΔΕ (όπως αναφέρεται στα ΣΔΚΠ)	560	
Εκβολή	ΥΔΡΟΕΞΥΓΙΑΝΤΙΚΗ Α.Ε.-ΣΥΣΤΑΣ Α.Ε	463.7	582.5

Οι διαφορές μεταξύ των εκτιμώμενων παροχών είναι αξιοσημείωτες. Η μεγάλη μεταβολή από μελέτη σε μελέτη οφείλεται στη χρήση διαφορετικών όμβριων καμπυλών και στη χρήση διαφορετικών μεθόδων εκτίμησης του χρόνου συγκέντρωσης. Από τη διαπίστωση αυτού του ζητήματος εύλογα εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- Η υδρολογική ανάλυση μιας λεκάνης εξαρτάται από πλήθος παραγόντων που ενέχουν μεγάλο βαθμό αβεβαιότητας.
- Το επίπεδο λεπτομέρειας της υδρολογικής προσομοίωσης μιας λεκάνης είναι καθοριστικός παράγοντας για τον βαθμό αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων της ανάλυσης.
- Πριν την υιοθέτηση των αποτελεσμάτων της υδρολογικής ανάλυσης, είναι σημαντικό να προηγηθεί βαθμονόμηση του μοντέλου με βάση πραγματικές μετρήσεις, αν και όπου αυτές είναι διαθέσιμες.

Στη συγκεκριμένη λεκάνη έχει παρατηρηθεί διαχρονικά πλήθος πλημμυρικών επεισοδίων με τα περισσότερα από αυτά να επηρεάζουν σημαντικά την πόλη της Καλαμάτας. Οι πλημμύρες στη λεκάνη απορροής του Νέδοντα απασχολούν το κράτος από τον 19^ο αιώνα. Αναφέρονται ιστορικές πλημμύρες τα έτη 1862, 1881, 1903, 1924, και 1929. Το 1890 το ελληνικό κράτος προώθησε με νόμο τη κατασκευή υδραυλικών έργων στον Νέδοντα, ωστόσο, όπως προκύπτει από τις καταγραφές και τα δημοσιεύματα της εποχής, μέχρι τη δεκαετία του 1920 δεν είχε υπάρξει αξιόλογη πρόοδος στη κατασκευή των έργων. Από τότε και ύστερα επιτεύχθηκε μείωση των πλημμυρικών συμβάντων, χάρη στα έργα που κατασκευάστηκαν, όχι μόνο στην Καλαμάτα, αλλά και στο σύνολο της λεκάνης. Το πιο πρόσφατο έντονο πλημμυρικό γεγονός που καταγράφεται στην ευρύτερη περιοχή συνέβη το 2016. Πιο συγκεκριμένα, σημειώθηκε ένα εξαιρετικά ακραίο και σπάνιο επεισόδιο καταιγίδας και πλημμύρας, που αργότερα αποτέλεσε πεδίο πλήθους αναλύσεων. Στην ευρύτερη περιοχή σημειώθηκαν σημαντικές ζημιές και πνίγηκαν τρεις άνθρωποι (Κουτσογιάννης, 2022).

Ένας ακόμη λόγος που επιλέγεται η λεκάνη του Νέδοντα είναι διότι αποτελεί μοναδικό ελληνικό πρότυπο, καθώς διαθέτει εξαιρετικά μεγάλο αριθμό έργων ορεινής υδρονομίας. Συγκεκριμένα, στη λεκάνη φαίνεται να έχουν κατασκευαστεί συνολικά 135 λιθόδημητα φράγματα συγκράτησης φερτών υλών (αναβαθμοί) και 558 ξηρολίθινα φράγματα, τα περισσότερα εκ των οποίων παραμένουν ουσιαστικά ή εν δυνάμει λειτουργικά (Κουτσογιάννης, 2022). Η ύπαρξη των αναβαθμών έχει δραστική επίδραση στην υδραυλική συμπεριφορά της πλημμύρας, καθώς μεταβάλλουν τη σημειακή κλίση του υδατορεύματος, προσφέρουν χώρο για αποθήκευση των φερτών, μειώνουν την ταχύτητα ροής, άρα διαχέουν το πλημμυρικό φαινόμενο στο χρόνο, και καταστρέφουν μέρος της ενέργειας της ροής. Συνεπώς, λόγω του πλήθους τους, είναι ενδιαφέρουσα η διερεύνηση της επίδρασης τους στην προσομοίωση. Ωστόσο, η λεπτομερής ποσοτικοποίηση της επίδρασης των αναβαθμών στην μείωση της πλημμυρικής αιχμής θα μπορούσε να γίνει μόνο στο πλαίσιο ενός αυτοτελούς ερευνητικού έργου.

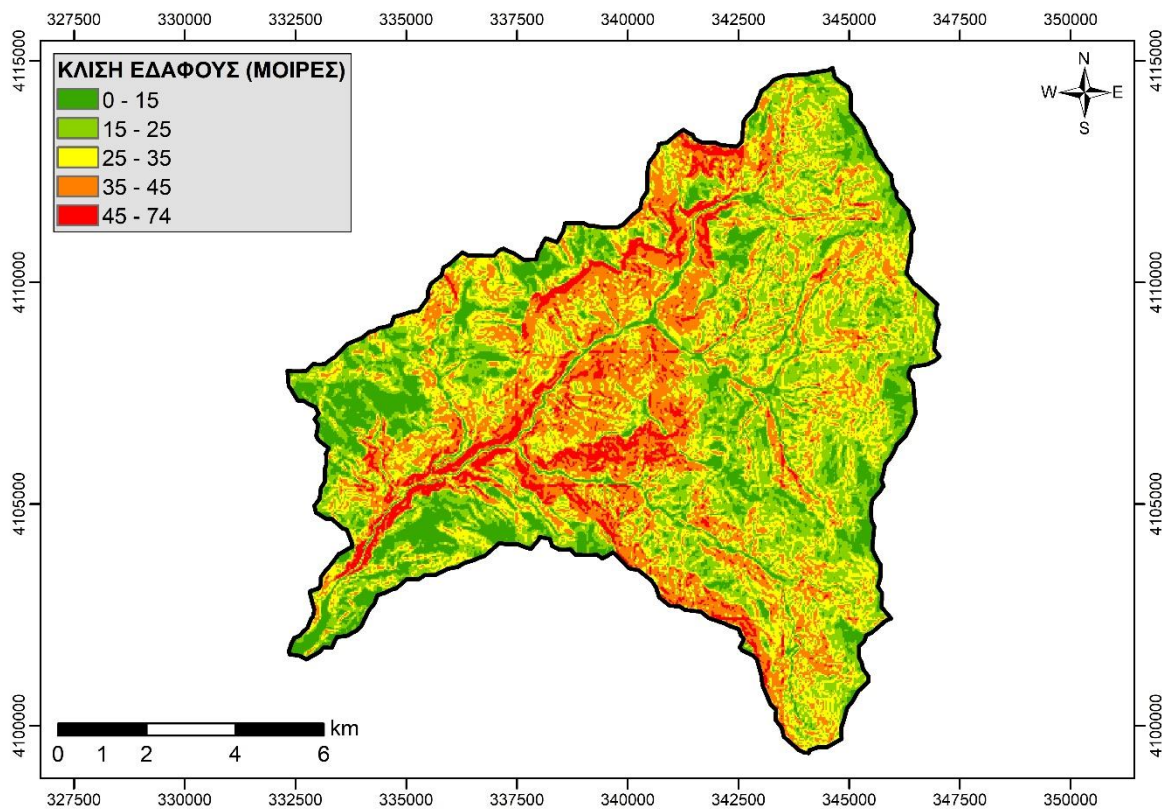


Σχήμα 4-3: Υφιστάμενοι αναβαθμοί στη λεκάνη απορροής του Νέδοντα (πηγή: Κουτσογιάννης 2022)

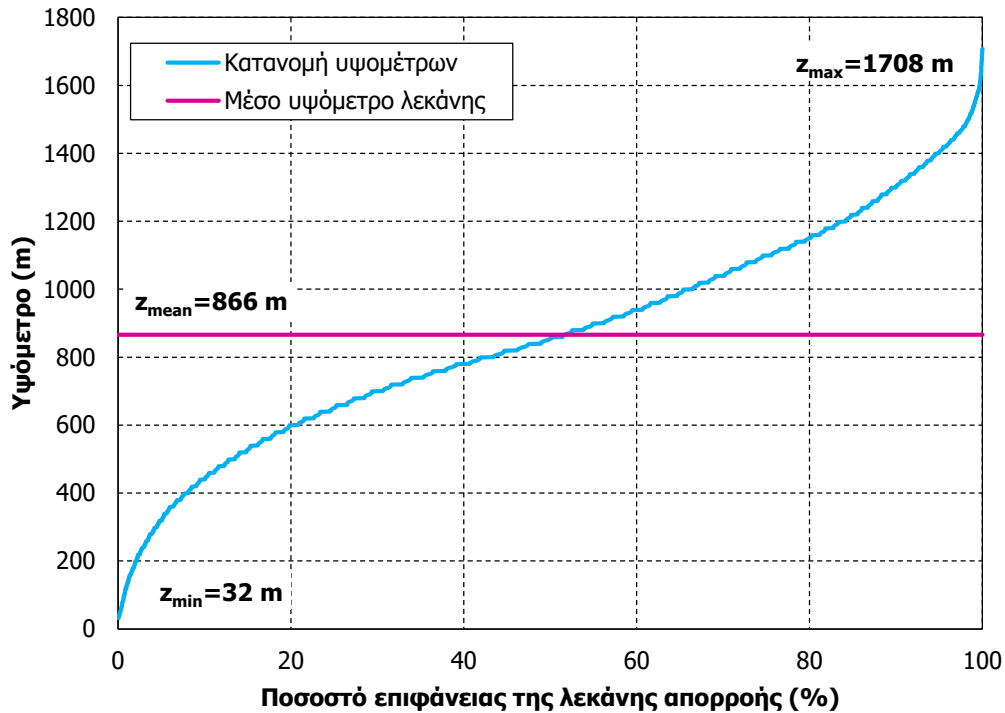
Τέλος, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα γεωλογικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης, τα οποία περιγράφονται εκτενώς σε επόμενο κεφάλαιο. Ενδεικτικά αναφέρονται οι έντονες κλίσεις και η ετερογένεια των πετρωμάτων μεταξύ του ΒΑ και ΝΔ τμήματος της λεκάνης.

4.3 Γεωμορφολογία λεκάνης

Η λεκάνη απορροής του ποταμού Νέδοντα βόρεια οριοθετείται από τα όρη Ξεροβούνια και Μαλεβός, νότια από το βουνό Πελενίτσα, ανατολικά τον Ταϋγετο και δυτικά τα όρη Γουβιά, Σφακωτό και Γούπατα Ράχη. Ο ποταμός εκβάλλει στο Μεσσηνιακό κόλπο, διασχίζοντας την πόλη της Καλαμάτας. Η ορεινή λεκάνη απορροής του έχει έντονο ανάγλυφο με μεγάλες κλίσεις και έντονη φυτοκάλυψη. Το υδρογραφικό δίκτυο είναι πυκνό και δενδριτικής ως επί το πλείστον μορφής. Όπως σε κάθε άλλο ποταμό, έτσι και στη περίπτωση του ποταμού Νέδοντα, η μορφολογία του υδρογραφικού δικτύου και της λεκάνης απορροής του ποταμού καθορίζεται δραστικά από τη λιθολογία της περιοχής. Το υπέδαφος στο δυτικό τμήμα της λεκάνης αποτελείται ως επί το πλείστον από ασβεστόλιθους, ενώ στο ανατολικό τμήμα από σχιστόλιθους. Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της λεκάνης απορροής είναι η βαθιά στενή χαράδρα, μήκους 9 km, που βρίσκεται μεταξύ της περιοχής Λαγού Χάνι και του στρατιωτικού πεδίου βολής, βόρεια της νέας χάραξης του αυτοκινητόδρομου Τρίπολη-Καλαμάτα.



Σχήμα 4-4: Κλίσεις της λεκάνης απορροής του Νέδοντα σε μοίρες



Σχήμα 4-5: Υψομετρική καμπύλη της λεκάνης απορροής του Νέδοντα

4.4 Γεωλογία λεκάνης

4.4.1 Λιθολογία

Ακολουθεί συνοπτική περιγραφή των γεωλογικών σχηματισμών της περιοχής:

Προνεογενή πετρώματα

Τα πετρώματα αυτά που εμφανίζονται στο μεγαλύτερο τμήμα της λεκάνης και από τα νεότερα προς τα πιο παλιά αποτελούνται από:

- Τριτογενή (Παλαιογενές- Ηώκαινο)

Στρώματα φλύσχη (ft) τα οποία ανήκουν στη ζώνη της Τρίπολης και αποτελούνται από εναλλασσόμενα στρώματα ψαμμιτών, ιλυόλιθων και κροκαλοπαγών. Ασβεστόλιθοι (Em-Pc.k), ανήκουν στη ζώνη της Τρίπολης είναι μεσοστρωματώδεις και βρίσκονται κάτω από τα στρώματα του φλύσχη.

- Κρητιδικό

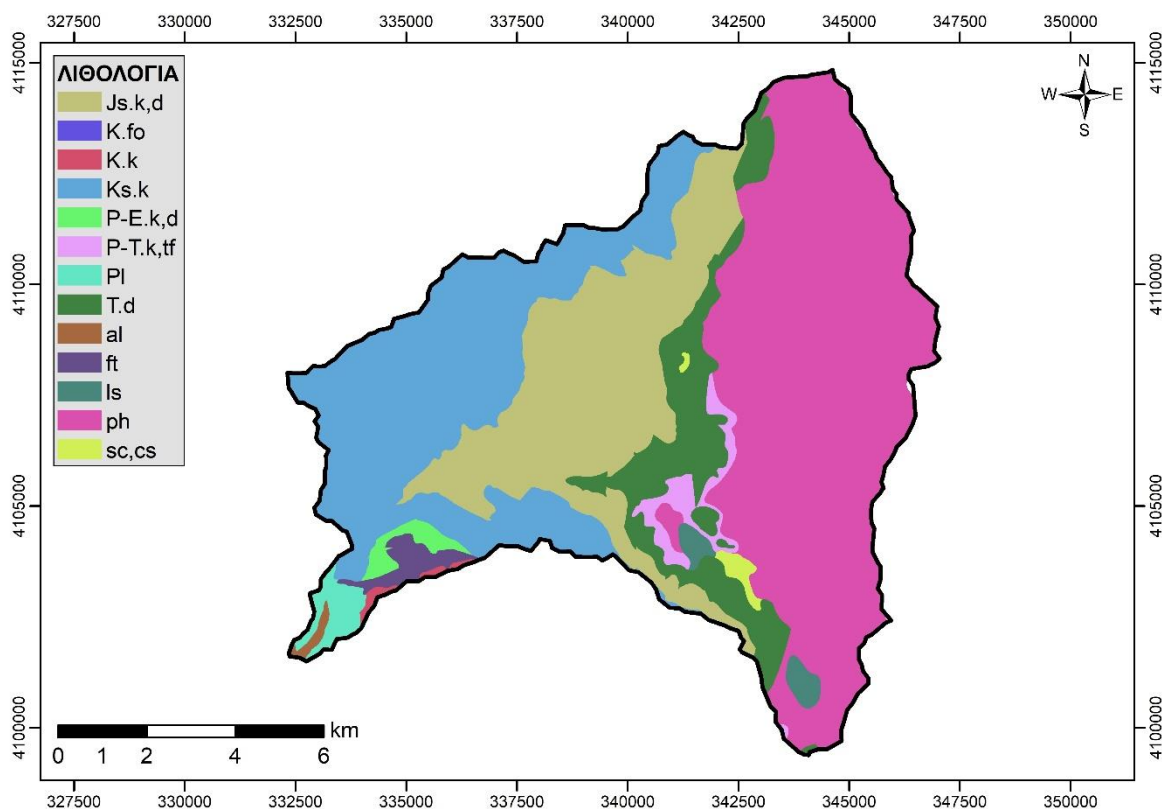
Ασβεστόλιθοι (K7-8-K), οι οποίοι ανήκουν στη ζώνη της Πίνδου, είναι αρκετά κερματισμένοι και λόγω επώθησης βρίσκονται πάνω από τα στρώματα του φλύσχη της ζώνης της Τρίπολης. Κατά θέσεις περιέχουν στρώσεις από πυριτόλιθους ή κερατόλιθους. Ασβεστόλιθοι και δολομίτες (K-k), ανήκουν στη ζώνη της Τρίπολης είναι αμιγείς και αρκετά κερματισμένοι.

- **Ιουρασικό**
Ασβεστόλιθοι (J-k), ανήκουν στη ζώνη της Τρίπολης, είναι αμιγείς και αρκετά κερματισμένοι. Σχιστοκερατόλιθοι (J.ki.fl), ανήκουν στη ζώνη της Πίνδου και θεωρούνται ότι αντιπροσωπεύουν τον πρώτο φλύσχη.
- **Τριαδικό**
Ασβεστόλιθοι και δολομίτες (Tm-s.k.d), ανήκουν στη ζώνη της Τρίπολης και είναι έντονα κερματισμένοι.
- **Πέρμιο**
Φυλλιτική-Χαλαζιτική σειρά (C-P.ph), αποτελούνται από φυλλίτες, χαλαζίτες και διαφόρων τύπων σχιστόλιθους.

Νεογενή και Τεταρτογενή ιζήματα

Τα Πλειοκαινικά στρώματα εμφανίζονται μόνο στο νότιο τμήμα της υδρολογικής λεκάνης και αποτελούνται από:

- Μάργες (Pl.m.k), κυρίως, ενώ στη βάση έχουμε κροκαλοπαγή.
- Χερσαίες αναβαθμίδες (Pl.t), που αποτελούνται από ερυθρές αργίλους, αργιλώδεις άμμους και κερατολιθικές κροκάλες ή λατύπες στη βάση.

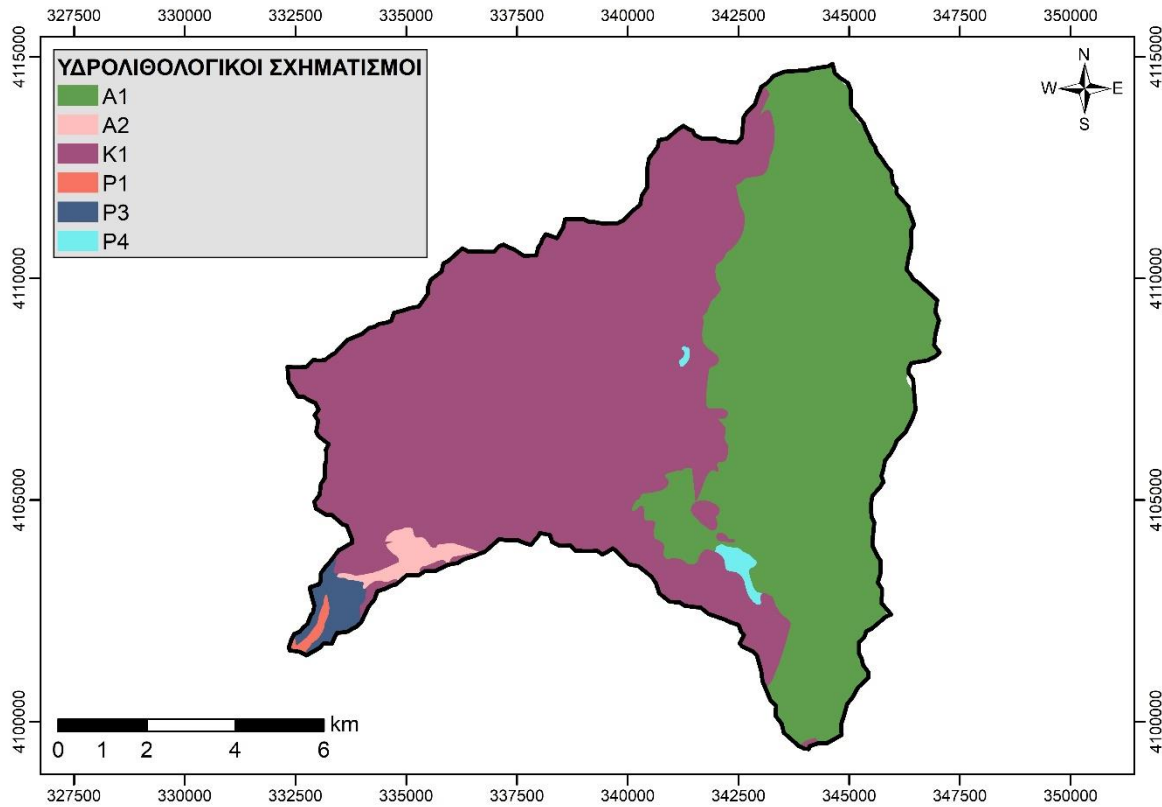


Σχήμα 4-6: Λιθολογικοί σχηματισμοί της λεκάνης απορροής του Νέδοντα

4.4.2 Υδρολιθολογία

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί από τους οποίους αποτελείται η λεκάνη του Νέδοντα, μπορούν να καταταγούν στις παρακάτω κατηγορίες με βάση την υδροπερατότητα που παρουσιάζουν:

- Βραχώδεις σχηματισμοί μέτριας έως υψηλής υδροπερατότητας (K1)
Στους βραχώδεις σχηματισμούς με υψηλή περατότητα κατατάσσονται τα ασβεστολιθικά στρώματα τα οποία είναι αμιγή και αρκετά κερματισμένα. Αυτοί οι σχηματισμοί καταλαμβάνουν το 44.16% της υδρολογικής λεκάνης.
- Βραχώδεις σχηματισμοί μέτριας υδροπερατότητας (K2)
Στους βραχώδεις σχηματισμούς με μέτρια περατότητα κατατάσσονται τα ασβεστολιθικά στρώματα τα οποία δεν είναι αμιγή αλλά περιέχουν στρώσεις σχιστόλιθων ή πυριτόλιθων. Αυτοί οι σχηματισμοί καταλαμβάνουν μόλις το 8.58% της όλης έκτασης της υδρολογικής λεκάνης.
- Βραχώδεις σχηματισμοί πρακτικά αδιαπέρατοι (A1)
Σε αυτήν την κατηγορία κατατάσσονται τα στρώματα του φλύσχη, οι κερατόλιθοι και τα στρώματα της φυλλιτικής-χαλαζιτικής σειράς. Αυτοί οι σχηματισμοί καταλαμβάνουν το 40.82% της όλης έκτασης της υδρολογικής λεκάνης.
- Βραχώδεις σχηματισμοί με επιλεκτική κυκλοφορία νερού (A2)
Στους βραχώδεις σχηματισμούς με επιλεκτική κυκλοφορία του νερού κατατάσσονται τα ασβεστολιθικά στρώματα του Ηώκαινου τα οποία δεν είναι αμιγή αλλά περιέχουν και αργιλομαργαϊκές στρώσεις. Αυτοί οι σχηματισμοί καταλαμβάνουν το 2.52% της υδρολογικής λεκάνης.
- Υδροπερατοί εδαφικοί σχηματισμοί (P1)
Στην ομάδα (P1), δηλαδή στα εδάφη υψηλής υδροπερατότητας, κατατάσσονται οι σύγχρονες αποθέσεις της παράκτιας περιοχής, οι αποθέσεις μέσα στις κοίτες των μεγαλύτερων ρεμάτων, καθώς και τα πλευρικά κορήματα. Αυτοί οι σχηματισμοί καταλαμβάνουν το 1.73% της όλης έκτασης της υδρολογικής λεκάνης.
- Συνεκτικοί σχηματισμοί μέτριας περατότητας (P2)
Σε αυτήν την ομάδα κατατάσσονται τα στρώματα των κροκαλοπαγών και οι χερσαίες αναβαθμίδες. Καταλαμβάνουν το 2.19% της έκτασης της υδρολογικής λεκάνης.



Σχήμα 4-7: Κατηγορίες υδροπερατότητας των πετρωμάτων της λεκάνης απορροής του Νέδοντα

4.5 Χρήσεις γης

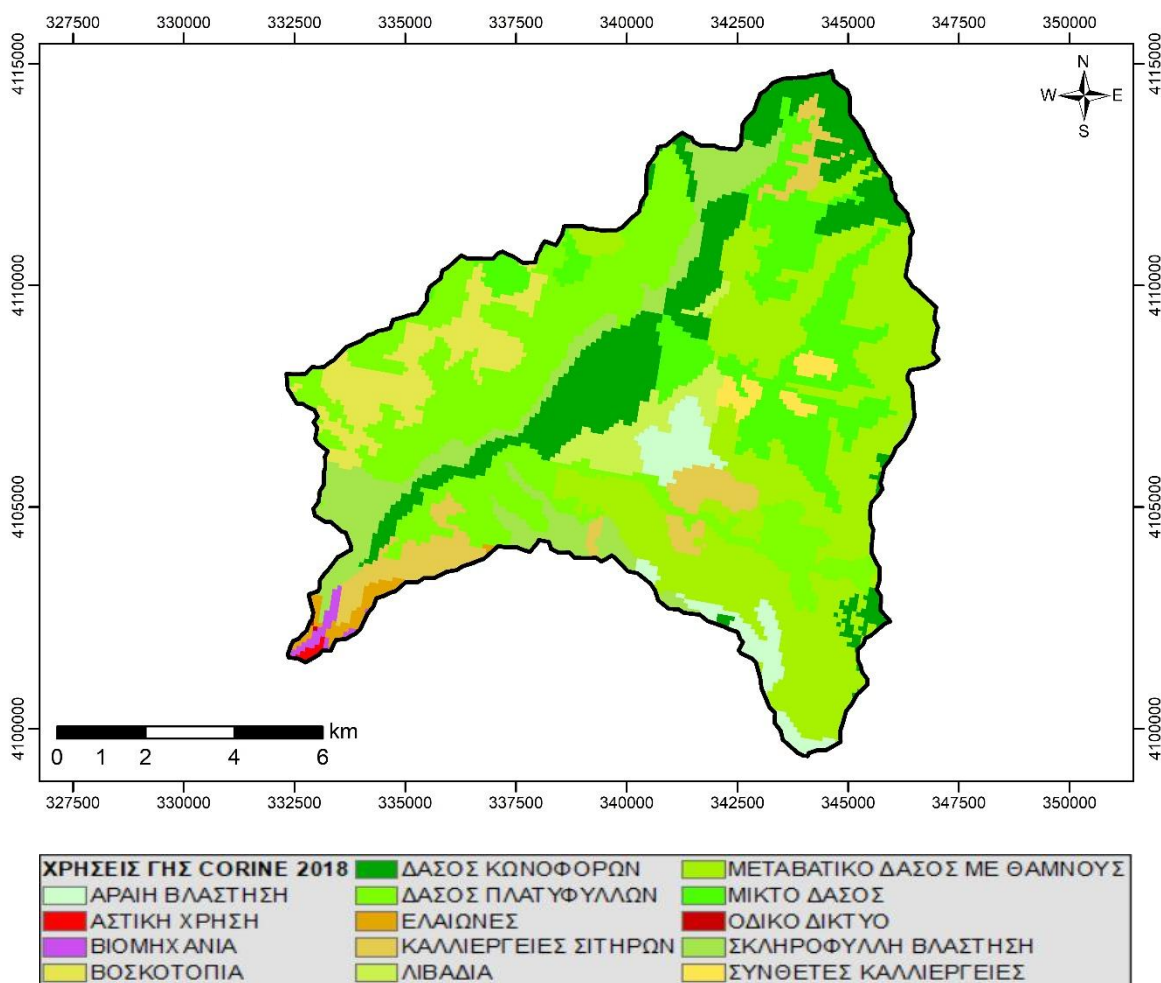
Οι χρήσεις γης είναι ένα εργαλείο ερμηνείας της υδρολογικής απόκρισης της λεκάνης, καθώς ενσωματώνουν πληροφορίες σχετικά με την διηθητικότητα και την απορροή της λεκάνης. Οι χρήσεις γης, γενικά, και ειδικά η φυτοκάλυψη, επηρεάζουν με πολλαπλούς τρόπους την απορροή. Ο μηχανισμός παρεμπόδισης της χλωρίδας έχει ως συνέπεια τη μείωση του όγκου απορροής κατά την ποσότητα που κατακρατείται από τη χλωρίδα και τελικά εξατμίζεται ή απορροφάται απ' αυτή. Ο ίδιος μηχανισμός είναι υπεύθυνος και για τη χρονική υστέρηση της απορροής. Στη χρονική υστέρηση συντείνει και η αύξηση της τραχύτητας των εδαφών που προκαλεί η φυτοκάλυψη, ενώ αντίθετα η δημιουργία λείων επιφανειών, π.χ. λόγω της αστικοποίησης και της ανάπτυξης του οδικού δικτύου, επιταχύνει την απορροή. Μια άλλη δράση της χλωρίδας, που λειτουργεί προστατευτικά στην πλημμύρα, έχει σχέση με τη μεταβολή των χαρακτηριστικών του επιφανειακού εδαφικού στρώματος (από τη δράση των ριζών αλλά και των φυλλωμάτων που πέφτουν), σε τρόπο ώστε να αυξάνεται η διηθητική ικανότητα του εδάφους και συνακόλουθα να μειώνεται η επιφανειακή απορροή.

Γενικά, η φυτοκάλυψη δρα προς την κατεύθυνση της μείωσης του όγκου άμεσης απορροής, και της επιβράδυνσης και εξομάλυνσης των ρυθμών της, με τελική συνέπεια τη μείωση των αιχμών των πλημμυρικών υδρογραφημάτων. Για τους ίδιους λόγους, όταν καταστρέφεται η χλωρίδα, π.χ. από πυρκαγιές ή εκχέρσωση, αλλάζει η υδρολογική συμπεριφορά της λεκάνης και συγκεκριμένα επιταχύνονται και ισχυροποιούνται τα φαινόμενα των πλημμυρών. Επιπλέον, η πυκνή κάλυψη με χλωρίδα, επιβραδύνοντας την απορροή, προστατεύει το έδαφος από την κινητική ενέργεια της βροχής, αλλά και δημιουργώντας συνεκτικό ιστό των εδαφικών

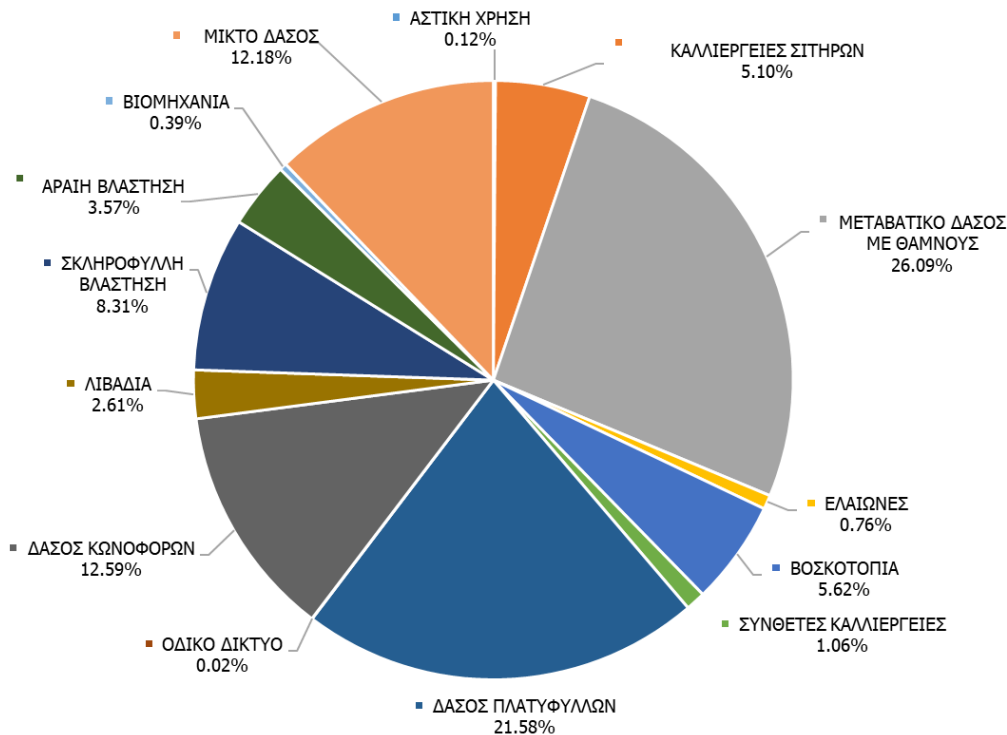
κόκκων, συγκρατεί το εδαφικό υλικό, περιορίζοντας τη διάβρωση της λεκάνης και όλες τις καταστρεπτικές της συνέπειες.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το ψηφιακό μοντέλο χρήσεων γης Corine Land Cover 2018 της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Corinecus, 2018). Σύμφωνα με το χάρτη χρήσεων γης, η εξεταζόμενη περιοχή μπορεί να χαρακτηριστεί γενικά ως δασώδης, καθώς οι αστικές και βιομηχανικές χρήσεις γης (αστική δόμηση, βιομηχανικές εκτάσεις, οδικό δίκτυο) καταλαμβάνουν μόλις το 0.53% της συνολικής έκτασης. Συνολικά, κυριαρχεί ο δασικός χαρακτήρας στην περιοχή, με τις δασώδεις εκτάσεις να καταλαμβάνουν πάνω από το 70% της συνολικής επιφάνειας. Σε αυτές τις εκτάσεις, περισσότερο από το 30% των δένδρων που εντοπίζονται είναι κωνοφόρα και πλατύφυλλα. Η υπόλοιπη επιφάνεια καλύπτεται από χαμηλή βλάστηση και βοσκοτόπια και μόνο ένα μικρό μέρος γης αξιοποιείται γεωργικά.

