



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ
ΚΑΙ ΠΑΡΑΚΤΙΑΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**Επίδραση της κλιματικής αλλαγής στην υδρολογία
και υδραυλική δύο λεκανών απορροής μικρού και
μεσαίου μεγέθους**

Εκπονήθηκε για την εκπλήρωση των υποχρεώσεων για την απόκτηση
Διδακτορικού Διπλώματος του Πολυτεχνείου Κρήτης

Σοφία Ν. Σαρχάνη

Επιβλέπων Καθηγητής: Ιωάννης Κ. Τσάνης

Χανιά, Απρίλιος 2023

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Επίδραση της κλιματικής αλλαγής στην υδρολογία και υδραυλική δύο λεκανών απορροής μικρού και μεσαίου μεγέθους

Παρουσίαση Δ.Δ. στις 5/4/2023, Χανιά

Επταμελής εξεταστική επιτροπή

Ιωάννης Τσάνης, Καθηγητής, Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος,
Πολυτεχνείο Κρήτης, *Επιβλέπων Καθηγητής*

Κωνσταντίνος Χρυσικόπουλος, Καθηγητής, Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών
Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, *Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής*

Αριστείδης Κουτρούλης, Αναπληρωτής Καθηγητής, Σχολή Χημικών Μηχανικών και
Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, *Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής
Επιτροπής*

Πέτρος Γκίκας, Καθηγητής, Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος,
Πολυτεχνείο Κρήτης, *Μέλος Επταμελούς Εξεταστικής Επιτροπής*

Αθανάσιος Λουκάς, Καθηγητής, Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών,
Πολυτεχνική Σχολή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, *Μέλος Επταμελούς
Εξεταστικής Επιτροπής*

Παναγιώτης Πρίνος, Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή,
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, *Μέλος Επταμελούς Εξεταστικής Επιτροπής*

Ευάγγελος Μπαλτάς, Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο
Πολυτεχνείο, *Μέλος Επταμελούς Εξεταστικής Επιτροπής*

«Η έγκριση της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής από τη Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων της συγγραφέως» (Νόμος 5343/1932, άρθρο 202).

Το παρόν αντίγραφο της διατριβής παρέχεται υπό την προϋπόθεση ότι οιοσδήποτε συμβουλευέται το περιεχόμενό της κατανοεί ότι τα πνευματικά δικαιώματα ανήκουν στη συγγραφέα. Κάθε παράθεση κειμένου ή πληροφορίας που προκύπτει από την εργασία πρέπει να γίνεται με τη συναίνεση της συγγραφέως.

...αφιερωμένη στην οικογένειά μου

Ευχαριστίες

Η παρούσα διδακτορική διατριβή εκπονήθηκε στο εργαστήριο Διαχείρισης Υδατικών Πόρων και Παράκτιας Μηχανικής, της Σχολής Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος, του Πολυτεχνείου Κρήτης, υπό την επίβλεψη του διευθυντή του εργαστηρίου, Καθηγητή κ. Ιωάννη Τσάνη. Η ολοκλήρωση αυτής της ερευνητικής εργασίας πραγματοποιήθηκε με τη συμβολή και υποστήριξη ορισμένων ανθρώπων, τους οποίους θα ήθελα να ευχαριστήσω.

Πρωτίστως, ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα της διδακτορικής διατριβής μου, Καθηγητή κ. Ιωάννη Τσάνη, για την ευκαιρία που μου έδωσε να εργαστώ στο εργαστήριό του, την εμπιστοσύνη στο πρόσωπό μου με την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος διατριβής, την ενθάρρυνση, τον πολύτιμο χρόνο που αφιέρωσε, τη χρηματοδότηση της έρευνας, καθώς και για την καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια εκπόνησής της.

Επιπρόσθετα, θέλω να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Β. Χρυσικόπουλο, για το ενδιαφέρον του στην πορεία μου, την υποστήριξή του, την ανασκόπηση και αξιολόγηση της παρούσας διατριβής, και τη συμμετοχή του στην τριμελή συμβουλευτική επιτροπή.

Θερμές ευχαριστίες, επίσης, εκφράζω στον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Αριστείδη Κουτρούλη, για την προθυμία του να με βοηθήσει σε μείζονα θέματα της έρευνάς μου, τις επιστημονικές συμβουλές του, τις ιδέες, καθώς και για την ανασκόπηση και αξιολόγηση της παρούσας εργασίας, και τη συμμετοχή του στην τριμελή συμβουλευτική επιτροπή.

Ευχαριστώ επίσης τα μέλη της επταμελούς εξεταστικής επιτροπής για τη συμμετοχή τους και συνεισφορά στην ολοκλήρωση της εργασίας.

Θέλω να ευχαριστήσω ακόμη τον Dr. Frezer S. Awol και τον Professor Paulin Coulibaly για την παροχή δεδομένων και τη συνεισφορά τους σε ερευνητικές δημοσιεύσεις. Ευχαριστώ επίσης την Δρ. Ilja van Meerveld από το Πανεπιστήμιο της Ζυρίχης, όπως και τον ειδικό πληροφορικής Marc J.P. Vis, για την παροχή του λογισμικού HBV-light και την τεχνική υποστήριξη. Θέλω να ευχαριστήσω ακόμη τον Δρ. Μανώλη Γρυλλάκη για τις ιδέες, την υποστήριξη και τις επιστημονικές συμβουλές του, τον Κωνσταντίνο Σειραδάκη για την παροχή δεδομένων και την τεχνική υποστήριξη, και τον Δρ. Δημήτρη Αλεξάκη για την παροχή δεδομένων. Κλείνοντας, ευχαριστώ την οικογένειά μου για την ανεκτίμητη στήριξη στις αποφάσεις της πορείας μου.

Περίληψη

Η κλιματική αλλαγή θα έχει μεγαλύτερο αντίκτυπο στη δριμύτητα των αιφνίδιων πλημμυρών, καθώς αναμένεται εντατικοποίηση των ισχυρών βροχοπτώσεων, τόσο σε περιοχές όπου είναι πιθανό να αυξηθούν οι βροχοπτώσεις, όπως στον ανατολικό Καναδά, αλλά και σε περιοχές όπου, κατά μέσο όρο, δύναται να μειωθούν οι βροχοπτώσεις, όπως στη νοτιοανατολική Μεσόγειο. Η αλλαγή του κλίματος αναμένεται να αυξήσει τα πλημμυρικά βάθη, την ταχύτητα των πλημμυρικών κυμάτων και τις εκτάσεις κατάκλισης, γεγονός που υπαγορεύει την επικαιροποίηση των σχεδίων διαχείρισης κινδύνων πλημμύρας.

Η παρούσα διδακτορική διατριβή επικεντρώνεται: (i) στην υδρολογική προσομοίωση μεμονωμένων καταιγιδοφόρων γεγονότων—κυρίως υψηλής έντασης βροχής—από ιστορικά δεδομένα, αλλά και προβαλλόμενων ισχυρότερα ακραίων βροχοπτώτικών γεγονότων από δεδομένα κλιματικών σεναρίων, σε δύο λεκάνες απορροής που χωροθετούνται στο νησί της Κρήτης και στο νότιο Οντάριο του Καναδά, καθώς και (ii) στις πλημμυρικές επιπτώσεις των παραπάνω γεγονότων στα κατάντη τμήματα των λεκανών απορροής.

Για τη μικρής έκτασης υδρολογική λεκάνη στην Κρήτη χωρίς καταγεγραμμένη απορροή, γίνεται βαθμονόμηση παραμέτρων και επικύρωση του υδρογραφήματος ενός ισχυρού βροχοπτώτικού γεγονότος, ώστε να επαληθευθεί το υδρολογικό μοντέλο με έμμεσα στοιχεία πεδίου μετά το πέρας της πλημμύρας. Παρακείμενοι μετεωρολογικοί σταθμοί έχουν καταγράψει αυξημένη ημερήσια βροχόπτωση από ισχυρές καταιγίδες γνωστές ως Medicanes. Για το λόγο αυτό, μελετάται η επίδραση υποθετικών σεναρίων κλιματικής αλλαγής με υψηλότερη ένταση βροχής—για ίδια αθροιστική βροχόπτωση—στο μέγεθος της απορροής αιχμής και στα πλημμυρικά βάθη και εκτάσεις κατάκλισης του κατάντες τμήματος της υδρολογικής λεκάνης, όπως προσομοιώνονται από δύο υδραυλικά μοντέλα. Εξετάζεται η επίδραση διαφορετικών χρονικών βημάτων δεδομένων βροχόπτωσης στην απορροή αιχμής. Διενεργείται ανάλυση ευαισθησίας υδραυλικών συντελεστών. Πραγματοποιείται σύγκριση της εξέλιξης του πλημμυρικού κύματος μεταξύ προσομοιώσεων με βάση δύο ψηφιακών μοντέλων υψομετρίας (DEMs) υψηλής ανάλυσης για το ιστορικό γεγονός και για προβαλλόμενο γεγονός από κλιματικό μοντέλο.

Για τη μεσαίου μεγέθους υδρολογική λεκάνη στο Οντάριο του Καναδά, που διαθέτει μετρήσεις απορροής στην έξοδο έξι υπολεκανών της, γίνεται βαθμονόμηση παραμέτρων και επικύρωση υδρογραφημάτων για έξι μεμονωμένα βροχοπτώτικά γεγονότα, ομαδοποιημένα σε ζεύγη με παρόμοια υδρομετεωρολογικά χαρακτηριστικά (υψηλή ένταση βροχόπτωσης, δύο υδρολογικές αιχμές, και πολλαπλές συνθήκες πρότερης εδαφικής υγρασίας) ώστε να επαληθευτούν τα αποτελέσματα από δύο υδρολογικά μοντέλα μέσω του συντελεστή συνέπειας Nash–Sutcliffe και του δείκτη % σφάλματος του συνολικού όγκου βροχής. Μελετάται η επίδραση προβαλλόμενων ημερήσιων βροχοπτώσεων από 24 κλιματικά μοντέλα στην απορροή αιχμής των έξι υπολεκανών. Για το λόγο αυτό, για τις εικοσαετίες 1995-2014, 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100, εξετάζονται οι μέσες τιμές—από τα 24 κλιματικά μοντέλα—των μέγιστων ημερήσιων γεγονότων βροχόπτωσης, καθώς και των ημερήσιων γεγονότων βροχόπτωσης που αντιστοιχούν στο 99.9 εκατοστημόριο, για τα σενάρια RCP4.5 και RCP8.5. Πραγματοποιείται σύγκριση των πλημμυρικών επιπτώσεων στην κατάντη περιοχή από τα προβαλλόμενα γεγονότα με δύο υδραυλικά μοντέλα και ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DTM) υψηλής ανάλυσης.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στοχεύουν να ωφελήσουν στην πρόβλεψη απορροών μελλοντικών γεγονότων, στη χαρτογράφηση της πλημμυρικής επικινδυνότητας των εξεταζόμενων λεκανών, και στην επικαιροποίηση του προγραμματισμού για τη διαχείριση πλημμυρών, για μια επιτυχημένη προσαρμογή στο μεταβαλλόμενο κλίμα. Τα αποτελέσματα της προσέγγισης που ακολουθήθηκε, για τις δύο λεκάνες απορροής, είναι χρήσιμα σε προκαταρκτικό επίπεδο διαχείρισης της πλημμυρικής επικινδυνότητας. Για τη μείωση των αβεβαιοτήτων στις τιμές των παραμέτρων στο χώρο και στο χρόνο, και την εξαγωγή ικανοποιητικών και λεπτομερών αποτελεσμάτων που απαιτούνται για τον τελικό σχεδιασμό έναντι πλημμυρικού κινδύνου, είναι απαραίτητη η μελλοντική έρευνα με κλιματικά δεδομένα και μετρήσεις πεδίου ακόμη υψηλότερης ανάλυσης, χωρικά και χρονικά.

Abstract

Climate change will have a greater impact on the severity of flash floods, because of the expected intensification of heavy precipitation, both in areas where rainfall may increase, such as in eastern Canada, as well as in areas where rainfall is likely to decrease on average, such as in the Southeast Mediterranean. The changing climate is expected to increase flood depths, flood wave velocities and floodplains, which necessitates the updating of flood risk management plans.

The present PhD thesis focuses on: (i) the hydrological simulation of single storm events—mainly of high precipitation intensity—through historical data, but also of projected strongest extreme rainfall events through climate scenarios' data, in two watersheds located on the island of Crete and in southern Ontario of Canada, as well as (ii) on the flood impacts of the above events on the downstream parts of the watersheds.

Parameter calibration and validation of the flow hydrograph of a heavy precipitation event is performed for the small ungauged hydrological basin in Crete, to verify the hydrological model with post-flood indirect field data. Adjacent meteorological stations have recorded increased daily precipitation from severe storms known as Medicanes. For this reason, the impact of hypothetical climate change scenarios with higher precipitation intensity—for the same cumulative precipitation—on the peak runoff magnitude is studied, as well as on flood depths and inundated areas of the downstream segment of the hydrological basin, as simulated by two hydraulic models. The effect of different time intervals of rainfall data on peak runoff is examined. Sensitivity analysis of hydraulic coefficients is performed. A comparison of flood wave evolution between simulations based on two high-resolution digital elevation models (DEMs) is carried out for the historical event as well as for the projected event from a climate model.

For the medium-sized watershed in Ontario, Canada, at the exit of six included gauged sub-basins, parameter calibration and validation of flow hydrographs are performed for six individual precipitation events, grouped into pairs with similar hydrometeorological characteristics (high rainfall intensity, two hydrological peaks, and various antecedent soil moisture conditions) to verify the results of two hydrological models through the Nash–Sutcliffe efficiency coefficient and the total rain volume % error index. The effect of

projected daily precipitation from 24 climate models on the peak runoff of the six sub-basins is studied. For this reason, for the twenty-year periods 1995-2014, 2021-2040, 2041-2060, and 2081-2100, the mean values—from the 24 climate models—of the maximum daily precipitation events, as well as of the daily precipitation events corresponding to the 99.9th percentile are examined, for the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios. A comparison of the flood impacts on the downstream area from the projected events is performed with two hydraulic models and a high-resolution digital terrain model (DTM).

The results of the simulations aim to assist in predicting the runoff of future events, in flood hazard mapping of the considered basins, and in updating flood management plans for a successful adaptation to the changing climate. The results from the followed approach, for both watersheds, are useful at a preliminary flood risk management level. In order to reduce the parameter uncertainties in space and time, and derive satisfactory and detailed results needed for the final design against flood risk, future research with spatial and temporal climate data and field measurements of even higher resolution is necessary.

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη.....	i
Abstract	iii
Πίνακας Περιεχομένων	v
Κατάλογος Εικόνων	ix
Κατάλογος Πινάκων.....	xv
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Γενική περιγραφή του θέματος.....	1
1.2 Στόχοι της διατριβής.....	3
1.3 Διάρθρωση της διατριβής.....	4
1.4 Πρωτότυπα σημεία.....	6
1.5 Λίστα σχετικών δημοσιεύσεων.....	8
2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ.....	10
2.1 Βροχοπτώσεις σε Μεσόγειο και Καναδά.....	10
2.1.1 Ιστορικές βροχοπτώσεις στην Κρήτη.....	10
2.1.2 Προβολές βροχοπτώσεων σε Μεσόγειο και Κρήτη.....	10
2.1.3 Ανασκόπηση υδρολογικών αναλύσεων σε Κρήτη και Μεσόγειο.....	11
2.1.4 Ιστορικές βροχοπτώσεις σε Καναδά και νότιο Οντάριο.....	13
2.1.5 Προβολές βροχοπτώσεων σε Καναδά και Οντάριο.....	14
2.1.6 Ανασκόπηση υδρολογικών αναλύσεων σε Καναδά και Οντάριο.....	14
2.2 Πλημμύρες.....	16
2.2.1 Πλημμύρες στην Ευρώπη.....	16
2.2.2 Πλημμύρες στο Τορόντο.....	16
2.2.3 Υδραυλικά μοντέλα και εργαλεία εκτίμησης πλημμυρικών επιπτώσεων.....	17
2.2.4 Αβεβαιότητες στην υδραυλική προσομοίωση.....	18
2.2.5 Υδραυλικές αναλύσεις με το συζευγμένο μοντέλο 1D/2D HEC-RAS και σύγκριση της απόδοσης με το 1D και 2D μοντέλο.....	19
2.2.6 Ανασκόπηση υδραυλικών αναλύσεων στο νότιο Οντάριο.....	20
3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	22
3.1 Μέθοδος πολυγώνων Thiessen κατανομής της βροχόπτωσης.....	22
3.2 Υδρολογικό μοντέλο HEC-HMS.....	23
3.2.1 Μοντέλο SCS Curve Number μεθόδου απωλειών.....	24
3.2.2 Μοντέλο Clark Unit Hydrograph μεθόδου άμεσης απορροής.....	27
3.2.3 Μοντέλο εκθετικής ύφεσης Recession μεθόδου βασικής απορροής.....	29
3.2.4 Μοντέλο Muskingum μεθόδου ροής ανοικτού αγωγού.....	30

3.3	Υδρολογικό μοντέλο HBV-light.....	31
3.3.1	Ρουτίνα χιονιού	32
3.3.2	Ρουτίνα εδαφικής υγρασίας.....	33
3.3.3	Ρουτίνα απόκρισης	34
3.3.4	Ρουτίνα διόδευσης	35
3.4	Βαθμονόμηση	36
3.5	Υδραυλικό μοντέλο HEC-RAS	37
3.5.1	Μονοδιάστατη (1D) μη μόνιμη ροή	37
3.5.2	Εξισώσεις υδροδυναμικής για 1D μη μόνιμη ροή.....	37
3.5.3	Αριθμητικές μέθοδοι επίλυσης εξισώσεων 1D μη μόνιμης ροής	38
3.5.4	Δισδιάστατη (2D) μη μόνιμη ροή	39
3.5.5	Εξισώσεις υδροδυναμικής για 2D μη μόνιμη ροή.....	40
3.5.6	Αριθμητική μέθοδος επίλυσης εξισώσεων 2D μη μόνιμης ροής	42
3.5.7	Συζευγμένη 1D/2D μη μόνιμη ροή.....	42
3.5.8	Εξισώσεις υδροδυναμικής για συζευγμένη 1D/2D μη μόνιμη ροή	43
3.5.9	Υδραυλικοί υπολογισμοί γεφυρών	43
3.5.10	Υπολογιστική διαδικασία αλγόριθμου επίλυσης εξισώσεων	47
4.	ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΔΕΔΟΜΕΝΑ.....	49
4.1	Υδρολογική λεκάνη του ρέματος Αλμυρίδας	49
4.1.1	Περιγραφή περιοχής μελέτης.....	49
4.1.2	Δεδομένα υδρογραφικά, υδρογεωλογικά & χρήσεων γης	50
4.1.3	Αιφνίδιο πλημμυρικό γεγονός στις 17/10/2006.....	52
4.1.4	Δεδομένα κλιματικών μοντέλων.....	53
4.1.5	Δεδομένα υδρολογικού μοντέλου HEC-HMS για το βροχοπτώτικό συμβάν της 17/10/2006	54
4.1.6	Δεδομένα γεωμετρίας στο ArcGIS–Σύνδεση και ανάλυση με το υδραυλικό μοντέλο 1D HEC-RAS.....	60
4.1.7	Δεδομένα γεωμετρίας στο ArcGIS–Σύνδεση και ανάλυση με το συζευγμένο υδραυλικό μοντέλο 1D/2D HEC-RAS	63
4.2	Υδρολογική λεκάνη του ποταμού Humber	69
4.2.1	Περιγραφή περιοχής μελέτης.....	69
4.2.2	Δεδομένα χρήσεων γης & υδρολογικών κατηγοριών εδάφους	72
4.2.3	Δεδομένα βροχόπτωσης έξι μεμονωμένων γεγονότων.....	73
4.2.4	Δεδομένα υδρολογικού μοντέλου HEC-HMS για έξι βροχοπτώτικά συμβάντα.....	78
4.2.5	Δεδομένα υδρολογικού μοντέλου HBV-light για έξι βροχοπτώτικά συμβάντα.....	84
4.2.6	Δεδομένα κλιματικών μοντέλων.....	87

4.2.7	Γεωμετρική σχεδίαση στο υδραυλικό μοντέλο 2D HEC-RAS–Ανάλυση δεδομένων	92
4.2.8	Δεδομένα γεωμετρίας στο ArcGIS–Σύνδεση και ανάλυση με το υδραυλικό μοντέλο 1D HEC-RAS.....	98
5.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	102
5.1	Αποτελέσματα υδρολογικής λεκάνης ρέματος Αλμυρίδας	102
5.1.1	Βαθμονόμηση υδρολογικού μοντέλου HEC-HMS και ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων.....	102
5.1.2	Αποτελέσματα υδρολογικού μοντέλου HEC-HMS.....	106
5.1.3	Αποτελέσματα υδραυλικού μοντέλου 1D HEC-RAS.....	106
5.1.4	Υποθετικά σενάρια κλιματικής αλλαγής για το συνολικό ύψος υετού του καταγεγραμμένου γεγονότος.....	110
5.1.5	Ανάλυση ευαισθησίας τιμών του συντελεστή τραχύτητας Manning στο ενιαίο υδραυλικό μοντέλο 1D/2D HEC-RAS	114
5.1.6	Ανάλυση ευαισθησίας τιμών του συντελεστή υδατοφράκτη στο ενιαίο υδραυλικό μοντέλο 1D/2D HEC-RAS	115
5.1.7	Αποτελέσματα ενιαίου υδραυλικού μοντέλου 1D/2D HEC-RAS	116
5.1.8	Ιστορικές βροχοπτώσεις και μελλοντικές προβλέψεις μέσω δεδομένων κλιματικών μοντέλων.....	124
5.1.9	Υποθετικά σενάρια αύξησης της έντασης της βροχής για την ίδια αθροιστική βροχόπτωση με του καταγεγραμμένου γεγονότος.....	127
5.2	Αποτελέσματα υδρολογικής λεκάνης ποταμού Humber.....	131
5.2.1	Βαθμονόμηση υδρολογικών μοντέλων HEC-HMS και HBV-light, και αποτελέσματα.....	131
5.2.2	Υποθετικό σενάριο αύξησης της βροχόπτωσης του γεγονότος με το μεγαλύτερο συνολικά ύψος υετού	150
5.2.3	Αποτελέσματα υδρολογικού μοντέλου HEC-HMS για τα εξεταζόμενα γεγονότα των κλιματικών μοντέλων.....	151
5.2.4	Αποτελέσματα υδραυλικού μοντέλου 2D HEC-RAS για το σενάριο RCP8.5.....	155
5.2.5	Αποτελέσματα υδραυλικού μοντέλου 2D HEC-RAS για το σενάριο RCP4.5.....	166
5.2.6	Αποτελέσματα υδραυλικού μοντέλου 1D HEC-RAS για το σενάριο RCP8.5.....	176
5.2.7	Αποτελέσματα υδραυλικού μοντέλου 1D HEC-RAS για το σενάριο RCP4.5.....	186
6.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ	196
6.1	Συζήτηση και συμπεράσματα.....	196
6.1.1	Μελέτη υδρολογικής απόκρισης της λεκάνης του ρέματος Αλμυρίδας χωρίς καταγεγραμμένη απορροή	196

6.1.2	Επίδραση της κλιματικής αλλαγής στην υδρολογία της λεκάνης του ρέματος Αλμυρίδας	197
6.1.3	Υδραυλική στο κάταντες τμήμα του ρέματος Αλμυρίδας	198
6.1.4	Επίδραση της κλιματικής αλλαγής στην υδραυλική του κάταντες τμήματος του ρέματος Αλμυρίδας	199
6.1.5	Μελέτη υδρολογικής απόκρισης της λεκάνης του ποταμού Humber που διαθέτει μετρήσεις απορροής.....	200
6.1.6	Επίδραση της κλιματικής αλλαγής στην υδρολογία της λεκάνης του ποταμού Humber	203
6.1.7	Επίδραση της κλιματικής αλλαγής στην υδραυλική των κατάντη τμημάτων του ποταμού Humber	206
6.1.8	Εφαρμογή μοντέλων στις δύο υδρολογικές λεκάνες	208
6.2	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	209
6.2.1	Υδρολογία και υδραυλική του ρέματος Αλμυρίδας.....	209
6.2.2	Υδρολογία και υδραυλική του ποταμού Humber	210
7.	BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	213
8.	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	226
8.1	Παράρτημα Α – Τιμές αναφοράς του <i>CN</i> και της % ολικής αδιαπερατότητας των υπολεκανών του ποταμού Humber, για το μοντέλο HEC-HMS.....	226
8.1.1	Υπολογισμοί των τιμών αναφοράς του <i>CN</i> για συνθήκες απορροής Τύπου II	226
8.1.2	Υπολογισμοί των τιμών αναφοράς της % ολικής αδιαπερατότητας.....	234
8.2	Παράρτημα Β – Ποσοστά κάλυψης των χρήσεων γης των έξι υπολεκανών του ποταμού Humber ανά υψομετρική ζώνη, για το μοντέλο HBV-light.....	238
8.3	Παράρτημα Γ – Μέγιστη ημερήσια βροχόπτωση εικοσαετίας και ημερήσια βροχόπτωση που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας, για 4 εικοσαετίες, 24 κλιματικά μοντέλα, και 2 σενάρια θερμοκηπικών εκπομπών, στις υπολεκάνες του ποταμού Humber	239
8.4	Παράρτημα Δ – Ισχυρά βροχοπτώτικα γεγονότα περιόδου 2015-2019 στο σταθμό των Αγ. Πάντων.....	249

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 3-1. Βήματα για τον προσδιορισμό των πολυγώνων Thiessen.....	22
Εικόνα 3-2. Ακολουθούμενη διαδικασία απορροής λεκανών, κατά την προσομοίωση με το HEC-HMS.....	24
Εικόνα 3-3. Διαδικασίες μοντέλου Clark Unit Hydrograph.....	28
Εικόνα 3-4. Απεικόνιση της επίδρασης της βασικής απορροής στη συνολική απορροή.....	30
Εικόνα 3-5. (α) Συνεισφορά της βροχής ή του λιωμένου χιονιού στην αποθήκευση νερού στο έδαφος και στην ανώτερη ζώνη των υπόγειων υδάτων, (β) γραμμική μείωση της δυνητικής εξάτμισης ανάλογα με την περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό.....	34
Εικόνα 3-6. Αναπαράσταση της ρουτίνας απόκρισης.....	35
Εικόνα 3-7. Επίδραση της συνάρτησης μετασχηματισμού στην προσομοιωμένη απορροή.....	35
Εικόνα 3-8. Θέσεις διατομών πριν, εντός, και μετά τη γέφυρα για τους υδραυλικούς υπολογισμούς.....	44
Εικόνα 4-1. Υδρολογική λεκάνη του ρέματος Αλμυρίδας στο νησί της Κρήτης.....	49
Εικόνα 4-2. Χρήσεις γης στην υδρολογική λεκάνη του ρέματος Αλμυρίδας (EEA, 2016).....	52
Εικόνα 4-3. Πλέγμα βροχοπτώσιων δεδομένων CORDEX, χωρικής ανάλυσης 12.5 km x 12.5 km, για την Κρήτη και τη λεκάνη της Αλμυρίδας.....	54
Εικόνα 4-4. Υδρολογικό σύστημα προσομοίωσης ρέματος Αλμυρίδας με το μοντέλο HEC-HMS.....	55
Εικόνα 4-5. Αναγωγή καταγεγραμμένων τριώνρων δεδομένων βροχόπτωσης στο βροχομετρικό σταθμό της Σούδας σε 15λεπτο βήμα (συνολική βροχόπτωση 196.2 mm).....	55
Εικόνα 4-6. Κοίτη ρέματος Αλμυρίδας, όχθες & διατομές, βάσει του DEM υψηλής ανάλυσης 5 m x 5 m...	61
Εικόνα 4-7. Γεωμετρία 1D ροής του μελετώμενου ρέματος (κανάλι, όχθες, διατομές), συμπεριλαμβανομένων των 2D επιφανειών ροής με τα 2D πεπερασμένα στοιχεία, των γραμμών διαχωρισμού (ροζ), καθώς και των πλευρικών δομών σύνδεσης της 1D ροής με τις 2D επιφάνειες ροής (μαύρη-κόκκινη διακεκομμένη γραμμή), βάσει του DEM υψηλής ανάλυσης 2 m x 2 m.....	66
Εικόνα 4-8. Διάγραμμα διαδικασίας για την 1D/2D συζευγμένη υδραυλική προσομοίωση του κάταντες τμήματος του ρέματος Αλμυρίδας.....	69
Εικόνα 4-9. Τοποθεσία της λεκάνης απορροής του ποταμού Humber στο Νότιο Οντάριο, με τους σταθμούς μέτρησης βροχόπτωσης και απορροής.....	70
Εικόνα 4-10. Πολύγωνα Thiessen από 16 βροχομετρικούς σταθμούς, και περιοχές επιρροής των βροχογράφων στις επτά υπολεκάνες της υδρολογικής λεκάνης του ποταμού Humber.....	71
Εικόνα 4-11. (α) Χρήσεις γης και (β) Κατηγορίες εδάφους της λεκάνης απορροής του ποταμού Humber. Οι χάρτες ανατυπώθηκαν από το Agriculture and Agri-Food Canada υπό την ανοικτής πρόσβασης κυβερνητική άδεια του Καναδά, έκδοση 2.0 (https://open.canada.ca/en/open-government-licence-canada , πρόσβαση στις 11 Μαΐου 2020).....	73
Εικόνα 4-12. Υδρολογικό σύστημα προσομοίωσης της λεκάνης του ποταμού Humber με το μοντέλο HEC-HMS.....	79
Εικόνα 4-13. Δεδομένα εξάτμισης από μετρήσεις πεδίου κατά την περίοδο 2010-2012, σε μηνιαία κλίμακα (Delidjakova et al., 2014).	87

Εικόνα 4-14. Πολύγωνα Thiessen από την επιρροή των κεντροειδών των 30 κελιών του πλέγματος στις υπολεκάνες της υδρολογικής λεκάνης του ποταμού Humber.	89
Εικόνα 4-15. Όρια της 2D επιφάνειας ροής, συμπεριλαμβανομένων των 2D πεπερασμένων στοιχείων, των γραμμών διαχωρισμού, των αξόνων των οκτώ γεφυρών, και των γραμμών των οριακών συνθηκών, βάσει του DTM υψηλής ανάλυσης 0.5 m x 0.5 m.	96
Εικόνα 4-16. Κοίτη ποταμού Humber και ρέματος Black Creek, όχθες, διατομές & γέφυρες, βάσει του DTM υψηλής ανάλυσης 0.5 m x 0.5 m.	100
Εικόνα 5-1. Καταγεγραμμένη βροχόπτωση και όρια αβεβαιότητας της προσομοιωμένης απορροής, του αιφνίδιου πλημμυρικού γεγονότος στην Αλμυρίδα το 2006.	106
Εικόνα 5-2. Τρισδιάστατη άποψη του πλημμυρικού κύματος στις (α) 10:00, (β) 11:30, (γ) 12:00, (δ) 13:00, (ε) 14:00, και (στ) 16:00 της 17 ^{ης} Οκτωβρίου 2006, με το 1D HEC-RAS, χρησιμοποιώντας το DEM υψηλής ανάλυσης 5 m x 5 m.	108
Εικόνα 5-3. (α) Έκταση πλημμύρας και μέγιστα πλημμυρικά βάθη, (β) μέγιστες ταχύτητες πλημμυρικού κύματος, (γ) διάρκεια πλημμύρας από την έναρξη της προσομοίωσης, (δ) χρόνος άφιξης πλημμυρικού κύματος στις πλημμυρικές επιφάνειες, με το 1D HEC-RAS, χρησιμοποιώντας το DEM υψηλής ανάλυσης 5 m x 5 m.	109
Εικόνα 5-4. Κατανομές βροχόπτωσης και προσομοιωμένα υδρογραφήματα λόγω των υποθετικών σεναρίων κλιματικής αλλαγής που αφορούν αύξηση της μέγιστης βροχόπτωσης κατά 100% και 300%.	110
Εικόνα 5-5. Συντελεστής έντασης της βροχόπτωσης κατά την αιχμή και λόγος της απορροής κατά την αιχμή, όπως προκύπτουν από αύξηση της έντασης της βροχόπτωσης κατά 100% και 300%.	111
Εικόνα 5-6. Προσομοιωμένες απορροές αιχμής λόγω διαφορετικής χρονικής ανακατανομής δεδομένων βροχόπτωσης, για το καταγεγραμμένο γεγονός (βασικό σενάριο), καθώς και αύξηση της μέγιστης βροχόπτωσης κατά 100% και 300%.	112
Εικόνα 5-7. Προσομοιωμένο βάθος στη διατομή ελέγχου για μεταβαλλόμενο συντελεστή υδατοφράκτη στις πλευρικές δομές και συντελεστή τραχύτητας Manning n_f στις επιφάνειες ροής, με το συζευγμένο υδραυλικό μοντέλο 1D/2D HEC-RAS, και υψηλής ανάλυσης DEM 5 m x 5 m.	115
Εικόνα 5-8. Προσομοιωμένο βάθος στη διατομή ελέγχου για μεταβαλλόμενο συντελεστή υδατοφράκτη στις πλευρικές δομές και συντελεστή τραχύτητας Manning n_f στις επιφάνειες ροής, με το συζευγμένο υδραυλικό μοντέλο 1D/2D HEC-RAS, και υψηλής ανάλυσης DEM 2 m x 2 m.	116
Εικόνα 5-9. Προσομοιωμένα πλημμυρικά βάθη (m) στις (α) 10:00, (β) 11:30, (γ) 12:00, (δ) 13:00, (ε) 14:00, και (στ) 16:00 της 17 ^{ης} Οκτωβρίου 2006, με το συζευγμένο μοντέλο 1D/2D HEC-RAS, σε υψηλής ανάλυσης DEM 5 m x 5 m.	118
Εικόνα 5-10. Προσομοιωμένες ταχύτητες (m/s) του πλημμυρικού κύματος στις (α) 10:00, (β) 11:30, (γ) 12:00, (δ) 13:00, (ε) 14:00, και (στ) 16:00 της 17 ^{ης} Οκτωβρίου 2006, με το συζευγμένο μοντέλο 1D/2D HEC-RAS, σε υψηλής ανάλυσης DEM 5 m x 5 m.	119
Εικόνα 5-11. Προσομοιωμένα πλημμυρικά βάθη (m) στις (α) 10:00, (β) 11:30, (γ) 12:00, (δ) 13:00, (ε) 14:00, και (στ) 16:00 της 17 ^{ης} Οκτωβρίου 2006, με το συζευγμένο μοντέλο 1D/2D HEC-RAS, σε υψηλής ανάλυσης DEM 2 m x 2 m.	120