Οι αστικές χρήσεις και οι βιομηχανικές εκτάσεις εντοπίζονται στο κατάντη τμήμα της λεκάνης, κοντά στην έξοδό της. Στην περιοχή αυτή, παρατηρείται συνεχής εξάπλωση της οικοδομικής δραστηριότητας τα τελευταία χρόνια. Γενικά, αυτή η παρέμβαση στη φυσική λεκάνη έχει επίδραση στην παραγόμενη απορροή, όμως περισσότερο κρίσιμο είναι το γεγονός ότι αυτές οι εκτάσεις βρίσκονται κοντά στην έξοδο της λεκάνης, όπου οι κλίσεις είναι μικρότερες. Συνεπώς, η επέκταση της αστικοποίησης και βιομηχανοποίησης καθιστά αυτό το τμήμα της λεκάνης εξαιρετικά ευάλωτο σε πλημμυρικά γεγονότα.



Σχήμα 4-8: Χρήσεις γης κατά Corine 2018 στην λεκάνη απορροής του Νέδοντα

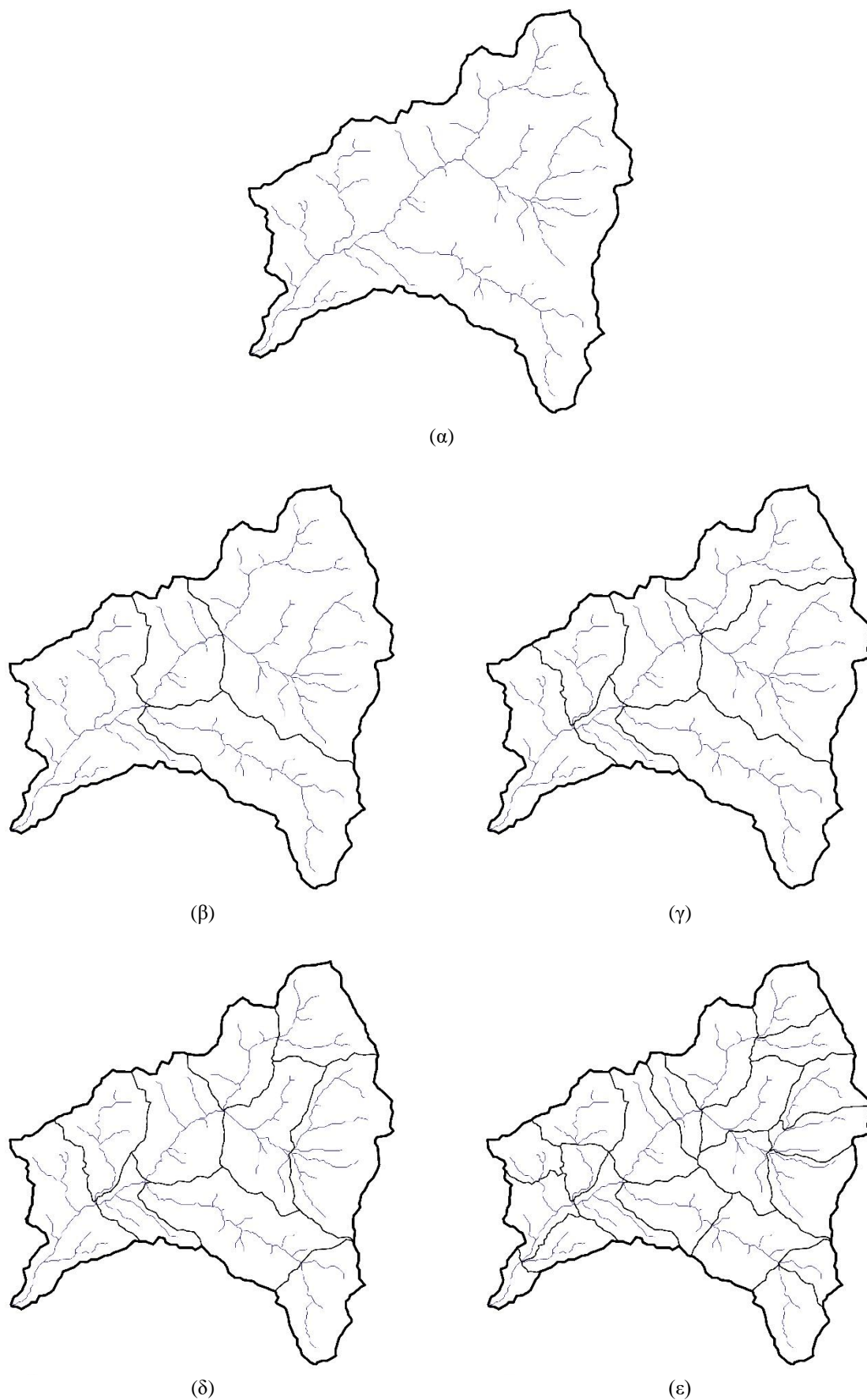


Σχήμα 4-9: Κατανομή χρήσεων γης στην λεκάνη απορροής του Νέδοντα

4.6 Διακριτοποίηση σε υπολεκάνες

Στην παρούσα εργασία η λεκάνη απορροής του Νέδοντα αντιμετωπίζεται ως αδιαμέριστη και εξετάζονται τέσσερις διαφορετικές διακριτοποιήσεις με 4, 7, 10 και 21 υπολεκάνες (Σχήμα 4-8). Η διακριτοποίηση σε υπολεκάνες και ο υπολογισμός χαρακτηριστικών μεγεθών των υπολεκανών πραγματοποιούνται σε περιβάλλον ΣΓΠ.

Η διακριτοποίηση κάθε φορά γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να αποτυπώνει άλλοτε αδρομερώς και άλλοτε λεπτομερώς τις διαφορές που εντοπίζονται στις χρήσεις γης, στα χαρακτηριστικά του υδρογραφικού δικτύου και στην συμπεριφορά των εδαφών. Εξάιρεση αποτελεί η περίπτωση των 21 υπολεκανών, επειδή το μέγεθος και τα χαρακτηριστικά της λεκάνης και το πραγματικό υδρογραφικό δίκτυο δεν δικαιολογούν μια τόσο πυκνή διακριτοποίηση. Ωστόσο, έχει ενδιαφέρον να μελετηθεί και ένα υπερβολικά λεπτομερές μοντέλο, που δεν θα ήταν ρεαλιστικό να εφαρμοστεί στην πράξη.



Σχήμα 4-10: Χωρικά μοντέλα της λεκάνης απορροής του Νέδοντα (α) αδιαμέριστη λεκάνη και (β) 4, (γ) 7, (δ) 10, (ε) 21 υπολεκάνες

5 ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

5.1 Όμβριες καμπύλες

Ως υπόβαθρο για την παραγωγή των υετογραφημάτων εισόδου των υπολεκανών του υδρολογικού συστήματος χρησιμοποιούνται οι όμβριες καμπύλες που παράγονται στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Οι όμβριες καμπύλες είναι στατιστικές σχέσεις που εκτιμούν την μέγιστη ένταση βροχής $i=f(d,T)$ που αναφέρεται σε χρονική κλίμακα (διάρκεια), d , και περίοδο επαναφοράς, T . Στη παρούσα μελέτη, η έκφραση της όμβριας καμπύλης προκύπτει από την κατανομή Γενική Ακραίων Τιμών (ΓΑΤ) 5 παραμέτρων (5.1). Η σχέση αυτή προτείνεται και από την Ειδική Γραμματεία Υδάτων στα Σχέδια Διαχείρισης Πλημμυρικού Κινδύνου.

$$i(d,T)=\frac{\lambda'(T^k-\psi')}{(1+d/\theta)^\eta}, \quad k \neq 0 \quad (5.1)$$

Όπου

- T: η περίοδος επαναφοράς (y)
- d: η διάρκεια βροχόπτωσης (h)
- κ: παράμετρος σχήματος
- λ': παράμετρος κλίμακας
- ψ': παράμετρος θέσης
- θ, η: παράμετροι της συνάρτησης διάρκειας

Η όμβρια καμπύλη υπολογίζει την σημειακή ένταση βροχής του σταθμού από τον οποίο λαμβάνονται οι παράμετροι. Στη περίπτωση της λεκάνης του Νέδοντα υπάρχουν τρεις σταθμοί πλησίον της, για κάθε έναν από τους οποίους η ΕΓΥ έχει παράξει την όμβρια καμπύλη (Πίνακας 5-1).

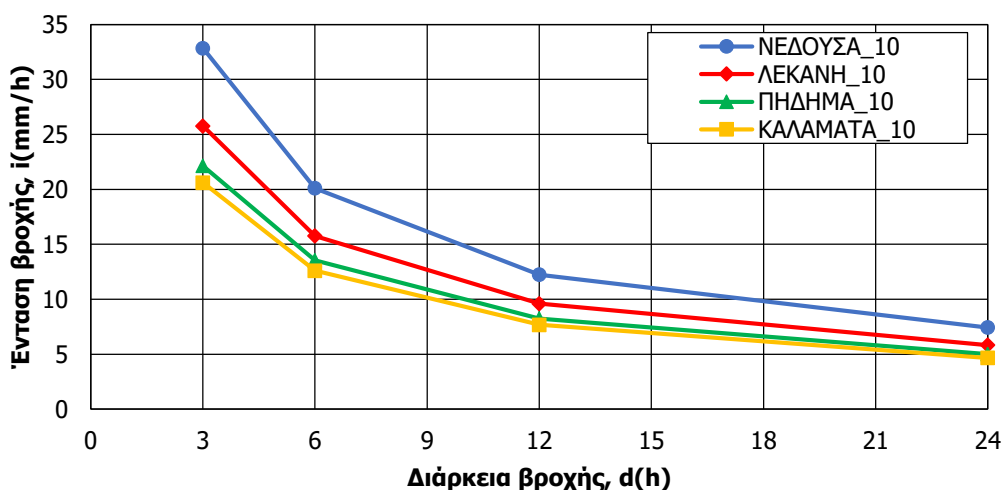
Πίνακας 5-1: Συντεταγμένες των πλησιέστερων σταθμών και παράμετροι των όμβριων καμπυλών τους

Σταθμός	X	Y	Z	κ	λ'	ψ'	θ	η
Καλαμάτα	324,055.80	4,104,082.20	6.3	0.113	436.7	0.682	0.089	0.724
Νέδουσα	342,906.00	4,112,566.00	730.0	0.113	537.3	0.500	0.089	0.724
Πήδημα	326,197.31	4,112,429.75	36.3	0.113	473.2	0.687	0.089	0.724

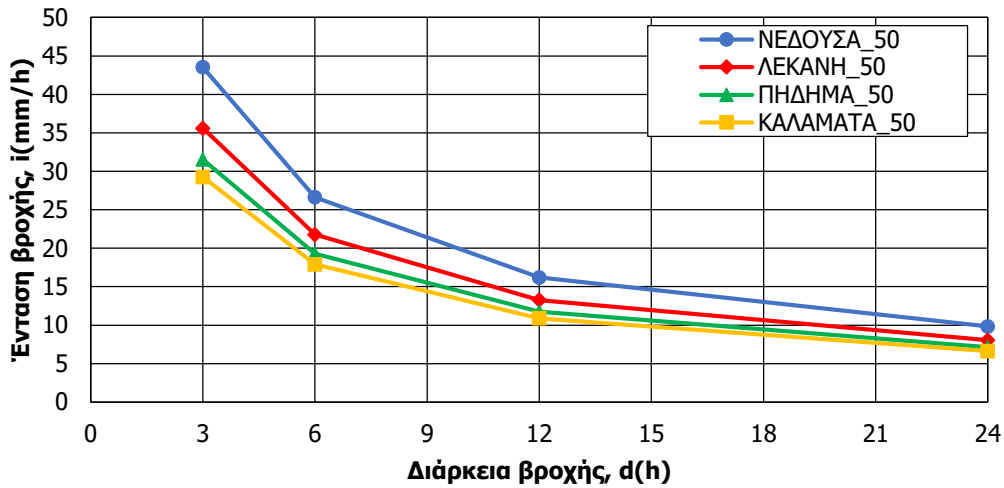
Από τη στιγμή που απαιτείται η κατάρτιση όμβριας καμπύλης σε κλίμακα λεκάνης απορροής, απαιτείται ο προσδιορισμός μιας αντιπροσωπευτικής τιμής κάθε παραμέτρου. Αυτό προϋποθέτει τη κατάρτιση χαρτών χωρικής παρεμβολής των παραμέτρων και την εφαρμογή τεχνικών επιφανειακής ολοκλήρωσης για την εκτίμηση της αντιπροσωπευτικής τιμής κάθε παραμέτρου, που αποτελεί σημειακή εκτιμήτρια για την λεκάνη μελέτης. Η παραπάνω διαδικασία αφορά μόνο την παράμετρο κλίμακας, λ' , και θέσης, ψ' , οι οποίες εμφανίζουν σημαντική χωρική μεταβλητότητα. Οι χάρτες χωρικής κατανομής των παραμέτρων κατασκευάζονται σε περιβάλλον ΣΓΠ με χρήση μοντέλου χωρικής παρεμβολής. Πιο συγκεκριμένα, επιλέχθηκε η μέθοδος των αντίστροφων αποστάσεων (IDW). Στους παραγόμενους χάρτες, κάθε στοιχείο του κανάβου έχει μια τιμή των παραμέτρων λ' και ψ' , αντίστοιχα, ενώ η επιφανειακή τιμή για κάθε παράμετρο εκτιμάται ως ο μέσος όρος των τιμών των κυττάρων που περικλείει η λεκάνη απορροής. Με αυτόν τον τρόπο προκύπτει η όμβρια καμπύλη στη κλίμακα όλης της λεκάνης (Πίνακας 5-2).

Πίνακας 5-2: Παράμετροι της όμβριας καμπύλης σε επίπεδο λεκάνης

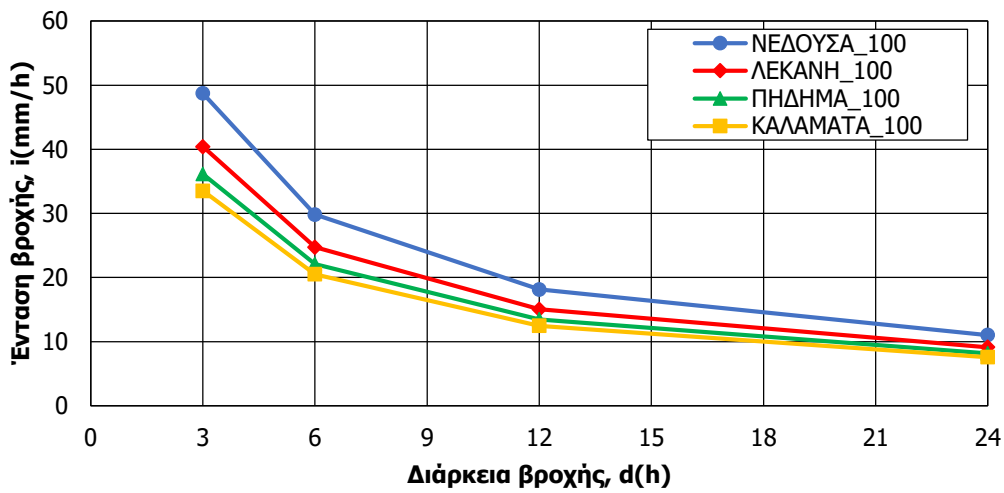
κ	λ'	ψ'	θ	η
0.113	495.3	0.619	0.089	0.724



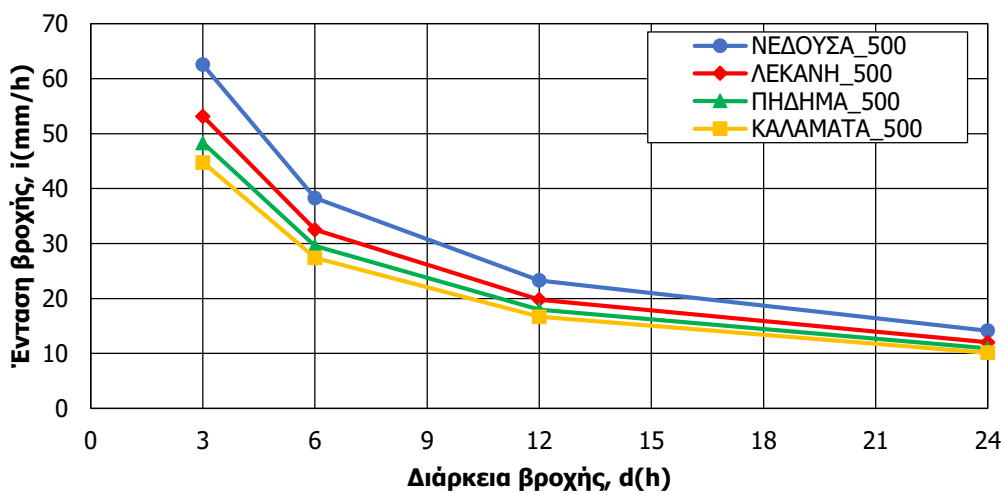
Σχήμα 5-1: Όμβρια καμπύλη της λεκάνης και των πλησιέστερων σταθμών για βροχή με περίοδο επαναφοράς 10 έτη



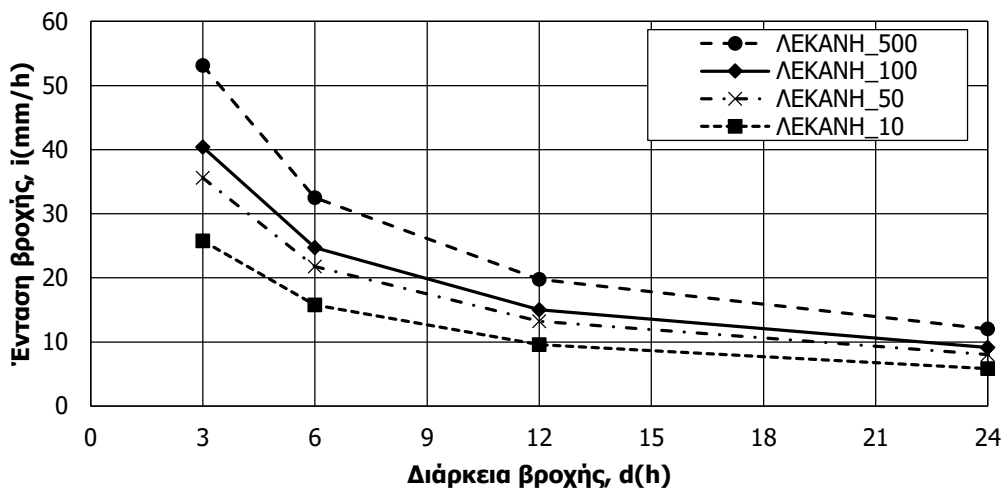
Σχήμα 5-2: Όμβρια καμπύλη της λεκάνης και των πλησιέστερων σταθμών για βροχή με περίοδο επαναφοράς 50 έτη



Σχήμα 5-3: Όμβρια καμπύλη της λεκάνης και των πλησιέστερων σταθμών για βροχή με περίοδο επαναφοράς 100 έτη



Σχήμα 5-4: Όμβρια καμπύλη της λεκάνης και των πλησιέστερων σταθμών για βροχή με περίοδο επαναφοράς 500 έτη



Σχήμα 5-5: Όμβρια καμπύλη της λεκάνης για βροχή με περίοδο επαναφοράς 10, 50, 100 και 500 έτη

5.2 Επιφανειακή αναγωγή σημειακής έντασης βροχής

Οι τιμές της κρίσιμης έντασης βροχόπτωσης που προκύπτουν με την παραπάνω διαδικασία θεωρείται ότι αναφέρονται σε ένα αντιπροσωπευτικό σημείο της λεκάνης. Για την εκτίμηση των επιφανειακών υψών βροχής, που εφαρμόζονται στο σχεδιασμό, απαιτείται η αναγωγή των σημειακών υψών βροχής, όπως αυτά προκύπτουν από την αντιπροσωπευτική όμβρια της λεκάνης. Σύμφωνα με την κοινή πρακτική που εφαρμόζεται στις μελέτες πλημμυρών, η αναγωγή γίνεται με χρήση του λεγόμενου συντελεστή επιφανειακής αναγωγής (areal reduction factor). Οι Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος (1999) πρότειναν έναν μειωτικό συντελεστή ϕ (5.2), ο οποίος έχει τις ακόλουθες, εμπειρικά διαπιστωμένες, ιδιότητες:

- Είναι πάντα μικρότερος της μονάδας. Όταν καταγράφεται μέγιστη ένταση στη θέση του βροχογραφικού σταθμού, είναι απίθανο την ίδια στιγμή να καταγράφεται μέγιστη ένταση σε όλη την υπόψη επιφάνεια.
- Είναι φθίνουσα συνάρτηση της έκτασης. Η αύξηση της έκτασης της επιφάνειας συνεπάγεται τη μείωση του συντελεστή επιφανειακής αναγωγής.
- Είναι αύξουσα συνάρτηση της διάρκειας. Η αύξηση της διάρκειας βροχής συνοδεύεται από αύξηση του συντελεστή επιφανειακής αναγωγής.
- Εξαρτάται σε κάποιο βαθμό από την περίοδο επαναφοράς και φαίνεται ότι η αύξηση της περιόδου επαναφοράς οδηγεί σε ασθενή μείωση του συντελεστή επιφανειακής αναγωγής, ωστόσο δεν υπάρχουν ακόμη κατηγορηματικά συμπεράσματα για αυτή την εξάρτηση, η οποία δεν έχει διερευνηθεί σε αντίστοιχο βαθμό με αυτές που αναφέρονται στη διάρκεια και την έκταση.

$$\varphi = \max \left(1 - \frac{0.048A^{0.36-0.01 \ln A}}{d^{0.35}}; 0.25 \right) \quad (5.2)$$

Όπου

φ : συντελεστής επιφανειακής αναγωγής (αδιάστατος αριθμός)

A : έκταση λεκάνης (km^2)

d : χρονική κλίμακα (h)

5.3 Χαρακτηριστικά χρονικά μεγέθη

5.3.1 Χρόνος συγκέντρωσης

Ο χρόνος συγκέντρωσης, t_c , ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται για να φτάσει το νερό, που ρέει επιφανειακά, από το υδραυλικά πιο απομακρυσμένο σημείο της λεκάνης μέχρι την διατομή εξόδου (Dingman, 1994). Η μαθηματική έκφραση του χρόνου συγκέντρωσης δίδεται από την σχέση (5.3).

$$t_c = L_{\max} / \bar{u} \quad (5.3)$$

Όπου

L_{\max} : το μήκος της μέγιστης διαδρομής του νερού στη λεκάνη

\bar{u} : η μέση ταχύτητα ροής

Ο χρόνος συγκέντρωσης εξαρτάται από διάφορα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης, όπως:

- το σχήμα και η έκτασή της
- το μήκος και η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου
- η κλίση του εδάφους
- τα χαρακτηριστικά που σχετίζονται με τη τραχύτητα του εδάφους (π.χ. φυτοκάλυψη)
- τα γεωμετρικά και υδραυλικά χαρακτηριστικά του υδρογραφικού δικτύου

5.3.2 Εμπειρικές μέθοδοι εκτίμησης του χρόνου συγκέντρωσης

Λόγω της έλλειψης δεδομένων και της πολυπλοκότητας προσδιορισμού του χρόνου συγκέντρωσης δεν είναι δυνατός ο υπολογισμός του στη βάση των φυσικών νόμων. Για τον λόγο αυτό, συνήθως εφαρμόζονται απλές εμπειρικές σχέσεις της βιβλιογραφίας, οι οποίες εκτιμούν τον χρόνο συγκέντρωσης συναρτήσει χαρακτηριστικών γεωμετρικών μεγεθών της λεκάνης (κλίση, εμβαδόν, υψόμετρα κτλ.).

Η απλούστερη σχέση είναι του Viparelli (1964), που εφαρμόζει μια σχέση της μορφής (5.3), όπου ο όρος του μήκους στον αριθμητή ορίζεται ως η απόσταση από το μέσον της λεκάνης έως την έξοδο, ενώ ο όρος της ταχύτητας στον παρονομαστή εκφράζει μια μέση ταχύτητα ροής, με προτεινόμενες τιμές από 1.0 έως 1.5 m/s.

Στην ελληνική πρακτική η πλέον διαδεδομένη σχέση, που συστήνεται μάλιστα και από τις προδιαγραφές των υδραυλικών έργων (ΠΔ 696/74) είναι η σχέση του Giandotti (1934):

$$t_{\text{Gian}} = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{\Delta H}} \quad (5.4)$$

Όπου

A: η επιφάνεια της λεκάνης απορροής (km²)

L: το μήκος της κύριας μισγάγγειας (km)

ΔH: η διαφορά του μέσου υψόμετρου της λεκάνης από το υψόμετρο εξόδου της (m)

Η εξίσωση (5.5) αποτελεί τη μαθηματική έκφραση της σχέσης του Kirpich (1940), που είναι ακόμα μια ευρέως διαδεδομένη εμπειρική σχέση για την εκτίμηση του χρόνου συγκέντρωσης.

$$t_c = 0.0667 \cdot L^{0.77} / S^{0.385} \quad (5.5)$$

Όπου

L: το μήκος της κύριας μισγάγγειας (km)

S: η μέση κλίση (m/m)

Η σχέση του Kirpich (1940) αναπτύχθηκε από την Αμερικανική Soil Conservation Service (SCS). Τα δεδομένα στα οποία στηρίχτηκε 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. Για αστικές λεκάνες, με επιφάνειες ασφαλτικές ή από σκυρόδεμα, η τιμή του χρόνου συγκέντρωσης διορθώνεται με μια μείωση κατά 40%. Έχει παρατηρηθεί ότι η σχέση του Kirpich υπολογίζει σημαντικά βραχύτερους χρόνους συγκέντρωσης από την σχέση του Giandotti (Daniil and Lazaridis, 2005).

5.3.3 Χρόνος υστέρησης

Ο χρόνος υστέρησης, t_L , ορίζεται ως το χρονικό διάστημα από το κέντρο βάρους της ενεργού βροχής έως την αιχμή του ολικού υδρογραφήματος. Αν και στη βιβλιογραφία ο χρόνος υστέρησης αναφέρεται ως αναλλοίωτη σταθερά της λεκάνης, στην πράξη, πέρα από τα χαρακτηριστικά της λεκάνης, εξαρτάται και από την μορφή του υετογραφήματος (διάρκεια, ένταση, ομοιομορφία βροχής).

Στη βιβλιογραφία αναφέρονται διάφορες εμπειρικές προσεγγίσεις που αποσκοπούν στη συσχέτιση των θεμελιωδών χρονικών μεγεθών της λεκάνης, κυρίως του χρόνου υστέρησης t_L και του χρόνου συγκέντρωσης t_c . Η σχέση (5.6), που έχει προταθεί από την Soil Conservation Service των ΗΠΑ, είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη σχέση για τη συσχέτιση των δύο χρονικών μεγεθών.

$$t_L = 0.6t_c \quad (5.6)$$

5.3.4 Συσχέτιση χρόνου συγκέντρωσης με την ένταση βροχής

Δεδομένου ότι ο χρόνος συγκέντρωσης μειώνεται με την αύξηση της παροχής, πρέπει να ληφθεί υπόψη η εξάρτησή του από την πλημμυρική απορροή. Για τον σκοπό αυτό αναπτύχθηκε μια εμπειρική σχέση που βασίζεται στις εξής υποθέσεις:

- Ο χρόνος συγκέντρωσης δίνεται από την εξίσωση (5.3)
- Η παροχή θεωρείται ανάλογη της έντασης βροχής
- 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 $b \gg y$
- Η ταχύτητα συνδέεται με το βάθος ροής y μέσω της σχέσης του Manning

Η παροχή συνδέεται με την ταχύτητα μέσω της σχέσης:

$$q = Au = byu = \frac{byL}{t_c} \quad (5.7)$$

Σύμφωνα με τις παραπάνω υποθέσεις, στην περίπτωση δύο επεισοδίων βροχής έντασης i_1 και i_2 , από τα οποία προκύπτουν πλημμυρικές παροχές q_1 και q_2 , αντίστοιχα, ισχύει:

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{q_1}{q_2} = \frac{y_1 t_{c2}}{y_2 t_{c1}} \quad (5.8)$$

Ακόμη, από την εφαρμογή της σχέσης του Manning προκύπτει:

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{t_{c2}}{t_{c1}} = \left(\frac{y_1}{y_2} \right)^{2/3} \quad (5.9)$$

$$\frac{y_1}{y_2} = \left(\frac{t_{c2}}{t_{c1}} \right)^{3/2} \quad (5.10)$$

Συνδυάζοντας τα παραπάνω προκύπτει η ακόλουθη σχέση αναλογίας (5.11) που συνδέει τον χρόνο συγκέντρωσης με την ένταση βροχής:

$$\frac{i_1}{i_2} = \left(\frac{t_{c2}}{t_{c1}} \right)^{5/2} \quad (5.11)$$

5.3.5 Εφαρμογή στη λεκάνη μελέτης

Επιλέγεται η μέθοδος Giandotti, διότι από εκτεταμένες αναλύσεις πλημμυρικών δεδομένων στην Κύπρο, φαίνεται ότι η συγκεκριμένη μέθοδος είναι η μοναδική που αναπαράγει με ικανοποιητική ακρίβεια τις παρατηρημένες παροχές αιχμής, μέσω της ορθολογικής μεθόδου (Γαλιούνα, 2011). Η χρήση της σχέσης Giandotti προτείνεται σε σύγχρονα ερευνητικά προγράμματα σχετικά με την υδρολογία των πλημμυρών (Efstratiadis et al., 2014).

Εφόσον ο χρόνος συγκέντρωσης υπολογίζεται από την σχέση του Giandotti, η διόρθωση του χρόνου συγκέντρωσης υλοποιείται με την εξίσωση (5.12), που αποτελεί απλοποιημένη εκδοχή της σχέσης (5.11).

$$t_c(T) = t_c \sqrt{i(5)/i(T)} \quad (5.12)$$

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

$i(T)$: η ένταση βροχής που αντιστοιχεί στην περίοδο επαναφοράς της μελέτης

Πίνακας 5-3: Χρόνοι συγκέντρωσης και συρροής των υπολεκανών του Νέδοντα σε κάθε διακριτοποίηση

Πλήθος υπολεκανών	ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ	t _{Gian} (hr)	T=10		T=50		T=100		T=500	
			t _c (hr)	t _{lag} (min)	t _c (hr)	t _{lag} (min)	t _c (hr)	t _{lag} (min)	t _c (hr)	t _{lag} (min)
1	1-1	3.38	3.13	113	2.66	96	2.50	90	2.18	78
4	4-1	2.22	2.06	74	1.75	63	1.64	59	1.43	52
	4-2	1.38	1.28	46	1.09	39	1.02	37	0.89	32
	4-3	1.93	1.79	64	1.52	55	1.43	51	1.24	45
	4-4	2.10	1.95	70	1.66	60	1.55	56	1.35	49
7	7-1	1.53	1.42	51	1.21	43	1.13	41	0.99	36
	7-2	1.39	1.28	46	1.09	39	1.02	37	0.89	32
	7-3	1.18	1.09	39	0.93	33	0.87	31	0.76	27
	7-4	1.93	1.78	64	1.52	55	1.42	51	1.24	45
	7-5	1.03	0.95	34	0.81	29	0.76	27	0.66	24
	7-6	1.72	1.79	64	1.35	49	1.43	51	1.24	45
	7-7	1.93	1.59	57	1.52	55	1.27	46	1.10	40
10	10-1	1.11	1.03	37	0.88	32	0.82	30	0.72	26
	10-2	1.46	1.35	49	1.15	41	1.08	39	0.94	34
	10-3	1.14	1.05	38	0.90	32	0.84	30	0.73	26
	10-4	1.16	1.08	39	0.91	33	0.86	31	0.75	27
	10-5	1.55	1.43	52	1.22	44	1.15	41	1.00	36
	10-6	1.74	1.61	58	1.37	49	1.29	46	1.12	40
	10-7	1.39	1.28	46	1.09	39	1.02	37	0.89	32
	10-8	1.18	1.09	39	0.93	33	0.87	31	0.76	27
	10-9	1.03	0.96	34	0.81	29	0.76	27	0.66	24
	10-10	1.72	1.59	57	1.35	49	1.27	46	1.10	40
21	21-1	0.89	0.83	30	0.70	25	0.66	24	0.57	21
	21-2	1.16	1.08	39	0.91	33	0.86	31	0.75	27
	21-3	0.90	0.83	30	0.71	25	0.66	24	0.58	21
	21-4	1.31	1.21	44	1.03	37	0.97	35	0.84	30
	21-5	0.96	0.89	32	0.75	27	0.71	25	0.62	22
	21-6	0.88	0.82	29	0.69	25	0.65	23	0.57	20
	21-7	1.16	1.08	39	0.92	33	0.86	31	0.75	27
	21-8	1.03	0.95	34	0.81	29	0.76	27	0.66	24
	21-9	1.33	1.23	44	1.05	38	0.99	36	0.86	31
	21-10	0.71	0.66	24	0.56	20	0.52	19	0.46	16
	21-11	1.00	0.92	33	0.79	28	0.74	27	0.64	23
	21-12	0.79	0.74	26	0.63	23	0.59	21	0.51	18
	21-13	1.21	1.12	40	0.95	34	0.89	32	0.78	28
	21-14	1.22	1.13	41	0.96	34	0.90	32	0.78	28
	21-15	1.21	1.12	40	0.95	34	0.90	32	0.78	28
	21-16	0.74	0.69	25	0.58	21	0.55	20	0.48	17
	21-17	1.03	0.95	34	0.81	29	0.76	27	0.66	24
	21-18	1.03	0.95	34	0.81	29	0.76	27	0.66	24
	21-19	1.03	0.95	34	0.81	29	0.76	27	0.66	24
	21-20	1.08	1.00	36	0.85	31	0.80	29	0.70	25
	21-21	1.29	1.19	43	1.02	37	0.95	34	0.83	30

5.3.6 Χρονικά μεγέθη υετογραφημάτων

Γενικά, για την κατάρτιση των υετογραφημάτων για καταιγίδες με δεδομένες περιόδους επαναφοράς, η διάρκεια βροχής λαμβάνεται ως πολλαπλάσιο του χρόνου συγκέντρωσης. Σύμφωνα με το ΣΔΚΠ, η διάρκεια του υετογραφήματος σχεδιασμού συνίσταται, να επιλέγεται ίση με το τριπλάσιο, τουλάχιστον, του χρόνου συγκέντρωσης της συνολικής λεκάνης. Στη περίπτωση της λεκάνης του Νέδοντα η προτεινόμενη διάρκεια της καταιγίδας σχεδιασμού στο ΣΔΚΠ είναι 12 h και στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας εξετάζονται επεισόδια βροχής με περίοδο επαναφοράς 10, 50, 100 και 500 έτη.

Όσον αφορά στη χρονική διακριτότητα της βροχόπτωσης, η οποία καθορίζει και το χρονικό βήμα υπολογισμών του υδρολογικού προσομοιώματος, πρέπει να επιλεγεί μία τιμή επαρκώς μικρή ώστε να μπορεί να περιγραφεί με ακρίβεια το φαινόμενο και να εντοπιστεί η αιχμή στο ΜΥΓ. Ωστόσο, το χρονικό βήμα δεν πρέπει να είναι άσκοπα πολύ μικρό, διότι επιβαρύνεται υπολογιστικά το προσομοίωμα. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν εμπειρικές συστάσεις για την επιλογή του χρονικού βήματος. Σε πρόσφατες εργασίες το χρονικό βήμα συνιστάται να επιλέγεται ίσο με το 1/3 του μικρότερου από τους χρόνους συγκέντρωσης των υπολεκανών, για την υπόψη περίοδο επαναφοράς. Με βάση τις παραπάνω προτάσεις της βιβλιογραφίας και λαμβάνοντας υπ' όψη την μεγάλη διακύμανση που παρατηρείται στους χρόνους συγκέντρωσης των υπολεκανών του Νέδοντα στις διαφορετικές διακριτοποιήσεις, επιλέγεται χρονικό βήμα προσομοίωσης 5 λεπτά.

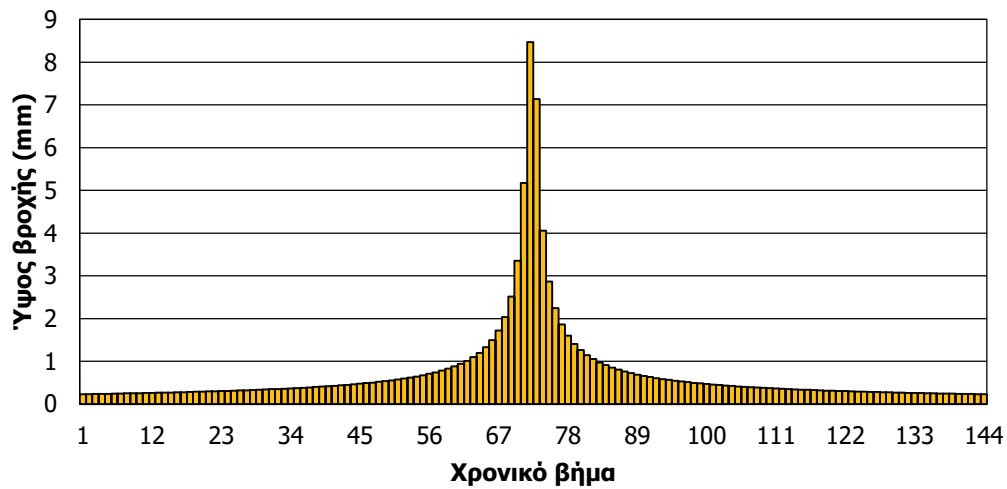
5.4 Παραγωγή υετογραφημάτων σχεδιασμού

Η βασικότερη παραδοχή στην κατάρτιση μιας καταιγίδας (υετογραφήματος) σχεδιασμού, που αναφέρεται σε δεδομένη περίοδο επαναφοράς, αφορά στη χρονική κατανομή του συνολικού ύψους βροχής. Στην πράξη, υιοθετούνται διάφορες απλοποιημένες προσεγγίσεις, που υποθέτουν μια δεδομένη χρονική κατανομή, με την οποία παράγονται δυσμενή πλημμυρογραφήματα. Με αυτές προσδιορίζονται τα τμηματικά ύψη βροχής των επιμέρους διαρκειών με βάση την όμβρια καμπύλη (είτε σε σημειακή κλίμακα είτε ανηγμένη στην επιφάνεια μιας λεκάνης), για την υπόψη περίοδο επαναφοράς. Ακολούθως, τα τμηματικά ύψη βροχής διατάσσονται με τρόπο τέτοιο που να προκύπτει ένας ρεαλιστικός και ταυτόχρονα αρκετά δυσμενής συνδυασμός.

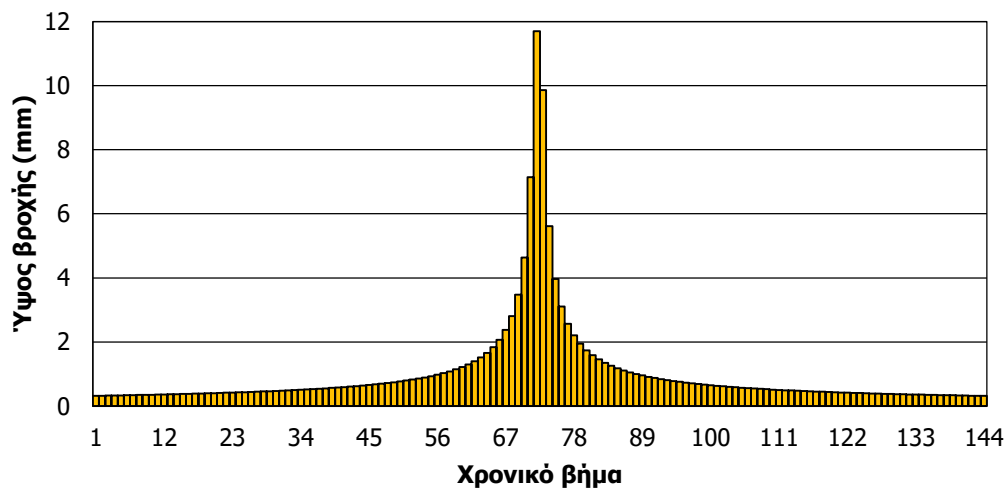
Στην παρούσα εργασία, ο χρονικός επιμερισμός της βροχής γίνεται με τη μέθοδο των εναλλασσόμενων μπλοκ (Chow et al., 1988), που αποτελεί κοινή πρακτική στις μελέτες πλημμυρών. Σύμφωνα με αυτή, τα τμηματικά ύψη βροχής διατάσσονται σε χρονική ακολουθία με το μέγιστο στο μέσο της επιλεγμένης συνολικής διάρκειας βροχής και τα υπόλοιπα σε φθίνουσα σειρά εναλλακτικά αριστερά και δεξιά από το κεντρικό μπλοκ.

Βασική παραδοχή της μεθόδου είναι ότι σε κάθε επιμέρους χρονική κλίμακα, το εκτιμώμενο ύψος βροχής έχει την ίδια περίοδο επαναφοράς με το τελικό (συνολικό) ύψος βροχής. Για διάρκεια βροχής D και χρονικό βήμα Δt υπολογίζονται $N=D/\Delta t$ τμηματικές εντάσεις βροχής $i(d,T)$, εφαρμόζοντας τη σχέση (5.1) για N χρονικές κλίμακες, δηλαδή για κλίμακες $k=\Delta t, 2\Delta t, \dots, D$, και υποθέτοντας την ίδια περίοδο επαναφοράς T για κάθε κλίμακα. Ακολούθως, υλοποιείται η διαδικασία επιφανειακής αναγωγής με εφαρμογή του συντελεστή ϕ (5.2), θεωρώντας την έκταση της συνολικής λεκάνης, A , καθώς μας ενδιαφέρει η πλημμύρα που καταλήγει στη θέση του έργου. Η υπόθεση αυτή υιοθετήθηκε και στις μελέτες πλημμυρών της Οδηγίας 2007/60/ΕΚ. Στη συνέχεια, από τις ανηγμένες εντάσεις παράγονται τα αθροιστικά ύψη

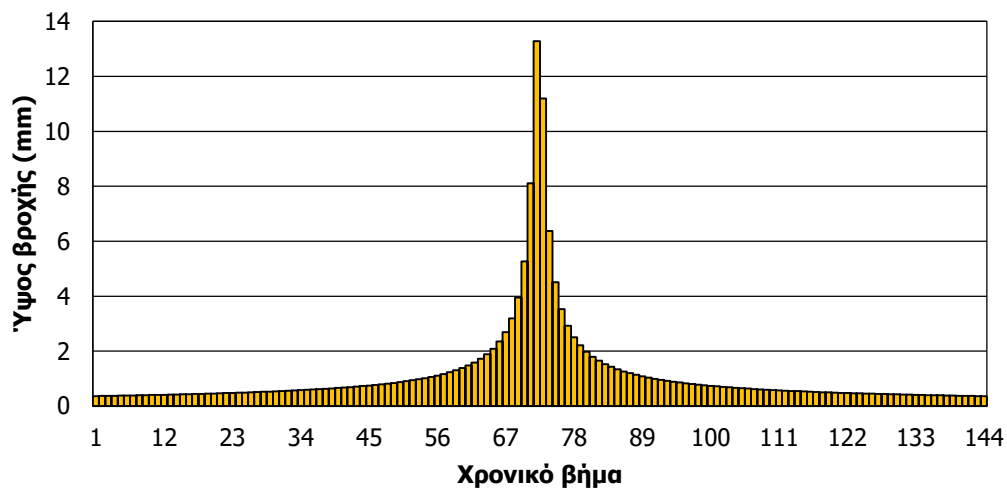
βροχής, πολλαπλασιάζοντας με τις διαδοχικές κλίμακες. Τέλος, από τα αθροιστικά ύψη υπολογίζονται τα αντίστοιχα τμηματικά, αφαιρώντας τις επιμέρους διαδοχικές τιμές.



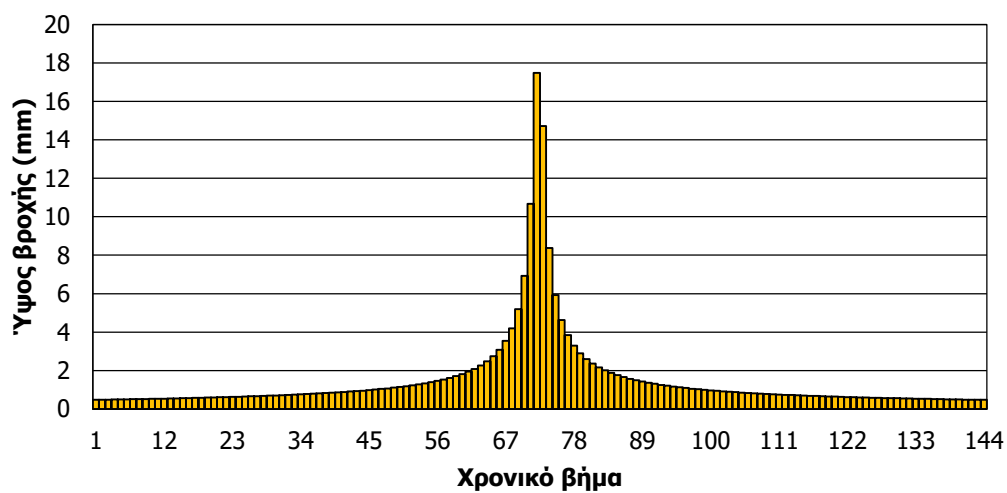
Σχήμα 5-6: Βροχογράφημα με διάρκεια 12 h, χρονικό βήμα 5 min και περίοδο επαναφοράς 10 έτη



Σχήμα 5-7: Βροχογράφημα με διάρκεια 12 h, χρονικό βήμα 5 min και περίοδο επαναφοράς 50 έτη



Σχήμα 5-8: Βροχογράφημα με διάρκεια 12 h, χρονικό βήμα 5 min και περίοδο επαναφοράς 100 έτη



Σχήμα 5-9: Βροχογράφημα με διάρκεια 12 h, χρονικό βήμα 5 min και περίοδο επαναφοράς 500 έτη

6 ΑΡΙΘΜΟΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΚΑΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΛΛΕΙΜΜΑΤΩΝ

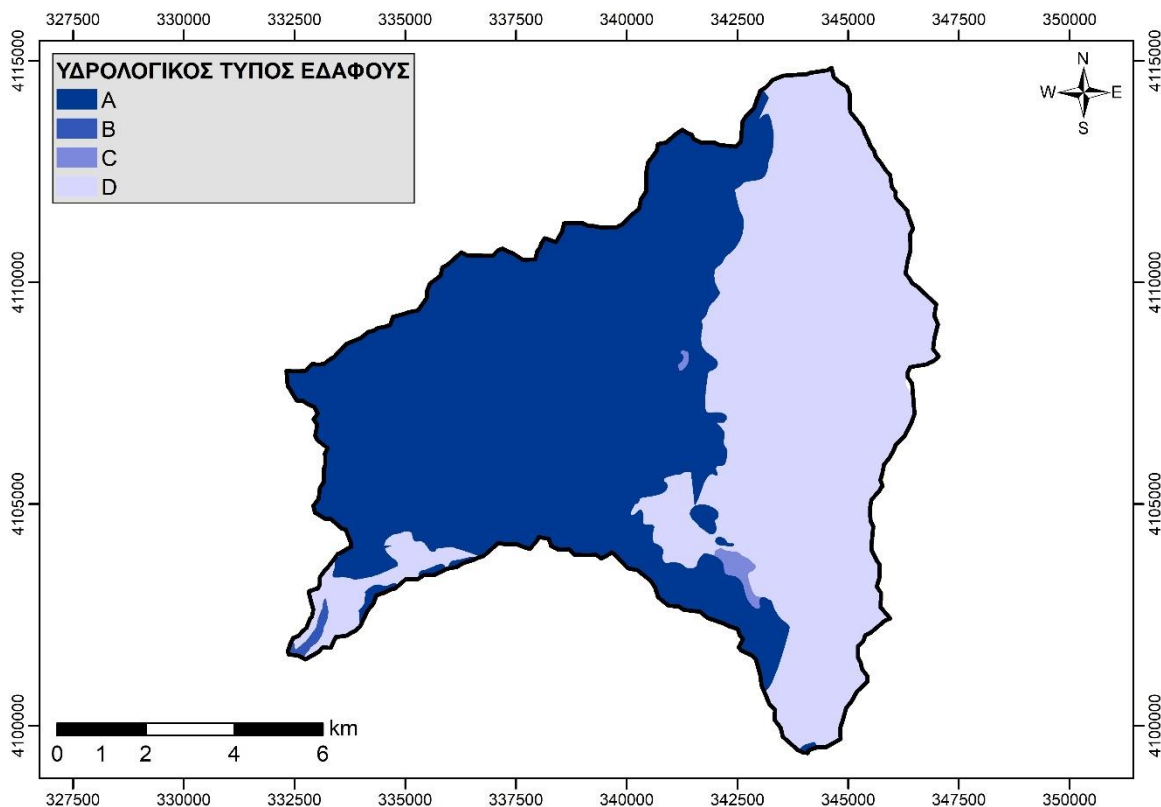
6.1 Αριθμός καμπύλης απορροής CN

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 παράμετρος αυτή χρησιμοποιείται στον υπολογισμό μιας σειράς υδρολογικών μεγεθών που εισάγονται στα υδρολογικά μοντέλα πλημμυρών, με τυπικότερη περίπτωση τη μέθοδο SCS, με την οποία εκτιμώνται τα υδρολογικά ελλείμματα που προκύπτουν από ένα δεδομένο επεισόδιο βροχής.

Η παράμετρος CN παίρνει τιμές από 0 μμέχρι 100, και επηρεάζεται από τα εδαφολογικά χαρακτηριστικά, τις χρήσεις γης, και τις προηγούμενες συνθήκες εδαφικής υγρασίας στη λεκάνη απορροής.

Αρχικά, η SCS κατατάσσει τα εδάφη σε τέσσερις υδρολογικές ομάδες, ανάλογα με τη διαπερατότητά τους (Σχήμα 6-1):

- Ομάδα A: Εδάφη με μεγάλους ρυθμούς διήθησης, π.χ. αμμώδη και χαλικώδη με πολύ μικρό ποσοστό ιλύος και αργίλου.
- Ομάδα B: Σχηματισμοί μέτριας και υψηλής υδατοπερατότητας. Κυρίως αμμώδεις εδαφικό στρώμα μικρότερου βάθους από αυτό της πρώτης κατηγορίας, καθώς και στρώμα πηλού μικρότερου βάθους από αυτό της πρώτης κατηγορίας. Η διηθητικότητα αυτών των εδαφών είναι άνω του μέσου.
- Ομάδα C: Σχηματισμοί μέτριας και χαμηλής υδατοπερατότητας. Εδαφικό στρώμα περιορισμένου βάθους με σημαντική περιεκτικότητα σε άργιλο, η οποία όμως είναι μικρότερη αυτής της επόμενης κατηγορίας. Η διηθητικότητα αυτών των εδαφών είναι κάτω του μέσου.
- Ομάδα D: Σχηματισμοί πολύ χαμηλής υδατοπερατότητας. Περιλαμβάνει κυρίως αργίλους και αβαθή εδάφη με αδιαπέρατο υπόστρωμα κοντά στην επιφάνεια.



Σχήμα 6-1: Υδρολογικοί τύποι του εδάφους, ανάλογα με τη διαπερατότητά του, στην λεκάνη απορροής του Νέδοντα

Η SCS ορίζει τρεις τύπους προηγούμενων συνθηκών υγρασίας.

- Τύπος I: Ξηρές συνθήκες (εδάφη ξηρά, αλλά πάνω από το σημείο μαρασμού), που αντιστοιχούν στην περίπτωση που η βροχόπτωση των προηγούμενων 5 ημερών είναι μικρότερη από 13 mm (ή μικρότερη των 35 mm, για φυτοκάλυψη σε συνθήκες ανάπτυξης).
- Τύπος II: Μέσες συνθήκες, που αντιστοιχούν σε βροχόπτωση των προηγούμενων 5 ημερών μεταξύ 13 και 38 mm (ή μεταξύ 35 και 53 mm, για φυτοκάλυψη σε συνθήκες ανάπτυξης).
- Τύπος III: Υγρές συνθήκες (εδάφη σχεδόν κορεσμένα), που αντιστοιχούν σε βροχόπτωση των προηγούμενων 5 ημερών μεγαλύτερη των 38 mm (ή μεγαλύτερη των 53 mm, για φυτοκάλυψη σε συνθήκες ανάπτυξης).

Οι παράμετροι των υδρολογικών τύπων έχουν προκύψει από μεγάλο αριθμό παρατηρημένων πλημμυρικών επεισοδίων σε μικρές αγροτικές λεκάνες στις ΗΠΑ, και θεωρείται ότι έχουν πιθανότητα υπέρβασης 10, 50 και 90%, για υγρές, μέσες και ξηρές συνθήκες, αντίστοιχα. 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 (Chow et al., 1988). Για τις άλλες συνθήκες προηγούμενης υγρασίας δίνει τύπους αναγωγής (6.1 και 6.2).

Περιγραφή χρήσης γης	Υδρολογική Κατάσταση ⁵	Υδρολογικός τύπος εδάφους			
		A	B	C	D
Γυμνό έδαφος		77	86	91	94
Ευρείες γραμμικές καλλιέργειες σε κεκλιμένο έδαφος ⁶	φτωχή	72	81	88	91
	καλή	67	78	85	89
Ευρείες γραμμικές καλλιέργειες σε βαθμίδες ⁷	φτωχή	66	74	80	82
	καλή	62	71	78	81
Καλλιέργειες σιτηρών σε κεκλιμένο έδαφος	φτωχή	65	76	84	88
	καλή	63	75	83	87
Καλλιέργειες σιτηρών σε βαθμίδες	φτωχή	61	72	79	82
	καλή	59	70	78	81
Πυκνές καλλιέργειες ψυχανθών σε κεκλιμένο έδαφος	φτωχή	66	77	85	89
	καλή	58	72	81	85
Πυκνές καλλιέργειες ψυχανθών σε βαθμίδες	φτωχή	63	73	80	83
	καλή	51	67	76	80
Χορτολιβαδικές εκτάσεις ⁸	φτωχή	68	79	86	89
	μέτρια	49	69	79	84
	καλή	39	61	74	80
Θάμνοι – υψηλές πόες - θάμνοι με υποβλάστηση αγρωστωδών και άλλων ποών ⁹	φτωχή	48	67	77	83
	μέτρια	35	56	70	77
	καλή	30	48	65	73
Δενδρόκηποι ή δενδροκαλλιέργειες ¹⁰	φτωχή	57	73	82	86

Σχήμα 6-2: Πίνακας της SCS με τιμές του CN (πηγή: ΕΓΥ)

$$CN_I = \frac{4.2CN_{II}}{10 - 0.058CN_{II}} \quad (6.1)$$

$$CN_{III} = \frac{23CN_{II}}{10 + 0.13CN_{II}} \quad (6.2)$$

6.2 Μέθοδος απωλειών NRCS-CN

6.2.1 Θεωρητικό υπόβαθρο

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).

Για δεδομένο υετογράφημα σχεδιασμού, η ενεργός βροχόπτωση εκτιμάται με τη μέθοδο NRCS-CN, η οποία αναπτύχθηκε από την Soil Conservation Service (1972, αναφέρεται πλέον ως Natural Resources Conservation Service, NRCS) και είναι από τις πλέον διαδεδομένες παγκοσμίως (Efstratiadis et al., 2014). Η μέθοδος περιγράφει τη χρονική εξέλιξη των ελλειμμάτων, εφαρμόζοντας μια απλή αλλά ρεαλιστική εννοιολογική διαδικασία, που βασίζεται στις ακόλουθες παραδοχές (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999):

- Για ένα αρχικό χρονικό διάστημα, t_{a0} , όλη η ποσότητα της βροχόπτωσης, I_a , μετατρέπεται εξ ολοκλήρου σε έλλειμμα (αρχικό έλλειμμα), χωρίς να δίνει καθόλου ενεργή βροχόπτωση. Κατά συνέπεια, μετά το χρόνο t_{a0} , το μέγιστο ενεργό ύψος βροχής, h_e , δεν μπορεί να υπερβεί το δυνητικό μέγεθος $h-I_a$, όπου h το ολικό ύψος βροχής.
- Το επιπλέον, πέραν του αρχικού I_a , ελλειμματικό ύψος κατά τη διάρκεια μιας μεγάλης βροχόπτωσης δεν μπορεί να ξεπεράσει μια μέγιστη τιμή S , η οποία καλείται μέγιστη δυνητική κατακράτηση (potential maximum retention).
- Σε κάθε χρονική στιγμή $t > t_{a0}$, οι λόγοι του ενεργού (καθαρού) ύψους βροχής h_e και του ελλειμματικού μείον το αρχικό έλλειμμα, $h-I_a$, προς τα αντίστοιχα δυνητικά μεγέθη, ήτοι $h-I_a$ και S , αντίστοιχα, είναι ίσοι. Βάσει των παραπάνω παραδοχών, προκύπτει η εμπειρική σχέση (6.3).

$$h_e = \begin{cases} 0 & h \leq I_a \\ \frac{(h-I_a)^2}{(h-I_a+S)} & h > I_a \end{cases} \quad (6.3)$$

Η σχέση (6.3) μπορεί να εφαρμοστεί όχι μόνο για το τελικό ύψος βροχής της καταιγίδας, αλλά και για ενδιάμεσες τιμές του, οπότε με τον τρόπο αυτό περιγράφεται η πλήρης χρονική εξέλιξη χρονική εξέλιξη του φαινομένου.

Η παραπάνω σχέση χρησιμοποιεί δύο παραμέτρους, τη μέγιστη δυνητική κατακράτηση S και το αρχικό έλλειμμα I_a , που μπορεί να εκφραστεί ως ποσοστό του S .

$$I_a = aS \quad (6.4)$$

Όπου

a : το ποσοστό των αρχικών ελλειμμάτων

Στη βιβλιογραφία συστήνεται η γενική εφαρμογή ποσοστού 20%, οπότε $I_a=0.20S$. Η τιμή αυτή έχει προκύψει ως μέσος όρος του 50% των παρατηρήσεων πεδίου, κυρίως από μετρήσεις διήθησης σε μικρές αγροτικές λεκάνες στις ΗΠΑ. Στην πραγματικότητα, το ποσοστό αυτό παρουσιάζει μεγάλη μεταβλητότητα, και μάλιστα αναφέρεται ότι το πλήρες εύρος των παρατηρημένων ποσοστών ελλειμμάτων που είχε εκτιμήσει η Soil Conservation Service στις πειραματικές λεκάνες κυμαινόταν από 9.5 ως 38% (Ponce and Hawkins, 1996).

Ωστόσο, όπως έχει φανεί από συστηματικές αναλύσεις πλημμυρικών επεισοδίων στην Ελλάδα και την Κύπρο (Ευστρατιάδης κ.ά., 2014), το προτεινόμενο ποσοστό του 20% δεν ανταποκρίνεται στην υδρολογική συμπεριφορά των λεκανών που εξετάστηκαν (ως επί το πλείστον, ορεινές), στις οποίες, λόγω των ισχυρών κλίσεων, η εμφάνιση της πλημμυρικής απορροής ήταν πολύ ταχύτερη. Μάλιστα, στα περισσότερα επεισόδια η εκτίμηση του ποσοστού ελλειμμάτων ήταν της τάξης του 5% ή και λιγότερο, το οποίο υποδηλώνει ταχεία απόκριση των λεκανών στην βροχόπτωση. Το συμπέρασμα αυτό επιβεβαιώνεται και από άλλους ερευνητές (Baltas et al., 2007, Massari et al., 2014).