Εικόνα 5-12. Προσομοιωμένες ταχύτητες (m/s) στις (α) 10:00, (β) 11:30, (γ) 12:00, (δ) 13:00, (ε) 14:00, και (στ) 16:00 της 17 ^{ης} Οκτωβρίου 2006, με το συζευγμένο μοντέλο 1D/2D HEC-RAS, σε υψηλής ανάλυσης DEM 2 m × 2 m.....	121
Εικόνα 5-13. Διακυμάνσεις μέγιστου πλημμυρικού βάθους (m) και έκτασης της πλημμύρας (m ²) κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης με το συζευγμένο μοντέλο 1D/2D HEC-RAS, για τα δύο DEM υψηλής ανάλυσης (5 και 2 m).	122
Εικόνα 5-14. (α) Έκταση πλημμύρας του κάταντες τμήματος του ρέματος της Αλμυρίδας όπως προκύπτει από DEM 2 m × 2 m (σκούρο μπλε) και DEM 5 m × 5 m (ανοιχτό μπλε). Χαρακτηριστικές διατομές και στάθμη νερού: (β) 515.68 m πριν την εκβολή, (γ) 423.20 m πριν την εκβολή, (δ) 207.43 m πριν την εκβολή, (ε) 117.16 m πριν την εκβολή, (στ) 61.21 m πριν την εκβολή, και από τα δύο DEM μέσω του συζευγμένου μοντέλου 1D/2D HEC-RAS.	124
Εικόνα 5-15. Κατανομές βροχόπτωσης και προσομοιωμένα υδρογραφήματα λόγω υποθετικών σεναρίων αύξησης της μέγιστης βροχόπτωσης κατά 50%, 100%, και 200%.	128
Εικόνα 5-16. Διάρκεια πλημμύρας του καταγεγραμμένου βροχοπτώσιου γεγονότος από την έναρξη της προσομοίωσης (α) με το DEM των 5 m, και (β) με το DEM των 2 m.	130
Εικόνα 5-17. Βροχόπτωση, καθώς και καταγεγραμμένη και προσομοιωμένη απορροή του γεγονότος στις 28–30 Μαΐου 2013, στην έξοδο των έξι υπολεκανών με μετρητές απορροής.	137
Εικόνα 5-18. Βροχόπτωση, καθώς και καταγεγραμμένη και προσομοιωμένη απορροή του γεγονότος στις 4-10 Ιουλίου 2013, στην έξοδο των έξι υπολεκανών με μετρητές απορροής.....	137
Εικόνα 5-19. Θηκογράμματα από το δείκτη Nash-Sutcliffe για τις έξι υπολεκάνες, από τα δύο υδρολογικά μοντέλα, για τα γεγονότα στις 28-30 Μαΐου 2013 και στις 4-10 Ιουλίου 2013.....	138
Εικόνα 5-20. Βροχόπτωση, καθώς και καταγεγραμμένη και προσομοιωμένη απορροή του γεγονότος στις 7-15 Απριλίου 2013, στην έξοδο των έξι υπολεκανών με μετρητές απορροής.	142
Εικόνα 5-21. Βροχόπτωση, καθώς και καταγεγραμμένη και προσομοιωμένη απορροή του γεγονότος στις 30 Απριλίου–7 Μαΐου 2017, στην έξοδο των έξι υπολεκανών με μετρητές απορροής.	142
Εικόνα 5-22. Θηκογράμματα από το δείκτη Nash-Sutcliffe για τις έξι υπολεκάνες, από τα δύο υδρολογικά μοντέλα, για τα γεγονότα στις 7-15 Απριλίου 2013 και στις 30 Απριλίου-7 Μαΐου 2017.	143
Εικόνα 5-23. Βροχόπτωση, καθώς και καταγεγραμμένη και προσομοιωμένη απορροή του γεγονότος στις 26-30 Ιουνίου 2010, στην έξοδο των έξι υπολεκανών με μετρητές απορροής.....	146
Εικόνα 5-24. Βροχόπτωση, καθώς και καταγεγραμμένη και προσομοιωμένη απορροή του γεγονότος στις 22-25 Ιουνίου 2017, στην έξοδο των έξι υπολεκανών με μετρητές απορροής.....	147
Εικόνα 5-25. Θηκογράμματα από το δείκτη Nash-Sutcliffe για τις έξι υπολεκάνες, από τα δύο υδρολογικά μοντέλα, για τα γεγονότα στις 26-30 Ιουνίου 2010 και στις 22-25 Ιουνίου 2017.....	147
Εικόνα 5-26. Θηκογράμματα από το δείκτη σφάλματος συνολικού όγκου (%) για τις έξι υπολεκάνες, από τα δύο υδρολογικά μοντέλα, για τα έξι μεμονωμένα γεγονότα βροχόπτωσης.....	149
Εικόνα 5-27. Βροχόπτωση και προσομοιωμένα υδρογραφήματα με τα δύο υδρολογικά μοντέλα στην έξοδο της υπολεκάνης W1020 λόγω του γεγονότος στις 4-10/7/2013, καθώς και υποθετικού σεναρίου αύξησης της αθροιστικής βροχόπτωσης κατά 50%.....	151

Εικόνα 5-28. Κατανομές για τις μέσες τιμές μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης–από 24 κλιματικά μοντέλα–για τις εικοσαετίες 2081-2100, 2041-2060, 2021-2040, και 1995-2014, για το σενάριο RCP8.5, και προσομοιωμένα υδρογραφήματα, στην έξοδο των έξι υπολεκανών.....	152
Εικόνα 5-29. Κατανομές για τις μέσες τιμές–από 24 κλιματικά μοντέλα–ημερήσιας βροχόπτωσης που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο για τις εικοσαετίες 2081-2100, 2041-2060, 2021-2040, και 1995-2014, για το σενάριο RCP8.5, και προσομοιωμένα υδρογραφήματα, στην έξοδο των έξι υπολεκανών.....	153
Εικόνα 5-30. Κατανομές για τις μέσες τιμές μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης–από 24 κλιματικά μοντέλα–για τις εικοσαετίες 2081-2100, 2041-2060, 2021-2040, και 1995-2014, για το σενάριο RCP4.5, και προσομοιωμένα υδρογραφήματα, στην έξοδο των έξι υπολεκανών.....	154
Εικόνα 5-31. Κατανομές για τις μέσες τιμές–από 24 κλιματικά μοντέλα–ημερήσιας βροχόπτωσης που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο για τις εικοσαετίες 2081-2100, 2041-2060, 2021-2040, και 1995-2014, για το σενάριο RCP4.5, και προσομοιωμένα υδρογραφήματα, στην έξοδο των έξι υπολεκανών.....	155
Εικόνα 5-32. Μέγιστα πλημμυρικά βάθη βάσει των υδρογραφημάτων που προέκυψαν από τις μέσες τιμές βροχόπτωσης–από 24 κλιματικά μοντέλα–των μέγιστων ημερήσιων γεγονότων και των ημερήσιων γεγονότων που αντιστοιχούν στο 99.9 εκατοστημόριο για τις εικοσαετίες 2081-2100, 2041-2060, 2021-2040, και 1995-2014, για το σενάριο RCP8.5, με το 2D HEC-RAS.	157
Εικόνα 5-33. Μέγιστη στάθμη νερού βάσει των υδρογραφημάτων που προέκυψαν από τις μέσες τιμές βροχόπτωσης–από 24 κλιματικά μοντέλα–των μέγιστων ημερήσιων γεγονότων και των ημερήσιων γεγονότων που αντιστοιχούν στο 99.9 εκατοστημόριο για τις εικοσαετίες 2081-2100, 2041-2060, 2021-2040, και 1995-2014, για το σενάριο RCP8.5, στα ανάντη και κατάντη των θέσεων των γεφυρών #1, #2, #3, και #4, με το 2D HEC-RAS.	160
Εικόνα 5-34. Μέγιστη στάθμη νερού βάσει των υδρογραφημάτων που προέκυψαν από τις μέσες τιμές βροχόπτωσης–από 24 κλιματικά μοντέλα–των μέγιστων ημερήσιων γεγονότων και των ημερήσιων γεγονότων που αντιστοιχούν στο 99.9 εκατοστημόριο για τις εικοσαετίες 2081-2100, 2041-2060, 2021-2040, και 1995-2014, για το σενάριο RCP8.5, στα ανάντη και κατάντη των θέσεων των γεφυρών #5, #6, #7, και #8, με το 2D HEC-RAS.	163
Εικόνα 5-35. Μέγιστες ταχύτητες πλημμυρικού κύματος βάσει των υδρογραφημάτων που προέκυψαν από τις μέσες τιμές βροχόπτωσης–από 24 κλιματικά μοντέλα–των μέγιστων ημερήσιων γεγονότων & των ημερήσιων γεγονότων που αντιστοιχούν στο 99.9 εκατοστημόριο για τις εικοσαετίες 2081-2100, 2041-2060, 2021-2040, και 1995-2014, για το σενάριο RCP8.5, με το 2D HEC-RAS.	164
Εικόνα 5-36. Χρόνος άφιξης μέγιστων πλημμυρικών βαθών βάσει των υδρογραφημάτων που προέκυψαν από τις μέσες τιμές βροχόπτωσης–από 24 κλιματικά μοντέλα–των μέγιστων ημερήσιων γεγονότων & των ημερήσιων γεγονότων που αντιστοιχούν στο 99.9 εκατοστημόριο για τις εικοσαετίες 2081-2100, 2041-2060, 2021-2040, και 1995-2014, για το σενάριο RCP8.5, με το 2D HEC-RAS.	165
Εικόνα 5-37. Μέγιστα πλημμυρικά βάθη βάσει των υδρογραφημάτων που προέκυψαν από τις μέσες τιμές βροχόπτωσης–από 24 κλιματικά μοντέλα–των μέγιστων ημερήσιων γεγονότων και των	

ημερήσιων γεγονότων που αντιστοιχούν στο 99.9 εκατοστημόριο για τις εικοσαετίες 2081-2100, 2041-2060, 2021-2040, και 1995-2014, για το σενάριο RCP4.5, με το 2D HEC-RAS.	167
Εικόνα 5-38. Μέγιστη στάθμη νερού βάσει των υδρογραφημάτων που προέκυψαν από τις μέσες τιμές βροχόπτωσης–από 24 κλιματικά μοντέλα–των μέγιστων ημερήσιων γεγονότων και των ημερήσιων γεγονότων που αντιστοιχούν στο 99.9 εκατοστημόριο για τις εικοσαετίες 2081-2100, 2041-2060, 2021-2040, και 1995-2014, για το σενάριο RCP4.5, στα ανάντη και κατάντη των θέσεων των γεφυρών #1, #2, #3, και #4, με το 2D HEC-RAS.	170
Εικόνα 5-39. Μέγιστη στάθμη νερού βάσει των υδρογραφημάτων που προέκυψαν από τις μέσες τιμές βροχόπτωσης–από 24 κλιματικά μοντέλα–των μέγιστων ημερήσιων γεγονότων και των ημερήσιων γεγονότων που αντιστοιχούν στο 99.9 εκατοστημόριο για τις εικοσαετίες 2081-2100, 2041-2060, 2021-2040, και 1995-2014, για το σενάριο RCP4.5, στα ανάντη και κατάντη των θέσεων των γεφυρών #5, #6, #7, και #8, με το 2D HEC-RAS.	173
Εικόνα 5-40. Μέγιστες ταχύτητες πλημμυρικού κύματος βάσει των υδρογραφημάτων που προέκυψαν από τις μέσες τιμές βροχόπτωσης–από 24 κλιματικά μοντέλα–των μέγιστων ημερήσιων γεγονότων & των ημερήσιων γεγονότων που αντιστοιχούν στο 99.9 εκατοστημόριο για τις εικοσαετίες 2081-2100, 2041-2060, 2021-2040, και 1995-2014, για το σενάριο RCP4.5, με το 2D HEC-RAS.	174
Εικόνα 5-41. Χρόνος άφιξης μέγιστων πλημμυρικών βαθών βάσει των υδρογραφημάτων που προέκυψαν από τις μέσες τιμές βροχόπτωσης–από 24 κλιματικά μοντέλα–των μέγιστων ημερήσιων γεγονότων & των ημερήσιων γεγονότων που αντιστοιχούν στο 99.9 εκατοστημόριο για τις εικοσαετίες 2081-2100, 2041-2060, 2021-2040, και 1995-2014, για το σενάριο RCP4.5, με το 2D HEC-RAS.	175
Εικόνα 5-42. Μέγιστα πλημμυρικά βάθη βάσει των υδρογραφημάτων που προέκυψαν από τις μέσες τιμές βροχόπτωσης–από 24 κλιματικά μοντέλα–των μέγιστων ημερήσιων γεγονότων και των ημερήσιων γεγονότων που αντιστοιχούν στο 99.9 εκατοστημόριο για τις εικοσαετίες 2081-2100, 2041-2060, 2021-2040, και 1995-2014, για το σενάριο RCP8.5, με το 1D HEC-RAS.	177
Εικόνα 5-43. Μέγιστη στάθμη νερού βάσει των υδρογραφημάτων που προέκυψαν από τις μέσες τιμές βροχόπτωσης–από 24 κλιματικά μοντέλα–των μέγιστων ημερήσιων γεγονότων και των ημερήσιων γεγονότων που αντιστοιχούν στο 99.9 εκατοστημόριο για τις εικοσαετίες 2081-2100, 2041-2060, 2021-2040, και 1995-2014, για το σενάριο RCP8.5, στα ανάντη και κατάντη των θέσεων των γεφυρών #1, #2, #3, και #4, με το 1D HEC-RAS.	180
Εικόνα 5-44. Μέγιστη στάθμη νερού βάσει των υδρογραφημάτων που προέκυψαν από τις μέσες τιμές βροχόπτωσης–από 24 κλιματικά μοντέλα–των μέγιστων ημερήσιων γεγονότων και των ημερήσιων γεγονότων που αντιστοιχούν στο 99.9 εκατοστημόριο για τις εικοσαετίες 2081-2100, 2041-2060, 2021-2040, και 1995-2014, για το σενάριο RCP8.5, στα ανάντη και κατάντη των θέσεων των γεφυρών #5, #6, #7, και #8, με το 1D HEC-RAS.	183
Εικόνα 5-45. Μέγιστες ταχύτητες πλημμυρικού κύματος βάσει των υδρογραφημάτων που προέκυψαν από τις μέσες τιμές βροχόπτωσης–από 24 κλιματικά μοντέλα–των μέγιστων ημερήσιων γεγονότων & των ημερήσιων γεγονότων που αντιστοιχούν στο 99.9 εκατοστημόριο για τις εικοσαετίες 2081-2100, 2041-2060, 2021-2040, και 1995-2014, για το σενάριο RCP8.5, με το 1D HEC-RAS.	184

Εικόνα 5-46. Χρόνος άφιξης μέγιστων πλημμυρικών βαθών βάσει των υδρογραφημάτων που προέκυψαν από τις μέσες τιμές βροχόπτωσης–από 24 κλιματικά μοντέλα–των μέγιστων ημερήσιων γεγονότων & των ημερήσιων γεγονότων που αντιστοιχούν στο 99.9 εκατοστημόριο για τις εικοσαετίες 2081-2100, 2041-2060, 2021-2040, και 1995-2014, για το σενάριο RCP8.5, με το 1D HEC-RAS.....	185
Εικόνα 5-47. Μέγιστα πλημμυρικά βάθη βάσει των υδρογραφημάτων που προέκυψαν από τις μέσες τιμές βροχόπτωσης–από 24 κλιματικά μοντέλα–των μέγιστων ημερήσιων γεγονότων και των ημερήσιων γεγονότων που αντιστοιχούν στο 99.9 εκατοστημόριο για τις εικοσαετίες 2081-2100, 2041-2060, 2021-2040, και 1995-2014, για το σενάριο RCP4.5, με το 1D HEC-RAS.	187
Εικόνα 5-48. Μέγιστη στάθμη νερού βάσει των υδρογραφημάτων που προέκυψαν από τις μέσες τιμές βροχόπτωσης–από 24 κλιματικά μοντέλα–των μέγιστων ημερήσιων γεγονότων και των ημερήσιων γεγονότων που αντιστοιχούν στο 99.9 εκατοστημόριο για τις εικοσαετίες 2081-2100, 2041-2060, 2021-2040, και 1995-2014, για το σενάριο RCP4.5, στα ανάντη και κατάντη των θέσεων των γεφυρών #1, #2, #3, και #4, με το 1D HEC-RAS.	190
Εικόνα 5-49. Μέγιστη στάθμη νερού βάσει των υδρογραφημάτων που προέκυψαν από τις μέσες τιμές βροχόπτωσης–από 24 κλιματικά μοντέλα–των μέγιστων ημερήσιων γεγονότων και των ημερήσιων γεγονότων που αντιστοιχούν στο 99.9 εκατοστημόριο για τις εικοσαετίες 2081-2100, 2041-2060, 2021-2040, και 1995-2014, για το σενάριο RCP4.5, στα ανάντη και κατάντη των θέσεων των γεφυρών #5, #6, #7, και #8, με το 1D HEC-RAS.	193
Εικόνα 5-50. Μέγιστες ταχύτητες πλημμυρικού κύματος βάσει των υδρογραφημάτων που προέκυψαν από τις μέσες τιμές βροχόπτωσης–από 24 κλιματικά μοντέλα–των μέγιστων ημερήσιων γεγονότων & των ημερήσιων γεγονότων που αντιστοιχούν στο 99.9 εκατοστημόριο για τις εικοσαετίες 2081-2100, 2041-2060, 2021-2040, και 1995-2014, για το σενάριο RCP4.5, με το 1D HEC-RAS.	194
Εικόνα 5-51. Χρόνος άφιξης μέγιστων πλημμυρικών βαθών βάσει των υδρογραφημάτων που προέκυψαν από τις μέσες τιμές βροχόπτωσης–από 24 κλιματικά μοντέλα–των μέγιστων ημερήσιων γεγονότων & των ημερήσιων γεγονότων που αντιστοιχούν στο 99.9 εκατοστημόριο για τις εικοσαετίες 2081-2100, 2041-2060, 2021-2040, και 1995-2014, για το σενάριο RCP4.5, με το 1D HEC-RAS.....	195

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3-1. Βροχόπτωση προηγούμενων 5 ημέρων, ανά περιόδους καλλιέργειας (USDA, 1956; Chow et al., 1988).	26
Πίνακας 4-1. Υπολογισμός του % εύρους της ολικής αδιαπερατότητας της λεκάνης.	58
Πίνακας 4-2. Χαρακτηριστικά των υπολεκανών του ποταμού Humber.	69
Πίνακας 4-3. Στάθμιση επιρροής των βροχομετρικών σταθμών στις υπολεκάνες.	71
Πίνακας 4-4. Χαρακτηριστικά των μελετώμενων βροχοπτώσιων γεγονότων.	75
Πίνακας 4-5. Χρονική διαφορά μεταξύ της καταγεγραμμένης μέγιστης απορροής και της μέγιστης έντασης της βροχόπτωσης για τα έξι μελετώμενα γεγονότα βροχής.	76
Πίνακας 4-6. Τιμές του CN για κανονικές συνθήκες απορροής (Τύπου II) για κάθε χρήση γης και κατηγορία εδάφους (USDA, 1989).	80
Πίνακας 4-7. Τιμές της % αδιαπερατότητας της επιφάνειας κάθε χρήσης γης της λεκάνης.	81
Πίνακας 4-8. Υπολογισμένες τιμές αναφοράς του CN και της % αδιαπερατότητας των υπολεκανών του ποταμού Humber.	81
Πίνακας 4-9. Κατάλογος εμπειρικών εξισώσεων που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του χρόνου συγκέντρωσης T_c (h).	82
Πίνακας 4-10. Ποσοστά αστικοποίησης υπολεκανών και προκύπτουσες τιμές του όρου $R/(T_c+R)$	82
Πίνακας 4-11. Χαρακτηριστικά των ανοικτών αγωγών διόδευσης της ροής στην έξοδο των υπολεκανών W1020 και W1180.	83
Πίνακας 4-12. Περίοδοι αρχικοποίησης συνθηκών του υδρολογικού μοντέλου HBV-light και προσομοίωσης για κάθε μελετώμενο γεγονός, ανά υπολεκάνη.	84
Πίνακας 4-13. Κατηγορίες βλάστησης/χρήσεων γης των έξι μελετώμενων υπολεκανών.	85
Πίνακας 4-14. Πλησιέστεροι μετεωρολογικοί σταθμοί στο κεντροειδές των υπολεκανών.	86
Πίνακας 4-15. Λίστα κλιματικών μοντέλων CMIP5 και ινστιτούτων κλιματικής μοντελοποίησης.	88
Πίνακας 4-16. Στάθμιση επιρροής του πλέγματος των 30 κελιών στις υπολεκάνες.	89
Πίνακας 4-17. Ποσοστιαία αύξηση της μέσης τιμής της μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης σε κάθε μελλοντική περίοδο, σε σχέση με την περίοδο βάσης, για το σενάριο εκπομπών RCP8.5.	91
Πίνακας 4-18. Ποσοστιαία αύξηση της μέσης τιμής της ημερήσιας βροχόπτωσης που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο σε κάθε μελλοντική περίοδο, σε σχέση με την περίοδο βάσης, για το σενάριο εκπομπών RCP8.5.	91
Πίνακας 4-19. Ποσοστιαία αύξηση της μέσης τιμής της μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης σε κάθε μελλοντική περίοδο, σε σχέση με την περίοδο βάσης, για το σενάριο εκπομπών RCP4.5.	91
Πίνακας 4-20. Ποσοστιαία αύξηση της μέσης τιμής της ημερήσιας βροχόπτωσης που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο σε κάθε μελλοντική περίοδο, σε σχέση με την περίοδο βάσης, για το σενάριο εκπομπών RCP4.5.	91
Πίνακας 4-21. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των οκτώ γεφυρών.	94
Πίνακας 5-1. Βαθμονόμηση μοντέλου με ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων, ανάλυση μεγέθους μέγιστης απορροής, και επαλήθευση μοντέλου.	103