Στους πίνακες τιμών CN της SCS (Σχήμα 6-2) εμπεριέχεται η παραδοχή ότι το ποσοστό αρχικών ελλειμμάτων είναι 20%. Συνεπώς, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν αυτούσιες οι τιμές αυτές, αλλά απαιτείται να αναχθούν σε τιμές που αντιστοιχούν σε ποσοστό αρχικών ελλειμμάτων 5%. Η σχέση αναγωγής είναι:

$$CN_{0.05} = \frac{CN_{0.20}}{1.42 - 0.0042 * CN_{0.20}} \quad (6.5)$$

Πλέον, συναρτήσει της ανηγμένης τιμής του αριθμού καμπύλης, εκτιμάται η τιμή της μέγιστης δυνατικής κατακράτησης, δηλαδή της παραμέτρου S, όπως προτείνεται από τη βιβλιογραφία (6.6).

$$S = 254 \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (6.6)$$

6.2.2 Εφαρμογή στη λεκάνη μελέτης

Στην περίπτωση της λεκάνης μελέτης, όπου διακριτοποιείται σε υπολεκάνες, ο υπολογισμός του αριθμού καμπύλης γίνεται σε επίπεδο υπολεκάνης. Δεδομένου, μάλιστα, ότι ο αριθμός καμπύλης μεταβάλλεται χωρικά, ο κάθε αριθμός καμπύλης απορροής που υπολογίζεται είναι σταθμισμένος ως προς την έκταση της αντίστοιχης υπολεκάνης. Δηλαδή, για δεδομένη χρήση γης σε έδαφος συγκεκριμένου υδρολογικού τύπου είναι γνωστός ο CN_i , βάσει πινάκων, καθώς και η έκταση A_i της χρήσης γης του εκάστοτε υδρολογικού τύπου (6.7). Ο υπολογιζόμενος αριθμός καμπύλης απορροής εμπεριέχει την παραδοχή ότι το ποσοστό αρχικών ελλειμμάτων είναι 20%, συνεπώς απαιτείται αναγωγή (6.5). Τα αποτελέσματα για τον αριθμό καμπύλης απορροής, τη μέγιστη δυνατή κατακράτηση και το αρχικό έλλειμμα για όλες τις υπολεκάνες συνοψίζονται στον Πίνακα 6-1.

$$CN_{0.20, \text{υπολεκ}} = \frac{\sum CN_i A_i}{A_{\text{tot, υπολεκ}}} \quad (6.7)$$

Πίνακας 6-1: Αριθμός καμπύλης απορροής, μέγιστη δυνατή κατακράτηση και αρχικό έλλειμμα των υπολεκανών του Νέδοντα σε κάθε διακριτοποίηση

Πλήθος υπολεκανών	Υπολεκάνη	CN _{0.20}	CN _{0.05}	S=f(CN _{0.05}) (mm)	I _a =0.05*S (mm)
1	1-1	61	52	234.46	11.72
4	4-1	68	60	169.73	8.49
	4-2	40	32	541.02	27.05
	4-3	68	60	169.73	8.49
	4-4	48	39	390.74	19.54
7	7-1	65	57	194.21	9.71
	7-2	40	32	541.02	27.05
	7-3	41	33	519.03	25.95
	7-4	70	62	154.58	7.73
	7-5	41	33	519.03	25.95
	7-6	68	60	169.73	8.49
	7-7	55	46	295.10	14.76
10	10-1	79	73	95.88	4.79
	10-2	75	68	120.23	6.01
	10-3	80	74	90.17	4.51
	10-4	47	38	406.72	20.34
	10-5	62	53	221.06	11.05
	10-6	61	52	230.60	11.53
	10-7	40	32	541.02	27.05
	10-8	41	33	519.03	25.95
	10-9	41	33	519.03	25.95
	10-10	55	46	295.10	14.76
21	21-1	75	68	120.23	6.01
	21-2	43	35	478.11	23.91
	21-3	80	74	90.17	4.51
	21-4	65	57	194.21	9.71
	21-5	78	71	101.73	5.09
	21-6	78	71	101.73	5.09
	21-7	65	57	194.21	9.71
	21-8	78	71	101.73	5.09
	21-9	72	64	140.26	7.01
	21-10	80	74	90.17	4.51
	21-11	80	74	90.17	4.51
	21-12	40	32	541.02	27.05
	21-13	41	33	519.03	25.95
	21-14	42	34	498.08	24.90
	21-15	52	43	332.94	16.65
	21-16	40	32	541.02	27.05
	21-17	41	33	519.03	25.95
	21-18	44	36	459.05	22.95
	21-19	45	37	440.83	22.04
	21-20	62	53	221.06	11.05
	21-21	83	77	73.87	3.69

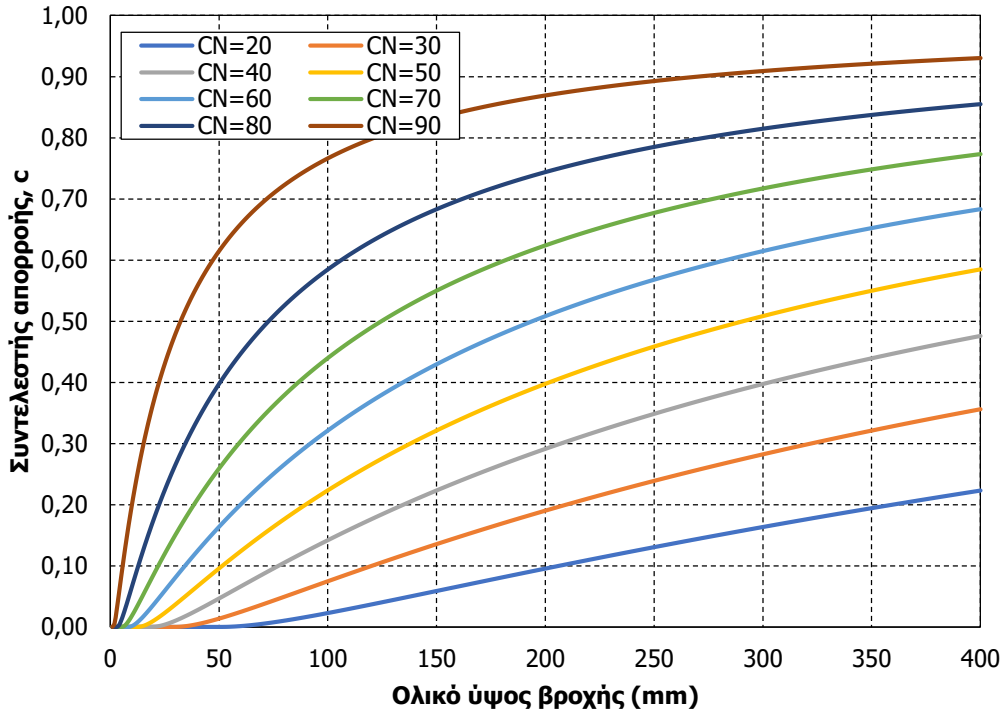
6.3 Συσχέτιση αριθμού καμπύλης απορροής και συντελεστή απορροής

Στη χρονική κλίμακα του πλημμυρικού επεισοδίου, ο συντελεστής απορροής ορίζεται ως ο λόγος του συνολικού ύψους επιφανειακής απορροής προς το συνολικό ύψος βροχόπτωσης (6.8).

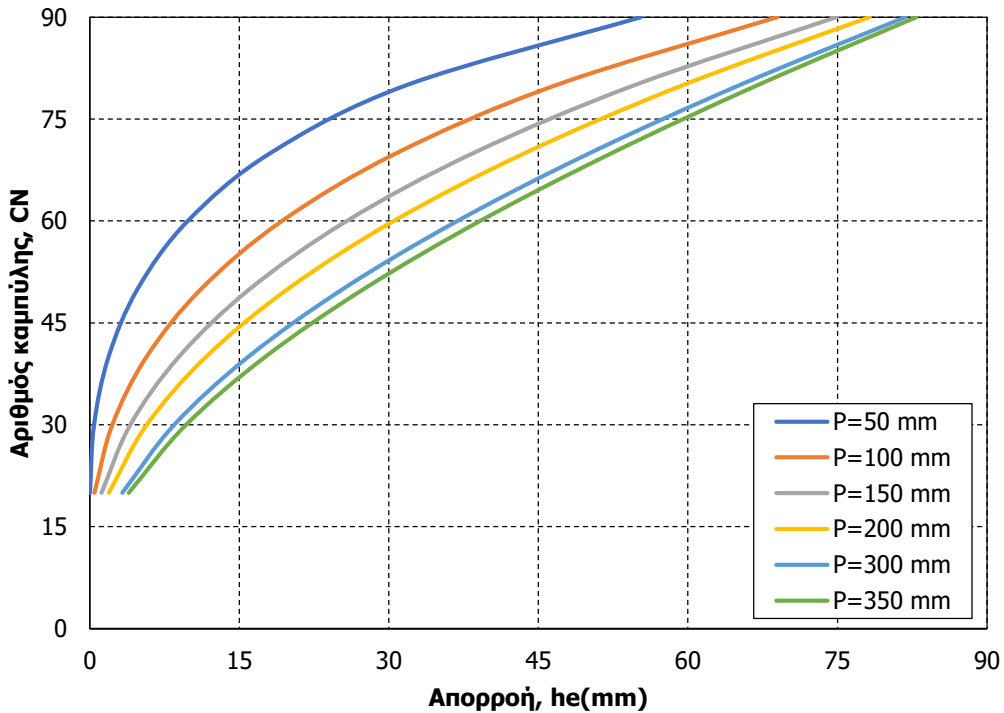
$$c=h_e/h \quad (6.8)$$

Με την υπόθεση ότι το αρχικό έλλειμμα είναι το 5% της μέγιστης δυνητικής κατακράτησης, παρήχθησαν σχέσεις μεταβολής των μεγεθών h , c και CN για ένα ευρύ φάσμα τιμών τους (Σχήμα 6-3). Συγκεκριμένα αποτυπώνεται η σχέση μεταξύ του ολικού ύψους βροχής και του συντελεστή απορροής c , για διάφορες τιμές του CN , από 20 έως 90. Αυτές οι τιμές του CN υποτίθεται έχουν προκύψει από αναγωγή των πινακοποιημένων τιμών για $\alpha=0.05$. Οι τιμές του συντελεστή απορροής προέκυψαν με βάση το καθαρό ύψος βροχής, που εκτιμήθηκε από τη σχέση (6.3). Από το διάγραμμα είναι εμφανής η μη γραμμικότητα της σχέσης που περιγράφει τη συσχέτιση μεταξύ των εξεταζόμενων μεγεθών. Για μεγάλες τιμές του CN ο συντελεστής απορροής αυξάνει γρήγορα. Αντίθετα για μικρές τιμές του CN , λόγω και της επίδρασης των αρχικών ελλειμμάτων, απαιτείται μεγάλο ύψος βροχής προκειμένου να ξεκινήσει η παραγωγή απορροής, ενώ και ο συντελεστής απορροής διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα.

Αποδεικνύεται ότι για πολύ μικρές και πολύ μεγάλες τιμές του αριθμού καμπύλης απορροής CN , ο ρυθμός μεταβολής του συντελεστή απορροής σε σχέση με το ολικό ύψος βροχής είναι μικρός (Σχήμα 6-3). Για παράδειγμα, για ύψη βροχής 50, 100, 150, 200, 300, 350 mm η τιμή του συντελεστή απορροής είναι μεταξύ 0-0.20 και 0.10-0.55 για $CN=20$ και $CN=50$, αντίστοιχα. Συνεπώς, σε λεκάνες όπου η τιμή του CN είναι περίπου μεταξύ 40-80, αναμένεται εντονότερη μεταβολή της συμπεριφοράς της λεκάνης σε βροχοπτώσεις διαφορετικών περιόδων επαναφοράς. Χαρακτηριστική είναι και η σχέση του αριθμού καμπύλης με την παραγόμενη απορροή/συντελεστή απορροής (Σχήμα 6-4). Πιο συγκεκριμένα, όσο αυξάνει το ύψος βροχής, αυξάνει και η γραμμικότητα που περιγράφει τη σχέση αυτή, ενώ για χαμηλότερα ύψη βροχής, η σχέση των δύο μεγεθών είναι έντονα μη γραμμική.



Σχήμα 6-3: Σχέσεις μεταβολής του συντελεστή απορροής συναρτήσει του ολικού ύψους βροχής, για διάφορες τιμές του αριθμού καμπύλης απορροής, για συντελεστή αρχικών ελλειμμάτων $\alpha=0.05$



Σχήμα 6-4: Σχέσεις μεταβολής του αριθμού καμπύλης απορροής συναρτήσει της απορροής, για διάφορες τιμές του ολικού ύψους βροχής, για συντελεστή αρχικών ελλειμμάτων $\alpha=0.05$

7 ΔΙΟΔΕΥΣΗ

7.1 Γενικά

Είναι γνωστό ότι εφόσον κατά μήκος ενός υδατορεύματος δεν πραγματοποιούνται πλευρικές εισροές, ένα υδρογράφημα (πλημμυρικό κύμα) που εισάγεται ανάντη θα εμφανιστεί στα κατάντη με χρονική υστέρηση, μειωμένη αιχμή και αυξημένη χρονική διασπορά. Το φαινόμενο είναι γνωστό ως διόδευση (routing), ενώ το σχετικό πρόβλημα, δηλαδή η μαθηματική αναπαράσταση της χωρικής και χρονικής εξέλιξης της στάθμης $y(x, t)$ και της παροχής $q(x, t)$ του υδατορεύματος, κατά κανόνα περιγράφεται ικανοποιητικά από τις διαφορικές εξισώσεις μονοδιάστατης μη μόνιμης ροής βαθμιαίας μεταβαλλόμενης σε αγωγούς με ελεύθερη επιφάνεια (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999).

Η απλούστερη και πλέον εύχρηστη κατηγορία αριθμητικών τεχνικών είναι οι υδρολογικές μέθοδοι, οι οποίες δεν αντιμετωπίζουν την πλήρη χωροχρονική εξέλιξη του φαινομένου αλλά ελέγχουν την στάθμη και την παροχή σε δύο σημεία, ανάντη και κατάντη (είσοδος και έξοδος υδατορεύματος). Το ενδιάμεσο τμήμα του αγωγού θεωρείται ως κλειστό υδρολογικό σύστημα, όπου η εξίσωση ποσότητας κίνησης αντικαθίσταται από μια συνάρτηση απόκρισης κλειστού τύπου ή από μια εννοιολογική σχέση (Κουτσογιάννης, 2011). Ειδικότερα, αντί της εξίσωσης ορμής εφαρμόζεται μια σχέση έκφρασης του αποθηκευμένου όγκου συναρτήσει άλλων μεταβλητών που υπεισέρχονται στην εξίσωση συνέχειας (7.1).

$$S(t)=f[I(t), O(t)] \quad (7.1)$$

Όπου

$I(t)$: η εισροή στην ανάντη διατομή

$O(t)$: η εκροή στην κατάντη διατομή

Γενικά, για τη διόδευση των πλημμυρικών παροχών στους κλάδους ενός υδρογραφικού δικτύου (υδατόρευμα) μπορεί να επιλεγθεί μία από τις ακόλουθες εναλλακτικές μεθόδους:

- τη μέθοδο Muskingum, η οποία ανήκει στην κατηγορία των μεθόδων διάχυσης κύματος, και δημιουργεί ένα εξομαλυμένο και χρονικά μετατοπισμένο υδρογράφημα εξόδου·
- τη μέθοδο του γραμμικού κινηματικού κύματος (ή απλούστερα, μέθοδος χρονικής υστέρησης), η οποία υλοποιεί απλά και μόνο μια χρονική μετάθεση της απορροής, χωρίς να μεταβάλλει το σχήμα του υδρογραφήματος.

Συνήθως, η μέθοδος Muskingum εφαρμόζεται για υδατορεύματα μικρής κλίσης (ενδεικτικά, <1%), ενώ για μεγαλύτερης κλίσης υδατορεύματα εφαρμόζεται η μέθοδος της χρονικής υστέρησης. Αν L είναι το μήκος του υδατορεύματος, ενώ z_u και z_d είναι τα υψόμετρα του ανάντη και κατόντη κόμβου, αντίστοιχα, η κλίση αυτή εκτιμάται ως:

$$J = \frac{z_u - z_d}{L} \quad (7.2)$$

Επισημαίνεται ότι η παραπάνω σχέση αποτελεί αδρομερή μόνο εκτιμήτρια της μέσης κλίσης του υδατορεύματος, για την ασφαλή εκτίμηση της οποίας πρέπει να ληφθούν διατομές και σε ενδιάμεσες θέσεις. Ωστόσο, όσο το μήκος μειώνεται, και εφόσον δεν υπάρχουν δραστικές γεωμορφολογικές διαφοροποιήσεις στο υπόψη μήκος, τόσο πιο έγκυρη είναι η εν λόγω εκτίμηση της κλίσης.

7.2 Μέθοδος Muskingum

Στη μέθοδο Muskingum, η εξίσωση συνέχειας διατυπώνεται ως εξίσωση διαφορών (7.3).

$$\frac{dS}{dt} = I(t) - O(t) \quad (7.3)$$

Όπου

$S(t)$: ο όγκος νερού που είναι αποθηκευμένος μεταξύ της ανάντη και κατόντη διατομής

$I(t)$: το γνωστό υδρογράφημα εισροής (σε όρους παροχής)

$O(t)$: το ζητούμενο υδρογράφημα εκροής (όλες οι διεργασίες αναφέρονται σε συνεχή χρόνο)

Η αριθμητική προσέγγιση της σχέσης (7.3) στο χρονικό διάστημα $\Delta t = [t, t-1]$ διατυπώνεται μέσω ενός απλού σχήματος οπίσθιων διαφορών, στο οποίο τα αντίστοιχα μεγέθη, πλέον, εκφράζονται σε διακριτό χρόνο (7.4).

$$\frac{S_t - S_{t-1}}{\Delta t} = \frac{I_t + I_{t-1}}{2} - \frac{O_t + O_{t-1}}{2} \quad (7.4)$$

Μεταφέροντας τα άγνωστα μεγέθη S_t και O_t στο αριστερό μέλος λαμβάνεται η σχέση:

$$\frac{S_t}{\Delta t} + \frac{O_t}{2} = \frac{S_{t-1}}{\Delta t} + \frac{I_t + I_{t-1}}{2} - \frac{O_{t-1}}{2} \quad (7.5)$$

Για την επίλυση της σχέσης (7.5) απαιτείται ο προσδιορισμός μιας ακόμη σχέσης, που συνδέει την εκροή O_t με την αποθήκευση S_t . Η μέθοδος Muskingum χρησιμοποιεί την εμπειρική γραμμική σχέση:

$$S_t = K[\theta I_t + (1-\theta)O_t] \quad (7.6)$$

Όπου

θ : αδιάστατη παράμετρος (συντελεστής βάρους)

K : χρονική παράμετρος, η οποία εκφράζει το μέσο χρόνο διαδρομής από την είσοδο μέχρι την έξοδο του υδατορεύματος (ακριβέστερα, την χρονική απόσταση μεταξύ των κέντρων βάρους των υδρογραφημάτων εισροής και εκροής)

Η παραπάνω εμπειρική σχέση περιλαμβάνει δύο συνιστώσες αποθήκευσης, την πρισματική (prism storage) και τη σφηνοειδή (wedge storage). Η πρισματική συνιστώσα, $K O_t$, εκφράζει τον όγκο που αποθηκεύεται μεταξύ των διατομών σε συνθήκες ομοιόμορφης ροής, στις οποίες το βάθος ροής είναι σταθερό, ενώ η σφηνοειδής αποθήκευση, $K \theta [I_t - O_t]$, σχετίζεται με τη μεταβολή της στάθμης κατά μήκος του αγωγού. Σύμφωνα με την παραπάνω υπόθεση, στα αρχικά στάδια της χρονικής εξέλιξης του φαινομένου η στάθμη μειώνεται από τα ανάντη προς τα κατόντη, καθώς αποθηκεύεται νερό στο ποτάμι λόγω ανάσχεσης της πλημμύρας, ενώ στη συνέχεια η στάθμη αυξάνει από τα ανάντη προς τα κατόντη, καθώς ο αποθηκευμένος όγκος απορρέει με υστέρηση.

Συνδυάζοντας τις (7.5) και (7.6) προκύπτει η ακόλουθη αναδρομική εξίσωση:

$$O_t = c_0 I_t + c_1 I_{t-1} + c_2 O_{t-1} \quad (7.7)$$

Όπου c_0 , c_1 , c_2 συντελεστές βάρους που εκτιμώνται από τις σχέσεις:

$$c_0 = \frac{\Delta t - 2K\theta}{2K(1-\theta) + \Delta t} \quad (7.8)$$

$$c_1 = \frac{\Delta t + 2K\theta}{2K(1-\theta) + \Delta t} \quad (7.9)$$

$$c_2 = \frac{-\Delta t - 2K(1-\theta)}{2K(1-\theta) + \Delta t} \quad (7.10)$$

Οι συντελεστές ικανοποιούν την προφανή σχέση $c_0+c_1+c_2=1$. Για δεδομένο υδρογράφημα εισόδου, και συνεπώς γνωστές την τρέχουσα και την προηγούμενη τιμή της εισροής, I_t και I_{t-1} , αντίστοιχα, και με γνωστή την εκροή του προηγούμενου βήματος, O_{t-1} , είναι δυνατός ο βήμα προς βήμα υπολογισμός της επίκαιρης εκροής O_t . Για την εφαρμογή της αναδρομικής σχέσης απαιτείται ο προσδιορισμός των ακόλουθων μεγεθών:

- του υπολογιστικού βήματος, Δt
- των παραμέτρων K και θ
- των τιμών της εισροής, I_0 , και εκροής, O_0 , στο πρώτο βήμα (αρχικές συνθήκες)

Το υπολογιστικό βήμα Δt ταυτίζεται με το χρονικό βήμα της προσομοίωσης, που εξαρτάται από τον χρόνο συγκέντρωσης της μικρότερης υπολεκάνης. Σε κάθε περίπτωση, οφείλει να είναι υποπολλαπλάσιο του K . Οι παράμετροι K και θ εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του υδατορεύματος (διατομή, μήκος, κλίση, συντελεστής απωλειών). Γενικά, για δεδομένο μήκος L , όσο μειώνεται η κλίση ο χρόνος K αυξάνει, ενώ, αντίθετα, η τιμή της παραμέτρου θ μειώνεται. Η παράμετρος θ τείνει να μηδενιστεί για υδατορεύματα εξαιρετικά ήπιας κλίσης και με πλευρική υπερχείλιση, οπότε η ροή προσομοιάζει τη λειτουργία γραμμικού ταμιευτήρα. Αντίθετα, για σχετικά απότομες κλίσεις και καλά διαμορφωμένες διατομές, η παράμετρος θ προσεγγίζει την θεωρητικά μέγιστη τιμή 0.50.

Στις υδρολογικές αναλύσεις, για τα υδατορεύματα για τα οποία επιλέγεται η εφαρμογή της μεθόδου Muskingum, λαμβάνεται $\theta=0.20$, που είναι η τυπική βιβλιογραφική τιμή για φυσικούς αγωγούς. Όσον αφορά στη χρονική παράμετρο K , δεδομένου ότι εκφράζει έναν μέσο χρόνο διαδρομής από την είσοδο μέχρι την έξοδο του υδατορεύματος, αυτή εκτιμάται με βάση τον χρόνο συγκέντρωσης της λεκάνης και τα χαρακτηριστικά των υδατορευμάτων (μήκος, κλίση, τραχύτητα), σύμφωνα με τη σχέση (5.3). Κατά συνέπεια, για μήκος διαδρομής L , ισχύει $K=L/V$. Προκειμένου να ληφθεί υπόψη η αύξηση της ταχύτητας ροής, και συνακόλουθα η μείωση του χρόνου ροής λόγω αύξησης της παραγόμενης απορροής με την αύξηση της περιόδου επαναφοράς, η τιμή της παραμέτρου K μειώνεται, με αναφορά στον χρόνο συγκέντρωσης της συνολικής λεκάνης απορροής.

Στον προσδιορισμό των μεγεθών Δt , K και θ , είναι αναγκαίο να εξασφαλίζεται ότι οι υπολογιζόμενες εκροές θα είναι μη αρνητικές. Στην ιδανική περίπτωση, θα πρέπει να ισχύει $K=\Delta t$, που σημαίνει ότι το υπολογιστικό βήμα να ταυτίζεται με το μέσο χρόνο διαδρομής του κύματος στο υδατόρευμα. Αν αυτό δεν είναι εφικτό, τότε για την αποφυγή αρνητικών παροχών, το υπολογιστικό βήμα Δt θα πρέπει να επιλέγεται στο διάστημα (Hjelmfelt Jr., 1985):

$$2K\theta \leq \Delta t \leq 2K(1-\theta) \quad (7.11)$$

Πρακτικά, για να υπάρχει ακρίβεια στους υπολογισμούς, το χρονικό βήμα θα πρέπει να λαμβάνεται μεταξύ των τιμών $K/3$ και $K/4$ (Κουτσογιάννης, 2011).

7.3 Μέθοδος χρονικής υστέρησης

Η υλοποίηση του μοντέλου χρονικής υστέρησης (lag) είναι εξαιρετικά απλή, καθώς το υδρογράφημα εξόδου προκύπτει με χρονική μετατόπιση των τεταγμένων του υδρογραφήματος εισόδου, δηλαδή:

$$O_t = I_{t-K} \quad (7.12)$$

Όπου

K: ο χρόνος υστέρησης του συγκεκριμένου κλάδου του υδρογραφικού δικτύου, που αποτελεί τη μοναδική παράμετρο του μοντέλου

Αν L το μήκος του υδατορεύματος, τότε η ποσότητα L/K εκφράζει την ταχύτητα του γραμμικού κινηματικού κύματος, το οποίο μετακινείται προς τα κατάντη χωρίς καμία μεταβολή του σχήματός του, και συνεπώς χωρίς εξομάλυνση της παροχής αιχμής. Το μοντέλο του κινηματικού κύματος εφαρμόζεται σε τμήματα του δικτύου με σχετικά μεγάλη κλίση, τέτοια ώστε η μεταβολή της στάθμης να είναι πολύ μικρή σε σχέση με την κλίση του πυθμένα.

Απαιτείται η εκτίμηση μιας χρονικής παραμέτρου K, που εκφράζει, απλουστευτικά, έναν μέσο χρόνο ροής μεταξύ του ανάντη και κατάντη κόμβου. Η εκτίμηση του χρόνου ροής στους κλάδους του υδρογραφικού δικτύου μιας λεκάνης απορροής βασίζεται σε μια ψευδο-υδραυλική προσέγγιση. Στη προσέγγιση αυτή, η ροή θεωρείται ομοιόμορφη, συνεπώς είναι εφαρμόσιμη η σχέση του Manning (7.13).

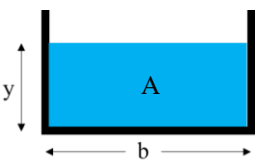
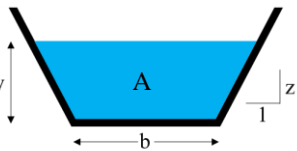
$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} J^{1/2} \quad (7.13)$$

Όπου

Q: η ταχύτητα ροής στον κλάδο διόδευσης
 n: ο συντελεστής τραχύτητας κατά Manning
 R: η υδραυλική ακτίνα
 A: η επιφάνεια της υγρής διατομής
 J: η υδραυλική κλίση, που στην ομοιόμορφη ροή ταυτίζεται με τη μέση κλίση του πυθμένα

Από τα παραπάνω μεγέθη, η τραχύτητα μπορεί να εκτιμηθεί μακροσκοπικά, με βάση την κατάσταση της κοίτης και της διατομής (ύπαρξη φερτών και άλλων εμποδίων, βλάστηση, κτλ.), ενώ η κλίση εκτιμάται προσεγγιστικά από τη σχέση (7.2). Αντίθετα, η υδραυλική ακτίνα και η επιφάνεια της υγρής διατομής απαιτούν υδραυλικούς υπολογισμούς, καθώς εξαρτώνται από τη γεωμετρία της διατομής και το βάθος ροής, που είναι συνάρτηση της παροχής.

Πίνακας 7-1: Υδραυλικά μεγέθη ορθογωνικής και τραπεζοειδούς διατομής

Διατομή	Εμβαδόν υγρής διατομής A	Ομοιόμορφο βάθος
	by	$y = \frac{1}{b} \left[\frac{Qn}{J^2} (b+2y)^2 \right]^{\frac{3}{5}}$
	$(b+zy)y$	$y = \frac{1}{b+zy} \left[\frac{Qn}{J^2} (b+2y\sqrt{1+z^2})^2 \right]^{\frac{3}{5}}$

7.4 Εφαρμογή στη λεκάνη μελέτης

Δεδομένου ότι οι κλίσεις που αναπτύσσονται στη λεκάνη είναι μεγάλες (μεγαλύτερες του 1%), εφαρμόζεται η μέθοδος της χρονικής υστέρησης. Από τον οπτικό έλεγχο διάφορων διατομών σε περιβάλλον ΣΓΠ διαπιστώθηκε ότι η τραπεζοειδής διατομή αποτελεί μια καλή προσομοίωση για την υδραυλική αποτύπωση του υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης μελέτης. Σε όλους τους κλάδους του προσομοιώματος τα χαρακτηριστικά της διατομής θεωρούνται ενιαία. Το πλάτος, b, της τραπεζοειδούς διατομής λαμβάνεται ίσο με 25 m, η κλίση πρανών επιλέγεται ίση με 1.5 και ο συντελεστής τραχύτητας κατά Manning, n, θεωρείται ίσος με 0.045.

Για την εκτίμηση των χρονικών παραμέτρων του μοντέλου, δηλαδή για τους χρόνους υστέρησης των κλάδων του μοντέλου, εφαρμόστηκε μια λεπτομερής υδραυλική προσέγγιση. Έστω A ο κόμβος του δικτύου που δεν καταλήγει σε αυτόν άλλος κλάδος. Ο A αποτελεί κόμβο αρχής του πιο απομακρυσμένου κλάδου i. Ο κόμβος B είναι ο κόμβος πέρας του κλάδου αυτού. Η παροχή εισόδου στον κόμβο A υπολογίζεται εύκολα, χωρίς να απαιτούνται χρονικές παράμετροι από το μοντέλο. Με γνωστή τη παροχή και από την αναδρομική σχέση υπολογίζεται με επαναλήψεις το ομοιόμορφο βάθος και στη συνέχεια η επιφάνεια της υγρής διατομής. Τέλος υπολογίζεται η ταχύτητα ως το πηλίκο της παροχής προς την επιφάνεια της υγρής διατομής (7.14).

$$V = \frac{Q}{A} \quad (7.14)$$

Αφού υπολογιστεί ο χρόνος διάδευσης σε λεπτά, διορθώνεται στο προσομοίωμα και γίνεται νέα εκτέλεση. Μετά τη διόρθωση υπολογίζεται σωστά και η παροχή στον κόμβο B, συνεπώς με την ίδια επαναληπτική διαδικασία διορθώνονται οι χρόνοι υστέρησης και των κατάντη κλάδων. Η διαδικασία αυτή είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα λόγω του μεγάλου υπολογιστικού φόρτου και των συνεχών διορθώσεων. Ωστόσο, αυτή η μεθοδολογία είναι πολύ ακριβής, δεδομένου ότι λαμβάνει υπόψη την επίδραση των διαφορετικών βροχοπτώσεων στην υδραυλική απόκριση του υδρογραφικού δικτύου. Παρ' όλα αυτά, στη βιβλιογραφία υπάρχουν και εμπειρικές μέθοδοι εκτίμησης της ταχύτητας ροής με βάση τα φυσιογραφικά

χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής. Οι μέθοδοι αυτές είναι σίγουρα υπολογιστικά ταχύτερες, όμως περιγράφουν με πολύ αδρομερή τρόπο την υδραυλική συμπεριφορά του υδρογραφικού δικτύου.

8 ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

8.1 Στόχος ανάλυσης

Στο Κεφάλαιο 6.3 αναδείχθηκε η επίδραση του αριθμού καμπύλης απορροής και των διαφορετικών υψών βροχής στον συντελεστή απορροής, δηλαδή στον πλημμυρικό όγκο απορροής μιας μεμονωμένης λεκάνης. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο η ανάλυση αυτή επεκτείνεται, συμπεριλαμβάνοντας και το επίπεδο διακριτοποίησης. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζεται η επίδραση του επιπέδου διακριτοποίησης μιας θεωρητικής λεκάνης στον πλημμυρικό όγκο. Η θεωρητική λεκάνη αναπαρίσταται από ένα τυχαίο πεδίο (random field), που διακριτοποιείται σε υπολεκάνες, διαμορφώνοντας έναν κάρναβο. Στόχος της συγκεκριμένης ανάλυσης είναι να διερευνηθεί η συσχέτιση διαφορετικών υψών βροχής, διαφορετικών επιπέδων διακριτοποίησης και διαφορετικών σεναρίων ετερογένειας του αριθμού καμπύλης CN με τον παραγόμενο πλημμυρικό όγκο μιας τυχαίας θεωρητικής λεκάνης.

Επισημαίνεται ότι στη συγκεκριμένη ανάλυση αγνοείται η έκταση των υπολεκανών και η διάδοση του πλημμυρικού κύματος, δηλαδή δεν λαμβάνεται υπόψη η χρονική διάσταση της πλημμυρικής απορροής. Η ανάλυση της θεωρητικής λεκάνης εστιάζει, κυρίως, στην ανάδειξη της σπουδαιότητας του αριθμού καμπύλης απορροής και του επιπέδου διακριτοποίησης για τον προσδιορισμό της πλημμυρικής απορροής σε διαφορετικά ύψη βροχής.

8.2 Δεδομένα της αριθμητικής εφαρμογής

Η θεωρητική λεκάνη διακριτοποιείται σε 5, 10, 20, 40 και 80 υπολεκάνες. Η μέση τιμή του αριθμού καμπύλης απορροής CN για όλη τη θεωρητική λεκάνη επιλέγεται να είναι ίση με 52 και γίνεται η παραδοχή ότι η μεταβολή του CN ακολουθεί κανονική κατανομή.

Η ετερογένεια του CN στην συνολική έκταση της θεωρητικής λεκάνης εκφράζεται με τον συντελεστή μεταβλητότητάς του (coefficient of variation). Όσο μικρότερος είναι ο συντελεστής μεταβλητότητας, τόσο μεγαλύτερη είναι η ομοιογένεια του CN στην συνολική έκταση της λεκάνης, με το CN των υπολεκανών να είναι πολύ κοντινό στη μέση τιμή του CN της συνολικής λεκάνης. Στην αριθμητική εφαρμογή, ο συντελεστής μεταβλητότητας λαμβάνει τιμή 5%, 10%, 15% και 20%, ενώ εξετάζονται ύψη βροχής 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160 mm.