Πίνακας 5-2. Μέγιστο πλημμυρικό βάθος (m) και έκταση πλημμύρας (m ²), όπως προέκυψαν για την καταγεγραμμένη βροχόπτωση (βασικό σενάριο), καθώς και αύξηση της μέγιστης βροχόπτωσης κατά 100% και 300%, με το 1D HEC-RAS.	113
Πίνακας 5-3. Μέση διάρκεια πλημμύρας (h) και μέγιστος χρόνος άφιξης πλημμυρικού κύματος (h), όπως προέκυψαν για την καταγεγραμμένη βροχόπτωση (βασικό σενάριο), καθώς και αύξηση της μέγιστης βροχόπτωσης κατά 100% και 300%, με το 1D HEC-RAS.	114
Πίνακας 5-4. Ιστορικά ημερήσια γεγονότα βροχής (mm), μέγιστη βροχή 3 ωρών (mm), και λόγος δεδομένων βροχής 3 ωρών προς τα ημερήσια δεδομένα διαιρεμένα με 8 τρίωρα ημερησίως, μέσω του κλιματικού μοντέλου EC-EARTH_RCP8.5_r12i1p1_SMHI_RCA4.	125
Πίνακας 5-5. Ανάλυση βροχερών ημερών περιόδου 1981-2098 γειτονικών σταθμών της περιοχής ενδιαφέροντος, μέσω προβολών από το κλιματικό μοντέλο MPI-ESM-LR_r1i1p1_CSC_REMO, για RCP4.5 και RCP8.5.	126
Πίνακας 5-6. Μέγιστο ύψος 15λεπτης βροχόπτωσης (mm), ωριαία ένταση βροχής (mm/h) και μέγιστη απορροή (m ³ /s), αλλά και προκύπτουν μέγιστο πλημμυρικό βάθος (m) με το συζευγμένο μοντέλο 1D/2D HEC-RAS, χρησιμοποιώντας DEM υψηλής ανάλυσης (5 και 2 m), λόγω διαφορετικών κατανομών βροχόπτωσης αιχμής, και για συνολικό ύψος νετού ίσο με 345 mm.	127
Πίνακας 5-7. Μέγιστο πλημμυρικό βάθος (m) και έκταση της πλημμύρας (m ²), όπως προέκυψαν από την καταγεγραμμένη βροχόπτωση και την αύξηση της βροχόπτωσης αιχμής κατά 50%, 100%, και 200%, με το συζευγμένο μοντέλο 1D/2D HEC-RAS, και τα δύο DEM υψηλής ανάλυσης (5 m και 2 m).	129
Πίνακας 5-8. Μέση διάρκεια πλημμύρας (h) και μέγιστος χρόνος άφιξης πλημμυρικού κύματος (h), όπως προέκυψαν για την καταγεγραμμένη βροχόπτωση (βασικό σενάριο), καθώς και αύξηση της μέγιστης βροχόπτωσης κατά 50%, 100%, και 200%, με το συζευγμένο μοντέλο 1D/2D HEC-RAS, και τα δύο DEM υψηλής ανάλυσης (5 m και 2 m).	131
Πίνακας 5-9. Επαλήθευση του υδρολογικού μοντέλου HEC-HMS μέσω της βαθμονόμησης παραμέτρων για το ζεύγος γεγονότων στις 28-30 Μαΐου 2013 και 4-10 Ιουλίου 2013.	133
Πίνακας 5-10. Βέλτιστες τιμές παραμέτρων μέσω της βαθμονόμησης και επαλήθευσης του υδρολογικού μοντέλου HBV-light για το ζεύγος γεγονότων στις 28-30 Μαΐου 2013 και 4-10 Ιουλίου 2013.	134
Πίνακας 5-11. Επαλήθευση του υδρολογικού μοντέλου HEC-HMS στην έξοδο της υπολεκάνης W1020 μέσω βαθμονόμησης της παραμέτρου Muskingum <i>K</i> (h) για τα κανάλια R1580, R1590, R1600, και R1610, για το γεγονός στις 4-10 Ιουλίου 2013.	138
Πίνακας 5-12. Επαλήθευση του υδρολογικού μοντέλου HEC-HMS μέσω της βαθμονόμησης παραμέτρων για το ζεύγος γεγονότων στις 7-15 Απριλίου 2013 και 30 Απριλίου-7 Μαΐου 2017.	139
Πίνακας 5-13. Βέλτιστες τιμές παραμέτρων μέσω της βαθμονόμησης και επαλήθευσης του υδρολογικού μοντέλου HBV-light για το ζεύγος γεγονότων στις 7-15 Απριλίου 2013 και 30 Απριλίου-7 Μαΐου 2017.	140
Πίνακας 5-14. Επαλήθευση του υδρολογικού μοντέλου HEC-HMS μέσω της βαθμονόμησης παραμέτρων για το ζεύγος γεγονότων στις 26-30 Ιουνίου 2010 και 22-25 Ιουνίου 2017.	143

Πίνακας 5-15. Βέλτιστες τιμές παραμέτρων μέσω της βαθμονόμησης και επαλήθευσης του υδρολογικού μοντέλου HBV-light για το ζεύγος γεγονότων στις 26-30 Ιουνίου 2010 και 22-25 Ιουνίου 2017.	144
Πίνακας 5-16. Σφάλμα συνολικού όγκου βροχής ανά υπολεκάνη για τα εξεταζόμενα γεγονότα, με χρήση του υδρολογικού μοντέλου HEC-HMS.	148
Πίνακας 5-17. Σφάλμα συνολικού όγκου βροχής ανά υπολεκάνη για τα εξεταζόμενα γεγονότα, με χρήση του υδρολογικού μοντέλου HBV-light.	148
Πίνακας 8-1. Υπολογισμός της τιμής αναφοράς του CN_{II} της υπολεκάνης W1460 του ποταμού Humber.	226
Πίνακας 8-2. Υπολογισμός της τιμής αναφοράς του CN_{II} της υπολεκάνης W790 του ποταμού Humber.	228
Πίνακας 8-3. Υπολογισμός της τιμής αναφοράς του CN_{II} της υπολεκάνης W800 του ποταμού Humber.	229
Πίνακας 8-4. Υπολογισμός της τιμής αναφοράς του CN_{II} της υπολεκάνης W900 του ποταμού Humber.	230
Πίνακας 8-5. Υπολογισμός της τιμής αναφοράς του CN_{II} της υπολεκάνης W1030 του ποταμού Humber.	232
Πίνακας 8-6. Υπολογισμός της τιμής αναφοράς του CN_{II} της υπολεκάνης W1020 του ποταμού Humber.	232
Πίνακας 8-7. Υπολογισμός της τιμής αναφοράς του CN_{II} της υπολεκάνης W1180 του ποταμού Humber.	234
Πίνακας 8-8. Υπολογισμός της τιμής αναφοράς της % ολικής αδιαπερατότητας της υπολεκάνης W1460 του ποταμού Humber.	234
Πίνακας 8-9. Υπολογισμός της τιμής αναφοράς της % ολικής αδιαπερατότητας της υπολεκάνης W790 του ποταμού Humber.	235
Πίνακας 8-10. Υπολογισμός της τιμής αναφοράς της % ολικής αδιαπερατότητας της υπολεκάνης W800 του ποταμού Humber.	235
Πίνακας 8-11. Υπολογισμός της τιμής αναφοράς της % ολικής αδιαπερατότητας της υπολεκάνης W900 του ποταμού Humber.	236
Πίνακας 8-12. Υπολογισμός της τιμής αναφοράς της % ολικής αδιαπερατότητας της υπολεκάνης W1030 του ποταμού Humber.	236
Πίνακας 8-13. Υπολογισμός της τιμής αναφοράς της % ολικής αδιαπερατότητας της υπολεκάνης W1020 του ποταμού Humber.	237
Πίνακας 8-14. Υπολογισμός της τιμής αναφοράς της % ολικής αδιαπερατότητας της υπολεκάνης W1180 του ποταμού Humber.	237
Πίνακας 8-15. Ποσοστιαία κάλυψη χρήσεων γης ανά υψομετρική ζώνη στην υπολεκάνη W1460 του ποταμού Humber.	238
Πίνακας 8-16. Ποσοστιαία κάλυψη χρήσεων γης ανά υψομετρική ζώνη στην υπολεκάνη W790 του ποταμού Humber.	238
Πίνακας 8-17. Ποσοστιαία κάλυψη χρήσεων γης ανά υψομετρική ζώνη στην υπολεκάνη W800 του ποταμού Humber.	238
Πίνακας 8-18. Ποσοστιαία κάλυψη χρήσεων γης ανά υψομετρική ζώνη στην υπολεκάνη W900 του ποταμού Humber.	239

Πίνακας 8-19. Ποσοστιαία κάλυψη χρήσεων γης ανά υψομετρική ζώνη στην υπολεκάνη W1030 του ποταμού Humber.	239
Πίνακας 8-20. Ποσοστιαία κάλυψη χρήσεων γης ανά υψομετρική ζώνη στην υπολεκάνη W1020 του ποταμού Humber.	239
Πίνακας 8-21. Μέγιστη ημερήσια βροχόπτωση εικοσαετίας, ανά υπολεκάνη & ανά κλιματικό μοντέλο, για τέσσερις εξεταζόμενες εικοσαετίες, για το σενάριο εκπομπών RCP8.5.	240
Πίνακας 8-22. Ημερήσια βροχόπτωση που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας, ανά υπολεκάνη & ανά κλιματικό μοντέλο, για τέσσερις εξεταζόμενες εικοσαετίες, για το σενάριο εκπομπών RCP8.5.	242
Πίνακας 8-23. Μέγιστη ημερήσια βροχόπτωση εικοσαετίας, ανά υπολεκάνη & ανά κλιματικό μοντέλο, για τέσσερις εξεταζόμενες εικοσαετίες, για το σενάριο εκπομπών RCP4.5.	244
Πίνακας 8-24. Ημερήσια βροχόπτωση που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας, ανά υπολεκάνη & ανά κλιματικό μοντέλο, για τέσσερις εξεταζόμενες εικοσαετίες, για το σενάριο εκπομπών RCP4.5.	246
Πίνακας 8-25. Ημερήσια βροχόπτωση (mm), μέγιστη ωριαία βροχόπτωση (mm/h), και λόγος ημερήσιας προς μέγιστη ωριαία βροχόπτωση, από 11 ισχυρά βροχοπτώτικα γεγονότα της περιόδου 2015-2019, του μετεωρολογικού σταθμού Αγ. Πάντων.	249

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενική περιγραφή του θέματος

Η μέση βροχόπτωση επάνω από χερσαίες εκτάσεις είναι πιθανό να έχει αυξηθεί σε σχέση με το 1950 σε παγκόσμια κλίμακα, με ταχύτερο ρυθμό αύξησης από τη δεκαετία του 1980, και την ανθρώπινη επιρροή πιθανώς να συμβάλλει στις παρατηρούμενες αλλαγές (IPCC, 2021). Στη νότια Ευρώπη, η σύγκριση των εποχιακών μέγιστων βροχοπτώσεων μίας ημέρας και πέντε ημερών για περίοδο επαναφοράς 20 ετών μεταξύ των περιόδων 1951-1970 και 1991-2010 υποδεικνύει μικρές αυξήσεις κατά την άνοιξη, το καλοκαίρι, και το φθινόπωρο (van den Besselaar et al., 2013). Απ' την άλλη, σε διάφορες περιοχές στο νότιο Καναδά, για την περίοδο 1900-1998 η ετήσια βροχόπτωση αυξήθηκε από 5% έως 35%, με τη μεγαλύτερη αύξηση να σημειώνεται στο νοτιοανατολικό Καναδά, και το κλίμα να έχει γίνει πιο υγρό και πιο θερμό (Zhang et al., 2000).

Ενώ τα ακραία καιρικά φαινόμενα είναι σπάνια, εντούτοις οι καταστροφικές πλημμύρες έχουν γίνει πιο συχνές σε πολλές περιοχές παγκοσμίως (Kundzewicz and Schellnhuber, 2004). Οι μικρής διάρκειας και συγχρόνως υψηλής έντασης βροχοπτώσεις δύνανται να προκαλέσουν αιφνίδιες πλημμύρες, κυρίως λόγω μεταγωγικών νεφών που λαμβάνουν χώρα τοπικά (Borga et al., 2011). Οι αιφνίδιες πλημμύρες συνήθως εκτυλίσσονται σε μικρές λεκάνες χωρίς μετρητές απορροής, είτε χωρίς επαρκή δεδομένα μετρήσεων. Αυτές οι πλημμύρες επηρεάζονται κυρίως από τα χαρακτηριστικά των βροχοπτώσεων, καθώς και τα φυσικά και υδρολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης (Rozalis et al., 2010). Γενικά, στις αιφνίδιες πλημμύρες η στάθμη των υδάτων αυξάνεται ταχέως, εντός 6 h από τη βροχόπτωση. Σε υψηλές εντάσεις βροχόπτωσης, οι μικρές λεκάνες πλημμυρίζουν ταχύτατα λόγω των απότομων κλίσεων και κορεσμένων εδαφών. Ιδιαίτερα ευάλωτες σε αιφνίδιες πλημμύρες είναι οι αστικές περιοχές, κυρίως λόγω των μεγάλων αδιαπέρατων επιφανειών (Haruarachchi et al., 2011). Για την Ευρώπη, οι αιφνίδιες πλημμύρες είναι πιο σφοδρές στις μεσογειακές χώρες απ' ό,τι στις ηπειρωτικές, και παρουσιάζουν έντονη εποχικότητα (Gaume et al., 2009; Marchi et al., 2010). Από δεδομένα της περιόδου 1990-2006, οι πιο σφοδρές αιφνίδιες πλημμύρες στη δυτική Μεσόγειο λαμβάνουν χώρα συνήθως το φθινόπωρο, ενώ στην ανατολική Μεσόγειο κυρίως το χειμώνα (Llasat et al.,

2010). Για το νοτιοανατολικό Καναδά, τα πλημμυρικά επεισόδια εκτυλίσσονται κατά 80% την άνοιξη, και κατά 20% το χειμώνα (Singh et al., 2021). Στο νότιο Οντάριο, τα τελευταία χρόνια έχουν αυξηθεί οι καλοκαιρινές καταιγίδες και οι υψηλής έντασης βροχοπτώσεις που προκαλούν αιφνίδιες πλημμύρες (Buttle et al., 2016).

Οι έντονες βροχοπτώσεις αναμένεται να γίνουν ακόμη πιο έντονες και πιο συχνές κατά τον 21^ο αιώνα, σε ένα θερμαινόμενο κλίμα, όπου αυξάνεται η δυνητική περιεκτικότητα της ατμόσφαιρας σε νερό (Kundzewicz et al., 2006). Σύμφωνα με την 6^η έκθεση αξιολόγησης (AR6) της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC), οι ισχυρές βροχοπτώσεις αναμένεται να εντατικοποιηθούν σε περιοχές όπου προβλέπεται αύξηση της μέσης βροχόπτωσης, όπως στον ανατολικό Καναδά, αλλά και σε περιοχές όπου προβλέπεται μείωση της μέσης βροχόπτωσης, όπως στη νοτιοανατολική Μεσόγειο (IPCC, 2021). Η επίδραση της κλιματικής αλλαγής θα είναι σημαντική στη σφοδρότητα των αιφνίδιων πλημμυρών. Την ίδια ώρα η Ευρωπαϊκή Οδηγία 2007/60/EK για τις πλημμύρες απαίτησε από τα Κράτη-Μέλη την επανεξέταση και επικαιροποίηση των σχεδίων διαχείρισης κινδύνων πλημμύρας έως το τέλος του 2021 και προσεχώς ανά εξαετία, λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της κλιματικής μεταβολής (EC, 2007).

Η υπερθέρμανση του πλανήτη λόγω της αύξησης των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου αναμένεται να αυξήσει το μέγεθος και τη συχνότητα των σφοδρών βροχοπτώσεων, που δύνανται να προκαλέσουν πιο έντονες και πιο συχνές πλημμύρες ποταμών (Dankers and Feyen, 2008). Τα παγκόσμια κλιματικά μοντέλα (Global Circulation Models – GCMs) είναι βασικά εργαλεία αναπαράστασης του κλιματικού συστήματος που βασίζονται σε αρχές της φυσικής. Τα GCMs δύνανται να αναπαράγουν με αποτελεσματικότητα τα μεγάλης κλίμακας χαρακτηριστικά του κλίματος, όπως η ατμοσφαιρική και ωκεάνια κυκλοφορία. Η τυπική χωρική ανάλυση των GCMs είναι της τάξης των 100 με 300 km. Τα περιοχικά κλιματικά μοντέλα (Regional Climate Models - RCMs) είναι λεπτομερέστερης κλίμακας εργαλεία για τη μελέτη του κλίματος σε τοπική κλίμακα (Katzav and Parker, 2015). Για την ποσοτικοποίηση των πλημμυρικών επιπτώσεων λόγω της αλλαγής του κλίματος, είναι κρίσιμες οι κλιματικές προσομοιώσεις υψηλής ανάλυσης. Τα τελευταία χρόνια έχουν παραχθεί πολυάριθμες περιοχικές προσομοιώσεις του κλίματος, για διάφορα κλιματικά σενάρια, με διαφορετικά κινητήρια GCMs ή εφαρμοσμένα RCMs, και έχουν αναπτυχθεί βάσεις δεδομένων δυναμικού καταβιβασμού κλίμακας (downscaling) (Rojas et al., 2012). Για

την Ευρώπη και τη Μεσόγειο, βάσεις δεδομένων από περιοχικές κλιματικές προβολές καταβιβασμού κλίμακας είναι το PRUDENCE (Christensen et al., 2002), το ENSEMBLES (Déqué et al., 2012), με πιο πρόσφατες, το EURO-CORDEX (Jacob et al., 2014), και το Med-CORDEX (Ruti et al., 2016; Somot et al., 2018). Για τις Η.Π.Α. και το μεγαλύτερο μέρος του Καναδά, χρησιμοποιούνται περιοχικές κλιματικές προβολές από τη βάση δεδομένων NARCCAP (Mearns et al., 2009), ενώ παγκοσμίως χρησιμοποιούνται η βάση δεδομένων CMIP5 (Taylor et al., 2012), και η πιο πρόσφατη CMIP6 (Eyring et al., 2016).

1.2 Στόχοι της διατριβής

Οι αντικειμενικοί στόχοι της διατριβής εστιάζονται στη μελέτη των επιπτώσεων ισχυρών καταιγισμοφόρων γεγονότων στην υδρολογία και υδραυλική δύο λεκανών απορροής μικρού και μεσαίου μεγέθους, στην Κρήτη και στο Οντάριο του Καναδά αντίστοιχα. Ειδικότερα, για τη μικρής έκτασης υδρολογική λεκάνη της Κρήτης τέθηκαν οι ακόλουθοι στόχοι:

- Ανάλυση ευαισθησίας υδρολογικών και υδραυλικών παραμέτρων, για την επαλήθευση μετρούμενου πλημμυρικού βάθους μετά την πλημμύρα.
- Διερεύνηση των διαφορών στη μέγιστη απορροή και στην πλημμυρική έκταση από αθροιστική βροχόπτωση διαφορετικής έντασης.
- Μελέτη της επίδρασης διαφορετικών χρονικών βημάτων της έντασης της βροχόπτωσης στη μέγιστη απορροή.
- Αντίκτυπος των πιθανών κατανομών έντασης της βροχόπτωσης στη μέγιστη απορροή και στα πλημμυρικά βάθη, προβαλλόμενου ημερήσιου γεγονότος από κλιματικό μοντέλο.
- Μελέτη των διαφορών στα πλημμυρικά βάθη και στην πλημμυρική έκταση από χρήση δύο ψηφιακών μοντέλων υψομετρίας (DEMs) υψηλής ανάλυσης και δύο υδραυλικών μοντέλων.

Για τη μεσαίου μεγέθους υδρολογική λεκάνη του Καναδά τέθηκαν οι εξής στόχοι:

- Ανάλυση διαφορετικών υδρομετρικών χαρακτηριστικών έξι μεμονωμένων βροχοπτώσιων συμβάντων για την κατανόηση των ανόμοιων συνθηκών δημιουργίας και εξέλιξης πλημμυρών.

- Σύγκριση δύο υδρολογικών μοντέλων με σημαντικές διαφορές για την επικύρωση των υδρογραφημάτων στην έξοδο έξι υπολεκανών.
- Υπόδειξη συνόλου τιμών παραμέτρων επαλήθευσης υδρολογικών μοντέλων για την εκτίμηση των απορροών αιχμής σε γεγονότα υψηλής έντασης, δύο υδρολογικών αιχμών, και πολλαπλών συνθηκών πρότερης εδαφικής υγρασίας.
- Σύγκριση διαφορετικών υδραυλικών μοντέλων για την εκτίμηση της πλημμυρικής έκτασης και εξαγωγή πλημμυρικών χαρτών στα κατάντη.
- Μελέτη της επίδρασης της κλιματικής αλλαγής από τα ισχυρότερα ακραία βροχοπτώτικα γεγονότα, στη μέγιστη απορροή, στις εκτάσεις κατάκλισης και στα πλημμυρικά βάθη.

1.3 Διάρθρωση της διατριβής

Μέχρι αυτό το σημείο του 1^{ου} κεφαλαίου έχει γίνει μια εισαγωγική τοποθέτηση στα ισχυρά βροχοπτώτικα γεγονότα, τις πλημμύρες, και την κλιματική αλλαγή, και παρουσιάστηκαν οι στόχοι της διατριβής. Στη συνέχεια του 1^{ου} κεφαλαίου επισημαίνονται τα σημεία πρωτοτυπίας της έρευνας και οι δημοσιεύσεις που σχετίζονται με την παρούσα διδακτορική διατριβή.

Στο 2^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο στο οποίο βασίζεται η παρούσα διατριβή. Γίνεται εκτενής λόγος για ιστορικές και προβαλλόμενες βροχοπτώσεις στη Μεσόγειο και στον Καναδά, και γίνεται ανασκόπηση υδρολογικών αναλύσεων σε Μεσόγειο και Καναδά. Επιπρόσθετα, παρουσιάζονται οι επιπτώσεις από ιστορικές πλημμύρες στην Ευρώπη και την πόλη του Τορόντο, γίνεται ανάλυση υδραυλικών μοντέλων που χρησιμοποιεί η επιστημονική κοινότητα και εργαλείων εκτίμησης των πλημμυρικών επιπτώσεων, παρουσιάζονται οι αβεβαιότητες που απαντώνται κατά την υδραυλική προσομοίωση, συγκρίνεται η απόδοση υδραυλικών μοντέλων μέσα από δημοσιευμένες εργασίες, και γίνεται ανασκόπηση υδραυλικών αναλύσεων εκτίμησης των πλημμυρικών επιπτώσεων από σφοδρές βροχοπτώσεις στο νότιο Οντάριο.

Στο 3^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μέθοδος που ακολουθήθηκε για την κατανομή των βροχοπτώτικών δεδομένων. Επίσης, περιγράφονται οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για την υδρολογική ανάλυση βροχοπτώτικών συμβάντων με τα υδρολογικά μοντέλα HEC-HMS και HBV-light, καθώς και τα κριτήρια βαθμονόμησης αυτών. Ακόμη,

παρουσιάζονται τα μοντέλα 1D HEC-RAS, 2D HEC-RAS, και το συζευγμένο μοντέλο 1D/2D HEC-RAS, υδραυλικής προσομοίωσης στα κατάντη υδρολογικών λεκανών, οι εξισώσεις υδροδυναμικής για μη μόνιμη ροή και οι αριθμητικές μέθοδοι επίλυσης αυτών, οι εξισώσεις υδραυλικών υπολογισμών σε θέσεις γεφυρών, και η υπολογιστική διαδικασία του αλγόριθμου επίλυσης εξισώσεων.

Στο 4^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά οι δύο περιοχές μελέτης με τα χαρακτηριστικά τους (υδρογραφικά, υδρογεωλογικά, χρήσεων γης), τα μετεωρολογικά δεδομένα, η παραμετροποίηση των μεθόδων υδρολογικής προσομοίωσης, τα δεδομένα κλιματικών σεναρίων, ο γεωμετρικός σχεδιασμός των υδραυλικών μοντέλων για τις προσομοιώσεις των υδραυλικών κυμάτων στα κατάντη των περιοχών μελέτης, και η παραμετροποίηση των εξισώσεων επίλυσης ροής κυμάτων.

Στο 5^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από εφαρμογή των μεθόδων μέσω των υδρολογικών και υδραυλικών μοντέλων. Για την περιοχή του ρέματος Αλμυρίδας, πραγματοποιείται βαθμονόμηση του υδρολογικού μοντέλου και ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων. Παρουσιάζεται η επίδραση σεναρίων κλιματικής αλλαγής στην ένταση της βροχόπτωσης, στο μέγεθος της απορροής αιχμής, και στα κατάντη πλημμυρικά βάθη και εκτάσεις κατάκλισης. Μελετάται η επίδραση διαφορετικών χρονικών βημάτων δεδομένων βροχής στο μέγεθος της απορροής αιχμής. Πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας στις τιμές του συντελεστή τραχύτητας Manning και του συντελεστή υδατοφράκτη στο 1D/2D HEC-RAS υδραυλικό μοντέλο. Διενεργείται σύγκριση των πλημμυρικών επιπτώσεων από την εφαρμογή δύο DEM υψηλής ανάλυσης. Πραγματοποιείται ανάλυση προβαλλόμενου ημερήσιου βροχοπτώσιου γεγονότος από κλιματικό μοντέλο, με αναγωγή σε 15άλεπτο βήμα και τρεις πιθανές κατανομές της βροχής, καθώς και εκτίμηση της παροχής αιχμής και των μέγιστων πλημμυρικών βαθών. Για την περιοχή του ποταμού Humber, πραγματοποιείται βαθμονόμηση δύο υδρολογικών μοντέλων και ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων για τρία ζεύγη γεγονότων με παρόμοια υδρομετρικά χαρακτηριστικά σε έξι υπολεκάνες. Παρουσιάζεται η επίδραση σεναρίου αύξησης της συνολικής βροχόπτωσης γεγονότος στο μέγεθος της απορροής αιχμής με τα δύο υδρολογικά μοντέλα. Μελετάται η βραχυπρόθεσμη, μεσοπρόθεσμη, και μακροπρόθεσμη επίδραση προβαλλόμενων ημερήσιων βροχοπτώσεων από 24 κλιματικά μοντέλα, για δύο σενάρια εκπομπών θερμοκηπικών αερίων, με αναγωγή σε ωριαίο βήμα και την παραδοχή ότι η πλειοψηφία της βροχής

πέφτει σε 2 h, στο μέγεθος της παροχής αιχμής των έξι υπολεκανών, συγκριτικά με βροχοπτώσεις περιόδου βάσης. Η ανάλυση αφορά τη μέση τιμή–από τα 24 κλιματικά μοντέλα– των μέγιστων ημερήσιων γεγονότων βροχόπτωσης, καθώς και των ημερήσιων γεγονότων βροχόπτωσης που αντιστοιχούν στο 99.9 εκατοστημόριο. Διενεργείται σύγκριση των επιπτώσεων στα μέγιστα πλημμυρικά βάθη, τις μέγιστες πλημμυρικές επιφάνειες, καθώς και στα πλημμυρικά βάθη στη θέση οκτώ γεφυρών, χρησιμοποιώντας δύο υδραυλικά μοντέλα (1D και 2D).

Τέλος, στο 6^ο κεφάλαιο παρατίθενται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα διατριβή, και παράλληλα γίνονται κάποιες προτάσεις για πιθανά θέματα μελλοντικής έρευνας.

1.4 Πρωτότυπα σημεία

Τα πρωτότυπα σημεία της παρούσας διατριβής συνεισφέρουν στους τομείς της βασικής έρευνας, της εφαρμοσμένης έρευνας και της ανάπτυξης εφαρμογών, ως εξής:

ΒΑΣΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

- Ανάλυση πρόγνωσης βροχερών ημερών περιόδου 1981-2098 σε γειτνιάζοντες σταθμούς της υδρολογικής λεκάνης της Κρήτης από κλιματικό μοντέλο για τα σενάρια θερμοκηπικών εκπομπών RCP4.5 και RCP8.5.
- Ανάλυση διαφορετικών υδρομετρικών χαρακτηριστικών πολλαπλών βροχοπτώσιων γεγονότων σε μεσαίου μεγέθους υδρολογική λεκάνη του Καναδά (χρόνος εμφάνισης μέγιστης απορροής συγκριτικά με μέγιστη βροχόπτωση, κορεσμός εδάφους, αδιαπερατότητα).
- Υπόδειξη συνόλου τιμών παραμέτρων για την επαλήθευση δύο υδρολογικών μοντέλων με διαφορετικά χαρακτηριστικά, μέσω επικύρωσης πλημμυρικών αιχμών από κατηγοριοποίηση βροχοπτώσιων γεγονότων για διαφορετικές υδρομετεωρολογικές συνθήκες (υψηλής έντασης βροχόπτωση, δύο υδρολογικές αιχμές, πολλαπλές συνθήκες πρότερης εδαφικής υγρασίας) σε έξι υπολεκάνες της υδρολογικής λεκάνης του Καναδά.
- Ανάλυση πρόγνωσης της μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης εικοσαετίας, καθώς και της ημερήσιας βροχόπτωσης που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας, από 30 κελιά πλέγματος στις υπολεκάνες της καναδικής λεκάνης,

από 24 κλιματικά μοντέλα, για τα σενάρια RCP4.5 και RCP8.5, για τις περιόδους: 1995-2014 (βάση), 2021-2040 (εγγύς μέλλον), 2041-2060 (μεσοπρόθεσμα), και 2081-2100 (μακροπρόθεσμα).

ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΕΡΕΥΝΑ

- Επεξεργασία υδρομετεωρολογικών μεταβλητών.
- Εκτίμηση της αβεβαιότητας υδρολογικών παραμέτρων για την επικύρωση υδρογραφήματος σε μικρής έκτασης υδρολογική λεκάνη της Κρήτης, χωρίς επαρκή δεδομένα επικύρωσης.
- Μελέτη της επίδρασης της έντασης της βροχόπτωσης στην απορροή αιχμής με κατανομή της βροχής σε διάφορα χρονικά βήματα σε υδρολογική λεκάνη της Κρήτης.
- Ανάλυση ευαισθησίας τιμών του συντελεστή υδατοφράκτη πλευρικών δομών σύνδεσης της 1D ροής ρέματος με τις 2D επιφάνειες ροής, από την εφαρμογή 1D/2D υδραυλικού μοντέλου στο κάταντες τμήμα υδρολογικής λεκάνης της Κρήτης.
- Επεξεργασία δύο διαφορετικών ψηφιακών μοντέλων υψομετρίας (DEMs) υψηλής ανάλυσης (5m και 2m) για την εκτίμηση των πλημμυρικών επιπτώσεων (πλημμυρικά βάθη, ταχύτητες, εκτάσεις κατάκλισης) με 1D/2D υδραυλικό μοντέλο στο κάταντες τμήμα υδρολογικής λεκάνης της Κρήτης.
- Ανάλυση της επίδρασης υποθετικών σεναρίων αύξησης της καταγεγραμμένης έντασης της βροχόπτωσης και ανακατανομής της υπόλοιπης βροχής στο υδρογράφημα εξόδου, στο μέγιστο πλημμυρικό βάθος, τη μέγιστη πλημμυρική έκταση, τη μέση διάρκεια πλημμύρας, και το μέγιστο χρόνο άφιξης πλημμυρικού κύματος, με δύο υδραυλικά μοντέλα (1D και 1D/2D), και χρήση DEM υψηλής ανάλυσης 5m (ή/και 2m), σε υδρολογική λεκάνη της Κρήτης.
- Μελέτη της επίδρασης διάφορων κατανομών έντασης της βροχόπτωσης λόγω του προβαλλόμενου ημερήσιου γεγονότος κλιματικού μοντέλου του σεναρίου RCP4.5 στην απορροή αιχμής, καθώς και στο μέγιστο πλημμυρικό βάθος, για τα 2 DEM υψηλής ανάλυσης, με 1D/2D υδραυλικό μοντέλο, σε υδρολογική λεκάνη της Κρήτης.

- Μελέτη της επίδρασης της μέσης τιμής–24 κλιματικών μοντέλων–των μέγιστων ημερήσιων γεγονότων βροχόπτωσης εικοσαετίας και των ημερήσιων γεγονότων βροχόπτωσης που αντιστοιχούν στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας, στην απορροή αιχμής, για τα σενάρια RCP4.5 και RCP8.5, για τις τέσσερις περιόδους, με κατανομή σε ωριαίο βήμα και την παραδοχή ότι η πλειοψηφία της βροχής (80%) πέφτει σε 2 h, για τις υπολεκάνες της Καναδικής υδρολογικής λεκάνης.
- Ανάλυση της επίδρασης της πλημμυρικής αιχμής από μέγιστα ημερήσια γεγονότα βροχής και από ημερήσια γεγονότα βροχής που αντιστοιχούν στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας, για τα σενάρια RCP4.5 και RCP8.5, για τις τέσσερις χρονικές περιόδους, με κατανομή σε ωριαίο βήμα, στο μέγιστο πλημμυρικό βάθος και τη μέγιστη πλημμυρική έκταση, με δύο υδραυλικά μοντέλα (1D και 2D), με χρήση DTM υψηλής ανάλυσης (0.5 m), στο κάταντες τμήμα υδρολογικής λεκάνης του Καναδά.
- Αξιολόγηση εξαγόμενων αποτελεσμάτων από τη σύγκριση διαφορετικών υδρολογικών μοντέλων (HEC-HMS, HBV-light) στις δύο υδρολογικές λεκάνες, καθώς και υδραυλικών μοντέλων (HEC-RAS 1D, 1D/2D και 2D) στα κατάντη τμήματα των δύο λεκανών απορροής (Κρήτης και Καναδά).

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

- Επεξεργασία δεδομένων και οπτικοποίηση αποτελεσμάτων σε ArcGIS και Excel από χρήση των υδρολογικών μοντέλων HEC-HMS και HBV-light, καθώς και των υδραυλικών μοντέλων HEC-RAS 1D, 1D/2D και 2D.

1.5 Λίστα σχετικών δημοσιεύσεων

Αποτελέσματα της παρούσας διδακτορικής διατριβής οδήγησαν σε δημοσιεύσεις σε διεθνή περιοδικά (Journal articles):

- ✧ **Sarchani, S.**; Awol, F.S.; Tsanis, I. Hydrological Analysis of Extreme Rain Events in a Medium-Sized Basin, *Applied Sciences* 2021, 11(11): 4901; <https://doi.org/10.3390/app11114901>.
- ✧ **Sarchani, S.**; Seiradakis, K.; Coulibaly, P.; Tsanis, I. Flood Inundation Mapping in an Ungauged Basin, *Water* 2020, 12(6): 1532; <https://doi.org/10.3390/w12061532>.
- ✧ **Sarchani, S.**; Tsanis, I. Analysis of a Flash Flood in a Small Basin in Crete, *Water* 2019, 11(11): 2253; <https://doi.org/10.3390/w11112253>.

Σχετικές δημοσιεύσεις σε συνέδρια με κριτές (Peer-reviewed conference proceedings):

- ✧ **Sarchani, S.;** Tsanis I. Flood inundation mapping along a downstream river segment, abstract submitted for Poster: *EGU General Assembly 2023*, 23-28 April 2023, Vienna, Austria, EGU23-3938, 2023.
- ✧ **Sarchani, S.;** Tsanis I. Analysis of a short-duration severe precipitation event in a small ungauged basin through a semi-distributed hydrological model, Online presented at: *EGU General Assembly 2021*, 19-30 April 2021, vEGU21: Gather Online, EGU21-15324, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-15324>, 2021.
- ✧ **Sarchani, S.N.;** Seiradakis, K.D.; Tsanis, I.K. Climate changes leading to flood hazard alterations across a flood-prone area, Oral Presentation: *System-Risk ETN*, 17-19 September 2019, Potsdam, Germany, id:32837, 2019.
- ✧ **Sarchani, S.;** Seiradakis, K.; Flocas, H.; Tsanis, I. Analysis of a severe storm resulting in a flash flood in Western Crete, Poster: *EGU General Assembly 2019*, 7-12 April 2019, Vienna, Austria, Geophysical Research Abstracts, Vol. 21, EGU2019-15437, 2019.