8.3 Μεθοδολογία

Υπολογίζεται η μέγιστη δυνατή κατακράτηση και το αρχικό έλλειμμα με $\alpha=0.05$. Ακολούθως, με βάση τη σχέση (6.3) υπολογίζεται η παραγόμενη απορροή της αδιαμέριστης λεκάνης h_e^1 για κάθε ύψος βροχής. Για κάθε τιμή του συντελεστή μεταβλητότητας εφαρμόζεται η ακόλουθη μεθοδολογία:

- Ορίζεται ένας αρχικός κάρναβος με άρτιο πλήθος N υπολεκανών, όπου η κάθε μία έχει τον δικό της CN . Για κάθε υπολεκάνη i υπολογίζεται η μέγιστη δυνατή κατακράτηση και το αρχικό έλλειμμα με $\alpha=0.05$. Ακολούθως, με βάση τη σχέση (6.3) υπολογίζεται η παραγόμενη απορροή της κάθε υπολεκάνης για κάθε ύψος βροχής.
- Στη συνέχεια, υπολογίζεται ανά δύο ο μέσος όρος των CN του αρχικού κάρναβου, οπότε προκύπτει ένας πιο αδρομερής κάρναβος με $N/2$ υπολεκάνες. Η διαδικασία υπολογισμού των απορροών είναι όμοια με την περίπτωση των N υπολεκανών.
- Η διαδικασία συνένωσης των υπολεκανών επαναλαμβάνεται μέχρι να προκύψει περιττό πλήθος υπολεκανών.
- Τέλος, σε όλες τις περιπτώσεις διακριτοποίησης, για κάθε ύψος βροχής υπολογίζεται ο μέσος όρος της παραγόμενης απορροής.
- Για κάθε περίπτωση διακριτοποίησης, K , ως ο καταλληλότερος δείκτης αξιολόγησης και σύγκρισης των αποτελεσμάτων ενδείκνυται το ποσοστό μεταβολής της συνολικής παραγόμενης απορροής h_e^K σε σχέση με την απορροή της αδιαμέριστης λεκάνης (6.9).

$$\Delta(\%) = \frac{(h_e^K - h_e^1)}{h_e^K} * 100 \quad (6.9)$$

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	50.0	53.4	47.9	51.3	50.2	45.0	47.6	42.7
2	49.7	56.2	58.0	51.9	56.9	54.7	52.7	43.1
3	46.3	47.6	56.0	57.2	57.8	50.7	47.4	45.4
4	50.3	53.8	51.0	52.2	46.9	55.3	46.1	60.1
5	49.4	51.7	61.2	48.9	54.7	56.5	47.6	48.8
6	54.4	55.0	58.7	50.9	53.0	53.1	56.7	49.7
7	54.6	46.4	52.9	54.8	40.0	51.7	59.0	61.2
8	56.1	55.2	58.6	54.2	48.2	51.6	48.1	51.0
9	54.6	62.7	49.9	45.7	57.4	54.3	48.5	48.6
10	47.1	53.0	59.3	52.3	47.1	49.2	46.3	55.4

(α)

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	47.7	59.5	43.1	51.3	44.7	37.8	57.7	57.5
2	47.5	59.1	66.1	37.7	61.2	61.4	59.0	53.7
3	70.1	59.9	53.9	43.3	52.3	56.5	62.9	47.6
4	69.4	50.3	57.5	34.6	40.0	43.7	47.6	53.5
5	52.7	48.8	35.3	54.4	57.3	44.7	47.1	57.4
6	51.4	43.4	67.9	55.0	65.0	50.0	50.6	36.4
7	48.8	56.5	54.3	60.3	58.4	46.8	54.6	46.4
8	72.3	47.6	59.2	49.7	53.2	41.9	59.8	69.7
9	63.1	37.8	62.7	50.7	57.5	30.1	52.7	50.8
10	60.4	40.5	44.7	37.3	47.1	53.9	29.6	55.8

(β)

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	48.9	24.7	45.5	68.1	40.8	46.7	55.0	32.3
2	69.8	67.5	36.8	58.7	67.3	57.3	51.3	44.8
3	44.8	46.9	44.2	45.7	63.8	75.7	45.6	68.8
4	34.6	54.3	60.4	36.8	50.3	18.8	58.0	56.8
5	55.0	20.8	53.7	39.6	64.2	48.5	55.3	59.2
6	60.7	62.7	21.2	65.8	65.6	67.2	74.4	30.5
7	21.2	55.8	49.2	71.6	58.3	46.5	38.4	55.5
8	53.6	61.7	67.3	36.1	74.5	23.6	67.4	49.2
9	58.2	46.6	53.9	23.6	35.2	54.1	62.0	56.5
10	42.0	56.6	44.8	52.6	66.7	76.0	64.2	73.2

(γ)

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	69.4	47.9	64.2	57.9	66.2	69.7	22.8	58.4
2	79.3	25.2	77.4	52.7	12.6	61.0	57.4	37.2
3	51.9	67.3	22.8	45.2	57.3	55.4	39.7	64.9
4	64.0	52.5	42.8	47.3	40.6	27.1	38.7	18.8
5	44.5	73.6	11.5	55.5	64.0	48.4	20.2	56.4
6	51.2	48.5	63.3	66.3	44.8	61.8	39.2	58.0
7	71.4	63.1	58.9	30.2	10.3	63.6	34.5	67.8
8	46.7	44.7	60.9	62.1	92.0	39.5	39.2	53.7
9	41.0	54.9	74.9	49.8	80.1	71.4	50.3	49.4
10	96.9	70.9	19.6	56.1	62.3	77.3	19.8	46.5

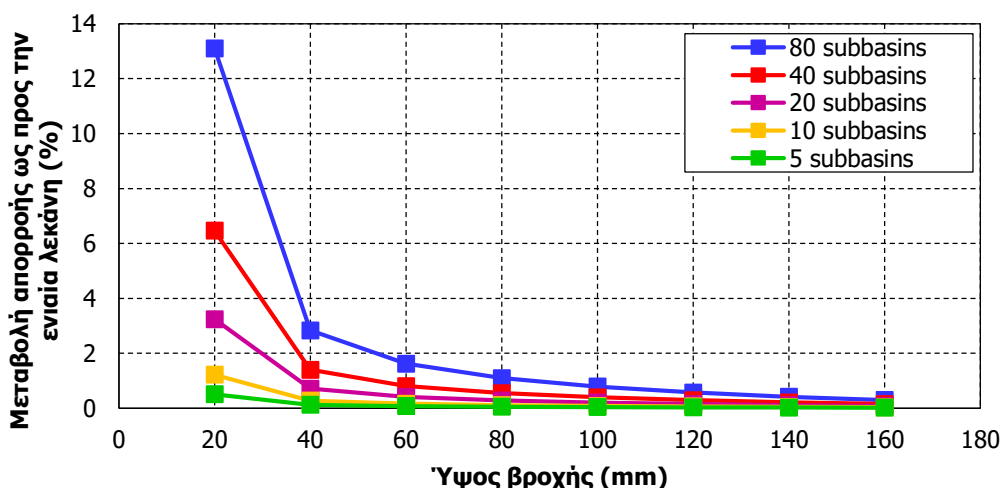
(δ)

Σχήμα 8-1: Κατανομή αριθμών καμπύλης απορροής στην περίπτωση των 80 υπολεκάνων της θεωρητικής λεκάνης, για συντελεστή μεταβλητότητας (α) 5%, (β) 10%, (γ) 15%, (δ) 20%

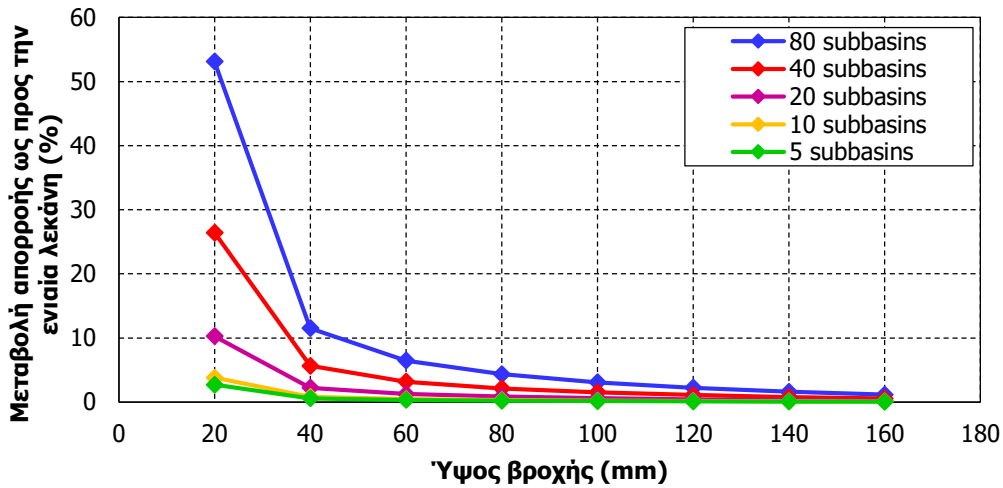
8.4 Αποτελέσματα ανάλυσης

Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι η ποσοστιαία διαφορά της απορροής είναι μεγαλύτερη για μικρότερα ύψη βροχής και μεγαλύτερο πλήθος υπολεκανών. Η τάση αυτή είναι ανεξάρτητη του συντελεστή μεταβλητότητας του αριθμού καμπύλης απορροής, δηλαδή της ετερογένειάς του (Σχήμα 8-2, 8-3, 8-4, 8-5). Διαπιστώνεται, ακόμη, ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός ετερογένειας του αριθμού καμπύλης απορροής εντός της θεωρητικής λεκάνης, τόσο μεγαλύτερη είναι η ποσοστιαία διαφορά της απορροής, όσο μειώνεται το ύψος βροχής. Αυτή η τάση καταγράφεται σε κάθε περίπτωση διακριτοποίησης (Σχήμα 8-6, 8-7, 8-8, 8-9, 8-10).

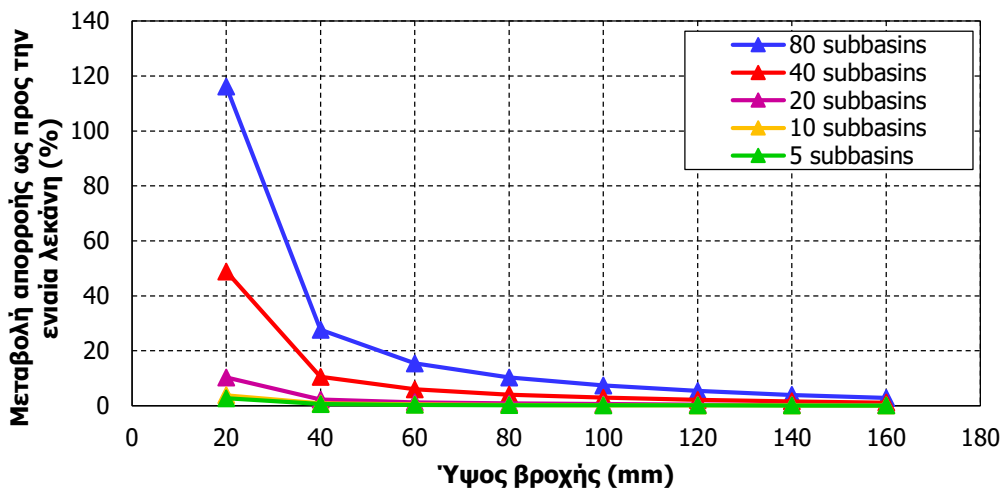
Συνεπώς, η διακριτοποίηση της λεκάνης σε υπολεκάνες, ανεξαρτήτως πλήθους, οδηγεί σε αυξημένη απορροή. Από ένα ύψος βροχής και πάνω δεν αναμένεται μεταβολή του όγκου απορροής λόγω της διακριτοποίησης. Άρα, είναι απόφαση του μελετητή και του σκοπού της μελέτης η ανάπτυξη λεπτομερούς χωρικού μοντέλου. Ωστόσο, στην αντιπλημμυρική μελέτη κάποιου σημαντικού έργου το ύψος της βροχής σχεδιασμού αναμένεται να είναι υψηλό λόγω της μεγάλης περιόδου επαναφοράς. Συνεπώς, σε τέτοιες περιπτώσεις είναι στη κρίση του μελετητή να αποφασίσει αν η σπουδαιότητα του έργου δικαιολογεί την κατάρτιση ενός συνθετότερου χωρικού μοντέλου.



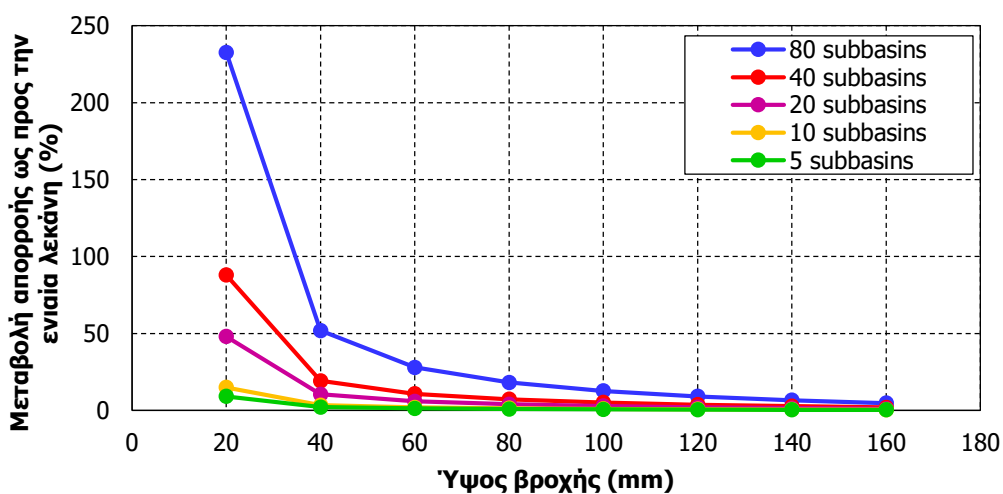
Σχήμα 8-2: Ποσοστιαία μεταβολή της απορροής σε σχέση με το ύψος βροχής των διαφορετικών διακριτοποιήσεων ως προς την αδιαμέριστη λεκάνη για συντελεστή μεταβλητότητας του CN 5%



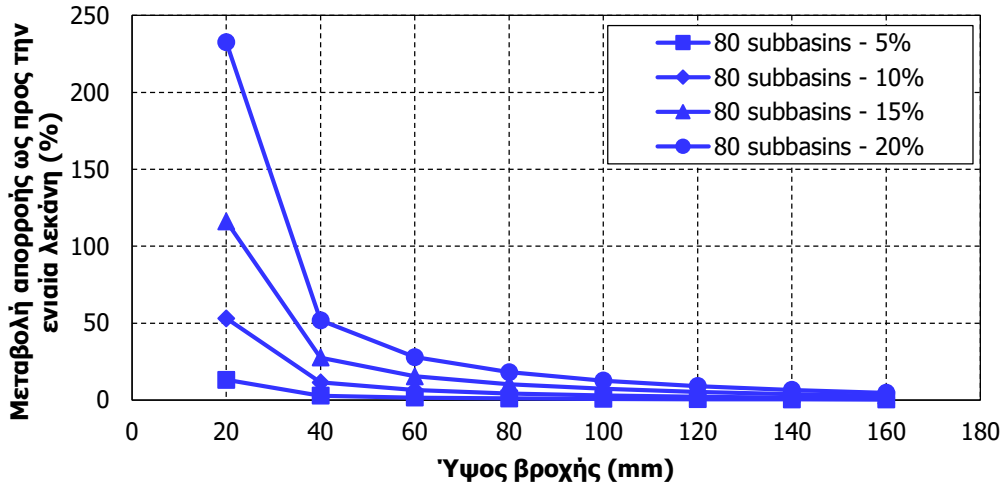
Σχήμα 8-3: Ποσοστιαία μεταβολή της απορροής σε σχέση με το ύψος βροχής των διαφορετικών διακριτοποιήσεων ως προς την αδιαμέριστη λεκάνη για συντελεστή μεταβλητότητας του CN 10%



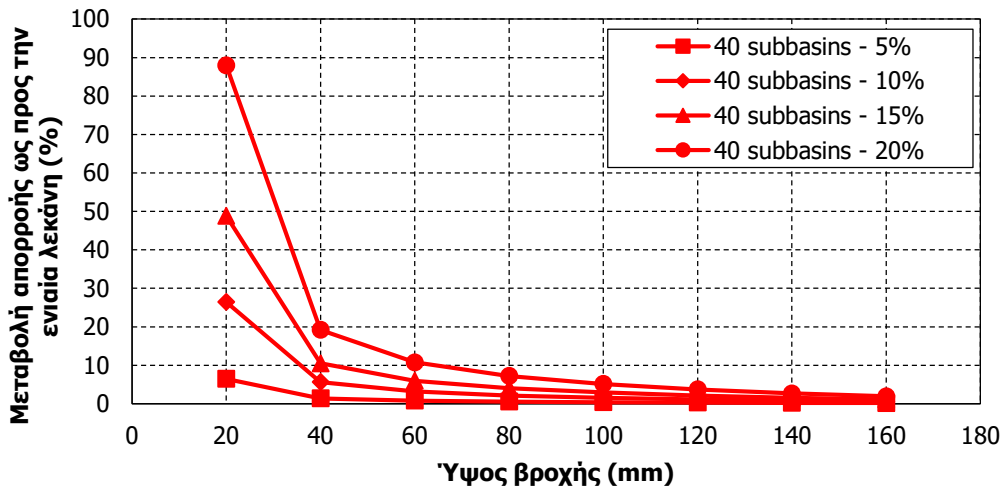
Σχήμα 8-4: Ποσοστιαία μεταβολή της απορροής σε σχέση με το ύψος βροχής των διαφορετικών διακριτοποιήσεων ως προς την αδιαμέριστη λεκάνη για συντελεστή μεταβλητότητας του CN 15%



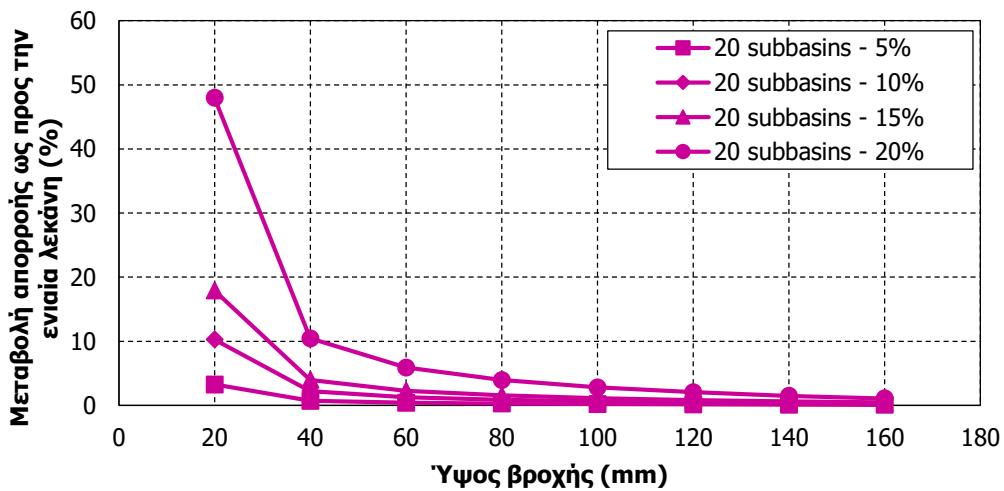
Σχήμα 8-5: Ποσοστιαία μεταβολή της απορροής σε σχέση με το ύψος βροχής των διαφορετικών διακριτοποιήσεων ως προς την αδιαμέριστη λεκάνη για συντελεστή μεταβλητότητας του CN 20%



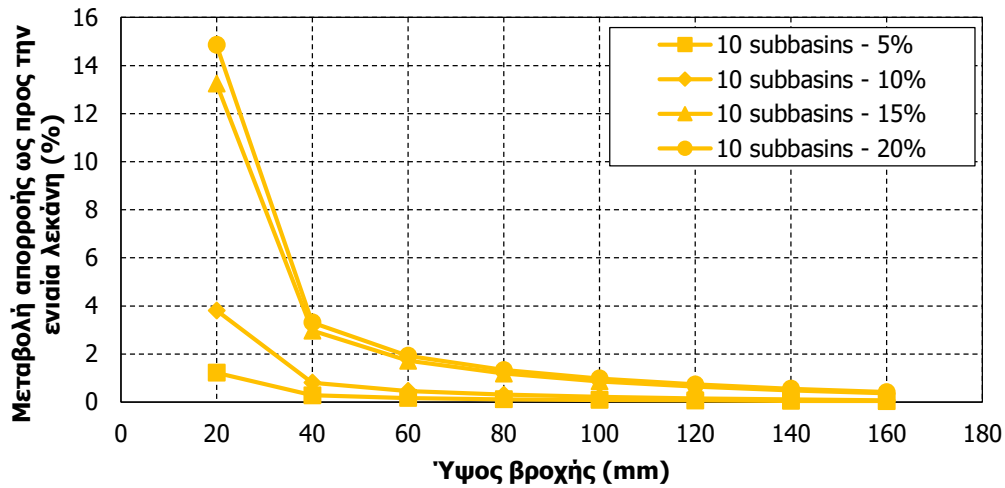
Σχήμα 8-6: Ποσοστιαία μεταβολή της απορροής σε σχέση με το ύψος βροχής της περίπτωσης των 80 υπολεκανών ως προς την αδιαμέριστη λεκάνη για διαφορετικούς συντελεστές μεταβλητότητας του CN



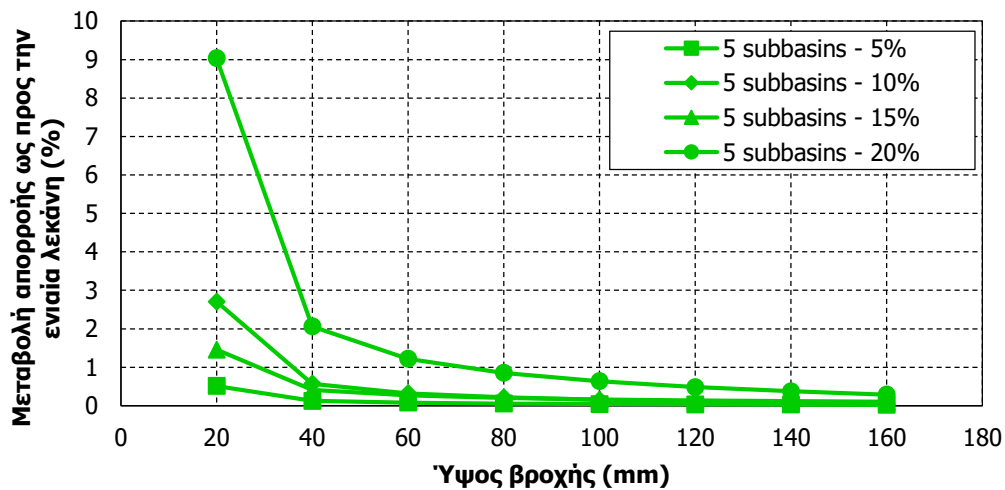
Σχήμα 8-7: Ποσοστιαία μεταβολή της απορροής σε σχέση με το ύψος βροχής της περίπτωσης των 40 υπολεκανών ως προς την αδιαμέριστη λεκάνη για διαφορετικούς συντελεστές μεταβλητότητας του CN



Σχήμα 8-8: Ποσοστιαία μεταβολή της απορροής σε σχέση με το ύψος βροχής της περίπτωσης των 20 υπολεκανών ως προς την αδιαμέριστη λεκάνη για διαφορετικούς συντελεστές μεταβλητότητας του CN



Σχήμα 8-9: Ποσοστιαία μεταβολή της απορροής σε σχέση με το ύψος βροχής της περίπτωσης των 10 υπολεκανών ως προς την αδιαμέριστη λεκάνη για διαφορετικούς συντελεστές μεταβλητότητας του CN



Σχήμα 8-10: Ποσοστιαία μεταβολή της απορροής σε σχέση με το ύψος βροχής της περίπτωσης των 5 υπολεκανών ως προς την αδιαμέριστη λεκάνη για διαφορετικούς συντελεστές μεταβλητότητας του CN

9 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΛΕΚΑΝΗΣ ΝΕΛΟΝΤΑ

9.1 Προσομοίωση στο λογισμικό HEC-HMS

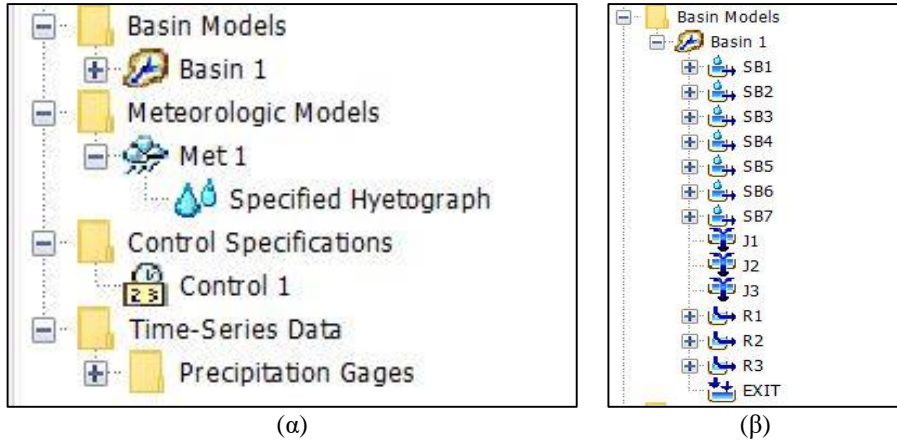
Το πλέον διαδεδομένο και εύχρηστο εργαλείο για μελέτες πλημμυρών είναι το HEC-HMS, το οποίο αναπτύχθηκε από το U.S. Army Corp of Engineers, και αποτελεί εξέλιξη του μοντέλου HEC-1. Το λογισμικό, το οποίο είναι ελεύθερα διαθέσιμο στο διαδίκτυο, χρησιμοποιείται τόσο σε επίπεδο σχεδιασμού όσο και για την πρόγνωση πλημμυρικών φαινομένων σε πραγματικό χρόνο.

Το HEC-HMS υιοθετεί μια ημικατανεμημένη σχηματοποίηση της λεκάνης. Σε κάθε υπολεκάνη και για κάθε διεργασία του υδρολογικού κύκλου μπορούν να οριστούν διαφορετικά μοντέλα ή διαφορετικές παράμετροι του ίδιου μοντέλου. Η φυσική περιγραφή της λεκάνης υλοποιείται καθορίζοντας στο πρόγραμμα το μοντέλο λεκάνης (basin model) και είναι διατίθενται τα εξής μοντέλα:

- μοντέλα εκτίμησης υδρολογικών ελλειμμάτων
- μοντέλα εκτίμησης άμεσης απορροής
- μοντέλα εκτίμησης βασικής απορροής
- μοντέλα διόδευσης πλημμυρών

Ακόμη, το πρόγραμμα διαθέτει μοντέλα για προσομοίωση έργων ελέγχου στάθμης νερού, όπως εκτροπές, δεξαμενές ανάσχεσης. Για τη διόδευση των υδρογραφήματων διατίθενται διάφορα αριθμητικά σχήματα, ενώ παρέχεται και τη δυνατότητα διόδευσης μέσω υπερχειλιστή ταμειυτήρα.

Ο μετασχηματισμός της ενεργού βροχόπτωσης σε πλημμυρογράφημα στην έξοδο της κάθε υπολεκάνης υλοποιείται με εφαρμογή της θεωρίας του μοναδιαίου υδρογραφήματος. Συγκεκριμένα επιλέγεται το μοναδιαίο υδρογράφημα της SCS (Standard PRF 484). Επισημαίνεται ακόμη ότι στο μοντέλο των υδρολογικών ελλειμμάτων, πέραν του CN, συμπληρώνεται από τον χρήστη και το προαιρετικό πεδίο Initial Abstraction, διότι η default τιμή εμπεριέχει την τυπική παραδοχή $\alpha=20\%$.