Επιστημονικό άρθρο υπό προετοιμασία για δημοσίευση σε διεθνές περιοδικό:

- ✧ Sarchani, S. and Tsanis I., "Climate change impact on flood inundation along the lower end of Humber River basin, Ontario".

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

2.1 Βροχοπτώσεις σε Μεσόγειο και Καναδά

2.1.1 Ιστορικές βροχοπτώσεις στην Κρήτη

Πολλές μελέτες έχουν επικεντρωθεί στα υδρο-μετεωρολογικά χαρακτηριστικά γεγονότων βροχόπτωσης στο νησί της Κρήτης. Από πλεγματικά δεδομένα μέσης πίεσης στη στάθμη της θάλασσας σε εξάωρο χρονικό βήμα για την αναγνώριση της τροχιάς κυκλώνων, της περιόδου 1979-2011, ανιχνεύτηκαν υφέσεις πλησίον της Κρήτης για την πλειονότητα των ισχυρών βροχοπτώσεων της άνοιξης, ακολουθούμενες από αυτές του χειμώνα και του φθινοπώρου, ενώ γενικά οι περισσότερες υφέσεις που επηρεάζουν το νησί προσεγγίζουν κυρίως από τα βορειοδυτικά, και ακολούθως από τα νοτιοδυτικά, κινούμενες ανατολικά (Iordanidou et al., 2015). Σε μια μελέτη για την περίοδο 1973-2005 για την Κρήτη, η ανάλυση της εποχικότητας της μέσης μηνιαίας βροχόπτωσης από 53 μετεωρολογικούς σταθμούς έδειξε ότι οι μέγιστες βροχοπτώσεις εκδηλώθηκαν κατά τους μήνες Νοέμβριο έως Ιανουάριο (Koutroulis et al., 2010). Η χωρική ανάλυση μηνιαίων δεδομένων βροχόπτωσης, από Σεπτέμβριο έως Αύγουστο, 56 βροχομετρικών σταθμών στην Κρήτη, για την περίοδο 1974-2005, αποκάλυψε ότι η μέση ετήσια βροχόπτωση συσχετίζεται ισχυρά με την ορεογραφία, και το μέγεθός της μειώνεται στα ανατολικά του νησιού έως και 400 mm κατά μέσο όρο, σε σχέση με τα δυτικά (Vrochidou and Tsanis, 2012).

2.1.2 Προβολές βροχοπτώσεων σε Μεσόγειο και Κρήτη

Πολλοί ερευνητές έχουν μελετήσει τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στην υδρολογική συμπεριφορά αρκετών λεκανών απορροής της Μεσογείου, για διάφορα σενάρια εξέλιξης της συγκέντρωσης (Representative Concentration Pathways - RCPs) θερμοκηπικών αερίων και διάφορες μελλοντικές χρονικές περιόδους συγκριτικά με περιόδους αναφοράς (Vozinaki et al., 2018; Fonseca and Santos, 2019; Venetsanou et al., 2020). Οι μελλοντικές προβολές ημερήσιας βροχόπτωσης βασίζονται σε σύνολο δεδομένων με διόρθωση μεροληπτικού σφάλματος και βελτιωμένης χωρικής ανάλυσης μέσω καταβιβασμού κλίμακας, από παγκόσμια κλιματικά μοντέλα (GCMs) (López-

Ballesteros et al., 2020), καθώς και σε συνδυασμό με περιοχικά κλιματικά μοντέλα (RCMs) (Perra et al., 2018; Senatore et al., 2022; Todaro et al., 2022). Από 42 GCMs για τη νότια Ευρώπη και τη Μεσόγειο, με το σενάριο θερμοκηπικών εκπομπών RCP4.5, μέχρι το τέλος του αιώνα αναμένεται μηδενική αλλαγή είτε μέτρια μείωση της μέσης βροχόπτωσης κατά τους μήνες Οκτώβριο έως Μάρτιο, ενώ προβλέπεται σημαντική μείωση της μέσης βροχόπτωσης κατά τους μήνες Απρίλιο έως Σεπτέμβριο (IPCC, 2013). Οι μελλοντικές προβολές μηνιαίας βροχόπτωσης από 10 RCMs σε 130 υδρολογικές λεκάνες της Κρήτης, με διορθωμένο το μεροληπτικό σφάλμα για το σενάριο θερμοκηπικών εκπομπών SRES A1B, έδειξαν σταδιακή μείωση των βροχοπτώσεων έως το 2100 και συνεπώς μια εκτεταμένη περίοδο ήπιας ξηρασίας (Koutroulis et al., 2011). Για το ίδιο σενάριο θερμοκηπικών εκπομπών, από 10 GCMs-RCMs για την Κρήτη, οι μελλοντικές προβλέψεις αποκαλύπτουν μείωση της μέσης βροχόπτωσης σε σχέση με την τριακονταετία αναφοράς 1970-2000, και συγκεκριμένα κατά $12(\pm 25)\%$ κατά την κοντινή περίοδο 2010-2040, κατά $20(\pm 46)\%$ κατά την περίοδο 2040-2070, και κατά $29(\pm 41)\%$ στο τέλος του αιώνα (2070-2100) (Tsanis et al., 2011). Σε μια πιο πρόσφατη μελέτη, από 11 GCMs-RCMs για το νησί της Κρήτης, για την περίοδο 2071-2100 και το σενάριο μέτριου μετριασμού των θερμοκηπικών εκπομπών (RCP4.5), προβλέπεται μια στατιστικά ισχυρή μείωση της βροχόπτωσης έως -18% στις ορεινές περιοχές, σε σχέση με την περίοδο βάσης 1971-2000, ενώ για το σενάριο υψηλών εκπομπών αερίων (RCP8.5) και για όλη την Κρήτη, προβλέπεται μια στατιστικά ισχυρή μείωση της βροχόπτωσης από -20% έως -30% , συγκριτικά με την περίοδο αναφοράς (Georgoulas et al., 2022).

2.1.3 Ανασκόπηση υδρολογικών αναλύσεων σε Κρήτη και Μεσόγειο

Για την αξιολόγηση της υδρολογικής απόκρισης λεκανών απορροής στη Μεσόγειο έπεται από βροχοπτώσεις, η ερευνητική κοινότητα χρησιμοποιεί υδρολογικά μοντέλα. Μια μελέτη σε λεκάνη απορροής στη νότια Κρήτη χρησιμοποίησε και συνέκρινε διαφορετικούς αλγόριθμους βελτιστοποίησης για τη βαθμονόμηση και επικύρωση ενός εννοιολογικού υδρολογικού μοντέλου από ημερήσια βροχόπτωση μακράς διάρκειας (Tigkas et al., 2015). Μια άλλη έρευνα αφορούσε υδρολογικές προσομοιώσεις μακράς διάρκειας, με δεδομένα μετρητών απορροής τριακονταετίας (1980-2009), σε πλήθος λεκανών της Κρήτης, για να αξιολογήσουν υδρολογικά τη χωροχρονική διαμόρφωση του υδατικού ισοζυγίου λόγω της κυρίαρχης καρστικής γεωλογίας (Malagò et al., 2016). Σε

μια λεκάνη με περιορισμένα δεδομένα στη βόρεια Κρήτη, έγινε ανάλυση ευαισθησίας υδρολογικών παραμέτρων για τη βαθμονόμηση μοντέλου από οκτώ μεμονωμένα βροχοπτώτικα γεγονότα, βάσει ελαχιστοποίησης των σφαλμάτων συνολικού όγκου νερού, μέγιστης απορροής, και χρόνου εμφάνισης της μέγιστης απορροής, καθώς και βάσει της καλύτερης απόδοσης δεικτών όπως ο Nash-Sutcliffe, ο συντελεστής συσχέτισης, η επεξηγημένη διακύμανση, το μέσο σφάλμα τετραγωνικής ρίζας (RMSE), και τα απόλυτα μέσα ποσοστιαία σφάλματα (Koutroulis and Tsanis, 2010). Σε δύο λεκάνες απορροής στη βόρεια Κρήτη, από την υδρολογική προσομοίωση δύο σφοδρών βροχοπτώτικών γεγονότων αντίστοιχα, με ένα χωρικά κατανεμημένο υδρολογικό μοντέλο το οποίο βαθμονομήθηκε και επαληθεύτηκε με δεδομένα εδαφικής υγρασίας από τηλεπισκόπηση, διαπιστώθηκε ότι η επίδραση της αρχικής εδαφικής υγρασίας στο μέγεθος της απορροής αιχμής εξαρτάται από το ύψος υετού του γεγονότος και σε μικρότερο βαθμό από το κλίμα (Grillakis et al., 2016). Άλλες μελέτες σε λεκάνες απορροής της Μεσογείου έχουν συγκρίνει ασύζευκτα με συζευγμένα υδρολογικά μοντέλα (Givati et al., 2016), συγκεντρωτικά με πλήρως κατανεμημένα μοντέλα (Boithias et al., 2017), μοντέλα που βασίζονται σε φυσικά χαρακτηριστικά των λεκανών με εννοιολογικά μοντέλα (Filianoti et al., 2020), για να προσομοιώσουν την απορροή έπειτα από μεμονωμένα ισχυρά βροχοπτώτικά συμβάντα. Σε μια μελέτη έξι μικρών λεκανών στο νησί της Θάσου, στη βόρεια Ελλάδα, χωρίς βροχομετρικούς σταθμούς εντός των λεκανών, πραγματοποιήθηκε προσομοίωση των πλημμυρογραφημάτων με χρήση βροχόπτωσης που προέκυψε από συσχέτιση δορυφορικών δεδομένων βροχής και βροχομετρικών δεδομένων από τον κοντινότερο σταθμό στις λεκάνες, που είναι και ο μοναδικός στο νησί (Sapountzis et al., 2021). Σε μια άλλη μελέτη 22 μικρών λεκανών στην Κύπρο, προσομοιώθηκαν σφοδρά γεγονότα βροχής με ένα υδρολογικό μοντέλο το οποίο βαθμονομήθηκε χρησιμοποιώντας καταγεγραμμένη βροχόπτωση από βροχομετρικούς σταθμούς, ώστε να αξιολογηθεί η απόδοσή του με πλεγματικά βροχομετρικά δεδομένα μοντέλου έρευνας και πρόβλεψης καιρού (WRF) επανανάλυσης από καταβιβασμό κλίμακας ($1 \times 1 \text{ km}^2$) (Camera et al., 2020). Σε μελέτη δύο λεκανών στη νοτιοανατολική Γαλλία, με εκτάσεις ίσες προς 88 km^2 και 99 km^2 , με τη βροχόπτωση να αναλύεται σε διάφορες κλίμακες χωρικά (1-8 km) και χρονικά (5-60 min), διαπιστώθηκε ότι ο χρόνος εμφάνισης της απορροής αιχμής ήταν πιο ευαίσθητος στο χρονικό βήμα της βροχής παρά στη χωρική ανάλυση, το οποίο πιθανώς δικαιολογείται από το μικρό μέγεθος των λεκανών και το σύντομο χρόνο απόκρισής τους (Anquetin et al., 2010). Ερευνητές

επίσης, επεσήμαναν τη σημασία της χωρικής κατανομής των τύπων εδάφους για την προσομοίωση της πρώτης αιχμής της απορροής έπειτα από ξηρές συνθήκες (Anquetin et al., 2010; Wahren et al., 2016). Μελέτες σε λεκάνες της Πορτογαλίας και της Ελλάδας έδειξαν ότι οι αλλαγές στις χρήσεις γης επηρεάζουν σημαντικά το μέγεθος της απορροής ποταμών, με τις αναδασώσεις να μειώνουν την επιφανειακή απορροή λόγω της μεγάλης ποσότητας απώλειας νερού από την εξατμισοδιαπνοή, ενώ οι αποψιλώσεις δασών και η μετάβαση χρήσεων γης σε βοσκότοπους ή γεωργικές εκτάσεις αυξάνουν τη μέση ετήσια απορροή ποταμών (Santos et al., 2019; Mentzafou, 2019). Μια άλλη έρευνα με σύγκριση ψηφιακών μοντέλων υψομετρίας (Digital Elevation Models - DEMs) σε δασώδη υδρολογική λεκάνη της Πορτογαλίας, ήπιας υψομετρίας, έδειξε ότι το DEM υψηλότερης ανάλυσης αναπαριστά λεπτομερέστερα την κλίση του εδάφους, τον αριθμό των ρεμάτων του υδρογραφικού δικτύου και το μήκος τους, επιδρώντας στον ορθότερο υπολογισμό του χρόνου εμφάνισης και του μεγέθους της απορροής από υδρολογικό μοντέλο που προσομοιώνει βροχόπτωση μακράς διάρκειας (Rocha et al., 2020).

2.1.4 Ιστορικές βροχοπτώσεις σε Καναδά και νότιο Οντάριο

Η πόλη του Τορόντο, στο νότιο Οντάριο του Καναδά, είναι εκτεθειμένη σε έντονα καιρικά συστήματα που προκαλούν περιστασιακά ξαφνικές πλημμύρες λόγω εμφάνισης πολλαπλών καταιγίδων πάνω από μια περιοχή ή βραδυκίνητων καταιγίδων που διασχίζουν μια περιοχή (Nirupama et al., 2014). Σε μια πρόσφατη μελέτη για την περίοδο 1950-2012, η χωροχρονική ανάλυση ημερήσιας βροχόπτωσης μακράς διάρκειας, από διάφορες κλιματικές ταλαντώσεις, αποκάλυψε ότι τα ακραία βροχοπτώτικα γεγονότα στον Καναδά έχουν γίνει ακόμη πιο σφοδρά (Yang et al., 2019). Τα ημερήσια δεδομένα πέντε κλιματικών ταλαντώσεων μεγάλης κλίμακας για την περίοδο 1958-2013 έδειξαν ότι οι βροχοπτώσεις αυξήθηκαν σημαντικά στις ανατολικές περιοχές του Καναδά το καλοκαίρι και το φθινόπωρο, κατά μέσο όρο κατά 36.3 mm και 73.3 mm, αντίστοιχα (Tan et al., 2019). Ο υπολογισμός διαφόρων κλιματικών δεικτών από ιστορικές χωροχρονικές ημερήσιες καταγραφές βροχοπτώσεων διάρκειας 63 ετών (περιόδου 1951-2013) έδειξε ότι σε όλο το νότιο Οντάριο οι ακραίες βροχοπτώσεις έχουν γίνει πιο συχνές (Wazneh et al., 2017). Σε μια άλλη μελέτη, με δεδομένα 133 μετεωρολογικών σταθμών από όλο το Οντάριο, από καταγραφές κατά μέσο όρο 26 ετών, και εφαρμογή της μεθόδου περιοχικής χρονικής γραμμής τάσης για διαφορετικής διάρκειας ετήσιες μέγιστες εντάσεις της βροχόπτωσης, διαπιστώθηκε ότι η ένταση ακραίας βροχόπτωσης

αυξήθηκε ανά δεκαετία, από 1.25% για καταιγίδα 30 λεπτών έως 1.82% για καταιγίδα 24 ωρών (Soulis et al., 2016). Επιπλέον, σε όλο το Οντάριο, μέσω ακατέργαστων δεδομένων βροχόπτωσης πενήντα ή περισσότερων ετών–αναλόγως το σταθμό καταγραφής–παρατηρήθηκε ότι τα γεγονότα με βραχεία διάρκεια έντασης της βροχόπτωσης (15 min, 30 min, και 1 h) εμφάνισαν μεγαλύτερη διακύμανση στις ετήσιες και μηνιαίες τιμές της βροχόπτωσης αιχμής απ’ ό,τι τα γεγονότα με μακρά διάρκεια έντασης της βροχής (6 h, 12 h, και 24 h) (Rudra et al., 2015). Οι Paixao et al. (2015) πρότειναν την ταυτόχρονη χρήση παρατηρήσεων από ραντάρ τηλεπισκόπησης και καταγραφών από βροχόμετρα, για τον καλύτερο εντοπισμό περιοχών με ομοιογενή ισχυρή βροχόπτωση, σε μελέτη τους για υδρολογική λεκάνη στο νότιο Οντάριο με δεδομένα δεκαετίας. Την αποτελεσματικότητα των ραντάρ στην ποσοτική εκτίμηση της βροχόπτωσης για χρήση σε υδρομετεωρολογικές εφαρμογές υπογράμμισαν επίσης οι Wijayarathne et al. (2020), από μελέτη τους στην ευρύτερη περιοχή του Τορόντο.

2.1.5 Προβολές βροχοπτώσεων σε Καναδά και Οντάριο

Αρκετοί ερευνητές έχουν εξετάσει την επίδραση ενός μεταβαλλόμενου κλίματος στην υδρολογική απόκριση διάφορων λεκανών απορροής σε όλο τον Καναδά, με βάση στατιστικές μεθόδους καταβιβασμού κλίμακας που εφαρμόζονται σε χρονοσειρές ημερήσιων δεδομένων από παγκόσμια κλιματικά μοντέλα (Dibike and Coulibaly, 2005), και για διάφορα σενάρια εκπομπών θερμοκηπικών αερίων (Cheng et al., 2012), καθώς και βάσει δεδομένων με διόρθωση μεροληπτικού σφάλματος που προκύπτουν από συνδυασμό περιοχικών κλιματικών μοντέλων (RCMs) και παγκόσμιων κλιματικών μοντέλων (GCMs) (Ahmed and Tsanis, 2016a). Από μελλοντικές προβολές ημερήσιων δεδομένων βροχόπτωσης με διόρθωση μεροληπτικού σφάλματος από 21 GCMs, για το σενάριο εκπομπών θερμοκηπικών αερίων A2 της 4^{ης} έκθεσης αξιολόγησης της IPCC (IPCC, 2000), αναμένεται ότι οι ημέρες έντονης και πολύ έντονης βροχής, καθώς και οι πολύ υγρές και εξαιρετικά υγρές ημέρες, πιθανότατα θα αυξηθούν σημαντικά σε ετήσια βάση σε μεγάλες εκτάσεις του Οντάριο (Deng et al., 2016).