Σχήμα 9-1: HEC-HMS (α) Δεδομένα εισόδου (Components) και (β) στοιχεία προσομοίωσης της φυσικής λεκάνης

Subbasin	Loss	Transform	Options
Basin Name: Basin 1			
Element Name: SB1			
Description:			
Downstream:	J1		
*Area (KM2)	19,65		
Latitude Degrees:			
Longitude Degrees:			
Discretization Method:	--None--		
Canopy Method:	--None--		
Surface Method:	--None--		
Loss Method:	SCS Curve Number		
Transform Method:	SCS Unit Hydrograph		
Baseflow Method:	--None--		

(α)

Subbasin	Loss	Transform	Options
Basin Name: Basin 1			
Element Name: SB1			
Initial Abstraction (MM)	9,71		
*Curve Number:	57		
*Impervious (%)	0,0		

(β)

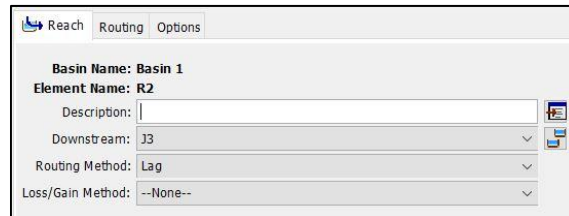
Subbasin	Loss	Transform	Options
Basin Name: Basin 1			
Element Name: SB1			
Graph Type:	Standard (PRF 484)		
*Lag Time (MIN)	43		

(γ)

Σχήμα 9-2: HEC-HMS (α) Περιγραφή του μοντέλου της υπολεκάνης, (β) Δεδομένα εισόδου του μοντέλου απωλειών και (γ) Δεδομένα εισόδου του μοντέλου απορροής



(α)

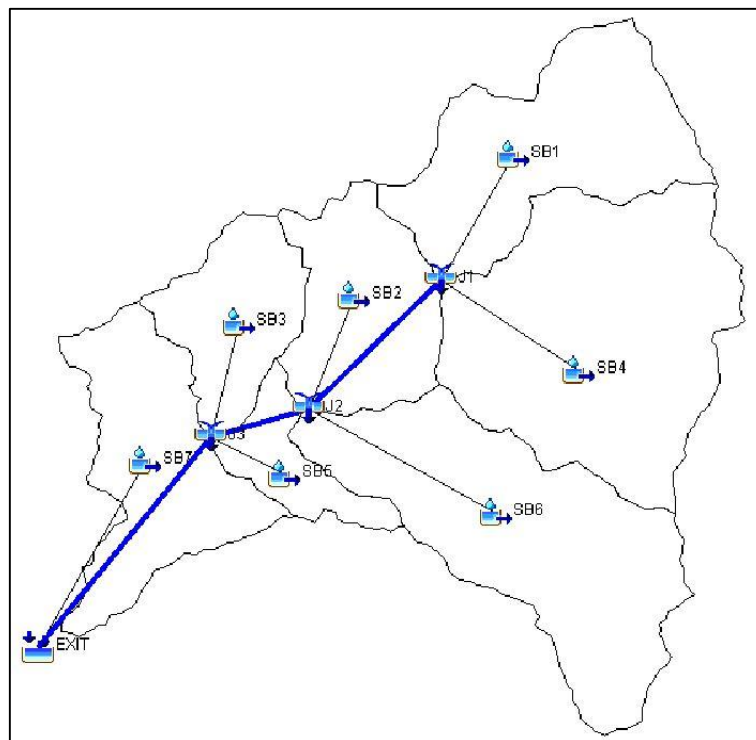


(β)



(γ)

Σχήμα 9-3: HEC-HMS (α) Περιγραφή του μοντέλου του κόμβου, (β) Περιγραφή του μοντέλου του κλάδου και (γ) Δεδομένα εισόδου του μοντέλου διόδευσης στον κλάδο

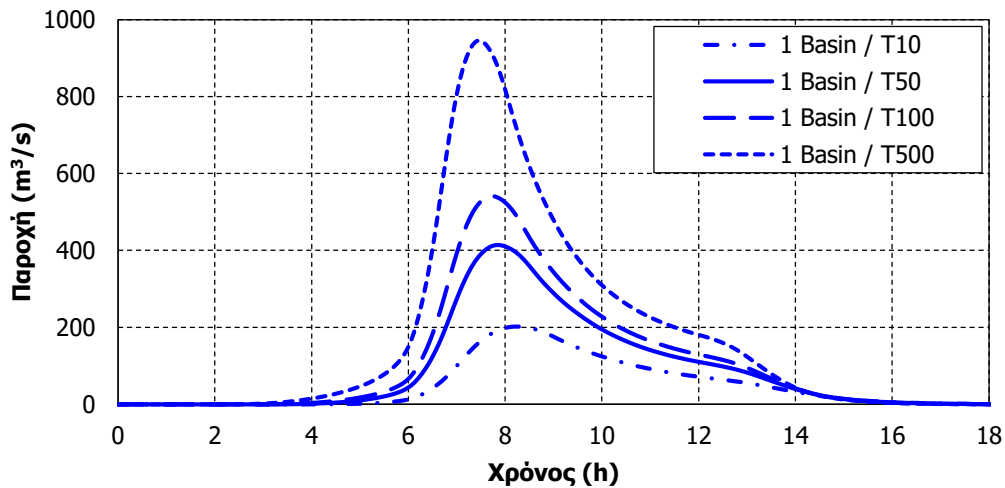


Σχήμα 9-4: Παράδειγμα αποτύπωσης του υδρολογικού μοντέλου της λεκάνης του Νέδοντα στο HEC-HMS

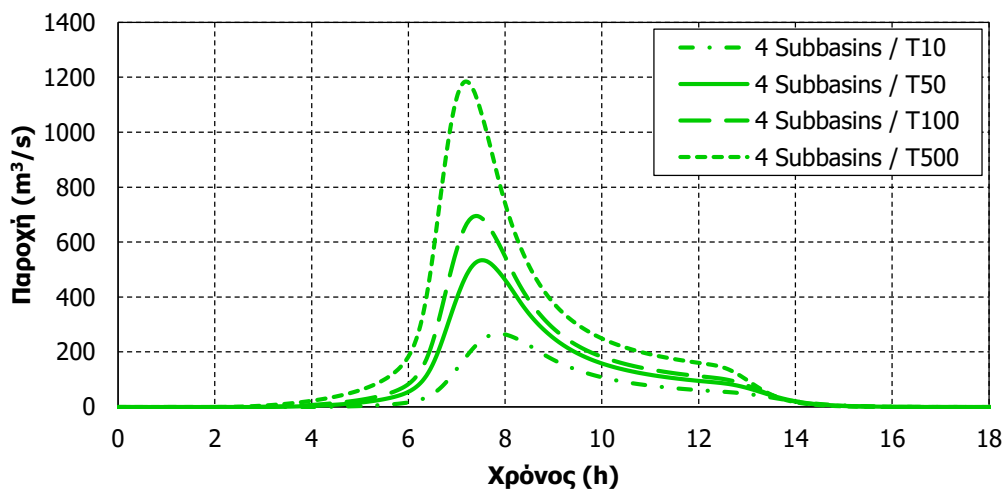
9.2 Αποτελέσματα

Η λεκάνη μελέτης προσομοιώθηκε χωρικά με πέντε διαφορετικούς τρόπους. Στη μια περίπτωση αντιμετωπίστηκε ως αδιαμέριστη και στις υπόλοιπες ως ημικατανεμημένη. Στην περίπτωση της ημικατανεμημένης προσομοίωσης εξετάστηκαν τέσσερα σενάρια με 4, 7, 10 και 21 υπολεκάνες. Κατά την προσομοίωση, η διατομή των κλάδων σύνδεσης των υπολεκανών θεωρήθηκε τραπεζοειδής, πλάτους 25 m και με συντελεστή τραχύτητας κατά Manning 0.045. Κάθε μοντέλο ελέγχθηκε σε βροχόπτωση με περίοδο επαναφοράς 10, 50, 100 και 500 έτη. Το χρονικό βήμα Δt της βροχόπτωσης και της επίλυσης επιλέχθηκε ίσο με 5 min. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 20 αναλύσεις.

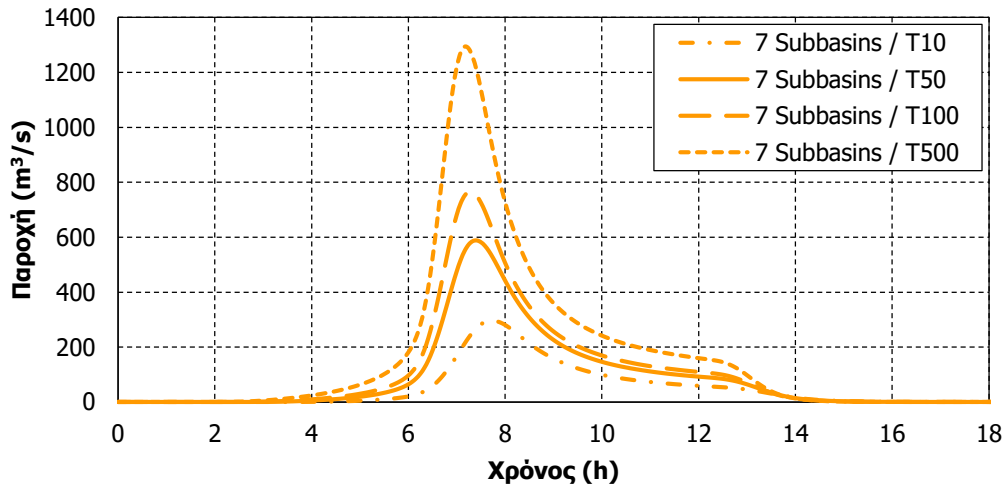
Προκύπτουν πολύ σημαντικά αποτελέσματα που αφορούν όλα τα χαρακτηριστικά μεγέθη της πλημμύρας. Αρχικά, ανεξαρτήτως επιπέδου διακριτοποίησης, είναι αναμενόμενο με την αύξηση του ύψους βροχής να αυξάνεται η παροχή αιχμής και να μειώνεται ο χρόνος εμφάνισής της (Σχήμα 9-5, 9-6, 9-7, 9-8, 9-9).



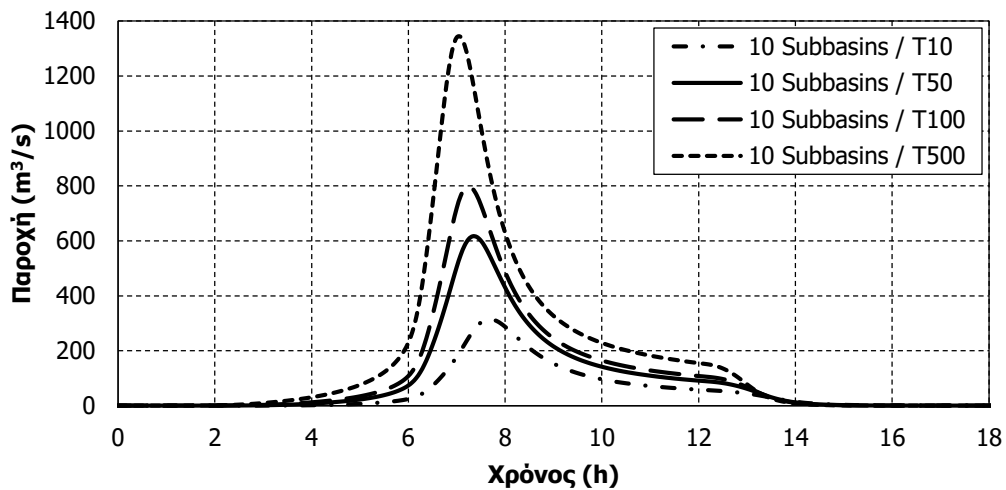
Σχήμα 9-5: Πλημμυρογραφήματα της αδιαμέριστης λεκάνης για βροχή με περίοδο επαναφοράς 10, 50, 100 και 500 έτη



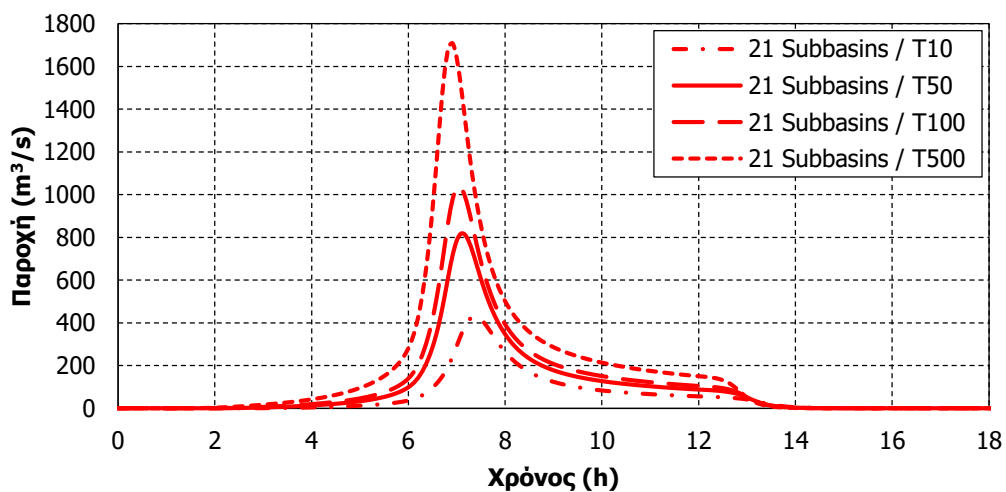
Σχήμα 9-6: Πλημμυρογραφήματα της διακριτοποίησης με 4 υπολεκάνες για βροχή με περίοδο επαναφοράς 10, 50, 100 και 500 έτη



Σχήμα 9-7: Πλημμυρογραφήματα της διακριτοποίησης με 7 υπολεκάνες για βροχή με περίοδο επαναφοράς 10, 50, 100 και 500 έτη



Σχήμα 9-8: Πλημμυρογραφήματα της διακριτοποίησης με 10 υπολεκάνες για βροχή με περίοδο επαναφοράς 10, 50, 100 και 500 έτη

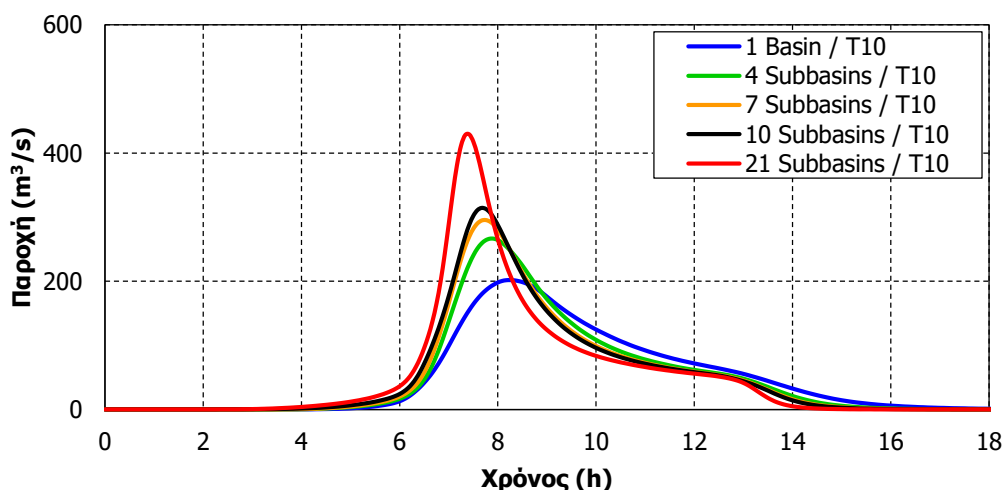


Σχήμα 9-9: Πλημμυρογραφήματα της διακριτοποίησης με 21 υπολεκάνες για βροχή με περίοδο επαναφοράς 10, 50, 100 και 500 έτη

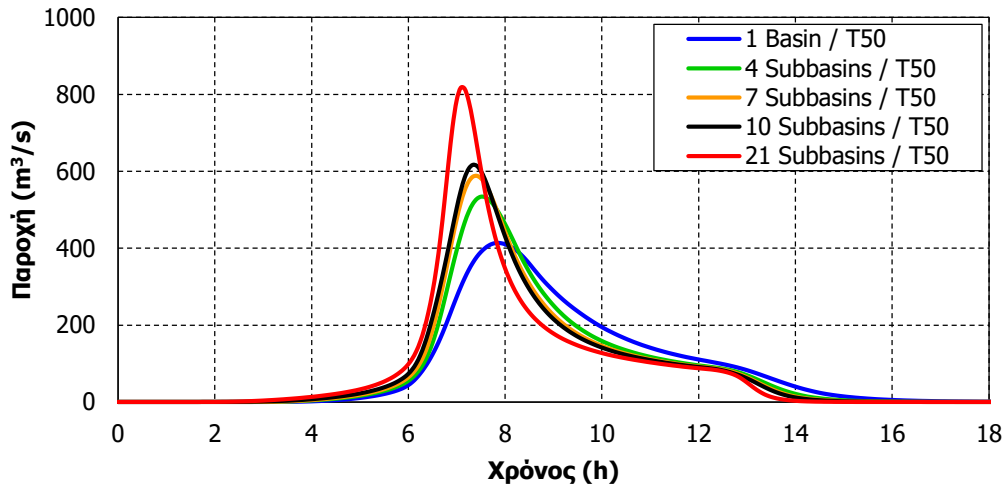
Η επίδραση της διακριτοποίησης της λεκάνης είναι σημαντική στην εκτίμηση των πλημμυρικών μεγεθών. Για κάθε ύψος βροχής, η παροχή αιχμής και ο πλημμυρικός όγκος αυξάνονται όσο αυξάνεται το επίπεδο της διακριτοποίησης, ενώ ο χρόνος εμφάνισης της αιχμής μειώνεται (Σχήμα 9-10, 9-11, 9-12, 9-13).

Για κάθε περίοδο επαναφοράς, εξετάζεται αν η παροχή αιχμής συγκλίνει σε κάποια τιμή, όσο πυκνώνει η διακριτοποίηση. Αυτό υλοποιείται προσαρμόζοντας μια λογαριθμική σχέση παλινδρόμησης με ασυμπτωτική μορφή, από την οποία προκύπτουν νόμοι κλίμακας της μορφής $y = a \ln(x) + b$. Η μετάβαση από την αδιαμέριστη λεκάνη σε 4 υπολεκάνες δίνει μεγαλύτερη αύξηση της αιχμής σε σχέση με τη μετάβαση από 4 σε 7 και από 7 σε 10 υπολεκάνες (Σχήμα 9-14). Δηλαδή, ο ρυθμός αύξησης της αιχμής μειώνεται με την πυκνωση της διακριτοποίησης.

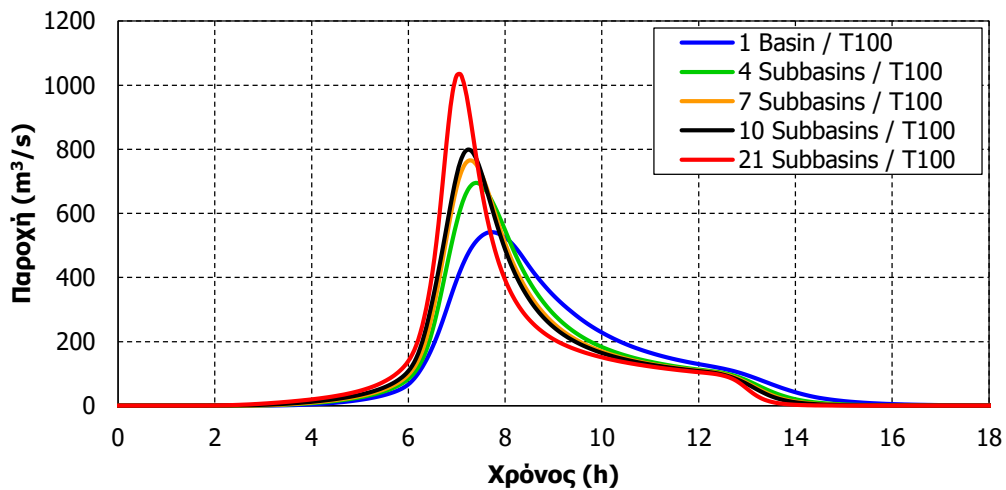
Ωστόσο, έχει εξαιρετικό ενδιαφέρον η περίπτωση των 21 υπολεκανών, καθώς εμφανίζει μεγάλη και ανεξήγητη αύξηση της αιχμής. Το φαινόμενο αυτό εντοπίζεται σε όλα τα εξεταζόμενα επεισόδια βροχής και εγείρει διάφορους προβληματισμούς. Από την ανάλυση των 10 υπολεκανών θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι η αιχμή αρχίζει να παρουσιάζει τάση σταθεροποίησης, γεγονός που επιβεβαιώνεται και βιβλιογραφικά, αφού σε πολλές μελέτες επισημαίνεται ότι υπάρχει ένα όριο διακριτοποίησης πέραν του οποίου το πλημμυρογράφημα μένει αμετάβλητο. Ωστόσο, η περίπτωση των 21 υπολεκανών ανατρέπει τις αναμενόμενες προσδοκίες. Γενικά, δεδομένων των φυσιογραφικών, γεωμορφολογικών και υδρολογικών χαρακτηριστικών της λεκάνης του Νέδοντα, η διακριτοποίηση σε 21 υπολεκάνες θεωρείται υπερβολική και ουσιαστικά αχρείαστη. Η απότομη αύξηση της αιχμής πιθανότατα οφείλεται στο αυξημένο πλήθος κλάδων διόδευσης, οι οποίοι, όπως προκύπτει και εκ του αποτελέσματος, δεν αποτυπώνουν με ακρίβεια τα χαρακτηριστικά της λεκάνης και την λειτουργία του υδρογραφικού δικτύου. Αυτή η προσέγγιση είναι σύμφωνη με την βιβλιογραφία, όπου επισημαίνεται ότι η αξιοπιστία του μοντέλου μειώνεται, λόγω των περισσότερων πηγών αβεβαιότητας που προέρχονται από το μεγάλο πλήθος κλάδων διόδευσης (Hromadka II and DeVries, 1986· Thompson and Cleveland, 2009· Yu et al., 2012).



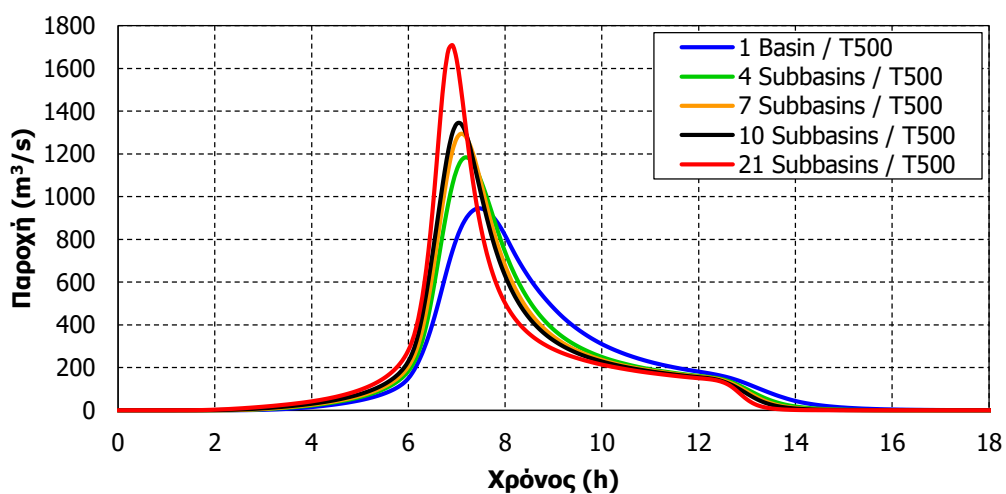
Σχήμα 9-10: Πλημμυρογραφήματα της ενιαίας λεκάνης και των διαφορετικών διακριτοποιήσεων για τη βροχή με περίοδο επαναφοράς 10 έτη



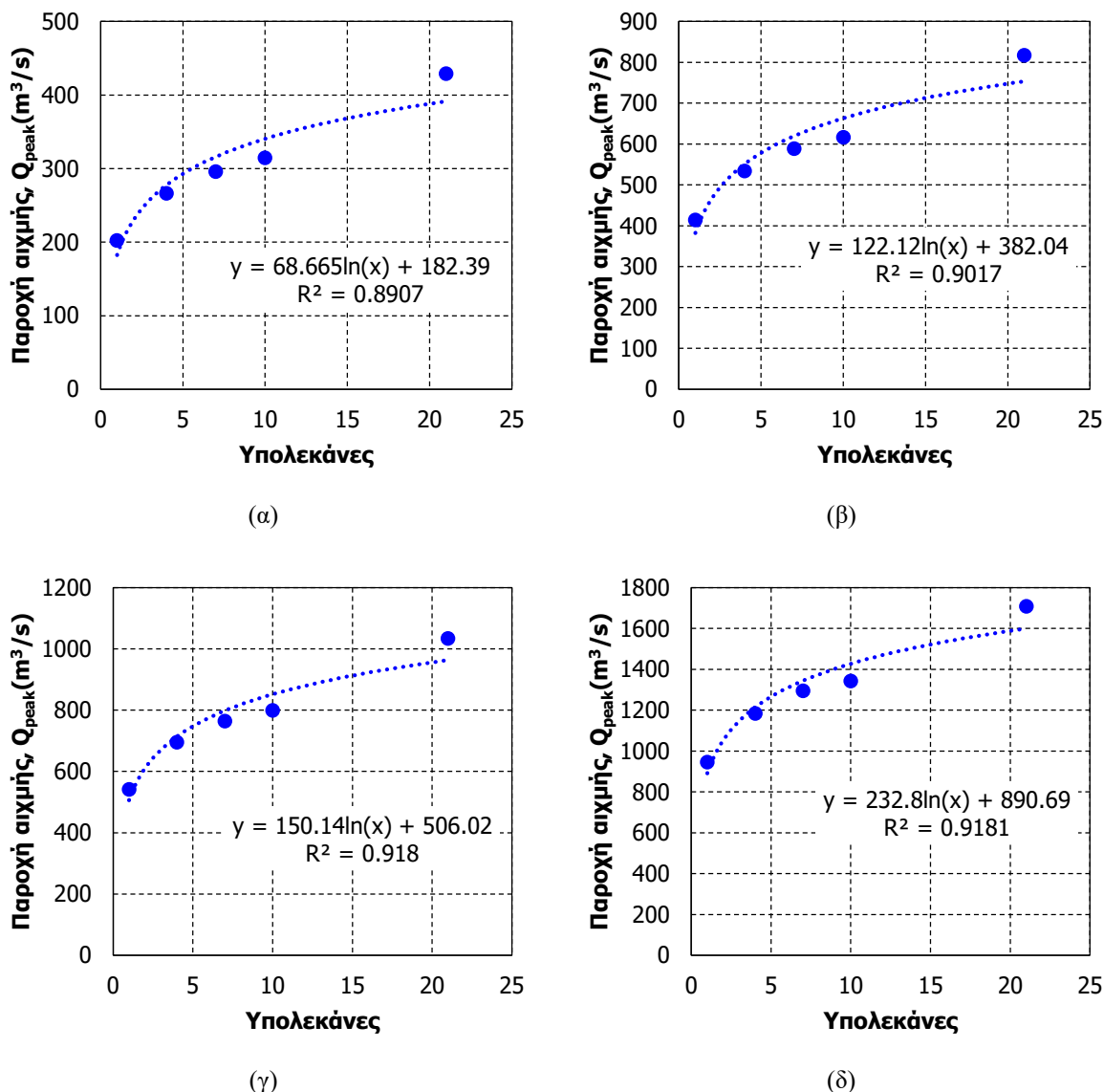
Σχήμα 9-11: Πλημμυρογραφήματα της ενιαίας λεκάνης και των διαφορετικών διακριτοποιήσεων για τη βροχή με περίοδο επαναφοράς 50 έτη



Σχήμα 9-12: Πλημμυρογραφήματα της ενιαίας λεκάνης και των διαφορετικών διακριτοποιήσεων για τη βροχή με περίοδο επαναφοράς 100 έτη



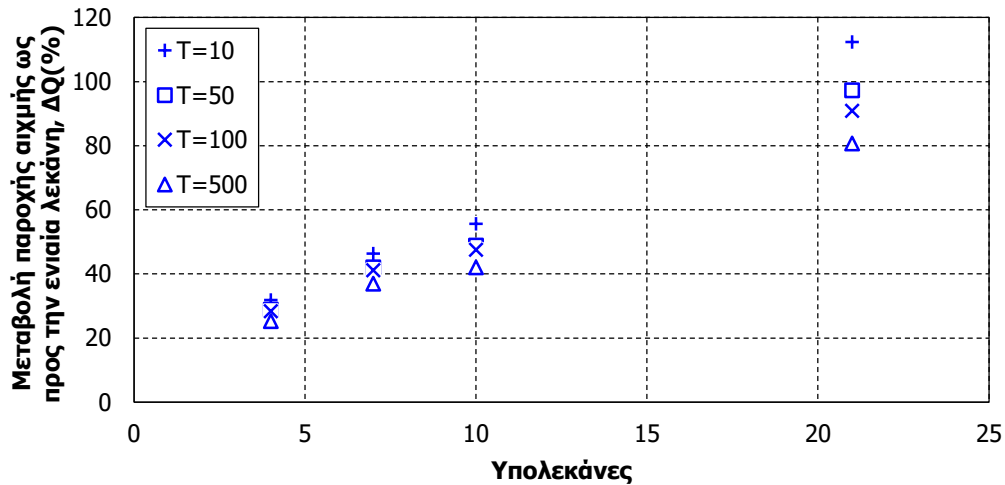
Σχήμα 9-13: Πλημμυρογραφήματα της ενιαίας λεκάνης και των διαφορετικών διακριτοποιήσεων για τη βροχή με περίοδο επαναφοράς 500 έτη



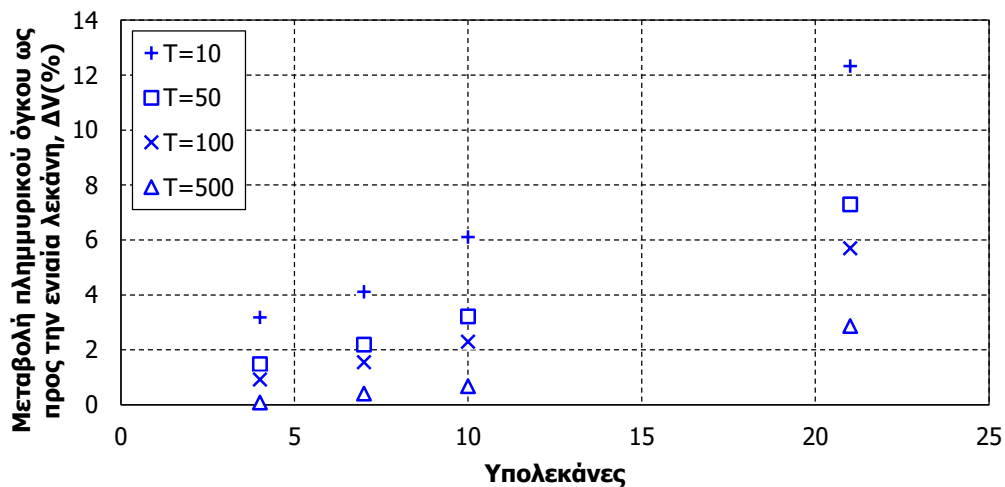
Σχήμα 9-14: Συσχέτιση των παροχών αιχμής και των διαφορετικών διακριτοποιήσεων με λογαριθμική σχέση, για βροχή με περίοδο επαναφοράς (α) 10 έτη, (β) 50 έτη, (γ) 100 έτη, (δ) 500 έτη

Σε όλα τα ύψη βροχής, η μεταβολή της αιχμής είναι εντονότερη από αυτή του πλημμυρικού όγκου, με την τελευταία να μην ξεπερνάει το 15% (Σχήμα 9-15, 9-16). Μάλιστα, διαπιστώνεται ότι, όσο μεγαλύτερο είναι το ύψος της βροχής, τόσο μικρότερη είναι η επίδραση της διακριτοποίησης της λεκάνης στην μεταβολή της αιχμής και του όγκου. Για βροχή με περίοδο επαναφοράς 10 έτη, η αύξηση της παροχής αιχμής και του όγκου κάθε διακριτοποιημένου μοντέλου ως προς το αδιαμέριστο μοντέλο έχει εύρος από 28 έως 110% και από 3 έως 12%, αντίστοιχα. Στη βροχή με περίοδο επαναφοράς 500 έτη το εύρος αύξησης της αιχμής είναι από 22 έως 80%, ενώ του όγκου είναι πολύ μικρότερη, από 0.1 έως 2.9%. Επιπλέον, σύμφωνα με τα αποτελέσματα, όσο πιο αδρομερής είναι η διακριτοποίηση, τόσο μικρότερο είναι το εύρος μεταβολής της παροχής αιχμής και του πλημμυρικού όγκου σε σχέση με τη μεταβολή της βροχής. Για κάθε ύψος βροχής, η σχέση μεταξύ της ποσοστιαίας μεταβολής της παροχής αιχμής ή του πλημμυρικού όγκου και του επιπέδου διακριτοποίησης περιγράφεται από γραμμικούς νόμους, της μορφής $y=ax+b$ (Σχήμα 9-17, 9-18).

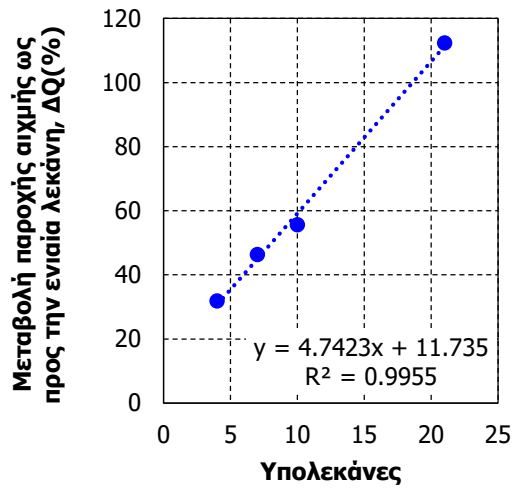
Γενικά, διαπιστώνεται ότι τα αποτελέσματα των αναλύσεων είναι σύμφωνα με αυτά του θεωρητικού παραδείγματος που αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 6.4. Πιο συγκεκριμένα, επιβεβαιώνεται ότι το επίπεδο διακριτοποίησης είναι πιο ευαίσθητος παράγοντας, ως προς τον πλημμυρικό όγκο, στα χαμηλά ύψη βροχής.