2.1.6 Ανασκόπηση υδρολογικών αναλύσεων σε Καναδά και Οντάριο

Μελέτες σε λεκάνες απορροής του Καναδά έχουν συνδυάσει διάφορα υδρολογικά μοντέλα με στατιστικές τεχνικές μετα-επεξεργασίας (Muhammad et al., 2018), όπου ποσοτικοποιείται η αβεβαιότητα (Han et al., 2019), είτε προ-επεξεργασίας όπου

αφομοιώνεται σύνολο φιλτραρισμένων δεδομένων με τη μέθοδο Kalman (Leach et al., 2018), ή ενσωματώνονται αριθμητικές προγνώσεις καιρού (Awol et al., 2021), για την πρόβλεψη πλημμυρών μακράς ή βραχείας διάρκειας. Άλλες μελέτες, σε λεκάνες απορροής του Οντάριο και του ευρύτερου Καναδά, έχουν συγκρίνει διάφορα πλήρως καταναεμημένα, ημικαταναεμημένα ή συγκεντρωτικά υδρολογικά μοντέλα, για να αξιολογηθεί η απόδοσή τους ή για επιχειρησιακές προβλέψεις πλημμυρών (Golmohammadi et al., 2014; Darbandsari and Coulibaly, 2020; Unduche et al., 2018; Sahraei et al., 2020). Υδρολογικά μοντέλα έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση των αλλαγών στην υδρολογική απόκριση λεκανών του Οντάριο χρονικά (Golmohammadi et al., 2017) και χωρικά (Dong et al., 2019). Σε διάφορες υδρολογικές λεκάνες του Οντάριο έχει εξεταστεί η αβεβαιότητα από τις διαφοροποιήσεις στις χρήσεις γης με διάφορα μοτίβα διακριτοποίησης, είτε με χωρικά δεδομένα διαφορετικής ανάλυσης, για υδρολογικές προσομοιώσεις βροχόπτωσης μακράς διάρκειας (Haghnegahdar et al., 2015; Daggupati et al., 2018). Η υδρολογική απορροή μεμονωμένων συμβάντων έχει προσδιοριστεί και μέσω εμπειρικών μεθόδων. Η ανάλυση δεκαοκτώ βροχοπτώσιων γεγονότων σε μια μικρής έκτασης αγροτική λεκάνη στο νότιο Οντάριο έδειξε ότι τα χαμηλά επίπεδα εδαφικής υγρασίας το καλοκαίρι και το φθινόπωρο συνέβαλαν στην περίσσεια διήθησης, ενώ η υψηλή εδαφική υγρασία την άνοιξη δημιούργησε περίσσεια κορεσμού. Η διακύμανση της εποχιακής απορροής επηρεάστηκε από το συνολικό ύψος υετού, και συγχρόνως κατά το καλοκαίρι και το φθινόπωρο από την ένταση της βροχόπτωσης, ενώ κατά την άνοιξη από τη διάρκεια της βροχής (Chapi et al., 2015). Στο νότιο Οντάριο, η αστικοποίηση επεκτείνεται, επηρεάζοντας την υδρολογική συμπεριφορά της περιοχής σε σοβαρά βροχοπτώσιμα γεγονότα. Η εμπειρική υδρολογική ανάλυση έντεκα ποταμών στη λεκάνη απορροής των Μεγάλων Λιμνών του Καναδά, με δεδομένα 42 ετών από τα τέλη Μαΐου έως τα μέσα Νοεμβρίου, έδειξε ότι το ποσοστό αστικοποίησης αλληλεπιδρά με το μέγεθος της λεκάνης, επηρεάζοντας τη συνολική απορροή. Επιπλέον, η αύξηση της αστικής κάλυψης προκάλεσε αύξηση στην επιτάχυνση της απορροής (Trudeau and Richardson, 2016). Μια άλλη έρευνα έδειξε ότι η κλιματική αλλαγή επηρεάζει την πόλη του Τορόντο περισσότερο από τη μελλοντική αύξηση του αστικού ιστού (Kaykhosravi et al., 2020). Οι περισσότερες μελέτες των τελευταίων ετών για την περιοχή του Καναδά επικεντρώνονται σε υδρολογικές προσομοιώσεις μακράς διάρκειας, παρά στην προσομοίωση μεμονωμένων γεγονότων πλημμύρας.

2.2 Πλημμύρες

2.2.1 Πλημμύρες στην Ευρώπη

Σύμφωνα με τον ΕΕΑ (2010), από το 1998 έως το 2009, οι πλημμύρες και οι καταιγίδες ήταν οι πιο δαπανηροί φυσικοί κίνδυνοι στην Ευρώπη, με τις συνολικές απώλειες να ανέρχονται σε περίπου 52 δισ. ευρώ για τις πλημμύρες και σε περίπου 44 δισ. ευρώ για τις καταιγίδες. Κατά την ίδια περίοδο, ο αριθμός των θανάτων έφτασε τους 1126 από 213 καταγεγραμμένα πλημμυρικά γεγονότα, ενώ οι θάνατοι από 155 καταγεγραμμένες καταιγίδες ήταν 729. Για τη Νότια Ευρώπη, οι άμεσες οικονομικές ζημιές από πλημμύρες υπολογίζονται για την περίοδο 1961-1990 σε περίπου 673 εκατ. ευρώ/έτος, ενώ αναμένονται να φτάσουν στα 1.3 δισ. ευρώ/έτος κατά την περίοδο 2071-2100 με το SRES A1B σενάριο (Ciscar et al., 2014) μέτρων προς υψηλών ανθρωπογενών εκπομπών που οδηγεί σε αύξηση της παγκόσμιας θερμοκρασίας κατά 3.5 °C πάνω από τα προβιομηχανικά επίπεδα. Οι πιο επιρρεπείς περιοχές σε πλημμύρες τίθενται σε ακόμη υψηλότερο κίνδυνο. Από ένα σύνολο 7 κλιματικών μοντέλων της βάσης δεδομένων EURO-CORDEX, για το σενάριο υψηλών θερμοκηπικών εκπομπών RCP8.5, τα ακραία βροχοπτώτικα γεγονότα αναμένεται κατά μέσο όρο να διπλασιαστούν στην Ευρώπη για την περίοδο 2006-2035, συγκριτικά με την περίοδο βάσης 1976-2005, με μια πρόσθετη αύξησή τους μέχρι το τέλος του αιώνα, έχοντας πρόσθετο αντίκτυπο στη συχνότητα ακραίων πλημμυρών (Alfieri et al., 2015). Η χωροχρονική ανάλυση σημαντικών πλημμυρικών γεγονότων στην Ευρώπη κατά την περίοδο 1985-2009 έδειξε μια αυξητική τάση στις πλημμύρες σε σφοδρότητα και σε έκταση, λόγω της κλιματικής μεταβολής και αλλαγών στην τοπογραφία (Kundzewicz et al., 2013).

2.2.2 Πλημμύρες στο Τορόντο

Οι λεκάνες απορροής που διασχίζουν την πόλη του Τορόντο είναι σχετικά μικρές, με μικρού μήκους ρέματα, ενώ είναι υψηλά αστικοποιημένες, δίδοντας μικρό χρόνο αντίδρασης έναντι πλημμυρικού κινδύνου έπειτα από σφοδρά γεγονότα βροχόπτωσης. Σε εποχιακή κλίμακα, οι πλημμύρες στο Τορόντο δύνανται να προκληθούν από παγιδευμένο πάγο το χειμώνα, λιώσιμο χιονιών την άνοιξη, απρόβλεπτες καταιγίδες το καλοκαίρι, και υπολείμματα τυφώνων το φθινόπωρο (McNeil, 2019). Η πόλη του Τορόντο έχει πληγεί από πολλές μεγάλες πλημμύρες τα τελευταία 100 χρόνια. Η πιο καταστροφική πλημμύρα συνέβη στις 15 Οκτωβρίου 1954 από το πέρασμα του τυφώνα

Hazel, με 81 νεκρούς και 7472 ανθρώπους που έμειναν άστεγοι (Nirupama et al., 2014; McNeil, 2019; PSC, 2023), καθώς και μεγάλες καταστροφές σε γέφυρες, οδούς, και κτίρια (GOC, 2023). Μεγάλες ήταν οι πλημμύρες στις 27-28 Αυγούστου 1976, με εκτιμώμενες ζημιές πάνω από 1.3 εκατ. δολάρια στην ευρύτερη περιοχή του Τορόντο (TRCA, 1999; Nirupama et al., 2014). Άλλη μεγάλη πλημμύρα έλαβε χώρα στις 19 Αυγούστου 2005, με περισσότερους από 10000 κατοίκους του Τορόντο χωρίς ρεύμα και τουλάχιστον 1200 πλημμυρισμένα υπόγεια (Nirupama et al., 2014), ενώ οι συνολικές ζημιές σε ασφαλισμένες περιουσίες σε όλο το νότιο Οντάριο ανήλθαν σε 500 εκατ. δολάρια (PSC, 2023). Η πιο πρόσφατη σημαντική πλημμύρα συνέβη στις 8 Ιουλίου 2013, με διακοπές ρεύματος που επηρέασαν περίπου 300 χιλιάδες κατοίκους του Τορόντο, μη λειτουργία των περισσότερων συγκοινωνιακών μέσων έως την επόμενη ημέρα, και εκτίμηση των ζημιών σε ασφαλισμένες ιδιοκτησίες άνω των 940 εκατ. δολαρίων (Nirupama et al., 2014; PSC, 2023).

2.2.3 Υδραυλικά μοντέλα και εργαλεία εκτίμησης πλημμυρικών επιπτώσεων

Για την εκτίμηση των επιπτώσεων από πλημμύρες έπειτα από σφοδρά βροχοπτώτικα γεγονότα, και την παραγωγή χαρτών πλημμύρας με ακρίβεια, η ερευνητική κοινότητα χρησιμοποιεί υδραυλικά/υδροδυναμικά μοντέλα. Ευρείας χρήσης μοντέλα για υδροδυναμική προσομοίωση είναι αυτά σε μία διάσταση (1D), ακολουθούμενα από τα συζευγμένα υδραυλικά μοντέλα (1D/2D). Τα τελευταία χρόνια η λεπτομερέστερη ανάλυση των ψηφιακών μοντέλων υψομετρίας οδήγησε την ερευνητική κοινότητα να εφαρμόζει μοντέλα σε δύο διαστάσεις (2D) για την προσομοίωση πλημμυρών, με πιο δημοφιλή σε μελέτες τα HEC-RAS 2D, LISFLOOD-FP (Liu et al., 2019; Shustikova et al., 2019), TELEMAC-2D (Lagasio et al., 2022), και MIKE-21 (Fourniotis et al., 2018; Zheng and Sun, 2020). Τα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών (GIS) χρησιμοποιούνται ως προ-επεξεργαστές για την απόδοση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών ενός ποταμού, μέσω εργαλείων που είναι συνδεδεμένα με υδραυλικά μοντέλα. Απαραίτητη είναι η διαθεσιμότητα ψηφιακού μοντέλου υψομετρίας (DEM) υψηλής ανάλυσης. Πρόσθετα στοιχεία τοπογραφίας και υφιστάμενων τεχνικών έργων, καθώς και δεδομένων χρήσεων γης είναι χρήσιμα για τη σωστή απόδοση του υδραυλικού συστήματος. Επίσης, θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν χρονοσειρές βροχόπτωσης, οι οποίες συνήθως δε διατίθενται για μικρής έκτασης υδρολογικές λεκάνες της Μεσογείου (Kastridis and Stathis, 2020). Για την εκτέλεση των υδραυλικών μοντέλων απαιτούνται αξιόπιστα

δεδομένα ροής. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια ισχυρών βροχοπτώσεων, οι μετρητές απορροής καταστρέφονται λόγω της ορμητικότητας των ποταμών. Για την επικύρωση των πλημμυρικών επιπτώσεων των μοντέλων πολύ χρήσιμα εργαλεία είναι η συλλογή στοιχείων και οι μετρήσεις πεδίου μεταπλημμυρικά, ενώ θα μπορούσε να ωφελήσει και η λήψη αεροφωτογραφιών εξέλιξης της πλημμυρισμένης έκτασης σε πραγματικούς χρόνους. Ωστόσο, οι εικόνες που καταγράφονται από δορυφορικούς οπτικούς αισθητήρες δύνανται να είναι ανεπαρκείς στην περίπτωση κακών καιρικών συνθηκών ή πυκνά ανεπτυγμένης βλάστησης (Teng et al., 2017). Η πιο πρόσφατα ανεπτυγμένη τεχνολογία, το ραντάρ συνθετικού διαφράγματος (SAR), μπορεί να είναι πολύ αποτελεσματικό στον προσδιορισμό των μεταβολών της πλημμυρισμένης έκτασης με το χρόνο, καθώς δύναται να διεισδύει στην κάλυψη νεφών (Clement et al., 2017), υποστηρίζοντας τη διαδικασία βαθμονόμησης και επικύρωσης υδραυλικού μοντέλου.

2.2.4 Αβεβαιότητες στην υδραυλική προσομοίωση

Πολλοί ερευνητές εστιάζουν σε πολλαπλούς παράγοντες αβεβαιότητας που συνδέονται με τον ακριβή προσδιορισμό των πλημμυρικών χαρτών, μέσω υδραυλικών/υδροδυναμικών μοντέλων. Μια σημαντική παράμετρος που έχει ήδη εξεταστεί, είτε μόνη της χρησιμοποιώντας διάφορες συναρτήσεις πιθανοτικών κατανομών μέσω της τεχνικής Monte Carlo (Papaioannou et al., 2017), είτε σε συνδυασμό με άλλες μεταβλητές όπως η εισερχόμενη ροή, οι διαμήκεις και πλευρικές κλίσεις, το μέγεθος κελιών πλέγματος σε οιονεί-2D μοντέλα (Dimitriadis et al., 2016), είναι ο συντελεστής τραχύτητας Manning. Χαμηλές τιμές του συντελεστή τραχύτητας Manning στην κοίτη ενός ποταμού δύνανται να μειώσουν το χρόνο διάδοσης του πλημμυρικού κύματος, καθώς και τη συνολική έκταση της πλημμύρας (Lamichhane and Sharma, 2018). Ο συντελεστής τραχύτητας δύναται να βαθμονομηθεί αναλύοντας σημάδια παλαιάς στάθμης που προκλήθηκαν σε κορμούς δέντρων από επιπλέοντα ξύλα κατά την κατεύθυνση του πλημμυρικού κύματος, σε προγενέστερες πλημμύρες (Ballesteros et al., 2011). Οι αβεβαιότητες στη σχέση πλημμυρικής στάθμης-απορροής δύνανται να μειωθούν με διορθώσεις κατά τόπους των συντελεστών τριβής σε κοίτη και περιοχές ροής, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του μοντέλου με επί τόπου μετρήσεις σε πλημμυρικές στάθμες (Habert et al., 2016). Στην περίπτωση λεκανών χωρίς μετρητές απορροής, για τη μείωση της αβεβαιότητας του μεγέθους της απορροής ποταμών δύναται να πραγματοποιηθεί περιοχική ανάλυση των ποσοστημορίων πλημμύρας

(regional flood quantiles analysis) πριν από την υδραυλική προσομοίωση, για διάφορα πιθανοτικά σενάρια περιόδων επαναφοράς (Sarhadi, 2012). Αβεβαιότητα στα χαρακτηριστικά αιφνίδιων πλημμυρών προκύπτει και από τη σύγκριση διαφορετικών τύπων μοντέλων, όπως 1D, 2D, και συζευγμένα 1D/2D υδραυλικά μοντέλα, αλλά και διαφορετικών Ψηφιακών Μοντέλων Υψομετρίας (DEM) (Tsanis et al., 2013; Petroselli et al., 2018; Papaioannou et al., 2016). Μια άλλη πηγή αβεβαιότητας στη χρήση υδραυλικών μοντέλων για τη δημιουργία χαρτών πλημμύρας είναι οι οριακές συνθήκες, τόσο στα ανάντη ως προς το υδρογράφημα σχεδιασμού, όσο και στα κατάντη της ροής ενός ποταμού ως προς τις καμπύλες ταξινόμησης ροής-βάθους (Domeneghetti et al., 2013). Σημαντικός παράγοντας για την προσομοίωση της πλημμυρικής στάθμης είναι το μέγεθος των κελιών του υπολογιστικού πλέγματος, με το μικρότερο μέγεθος να αυξάνει την ακρίβεια του μοντέλου, ενώ δεν επηρεάζει την έκταση της πλημμύρας, και αυξάνει τον υπολογιστικό χρόνο (Alipour et al., 2022). Συνδυαστικά με τις προαναφερθείσες αβεβαιότητες, διαφορές στην προσομοίωση της πλημμυρικής στάθμης δύνανται να προκύψουν από τις εξισώσεις υδροδυναμικής που επιλέγονται προς επίλυση (Sharma and Regonda, 2021).

2.2.5 Υδραυλικές αναλύσεις με το συζευγμένο μοντέλο 1D/2D HEC-RAS και σύγκριση της απόδοσης με το 1D και 2D μοντέλο

Η υδραυλική/υδροδυναμική προσομοίωση μέσω του συζευγμένου 1D/2D μοντέλου είναι μια σχετικά πρόσφατη δυνατότητα για το υδραυλικό λογισμικό HEC-RAS. Ερευνητές που έχουν ήδη χρησιμοποιήσει αυτό το εργαλείο διαπίστωσαν αποτελεσματικότητα στην παραγωγή αξιόπιστων χαρτών πλημμυρών. Σε μελέτες που έχει χρησιμοποιηθεί το συζευγμένο 1D/2D μοντέλο συγκρίθηκαν τα υδραυλικά αποτελέσματα με τα αντίστοιχα από το 1D μοντέλο μέσω DEM υψηλής ανάλυσης (Vozinaki et al., 2016), είτε με χάρτες πλημμύρας που παράχθηκαν από ραντάρ συνθετικού διαφράγματος με στατιστική χρονική ανάλυση (Zotou et al., 2022). Σε άλλες μελέτες προσομοιώθηκε η υπερχειλίση ποταμού από κατάρρευση αναχώματος (Dasallas et al., 2019), καθώς και οι καταστροφικές επιπτώσεις από θραύση φράγματος και οι μετριασμένες επιπτώσεις λόγω αναχωμάτων προστασίας (Patel et al., 2017). Επίσης, διερευνήθηκε το σύνολο των 2D εξισώσεων (ρηχών υδάτων είτε διάχυσης κύματος) που ανταποκρίνεται καλύτερα στην ελαχιστοποίηση του υπολογιστικού χρόνου, διατηρώντας ένα αποδεκτό αριθμητικό σφάλμα στην επίλυση για την προσομοίωση των

πλημμυρικών επιπτώσεων έπειτα από καταστροφική αιφνίδια πλημμύρα (Mitsopoulos et al., 2022). Στις παραπάνω μελέτες, το μοντέλο απεικόνισε ρεαλιστική συμπεριφορά της υδροδυναμικής της πλημμύρας στις θέσεις σύνδεσης της 1D ροής του ρέματος με τις 2D πλημμυρικές επιφάνειες. Από τη σύγκριση των επιπτώσεων από το 1D/2D και το 2D μοντέλο κατά την εξέταση δύο πλημμυρικών συμβάντων σε μεγάλη υδρολογική λεκάνη, το συζευγμένο μοντέλο έδωσε καλύτερη πρόβλεψη της έκτασης της πλημμύρας σε υψηλές και χαμηλές ροές, και λίγο καλύτερη πρόβλεψη της πλημμυρικής στάθμης, ιδίως για τις χαμηλές ροές (Samarasinghe et al., 2022). Σε μια άλλη μελέτη ωστόσο, το 2D HEC-RAS απέδωσε καλύτερους στατιστικούς δείκτες από το 1D/2D μοντέλο, ενώ συγχρόνως το 1D/2D μοντέλο παρουσίασε μεγαλύτερη ευαισθησία στη διακύμανση του συντελεστή Manning από το 2D μοντέλο (Ghimire et al., 2022).