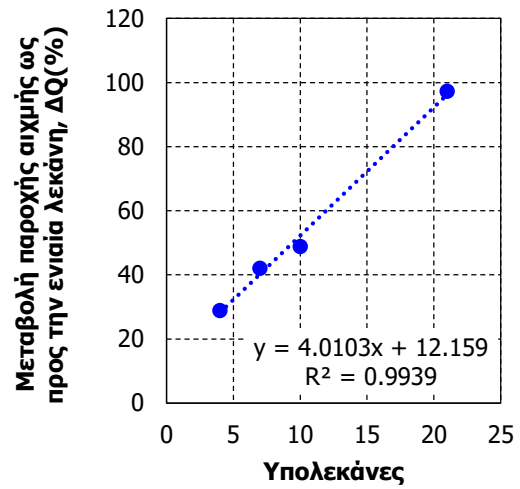
Σχήμα 9-15: Ποσοστιαία μεταβολή της παροχής αιχμής σε σχέση με το πλήθος των υπολεκανών των διαφορετικών διακριτοποιήσεων ως προς την αδιαμέριστη λεκάνη για διάφορα ύψη βροχής



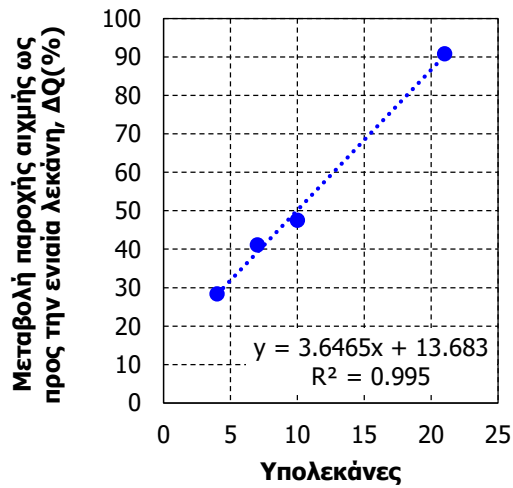
Σχήμα 9-16: Ποσοστιαία μεταβολή του πλημμυρικού όγκου σε σχέση με το πλήθος των υπολεκανών των διαφορετικών διακριτοποιήσεων ως προς την αδιαμέριστη λεκάνη για διάφορα ύψη βροχής



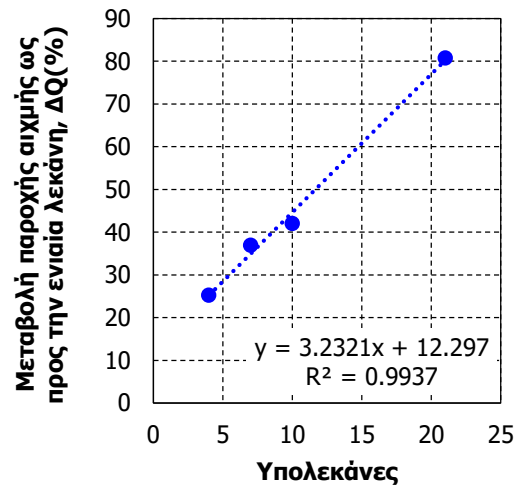
(α)



(β)

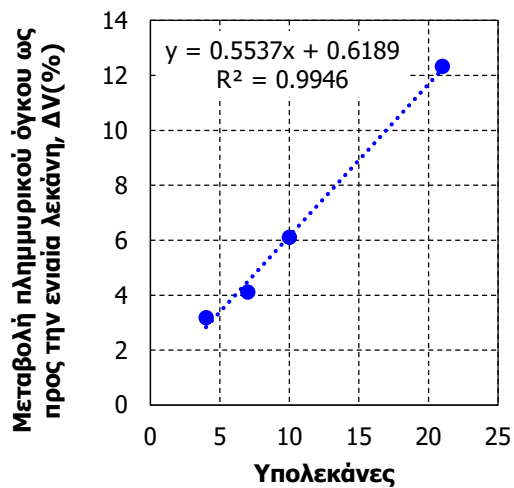


(γ)

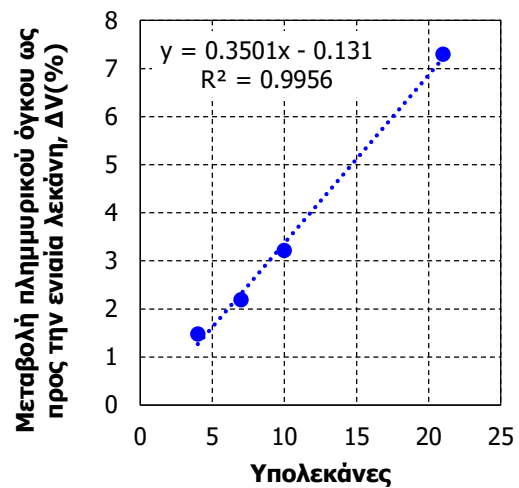


(δ)

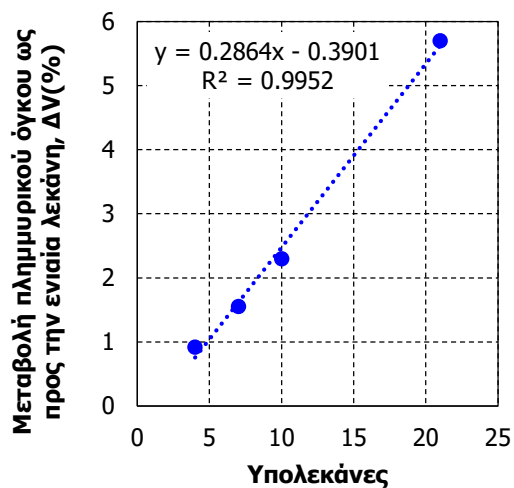
Σχήμα 9-17: Συσχέτιση της ποσοστιαίας μεταβολής της παροχής αιχμής ως προς την αδιαμέριστη λεκάνη και των διαφορετικών διακριτοποιήσεων με γραμμική σχέση για βροχή με περίοδο επαναφοράς (α) 10 έτη, (β) 50 έτη, (γ) 100 έτη, (δ) 500 έτη



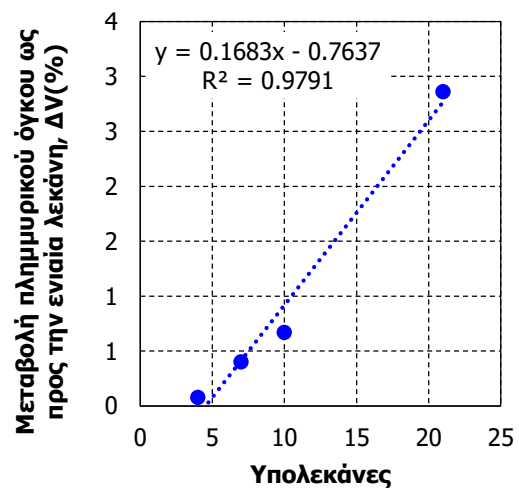
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Σχήμα 9-18: Συσχέτιση της ποσοστιαίας μεταβολής του πλημμυρικού όγκου ως προς την αδιαμέριστη λεκάνη και των διαφορετικών διακριτοποιήσεων με γραμμική σχέση για βροχή με περίοδο επαναφοράς (α) 10 έτη, (β) 50 έτη, (γ) 100 έτη, (δ) 500 έτη

10 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

10.1 Γενικά

Η ανάλυση ευαισθησίας αποτελεί μια διαδικασία αξιολόγησης και ποσοτικοποίησης της επίδρασης της αβεβαιότητας των παραμέτρων εισόδου ενός μοντέλου στο παραγόμενο προϊόν. Προσδίδει ένα είδος στοχαστικού χαρακτήρα στο προσδιοριστικό πλαίσιο της μοντελοποίησης, καθώς εξετάζει τον αντίκτυπο που θα έχει η μεταβολή μιας μόνο παραμέτρου τη φορά στο εξεταζόμενο αποτέλεσμα. Η ανάλυση ευαισθησίας είναι ένα σημαντικό εργαλείο, που συμβάλλει στην κατανόηση των εσωτερικών παραμέτρων του μοντέλου και υποδεικνύει προσεκτική συλλογή και ανάλυση δεδομένων από τον χρήστη, σε περιπτώσεις μεγάλης ευαισθησίας έναντι κάποιων παραμέτρων εισόδου. Έχει ευρύ πεδίο εφαρμογής και στόχων, που περιλαμβάνουν δοκιμές ευρωστίας των αποτελεσμάτων ενός μοντέλου, ανίχνευση σφαλμάτων και διόρθωση ή αφαίρεση δεδομένων εισόδου, καθώς και την αναζήτηση του πεδίου ορισμού των παραμέτρων εισόδου προς ικανοποίηση κάποιου κριτηρίου που βελτιστοποιεί το εξαγόμενο αποτέλεσμα (μέθοδος Monte Carlo).

Στην παρούσα εργασία, η ανάλυση ευαισθησίας πραγματοποιείται για το υδρολογικό μοντέλο της λεκάνης του Νέδοντα. Υλοποιείται με τη μορφή σεναρίων και στοχεύει στην κατανόηση των σχέσεων μεταξύ των μεταβλητών εισόδου και εξόδου των μοντέλων με διαφορετικές διακριτοποιήσεις και την διερεύνηση της συμπεριφοράς τους στο ενδεχόμενο κάποιας αλλαγής. Η πιο απλή μέθοδος εφαρμογής της ανάλυσης ευαισθησίας είναι η μεταβολή μιας και μόνο παραμέτρου τη φορά (once at a time) μέσα σε ένα δεδομένο διάστημα, π.χ. μέγιστο και ελάχιστο όριο μεταβολής, στο οποίο έχει φυσικό νόημα η παράμετρος, και κατόπιν η εφαρμογή του μοντέλου στα όρια αυτά, ώστε να προσδιοριστεί η φύση και η έκταση της μεταβολής του αποτελέσματος. Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι, γενικότερα, η εν λόγω απλουστευμένη διαδικασία δεν λαμβάνει υπόψη την αλληλεπίδραση μεταξύ των μεταβλητών εισόδου του μοντέλου, καθώς δεν ερευνά την ταυτόχρονη μεταβολή τους.

Οι μεταβλητές εισόδου που επιλέχθηκε να διερευνηθούν μέσω της ανάλυσης ευαισθησίας του μοντέλου είναι οι εξής:

- το πλάτος της τραπεζοειδούς διατομής, b , σε ένα εύρος μεταβολής $\pm 20\%$
- ο συντελεστής τραχύτητας κατά Manning, n , σε ένα εύρος μεταβολής $\pm 20\%$
- ο αριθμός καμπύλης απορροής, CN , σε ένα εύρος μεταβολής $\pm 5\%$

Το πλάτος και ο συντελεστής τραχύτητας θεωρήθηκε κρίσιμο να εξεταστούν σε ένα πλαίσιο ανάλυσης της ευαισθησίας του μοντέλου, καθώς είναι παράμετροι που διέπονται από πολλαπλές πηγές αβεβαιότητας, οι οποίες οφείλονται αφενός στο απλουστευμένο υδραυλικό υπόβαθρο του μοντέλου διόδευσης, και αφετέρου στην απουσία πληροφορίας πεδίου (αποτυπώσεις διατομών) αλλά και ανεπαρκή κατανόηση των μηχανισμών λειτουργίας τους. Για τον αριθμό καμπύλης απορροής επιλέγεται μικρότερο εύρος μεταβολής, διότι η παράμετρος είναι πολύ καλά μελετημένη στη βιβλιογραφία και μπορεί να εκτιμηθεί με βάση χάρτες υδατοπερατότητας και χρήσεων γης, που διέπονται από καλή ακρίβεια.

Επιπλέον, εξετάζεται η επίδραση του χρονικού βήματος Δt της βροχής σχεδιασμού, το οποίο όπως έχει ήδη αναφερθεί είναι ίδιο με το χρονικό βήμα της επίλυσης του μοντέλου. Πιο συγκεκριμένα, για κάθε περίπτωση διακριτοποίησης επιλέγεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων για χρονικό βήμα 5 και 10 min. Γενικά, η επιλογή μικρότερου χρονικού βήματος συμβάλει στον ακριβέστερο εντοπισμό της παροχής αιχμής και της χρονικής εμφάνισής της. Αυτό κυρίως αποδίδεται στους ακριβέστερους υπολογισμούς των διοδεύσεων της επιφανειακής απορροής σε κλίμακα υπολεκάνης, με βάση το αντίστοιχο μοναδιαίο υδρογράφημα, το οποίο αναγκαστικά εκφράζεται σε διακριτοποιημένη μορφή.

10.2 Μεταβολή πλάτους τραπεζοειδούς διατομής

Κατά την αύξηση του πλάτους της διατομής, το εμβαδόν της έχει την τάση να αυξηθεί, με αποτέλεσμα να μειώνεται η ταχύτητα ροής του νερού και κατ' επέκταση να επιβραδύνεται ο χρόνος ταξιδιού της. Η μεταβολή που υφίσταται η παράμετρος του χρόνου έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της παροχής αιχμής. Αντίθετα, με τη μείωση του πλάτους, δημιουργείται επιτάχυνση της ροής στο υδατόρευμα και επομένως αύξηση των παροχών εξόδου στους κόμβους και επιτάχυνση του χρόνου απόκρισης. Η ανάλυση πραγματοποιείται για βροχή με περίοδο επαναφοράς 10, 50 και 100 έτη και εξετάζεται η περίπτωση των 4, 7 και 10 υπολεκανών.

Διαπιστώνεται ότι τα ποσοστά μεταβολής της παροχής αιχμής είναι μικρότερα από 0.50% (Πίνακας 10-1, 10-2, 10-3). Αυτό σημαίνει ότι για τα εξεταζόμενα ύψη βροχής, η ευαισθησία στο πλάτος της τραπεζοειδούς διατομής δεν είναι σημαντική. Όπως ήταν αναμενόμενο, σε όλες τις περιπτώσεις, η αύξηση του πλάτους της διατομής προκαλεί μείωση της παροχής αιχμής και η μείωση του πλάτους προκαλεί αύξηση της παροχής (Σχήμα 10-1, 10-2, 10-3). Ωστόσο, φαίνεται ότι όσο μικρότερο είναι το ύψος βροχής, τόσο μεγαλύτερη είναι η ευαισθησία των μοντέλων, ανεξαρτήτως διακριτοποίησης. Η αύξηση της διακριτοποίησης επιφέρει μεγαλύτερες μεταβολές, ανεξαρτήτως του ύψους βροχής.

Πίνακας 10-1: Ποσοστιαία μεταβολή της παροχής αιχμής στην ανάλυση ευαισθησίας του πλάτους διατομής για βροχή με περίοδο επαναφοράς 10 έτη

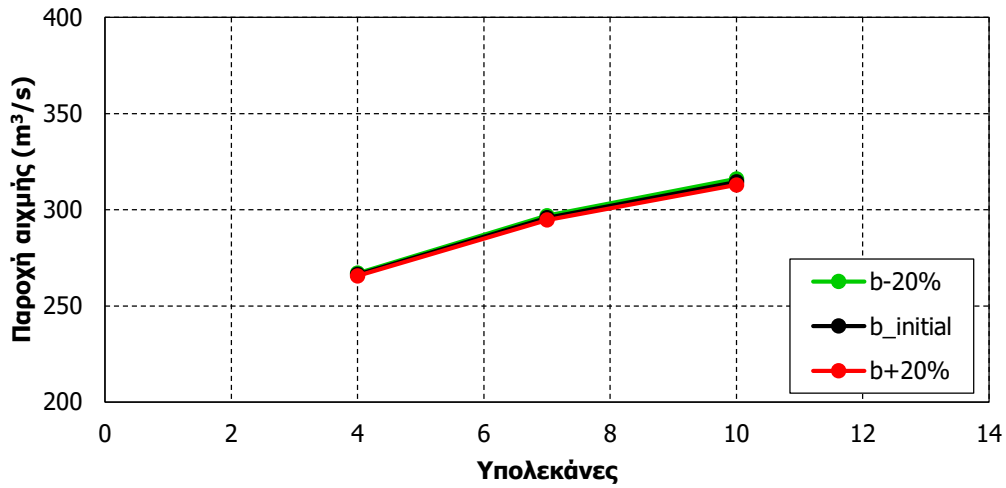
T10	Q _{peak} (m ³ /s)			ΔQ (%)		
	4	7	10	4	7	10
Υπολεκάνες						
-20%	267.0	296.9	316.0	0.24	0.37	0.49
b_{initial}	266.4	295.8	314.5	-	-	-
+20%	265.6	294.6	312.9	-0.30	-0.39	-0.5

Πίνακας 10-2: Ποσοστιαία μεταβολή της παροχής αιχμής στην ανάλυση ευαισθησίας του πλάτους διατομής για βροχή με περίοδο επαναφοράς 50 έτη

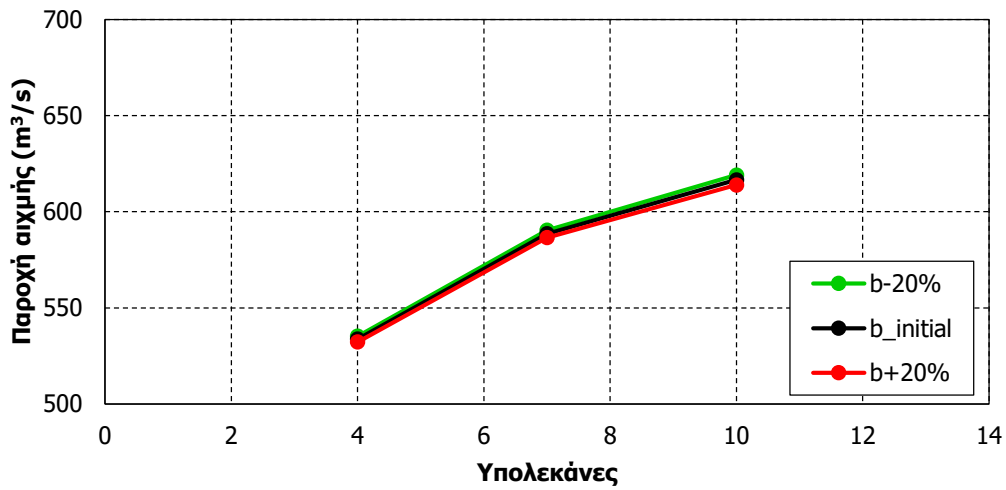
T50	Q _{peak} (m ³ /s)			ΔQ (%)		
	4	7	10	4	7	10
Υπολεκάνες						
-20%	535.3	590.4	619.1	0.28	0.32	0.4
b_{initial}	533.8	588.5	616.6	-	-	-
+20%	532.3	586.5	613.9	-0.29	-0.34	-0.44

Πίνακας 10-3: Ποσοστιαία μεταβολή της παροχής αιχμής στην ανάλυση ευαισθησίας του πλάτους διατομής για βροχή με περίοδο επαναφοράς 100 έτη

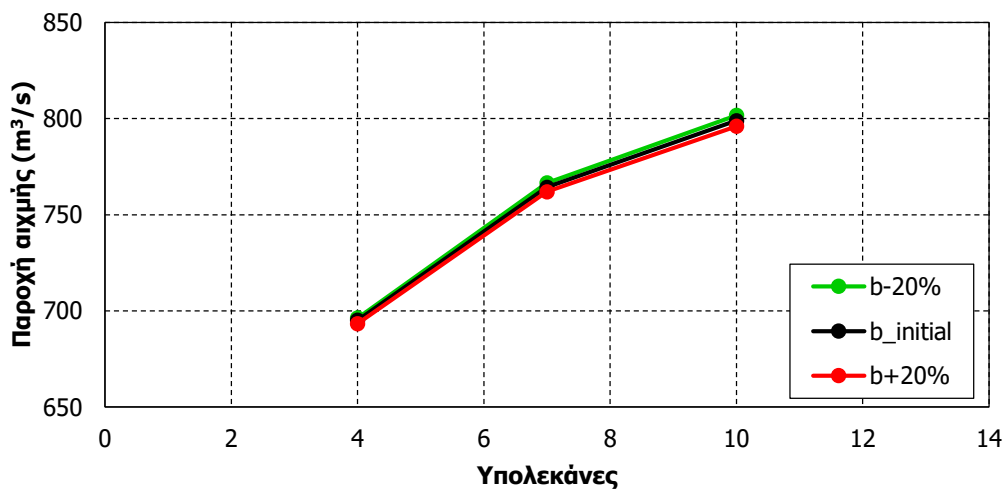
T100	Q _{peak} (m ³ /s)			ΔQ (%)		
	4	7	10	4	7	10
Υπολεκάνες						
-20%	696.3	766.5	801.6	0.17	0.29	0.34
b_{initial}	695.1	764.3	798.9	-	-	-
+20%	693.4	761.9	796.0	-0.25	-0.31	-0.36



Σχήμα 10-1: Ανάλυση ευαισθησίας του πλάτους διατομής για βροχή με περίοδο επαναφοράς 10 έτη



Σχήμα 10-2: Ανάλυση ευαισθησίας του πλάτους διατομής για βροχή με περίοδο επαναφοράς 50 έτη



Σχήμα 10-3: Ανάλυση ευαισθησίας του πλάτους διατομής για βροχή με περίοδο επαναφοράς 100 έτη

10.3 Μεταβολή συντελεστή τραχύτητας κατά Manning

Ο συντελεστής τραχύτητας κατά Manning, που εκφράζει την αντίσταση στην ροή, προφανώς εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της κοίτης. Αν και στην πραγματικότητα είναι μια μεταβλητή, κατά την εφαρμογή της εξίσωσης Manning κατά κανόνα θεωρείται σταθερή, καθώς είναι δύσκολη η ποσοτικοποίηση των παραγόντων που την επηρεάζουν. Με την αύξηση της τραχύτητας του υλικού της κοίτης, μεγαλώνει η αντίσταση στην ροή, με αποτέλεσμα την μείωση της ταχύτητας ροής και της παροχής και αύξηση της διάρκειας ταξιδιού του πλημμυρικού κύματος. Η ανάλυση πραγματοποιείται για βροχή με περίοδο επαναφοράς 10, 50 και 100 έτη και εξετάζεται η περίπτωση των 4, 7 και 10 υπολεκανών.

Η επίδραση στην παροχή αιχμής είναι ανεπαίσθητη, με τα ποσοστά μεταβολής να είναι μικρότερα του 1.50% (Πίνακας 10-4, 10-5, 10-6). Ωστόσο, εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα που αφορούν τη συσχέτιση του επιπέδου διακριτοποίησης και του ύψους βροχής με την μεταβολή του συντελεστή τραχύτητας κατά Manning. Αρχικά, επιβεβαιώνεται ότι η αύξηση του συντελεστή τραχύτητας επιφέρει μείωση της παροχής και αντίστροφα η μείωσή του προκαλεί αύξηση της παροχής (Σχήμα 10-4, 10-5, 10-6). Αυτό προκύπτει ανεξαρτήτως διακριτοποίησης και ύψους βροχής. Η ανάλυση δείχνει ότι όσο πιο λεπτομερές είναι το μοντέλο, τόσο πιο ευαίσθητο είναι στη μεταβολή του συντελεστή τραχύτητας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το λεπτομερέστερο μοντέλο αποτελείται από περισσότερους κλάδους διόδευσης, στους οποίους ουσιαστικά λαμβάνεται υπόψη ο συντελεστής τραχύτητας. Τέλος, το ύψος βροχής έχει σημαντική επίδραση, διότι για μικρότερα ύψη βροχής η ποσοστιαία μεταβολή είναι μεγαλύτερη.

Πίνακας 10-4: Ποσοστιαία μεταβολή της παροχής αιχμής στην ανάλυση ευαισθησίας του συντελεστή τραχύτητας κατά Manning για βροχή με περίοδο επαναφοράς 10 έτη

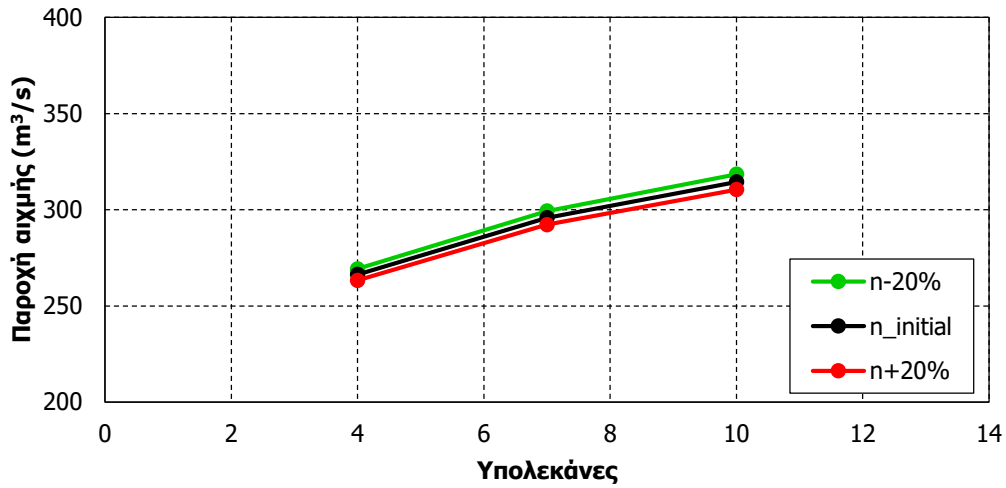
T10	Q _{peak} (m ³ /s)			ΔQ (%)		
	4	7	10	4	7	10
Υπολεκάνες						
-20%	269.3	299.3	318.4	1.09	1.18	1.25
n _{initial}	266.4	295.8	314.5	-	-	-
+20%	263.3	292.3	310.4	-1.17	-1.20	-1.29

Πίνακας 10-5: Ποσοστιαία μεταβολή της παροχής αιχμής στην ανάλυση ευαισθησίας του συντελεστή τραχύτητας κατά Manning για βροχή με περίοδο επαναφοράς 50 έτη

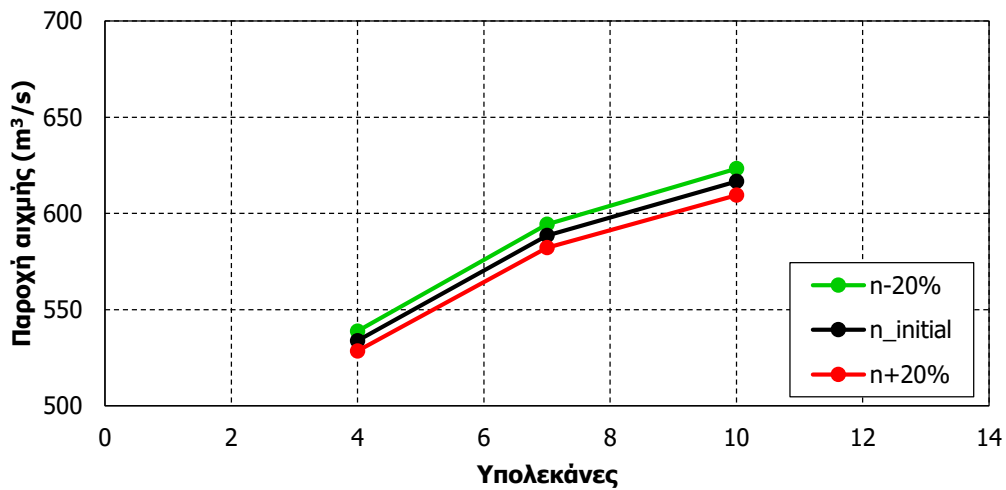
T50	Q _{peak} (m ³ /s)			ΔQ (%)		
	4	7	10	4	7	10
Υπολεκάνες						
-20%	538.8	594.3	623.3	0.94	0.99	1.09
n _{initial}	533.8	588.5	616.6	-	-	-
+20%	528.5	582.2	609.5	-0.99	-1.07	-1.15

Πίνακας 10-6: Ποσοστιαία μεταβολή της παροχής αιχμής στην ανάλυση ευαισθησίας του συντελεστή τραχύτητας κατά Manning για βροχή με περίοδο επαναφοράς 100 έτη

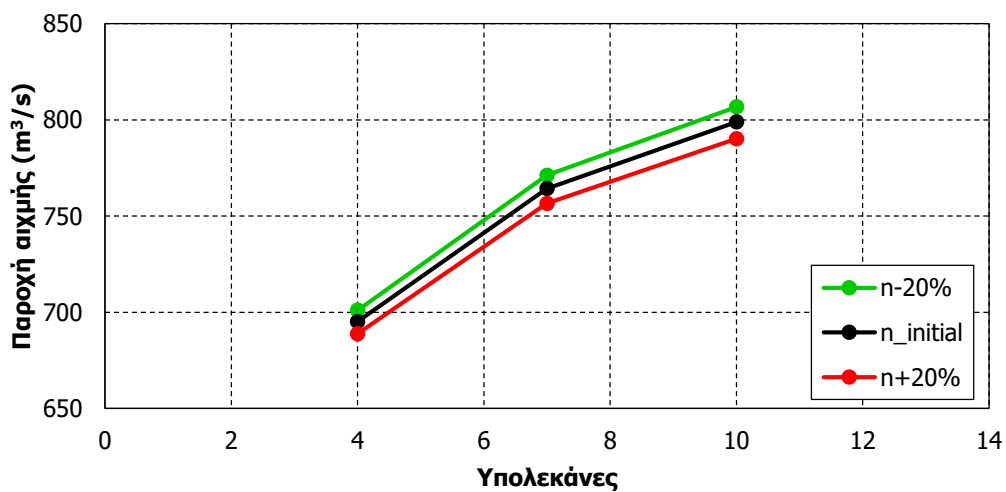
T100	Q _{peak} (m ³ /s)			ΔQ (%)		
	4	7	10	4	7	10
Υπολεκάνες						
-20%	701.0	771.2	806.7	0.85	0.90	0.98
n _{initial}	695.1	764.3	798.9	-	-	-
+20%	688.8	756.6	790.2	-0.91	-1.01	-1.09



Σχήμα 10-4: Ανάλυση ευαισθησίας του συντελεστή τραχύτητας κατά Manning για βροχή με περίοδο επαναφοράς 10 έτη



Σχήμα 10-5: Ανάλυση ευαισθησίας του συντελεστή τραχύτητας κατά Manning για βροχή με περίοδο επαναφοράς 50 έτη



Σχήμα 10-6: Ανάλυση ευαισθησίας του συντελεστή τραχύτητας κατά Manning για βροχή με περίοδο επαναφοράς 100 έτη

10.4 Μεταβολή αριθμού καμπύλης απορροής CN

Η διερεύνηση της επίδρασης της μεταβολής του αριθμού καμπύλης απορροής CN έχει ιδιαίτερη σημασία, διότι αυτή η μεταβολή ερμηνεύει κάποια μεταβολή στις χρήσεις γης της λεκάνης. Η μεταβολή των χρήσεων γης μπορεί να προκληθεί από αλλαγή καλλιεργειών, επέκταση ή ελάττωση καλλιεργήσιμων εκτάσεων, επέκταση αστικοποίησης, ανάπτυξη βιομηχανιών, κατασκευή οδικών και εγγειοβελτιωτικών έργων, πυρκαγιά. Στο Κεφάλαιο 8, στην περίπτωση της θεωρητικής λεκάνης, ποσοτικοποιείται η επίδραση της μεταβολής του CN στον πλημμυρικό όγκο για διάφορα ύψη βροχής. Τώρα, στην περίπτωση της λεκάνης του Νέδοντα, με την συγκεκριμένη ανάλυση ευαισθησίας σκοπός είναι να υπολογισθεί η επίδραση της μεταβολής του CN στην παροχή αιχμής. Είναι γνωστό ότι η αύξηση του CN θα επιφέρει αύξηση της παροχής και η μείωση του CN μείωση της παροχής, ωστόσο αυτό που έχει ενδιαφέρον είναι το μέγεθος των μεταβολών στα μοντέλα με διαφορετικές διακριτοποιήσεις. Η ανάλυση πραγματοποιείται για βροχή με περίοδο επαναφοράς 10, 50 και 100 έτη και εξετάζεται η περίπτωση των 4, 7 και 10 υπολεκάνων.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ανάλυσης, οι μεταβολές στην παροχή αιχμής είναι λίγο μεγαλύτερες από 8% και λίγο μικρότερες από 12% (Πίνακας 10-7, 10-8, 10-9). Όπως ήταν αναμενόμενο, σε κάθε επεισόδιο βροχής και σε κάθε περίπτωση διακριτοποίησης, η αύξηση του CN οδηγεί σε μεγαλύτερες αιχμές, ενώ η μείωσή του προκαλεί μείωση των αιχμών (Σχήμα 10-7, 10-8, 10-9). Όσο πυκνότερη είναι η διακριτοποίηση της λεκάνης, τόσο μεγαλύτερες είναι οι μεταβολές και αυτό ισχύει σε όλα τα εξεταζόμενα ύψη βροχής. Επίσης, στα μικρότερα ύψη βροχής οι μεταβολές είναι μεγαλύτερες, ανεξαρτήτως διακριτοποίησης.

Πίνακας 10-7: Ποσοστιαία μεταβολή της παροχής αιχμής στην ανάλυση ευαισθησίας του αριθμού CN για βροχή με περίοδο επαναφοράς 10 έτη

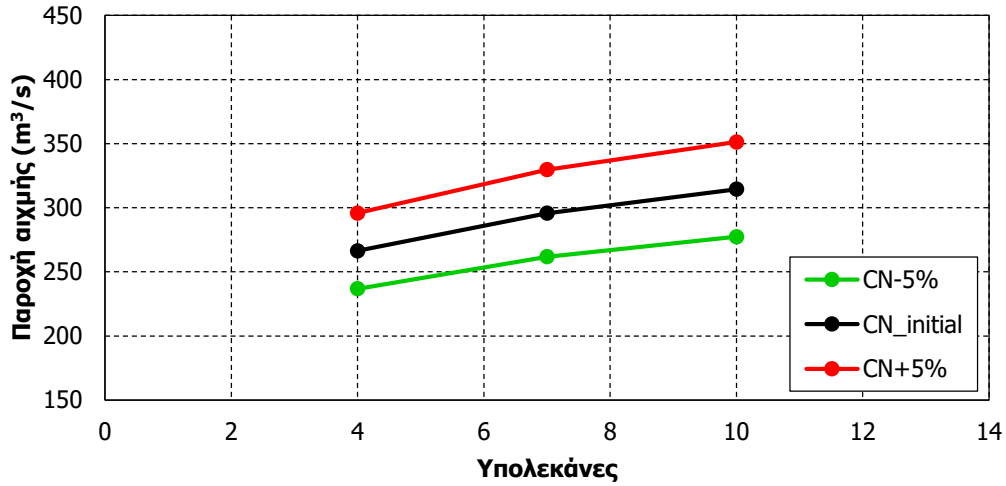
T10	Q _{peak} (m ³ /s)			ΔQ (%)		
	4	7	10	4	7	10
Υπολεκάνες						
-5%	236.8	261.8	277.4	-11.12	-11.49	-11.80
CN _{initial}	266.4	295.8	314.5	-	-	-
+5%	295.9	329.6	351.3	11.07	11.44	11.71

Πίνακας 10-8: Ποσοστιαία μεταβολή της παροχής αιχμής στην ανάλυση ευαισθησίας του αριθμού CN για βροχή με περίοδο επαναφοράς 50 έτη

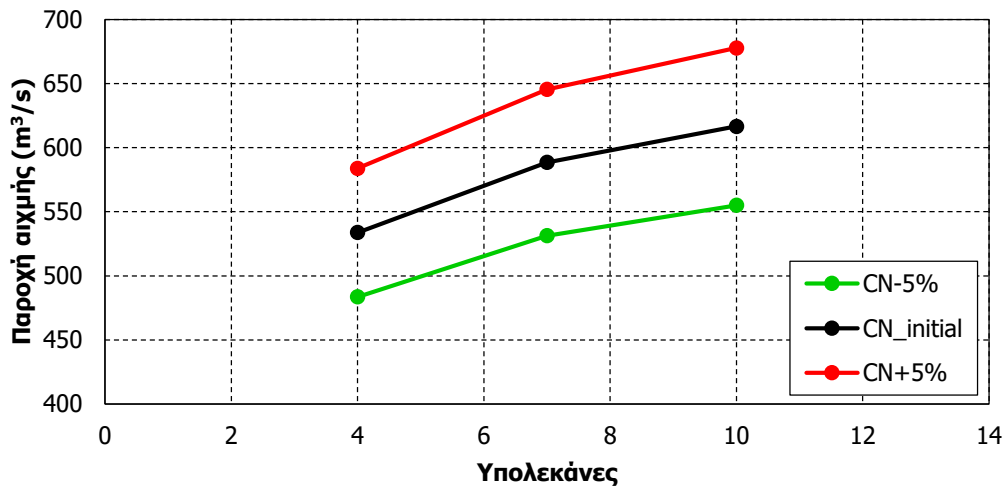
T50	Q _{peak} (m ³ /s)			ΔQ (%)		
	4	7	10	4	7	10
Υπολεκάνες						
-5%	483.6	531.3	555.1	-9.41	-9.72	-9.98
CN _{initial}	533.8	588.5	616.6	-	-	-
+5%	583.8	645.5	677.7	9.37	9.68	9.91

Πίνακας 10-9: Ποσοστιαία μεταβολή της παροχής αιχμής στην ανάλυση ευαισθησίας του αριθμού CN για βροχή με περίοδο επαναφοράς 100 έτη

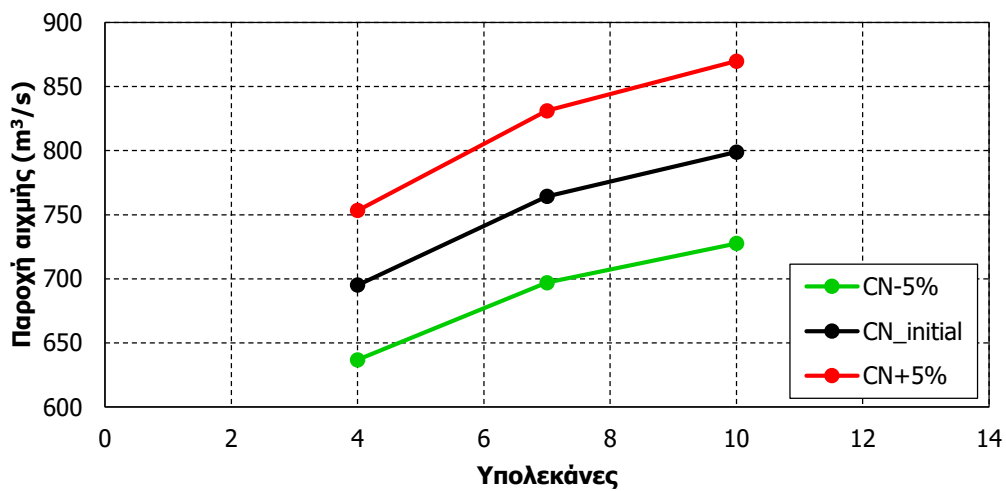
T100	Q _{peak} (m ³ /s)			ΔQ (%)		
	4	7	10	4	7	10
Υπολεκάνες						
-5%	636.8	697.0	727.6	-8.39	-8.80	-8.92
CN _{initial}	695.1	764.3	798.9	-	-	-
+5%	753.3	831.1	869.8	8.37	8.74	8.88



Σχήμα 10-7: Ανάλυση ευαισθησίας του αριθμού CN για βροχή με περίοδο επαναφοράς 10 έτη



Σχήμα 10-8: Ανάλυση ευαισθησίας του αριθμού CN για βροχή με περίοδο επαναφοράς 50 έτη

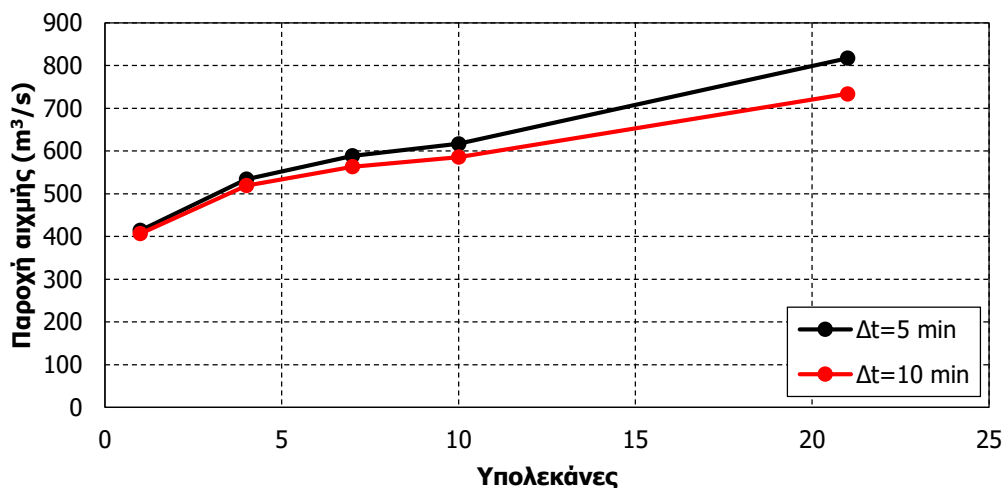


Σχήμα 10-9: Ανάλυση ευαισθησίας του αριθμού CN για βροχή με περίοδο επαναφοράς 100 έτη

10.5 Μεταβολή χρονικού βήματος Δt

Εξετάζεται η αύξηση κατά 5 λεπτά του χρονικού βήματος του υετογραφήματος και της προσομοίωσης. Επισημαίνεται ότι το νέο χρονικό βήμα $\Delta t=10$ min είναι σε κάθε περίπτωση μικρότερο από το 1/3 του μικρότερου χρόνου συγκέντρωσης, συνεπώς έχει νόημα η εφαρμογή του. Η διερεύνηση πραγματοποιείται για την βροχή με περίοδο επαναφοράς 50 έτη και εξετάζεται η ενιαία λεκάνη, καθώς και η περίπτωση των 4, 7, 10 και 21 υπολεκανών. Αρχικά, απαιτείται να επαναληφθεί η διαδικασία υπολογισμού της βροχής σχεδιασμού, αυτή τη φορά με χρονικό βήμα $\Delta t=10$ min. Γενικά, όσο μικρότερο είναι το χρονικό βήμα, τόσο περισσότερο λεπτομερές είναι η διακριτοποίηση του ΜΥΓ που υλοποιείται από το λογισμικό κατά την ανάλυση. Αυτό σημαίνει ότι η επιλογή μικρότερου χρονικού βήματος βοηθά στην καλύτερη εκτίμηση της παροχής αιχμής. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι στις περιπτώσεις που υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις επεισοδίων, το χρονικό βήμα που εφαρμόζεται στα μοντέλα συνίσταται να είναι ίσο με αυτό των μετρήσεων, προκειμένου να είναι τα αποτελέσματα του μοντέλου πιο κοντά στην πραγματικότητα.

Πράγματι, από την ανάλυση προκύπτει ότι η αιχμή μειώνεται με την αύξηση του χρονικού βήματος (Σχήμα 10-10). Το ποσοστό μείωσης εξαρτάται από το επίπεδο διακριτοποίησης. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, όσο πιο αδρομερές είναι η διακριτοποίηση, τόσο μικρότερη είναι η ευαισθησία του μοντέλου στην αύξηση του χρονικού βήματος. Αντίθετα, όσο πυκνώνει η διακριτοποίηση, η ποσοστιαία μεταβολή της παροχής αιχμής αυξάνεται. Στην περίπτωση της ενιαίας λεκάνης, των 7 υπολεκανών και των 21 υπολεκανών η μείωση της παροχής αιχμής είναι 7.6, 25.4 και 83.3 m^3/s , αντίστοιχα. Συνεπώς, η επιλογή του κατάλληλου χρονικού βήματος είναι αρκετά σημαντική απόφαση του χρήστη, στην περίπτωση των πιο λεπτομερών μοντέλων.



Σχήμα 10-10: Ανάλυση ευαισθησίας του χρονικού βήματος βροχής και προσομοίωσης για βροχή με περίοδο επαναφοράς 50 έτη

11 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

11.1 Σύνοψη

Η διερεύνηση της επίδρασης της χωρικής ανάλυσης στην εκτίμηση του πλημμυρικού όγκου και της παροχής αιχμής αποτελεί κρίσιμο επιστημονικό πεδίο, το οποίο δεν έχει μελετηθεί επαρκώς. Στην βιβλιογραφία εντοπίζονται αντικρουόμενα συμπεράσματα και είναι δύσκολο να εξαχθεί κάποιο γενικότερο συμπέρασμα. Συνεπώς, κάθε λεκάνη απορροής αποτελεί ξεχωριστή περίπτωση.

Σε αυτό το πλαίσιο, σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η διερεύνηση σε θεωρητικό και πρακτικό επίπεδο της επίδρασης του επιπέδου της διακριτοποίησης σε υπολεκάνες στην εκτίμηση πλημμυρικών μεγεθών, για διάφορα ύψη βροχής. Αρχικά, εξετάστηκε η επίδραση του επιπέδου διακριτοποίησης μιας θεωρητικής λεκάνης, με διαφορετικές κατανομές του αριθμού καμπύλης απορροής, στον πλημμυρικό όγκο. Στη συνέχεια, διερευνήθηκε και μια πραγματική λεκάνη απορροής. Επιλέχθηκε η λεκάνη απορροής του Νέδοντα, στην Καλαμάτα. Τόσο στην θεωρητική, όσο και στην πραγματική λεκάνη απορροής εξετάστηκαν διαφορετικές διακριτοποιήσεις και εφαρμόστηκαν διάφορα ύψη βροχής. Στην περίπτωση της λεκάνης του Νέδοντα, πραγματοποιήθηκε επιπλέον και ανάλυση ευαισθησίας των μοντέλων, μεταβάλλοντας το πλάτος και την τραχύτητα της διατομής, τον αριθμό καμπύλης απορροής και το χρονικό βήμα. Συνολικά, πραγματοποιήθηκαν 20 βασικές αναλύσεις, και άλλες 59 αναλύσεις στο πλαίσιο της ανάλυσης ευαισθησίας. Επισημαίνεται ότι στόχος της παρούσας εργασίας ήταν η καταγραφή των διαφορών των μοντέλων και όχι η βαθμονόμησή τους ή η επιλογή του καταλληλότερου εξ' αυτών.

11.2 Συμπεράσματα

Θεωρητική λεκάνη

- Σε κάθε περίπτωση διακριτοποίησης και ανεξαρτήτως της ετερογένειας του αριθμού καμπύλης απορροής, η ποσοστιαία διαφορά της απορροής είναι μεγαλύτερη για μικρότερα ύψη βροχής και μεγαλύτερο πλήθος υπολεκανών.
- Σε κάθε περίπτωση διακριτοποίησης, όσο μεγαλύτερη είναι ετερογένεια του αριθμού καμπύλης απορροής, τόσο μεγαλύτερη είναι η ποσοστιαία διαφορά της απορροής, όσο μειώνεται το ύψος βροχής.
- Η διακριτοποίηση της λεκάνης σε υπολεκάνες, ανεξαρτήτως πλήθους, οδηγεί σε αυξημένη απορροή.
- Από ένα ύψος βροχής και πάνω δεν αναμένεται μεταβολή του όγκου απορροής λόγω της διακριτοποίησης.

Λεκάνη Νέδοντα

- Ανεξαρτήτως επιπέδου διακριτοποίησης, από τα πλημμυρογραφήματα φαίνεται ότι με την αύξηση του ύψους βροχής αυξάνεται η παροχή αιχμής και μειώνεται ο χρόνος εμφάνισής της.
- Για κάθε ύψος βροχής, η παροχή αιχμής και ο πλημμυρικός όγκος αυξάνονται όσο αυξάνεται το επίπεδο της διακριτοποίησης, ενώ ο χρόνος εμφάνισης της αιχμής μειώνεται.
- Ο ρυθμός αύξησης της αιχμής μειώνεται με την πυκνωση της διακριτοποίησης.
- Στις 10 υπολεκάνες, που είναι ένα εύλογο επίπεδο διακριτοποίησης του υδρολογικού συστήματος, αρχίζει να διαφαίνεται τάση σταθεροποίησης της παροχής αιχμής.
- Στις 21 υπολεκάνες εμφανίζεται μη αναμενόμενη, μεγάλη αύξηση της παροχής αιχμής. Γενικά, η διακριτοποίηση της λεκάνης του Νέδοντα σε 21 υπολεκάνες είναι υπερβολική και η απότομη αύξηση της αιχμής συνδέεται με το αυξημένο πλήθος κλάδων διόδευσης. Συνεπώς, η υπερβολική και χωρίς λόγο διακριτοποίηση σε υπολεκάνες οδηγεί σε προβληματικά αποτελέσματα, υψηλής αβεβαιότητας.
- Σε όλα τα ύψη βροχής, η μεταβολή της παροχής αιχμής είναι εντονότερη από αυτή του πλημμυρικού όγκου.
- Όσο μεγαλύτερο είναι το ύψος της βροχής, τόσο μικρότερη είναι η επίδραση της διακριτοποίησης της λεκάνης στην παροχή αιχμής και στον πλημμυρικό όγκο.
- Όσο πιο αδρομερής είναι η διακριτοποίηση, τόσο μικρότερο είναι το εύρος μεταβολής της παροχής αιχμής σε σχέση με τη μεταβολή της βροχής.
- Στα χαμηλά ύψη βροχής, το επίπεδο διακριτοποίησης είναι πιο κρίσιμος παράγοντας, ως προς τον πλημμυρικό όγκο.
- Σε κάθε περίπτωση διακριτοποίησης, η μεταβολή του πλημμυρικού όγκου είναι μεγαλύτερη σε χαμηλά ύψη βροχής.

Ανάλυση ευαισθησίας στη λεκάνη του Νέδοντα

- Η ευαισθησία των μοντέλων στη μεταβολή του πλάτους και του συντελεστή τραχύτητας της διατομής, που αποτελούν δεδομένα εισόδου της ημιεμπειρικής διαδικασίας διόδευσης που αναπτύχθηκε, είναι ασήμαντη. Μεταξύ αυτών των παραμέτρων μεγαλύτερη επίδραση έχει ο συντελεστής τραχύτητας.
- Ο αριθμός καμπύλης απορροής και το χρονικό βήμα είναι δεδομένα εισόδου μείζονος σημασίας.
- Όσο μικρότερο είναι το ύψος βροχής, τόσο μεγαλύτερη είναι η ευαισθησία των μοντέλων, ανεξαρτήτως διακριτοποίησης.
- Η αύξηση της διακριτοποίησης επιφέρει μεγαλύτερες μεταβολές, ανεξαρτήτως ύψους βροχής.

11.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Στην Ελλάδα η ανάπτυξη ημικαταναμημένων μοντέλων αποτελεί συνήθη πρακτική, ωστόσο, όπως και στον υπόλοιπο κόσμο, η διερεύνηση της επίδρασης του επιπέδου της διακριτοποίησης δεν έχει εξεταστεί επαρκώς. Η λεκάνη του Νέδοντα παρουσίασε αύξηση των πλημμυρικών μεγεθών με την αύξηση της διακριτοποίησης και έχει ενδιαφέρον να μελετηθούν λεκάνες με παρόμοια χαρακτηριστικά στην Ελλάδα, ώστε να είναι βάσιμη μια σύγκριση. Γενικά, προτείνεται μια αντίστοιχη διερεύνηση σε λεκάνες διαφορετικής κλίμακας και σχήματος, κατά προτίμηση με διαθέσιμα δεδομένα από καταγραφές, ώστε μετέπειτα να είναι δυνατή και η βαθμονόμηση των μοντέλων. Ειδικότερα, η βαθμονόμηση των μοντέλων μπορεί να γίνει με τη προσομοίωση των καταγεγραμμένων επεισοδίων, για τα οποία είναι διαθέσιμη η πραγματική απορροή.

Στο πλαίσιο της ανάλυσης του προβλήματος διακριτοποίησης, ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα είχε και η διερεύνηση της επίδρασης της εφαρμογής διαφορετικών ΜΥΓ, π.χ. αντιπαραβολή του τυπικού υδρογραφήματος της NRCS (PRF484) με άλλα συνθετικά ΜΥΓ ή με τη μέθοδο των ισόχρονων. Η τελευταία επιτρέπει την παραγωγή μοναδιαίων υδρογραφημάτων φυσικής βάσης, και μπορεί να συνδυαστεί με την υδραυλική προσέγγιση που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία, για τη διόδευση των ροών στο υδρογραφικό δίκτυο.

Τα ευρήματα της παρούσας εργασίας μπορούν να αποτελέσουν τη βάση για περαιτέρω διερεύνηση της επίδρασης της διακριτοποίησης της λεκάνης του Νέδοντα σε υπολεκάνες. Η τοπογραφία της λεκάνης αυτής έχει υποστεί έντονη μεταβολή λόγω του πλήθους των αναβαθμών που έχουν κατασκευαστεί σε όλο το μήκος του υδρογραφικού δικτύου. Η παρουσία τους επηρεάζει τα χαρακτηριστικά της πλημμύρας. Από μόνη της η επίδραση των αναβαθμών της λεκάνης του Νέδοντα στην πλημμύρα απαιτεί εκτενή ερευνητική μελέτη και θα έχει ενδιαφέρον να συνεκτιμηθεί κι η επίδραση της διακριτοποίησης της λεκάνης. Ακόμη, υπάρχει περιθώριο και για μια πιο λεπτομερή προσομοίωση των υπόγειων διεργασιών της λεκάνης, σημαντικό τμήμα της οποίας είναι καρστικό, ώστε να εκτιμηθεί ακριβέστερα ο μηχανισμός παραγωγής των πλημμυρών.

Δεδομένου ότι σκοπός των υδρολογικών μοντέλων πλημμύρας είναι η εκτίμηση κρίσιμων πλημμυρικών μεγεθών, που αποτελούν δεδομένα εισόδου σε κατάντη υδραυλικά έργα εντός της λεκάνης μελέτης, είναι σημαντικό να διερευνηθεί η σχέση μεταξύ των μεγεθών των διαφορετικών διακριτοποιήσεων και της απόκρισης των κατάντη έργων. Για παράδειγμα, είναι σημαντικό να αποτυπωθεί η υδραυλική επίδραση της διαφοράς στην παροχή αιχμής μεταξύ

των διαφορετικών διακριτοποιήσεων στην διόδευση της πλημμύρας εντός της διευθετημένης κοίτης του Νέδοντα. Η ερμηνεία των διαφορών στην αιχμή και στον όγκο μπορεί να πραγματοποιηθεί με την ανάπτυξη 2D μοντέλων, ώστε να φανεί η διαφορά στην κατάκλυση των περιοχών.

Στη βιβλιογραφία διευκρινίζεται ότι η επίδραση της διακριτοποίησης της λεκάνης δεν είναι απαραίτητα ίδια για όλα τα υδρολογικά μεγέθη (π.χ. απορροή, στερεοαπορροή, εξατμισοδιαπνοή). Συνεπώς, στη λεκάνη του Νέδοντα υπάρχουν ακόμα πολλά υδρολογικά μεγέθη που θα ήταν χρήσιμο να εκτιμηθούν σε συνάρτηση της διακριτοποίησης της λεκάνης. Μια τέτοια μελέτη θα ήταν πολύ σημαντική προκειμένου να διερευνηθούν λύσεις εμπλουτισμού του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα και μέτρα σχετικά με την άρδευση καλλιεργειών στην ευρύτερη περιοχή.

12 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Ελληνικές

- 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.
- Ειδική Γραμματεία Υδάτων, Προδιαγραφές μελετών, *Σχέδια Διαχείρισης Κίνδυνων Πλημμύρας Λεκανών Απορροής Ποταμών των Υδατικών Διαμερισμάτων της Χώρας*, Ειδική Γραμματεία Υδάτων, http://floods.ypeka.gr/egyFloods/reports/SDKP_Prodiagrafes_Meleton.pdf, Αθήνα, 2012.
- Ευστρατιάδης, Α., Δ. Κουτσογιάννης, Ν. Μαμάσης, Π. Δημητριάδης, και Α. Μαχαίρας, Βιβλιογραφική επισκόπηση υδρολογίας πλημμυρών και συναφών εργαλείων, *ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ - Εκτίμηση πλημμυρικών ροών στην Ελλάδα σε συνθήκες υδροκλιματικής μεταβλητότητας: Ανάπτυξη φυσικά εδραιωμένου εννοιολογικού-πιθανοτικού πλαισίου και υπολογιστικών εργαλείων*, Ανάδοχοι: ΕΤΜΕ: Πέππας & Συν/τες Ε.Ε., Γραφείο Μαχαίρα, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, 115 σελίδες, Οκτώβριος 2012.
- Ευστρατιάδης, Α., Α. Κουκουβίνος, Ε. Μιχαηλίδη, Ε. Γαλιούνα, Κ. Τζούκα, Α. Δ. Κούσης, Ν. Μαμάσης, και Δ. Κουτσογιάννης, Τεχνική έκθεση περιγραφής περιοχικών σχέσεων εκτίμησης χαρακτηριστικών υδρολογικών μεγεθών, *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, 146 σελίδες, Σεπτέμβριος 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.

- Κουτσογιάννης, Δ., Τεχνική έκθεση, *Πρόσθετα και συμπληρωματικά υδραυλικά και αντιπλημμυρικά τεχνικά έργα στην περιοχή της Καλαμάτας - Εξέταση ζητημάτων που αφορούν στην τροποποίηση της αριθμ. 122004/13-07-2004 ΑΕΠΟ του έργου: «Αυτοκινητόδρομος Τρίπολης- Καλαμάτας τμήμα Τσακώνα-Καλαμάτα»*, Ανάθεση: Περιφέρεια Πελοποννήσου, Αθήνα, 2022.
- Λαγούδη, Α., Γ. Σπανός, Α. Σωτηρόπουλος, Λ. Καραβά, Σ. Μπαραφάκα, Δ. Αργυροπούλου, και Σ. Καϊμάκη, Τεχνική Έκθεση, *Αντιμετώπιση Προβλημάτων από Πλημμυρικά Φαινόμενα στην Περιοχή Ανάντη και Κατάντη της Περιμετρικής Οδού Καλαμάτας-Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων για την Τροποποίηση των Αποφάσεων Έγκρισης Περιβαλλοντικών Όρων του Τμήματος «Τσακώνα-Καλαμάτα» του Αυτοκινητοδρόμου «Κόρινθος-Τρίπολη-Καλαμάτα & Κλάδος Λεύκτρο-Σπάρτη»*, Terra Nova, Αθήνα, 2021.
- Μιμίκου, Μ., και Μπαλάτς, Ε., *Τεχνική Υδρολογία*, Έκδοση 3, 297 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2003.
- Οδηγία 2007/60/ΕΚ για την αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας, Ενσωμάτωση στο εθνικό δίκαιο σύμφωνα με την τροποποίηση ΚΥΑ 177772/924/2017 (ΦΕΚ 2140 Β΄/20), 2007.
- Παπανικολάου, Π., Σημειώσεις μαθήματος, *Στοιχεία μόνιμης ροής σε αγωγούς υπό πίεση και αγωγούς με ελεύθερη επιφάνεια*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Αύγουστος 2012.
- ΥΠΕΝ, Ειδική Γραμματεία Υδάτων, *Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Δυτικής Πελοποννήσου, Στάδιο Ι, Φάση 1 - Παραδοτέο 2 «Ομβρίες Καμπύλες - Τεχνική Έκθεση»*, Έκδοση 1, 2015.
- ΥΠΕΝ, Ειδική Γραμματεία Υδάτων, *Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Δυτικής Πελοποννήσου, Στάδιο ΙΙ, Φάση 1 - Παραδοτέο 12 «Προσχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας - Τεχνική Έκθεση»*, Έκδοση 1, 2017.

Ξενόγλωσσες

- 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, <https://doi.org/10.5194/hess-11-1825-2007>, 2007.
- Braud, J. A., *Impact of watershed delineation detail on hydrologic process modeling in low slope areas*, LSU Master's Theses, https://repository.lsu.edu/gradschool_theses/3294, 3294, 2009.
- Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED), Summarized Table of Natural Disasters in Greece from 1900 to 2020, *EM-DAT: The CRED/OFDA International Disaster Database*, Université Catholique de Louvain–Brussels–Belgium, Διαθέσιμο: <http://www.emdat.be>
- Chow, V.T., D.R. Maidment, and L.W. Mays, *Applied Hydrology*, McGraw-Hill, 1988.
- Chow V.T., *Open-channel Hydraulics*, McGraw-Hill, 1959.

- Daniil, E. I., and L. S. Lazaridis, Practical issues in hydrologic modeling for flood management of watercourses running through urban environments in Greece, *Conf. Proc., Watershed Management 2005*, G. E. Moglen, ed., ASCE, Reston, Va., 2005.
- Dingman, S. L., *Physical Hydrology*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1994.
- 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](https://doi.org/10.5194/nhess-14-1417-2014), 2014.
- Fernandes, A., A. Lima, J. Barbosa, and L. Assis, The influence of spatial discretization on HEC-HMS modelling: a case study, *International Journal of Hydrology*, 3, [10.15406/ijh.2019.03.00209](https://doi.org/10.15406/ijh.2019.03.00209), 2019.
- Giandotti, M., *Previsione delle piene e delle magre dei corsi d'acqua*, Istituto Poligrafico dello Stato, 8, 107-117, 1934.
- Hjelmfelt Jr., A. T., Negative outflows from Muskingum flood routing, *Journal of Hydraulic Engineering*, 111(6), 1010-1014, 1985.
- Hromadka II, T. V., and J. J. DeVries, *Kinematic wave routing and computational error*, Technical report, 1986.
- Kirpich, Z. P., Time of concentration of small agricultural watersheds, *Civil Engineering*, 10(6), 362, 1940.
- Loague, K. M. and R. A. Freeze, A comparison of rainfall-runoff modeling techniques on small upland catchments, *Water Resources Research*, 21(2), 229-248, 1985.
- Mamillapalli, S., R. Srinivasan, J. G. Arnold, and B. A. Engel, Effect of spatial variability on basin scale modeling, In Third International Conference/Workshop on Integrated Remote Sensing Resource Center, established with support from NASA (NAG5-6535), Third International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling, Santa Fe, New Mexico, *National Center for Geographic Information and Analysis*, Santa Barbara, CA, USA, January 21-26, 1996.
- Massari, C., L. Brocca, S. Barbetta, C. Papathanasiou, M. Mimikou, and T. Moramarco, Using globally available soil moisture indicators for flood modelling in Mediterranean catchments, *Hydrology and Earth System Sciences*, 18, 839-853, <https://doi.org/10.5194/hess-18-839-2014>, 2014.
- Norris, G., and C. T. Haan, Impact of subdividing watersheds on estimated hydrographs, *Soil and Water Division American Society of Agricultural Engineers*, 9, 443-445, 1993.
- Papaoannou G, A. Efstratiadis, L. Vasiliades, A. Loukas, S. M. Papalexiou, A. Koukouvinos, I. Tsoukalas, and P. Kossieris, An Operational Method for Flood Directive Implementation in Ungauged Urban Areas, *Hydrology*, 5(2), 24, <https://doi.org/10.3390/hydrology5020024>, 2018.
- Ponce V. M., and R. H. Hawkins, Runoff Curve Number: has it reached maturity?, *Journal of Hydrologic Engineering*, 1(1), 11-19, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(1996\)1:1\(11\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(1996)1:1(11)), 1996.

- Sasowsky, K. C., and T. W. Gardner, Watershed configuration and geographic information system parameterization for spur model hydrologic simulations, *Water resources bulletin*, 27(1), 7-18, 1991.
- Savvidou, E., A. Efstratiadis, A. D. Koussis, A. Koukouvinos, and D. Skarlatos, The curve number concept as a driver for delineating hydrological response units, *Water*, 10(2), 194, [doi:10.3390/w10020194](https://doi.org/10.3390/w10020194), 2018.
- Soil Conservation Service (SCS), *National Engineering Handbook*, Section 4, Hydrology (NEH-4), U.S. Department of Agriculture, Washington, DC, 1972.
- Sordo-Ward, A., P. Bianucci, and L. Garrote, Implications of the shape of the design hyetograph in the derived flood frequency distribution, *EGU*, Vienna, 2012.
- Sun, J., Y. P. Li, G. H. Huang, and C. X. Wang, Analysis of interactive effects of DEM resolution and basin subdivision level on runoff simulation in Kaidu River Basin, China, *Hydrology Research*, 48(4), 1100-1117, <https://doi.org/10.2166/nh.2016.332>, August, 2017.
- Thompson D. B., and T. G. Cleveland, *Subdivision of Texas watersheds for hydrologic modeling*, Texas Department of Transportation Research Project, 0-5822, 2009.
- Tripathi, M. P., N. S. Raghuwanshi, and G. P. Rao, Effect of watershed subdivision on simulation of water balance components. *Hydrological processes*, 20, 1137-1156, 2006.
- U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, *HEC-HMS Hydrologic Modeling System*, Technical Reference Manual, CPD-74B, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA, 2000.
- U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Design of Arch Dams, *U.S. Government Printing Office*, Denver, CO, 1977.
- Viparelli, C., Ricostruzione dell'idrogramma di piena, *L'Energia Elettrica*, 6, 421-428, 1963.
- Wood, E. F., M. Sivapalan, K. Beven, and L. Band, Effects of spatial variability and scale with implications to hydrologic modeling, *Journal of Hydrology*, 102, 29-47, 1988.
- Yu, M., C. Choi, J. Ji, and J. Yi, Analysis of runoff variation according to subbasin division, *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 159, 179-190, 10.2495/FRIAR120151, 2012.