2.2.6 Ανασκόπηση υδραυλικών αναλύσεων στο νότιο Οντάριο

Η εξέταση της αστικοποίησης μέσω διαφορετικών χαρτών χρήσεων γης 35ετίας, καθώς και διαφορετικών ποσοστών αδιαπέρατων επιφανειών (0-100%), σε λεκάνη στην ευρύτερη περιοχή του Τορόντο, για την ίδια βροχόπτωση σχεδιασμού 24 h με περίοδο επαναφοράς 100 ετών, έδειξε ότι το μέγεθος και η χωρική κατανομή της αδιαπερατότητας παράγουν μεγαλύτερα πλημμυρικά βάθη και πολύ μεγαλύτερη πλημμυρική έκταση, σε σύγκριση με τις περισσότερο αστικοποιημένες χρήσεις γης (Feng et al., 2021). Σε μελέτη μιας μικρής έκτασης λεκάνης στο νότιο Οντάριο, για βροχόπτωση σχεδιασμού προσαρμοσμένη στην κλιματική αλλαγή, περιόδου επαναφοράς 100 ετών, η συμπερίληψη πράσινων υποδομών, όπως τάφρων διήθησης, στις περιοχές με αστική ανάπτυξη, κατά μήκος των ρυμοτομικών γραμμών των οικοπέδων, ανέκοψε την απορροή, μειώνοντας σημαντικά την προσομοιωμένη πλημμυρική έκταση (-29%) (de Lange and McBean, 2017). Για την περίπτωση ενός ποταμού στο νότιο Οντάριο, για καταιγίδες σχεδιασμού 24 h που προέκυψαν από συνδυασμό δεδομένων GCMs και RCMs για το κλιματικό σενάριο SRES A2, περιόδων επαναφοράς 2 yr, 25 yr, και 100 yr, η μέση αύξηση του πλημμυρικού βάθους όλων των διατομών της 1D προσομοίωσης παράχθηκε ίση με 0.06 m, 0.22 m, και 0.3 m αντίστοιχα, συγκριτικά με τις καταιγίδες σχεδιασμού από δεδομένα παρατήρησης (Ahmed and Tsanis, 2016b). Η ανάλυση προβαλλόμενων ημερήσιων ροών στο νοτιοδυτικό Οντάριο από 21 GCMs για την περίοδο 2061-2100, σε σχέση με την περίοδο βάσης 1961-2005, έδειξε ότι αναμένεται αύξηση της συχνότητας πλημμυρών και αύξηση στο μέγεθος των πλημμυρών (Gaur et al., 2018). Σε μια μελέτη

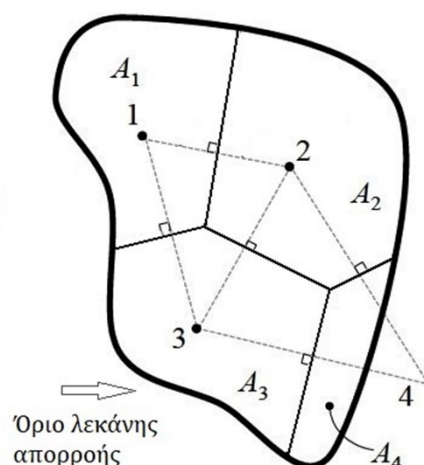
σε λεκάνη στο νοτιοανατολικό Οντάριο, από τη βροχόπτωση σχεδιασμού 12 h με περίοδο επαναφοράς 100 ετών από GCM-RCM και καμπύλες έντασης-διάρκειας-συχνότητας (IDF), για την τριακονταετία 2040-2069 και το σενάριο θερμοκηπικών εκπομπών RCP8.5, σε σχέση με αντιπροσωπευτικό συμβάν επαναφοράς εκατονταετίας της περιόδου βάσης, παράχθηκε αύξηση της πλημμυρικής έκτασης στη λεκάνη κατά 58%, καθώς και μέση αύξηση των πλημμυρικών βαθών από 0.75 m έως 1.43 m (Zahmatkesh et al., 2021). Σε μια άλλη μελέτη σε περιοχή του Τορόντο, η ντετερμινιστική ανάλυση από μελλοντικά ημερήσια δεδομένα βροχόπτωσης από GCMs, για το κλιματικό σενάριο RCP8.5, έδειξε ότι η έκταση που επηρεάστηκε από την χειρότερη περίπτωση πλημμύρας–με τις υψηλότερες αναμενόμενες ζημιές–κατά τη μεσοπρόθεσμη περίοδο (2040-2069) ήταν λίγο μικρότερη από την αντίστοιχη της περιόδου βάσης (1960-1989), ενώ λίγο μεγαλύτερη ήταν η έκταση της χειρότερης πλημμύρας της βραχυπρόθεσμης περιόδου (2020-2049) και ακόμη μεγαλύτερη μακροπρόθεσμα (2070-2099) (Rincón et al., 2022). Προκειμένου να μειωθεί η αβεβαιότητα υπολογισμών της αναμενόμενης πλημμυρικής έκτασης στο μέλλον, είναι απαραίτητη περαιτέρω έρευνα με περισσότερα δεδομένα από κλιματικά μοντέλα.

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

3.1 Μέθοδος πολυγώνων Thiessen κατανομής της βροχόπτωσης

Η μέθοδος των πολυγώνων Thiessen (Thiessen, 1911) είναι μια μέθοδος παρεμβολής για την εκτίμηση της περιοχικής κατανομής της βροχόπτωσης από ένα δίκτυο βροχομετρικών σταθμών σε μια λεκάνη απορροής. Με τη μέθοδο διαιρείται μια λεκάνη απορροής σε πολύγωνα, με καθένα να πλαισιώνει κάθε βροχογράφο, και προσδιορίζεται η στάθμιση (weight) των καταγραφών κάθε βροχομετρικού σταθμού βάσει της επιφάνειας του πολυγώνου διαιρεμένης με τη συνολική επιφάνεια της υδρολογικής λεκάνης.

Ο σχεδιασμός των πολυγώνων Thiessen ακολουθεί τα εξής βήματα (Εικόνα 3-1): (α) αποτυπώνονται οι θέσεις των βροχομετρικών σταθμών στη λεκάνη απορροής, (β) οι παρακείμενοι σταθμοί συνδέονται μεταξύ τους με γραμμές σχηματίζοντας τρίγωνα σε ένα ακανόνιστο τριγωνικό δίκτυο που ικανοποιεί το κριτήριο Delaunay, (γ) διχοτομείται κάθετα κάθε γραμμή που συνδέει δύο σταθμούς, σχηματίζοντας την ακμή ενός πολυγώνου Thiessen, και (δ) οι διχοτόμοι επεκτείνονται έως ότου διασταυρωθούν με άλλη διχοτόμο (θέσεις κορυφών πολυγώνου Thiessen) και με το όριο της υδρολογικής λεκάνης, σχηματίζοντας το πολύγωνο γύρω από κάθε βροχογράφο.



Εικόνα 3-1. Βήματα για τον προσδιορισμό των πολυγώνων Thiessen.

Η μέση περιοχική βροχόπτωση στη λεκάνη υπολογίζεται αθροίζοντας για όλους τους βροχογράφους το γινόμενο της βροχόπτωσης με το σταθμισμένο εμβαδόν του πολυγώνου που πλαισιώνει κάθε βροχομετρικό σταθμό, όπως φαίνεται στην εξίσωση:

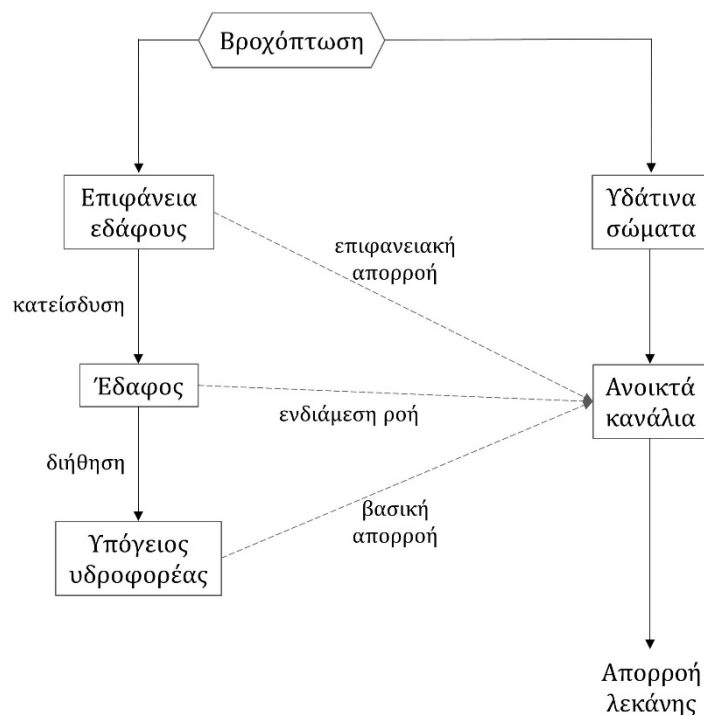
$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i \times A_i)}{A_{total}} \quad (1)$$

όπου \bar{P} είναι η μέση σταθμισμένη βροχόπτωση της λεκάνης απορροής, P_i είναι η καταγεγραμμένη βροχόπτωση κάθε βροχομετρικού σταθμού i , A_i είναι η επιφάνεια του πολυγώνου που περιβάλλει κάθε σταθμό i , n είναι ο αριθμός των βροχογράφων, και A_{total} η συνολική έκταση της λεκάνης απορροής (USDA, 2019).

3.2 Υδρολογικό μοντέλο HEC-HMS

Το υδρολογικό μοντέλο HEC-HMS, που αναπτύχθηκε από το κέντρο υδρολογικής μηχανικής του Σώματος Μηχανικών του Στρατού των ΗΠΑ (U.S. Army Corps of Engineers), δημιουργήθηκε για να προσομοιώνει τις διαδικασίες βροχόπτωσης-απορροής σε δενδριτικές υδρολογικές λεκάνες. Το μοντέλο δύναται να εφαρμοστεί σε ένα ευρύ φάσμα γεωγραφικών περιοχών, επιλύοντας την ευρεία αποστράγγιση της λεκάνης απορροής ποταμών ακολουθούμενη από τη δυνάμενη υδρολογική πλημμύρα, καθώς και την απορροή μικρών αστικών είτε φυσικών λεκανών (Scharffenberg, 2016). Περιλαμβάνει διάφορα μοντέλα, μεταξύ αυτών (i) τα μοντέλα προσομοίωσης της απορροής μεμονωμένων καταιγιδοφόρων γεγονότων, (ii) τα εμπειρικά, που βασίζονται στην παρατήρηση των δεδομένων εισόδου/εξόδου, χωρίς να επιδιώκεται η ρητή αναπαράσταση της διαδικασίας μετατροπής, (iii) τα συγκεντρωτικά, κατά τα οποία οι χωρικές μεταβολές χαρακτηριστικών και διαδικασιών υπολογίζονται κατά μέσο όρο, και (iv) μοντέλα μετρούμενων παραμέτρων, των οποίων οι τιμές μπορούν να προσδιοριστούν από τα χαρακτηριστικά της λεκάνης, είτε μοντέλα προσαρμοσμένων παραμέτρων, των οποίων οι τιμές προκύπτουν από βαθμονόμηση (Ford and Hamilton, 1996). Η απορροή των υδρολογικών λεκανών υπολογίζεται από τα δεδομένα βροχόπτωσης, αφαιρώντας τις απώλειες διήθησης (loss), υπολογίζοντας την επιφανειακή απορροή (transform) και προσθέτοντας τη βασική απορροή (baseflow). Σε λεκάνες με περισσότερες από μία εισροές, περιλαμβάνεται επίσης η προσομοίωση ροής ανοικτού καναλιού για τον υπολογισμό του υδρογραφήματος εξόδου (Scharffenberg,

2016). Η διαδικασία βροχόπτωσης-απορροής που ακολουθήθηκε παρουσιάζεται στην [Εικόνα 3-2](#).



Εικόνα 3-2. Ακολουθούμενη διαδικασία απορροής λεκανών, κατά την προσομοίωση με το HEC-HMS.

Οι μέθοδοι μοντελοποίησης που επιλέχθηκαν για την υδρολογική απόκριση λεκανών έπειτα από μεμονωμένα καταιγιδοφόρα γεγονότα ήταν: (α) το μοντέλο απωλειών SCS Curve Number για τον υπολογισμό των αθροιστικών απωλειών, (β) το μοντέλο Clark Unit Hydrograph για την αναπαράσταση της άμεσης απορροής της λεκάνης μέσω του μετασχηματισμού της κατακρήμνισης που δεν κατεισδύει, (γ) το μοντέλο εκθετικής ύφεσης Recession για τον υπολογισμό της βασικής απορροής της λεκάνης, και (δ) όπου χρειάστηκε, το μοντέλο διόδευσης Muskingum για τον υπολογισμό της ροής ανοικτών αγωγών (Feldman, 2000). Πρόκειται για εμπειρικά, συγκεντρωτικά μοντέλα, κατάλληλα για την προσομοίωση μεμονωμένων καταιγιδοφόρων γεγονότων, έπειτα από βαθμονόμηση των παραμέτρων τους.

3.2.1 Μοντέλο SCS Curve Number μεθόδου απωλειών

Το μοντέλο απωλειών SCS Curve Number είναι μια απλή, σταθερή και καθιερωμένη μέθοδος πρόβλεψης απωλειών, ευρέως αποδεκτή για χρήση (Feldman, 2000). Το μοντέλο εκτιμά την περίσσεια βροχόπτωσης P_e (mm) τη στιγμή t ως συνάρτηση της

αθροιστικής βροχόπτωσης, της εδαφικής κάλυψης, των χρήσεων γης και των συνθηκών πρότερης υγρασίας (USDA, 1986), χρησιμοποιώντας την εξίσωση:

$$P_e = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (2)$$

όπου P (mm) είναι η αθροιστική βροχόπτωση τη στιγμή t και S (mm) είναι η πιθανή μέγιστη κατακράτηση. Η διαφορά ανάμεσα στην αθροιστική περίσσεια βροχόπτωσης στο τέλος μιας περιόδου και στην αρχή της, εκτιμά σταδιακά τα χιλιοστά βροχής που δεν κατεισδύουν στο έδαφος για ένα χρονικό διάστημα.

Οι αρχικές απώλειες I_a (mm) που αντιπροσωπεύουν όλες τις απώλειες πριν από την έναρξη της απορροής, δίδονται από την εμπειρική σχέση:

$$I_a = 0.2S \quad (3)$$

Η πιθανή μέγιστη κατακράτηση S (mm) συσχετίζεται με τα χαρακτηριστικά της λεκάνης μέσω μιας άλλης παραμέτρου, του αριθμού καμπύλης (curve number – CN) (USDA, 1986) με την εξίσωση:

$$S = 25.4 \times \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (4)$$

όπου ο CN [-] είναι μια ευαίσθητη παράμετρος που χρησιμοποιείται στην προσομοίωση μεμονωμένων γεγονότων πλημμύρας, η οποία ενσωματώνει την επίδραση του τύπου εδάφους, των χρήσεων γης και των συνθηκών εδαφικής υγρασίας των προηγούμενων 5 ημερών σε μια λεκάνη απορροής (USDA, 1989). Από πίνακες που δημοσιεύθηκαν από την Soil Conservation Service, οι τιμές του CN για κάθε χρήση γης δίδονται ανά ομάδα εδάφους, κατηγορία υδρολογικών συνθηκών και κανονικές συνθήκες πρότερης υγρασίας (USDA, 1989), και κυμαίνονται από περίπου 30 για διαπερατό έδαφος με υψηλά ποσοστά διήθησης, έως 100 για υδάτινα σώματα (Feldman, 2000).

Τα εδάφη που ανήκουν στον τύπο της ομάδας Α εμφανίζουν μικρή δυνητικότητα απορροής και υψηλά ποσοστά διήθησης ακόμη και όταν διαβρέχονται πλήρως. Αποτελούνται κυρίως από άμμους ή χαλίκια υψηλής αποστραγγιστικής ικανότητας, με μικρές ποσότητες αργίλου, ενώ έχουν υψηλή διαπερατότητα μεταξύ των διακένων τους (USDA, 1989; USDA, 2009). Τα εδάφη της κατηγορίας Δ παρουσιάζουν υψηλή δυνατότητα απορροής με χαμηλό ρυθμό διήθησης όταν διαβρέχονται πλήρως. Αποτελούνται κυρίως από αργίλους με υψηλή δυνατότητα διόγκωσης, εδάφη στα οποία

ο υδροφόρος ορίζοντας είναι μονίμως σε υψηλή στάθμη, και ρηχά εδάφη επάνω από σχεδόν αδιαπέρατο υλικό, ενώ έχουν πολύ χαμηλή διαπερατότητα μεταξύ των διακένων τους (USDA, 1989).

Οι υδρολογικές συνθήκες προσδιορίζουν την επίδραση της κατηγορίας κάλυψης στη διήθηση και απορροή μέσω συνιστωσών όπως η φυτοκάλυψη, η πυκνότητα των καλλιεργειών, η ποσότητα του γρασιδιού και η τραχύτητα της επιφάνειας του εδάφους. Οι κακές υδρολογικές συνθήκες υποδηλώνουν μειωμένη διήθηση και συντελούν στην αύξηση της απορροής, ενώ οι καλές υδρολογικές συνθήκες υποδεικνύουν αυξημένη διήθηση και μειωμένη τάση απορροής (Feldman, 2000).

Οι συνθήκες υγρασίας του εδάφους καθορίζονται από την ποσότητα της βροχόπτωσης των προηγούμενων 5 ημερών και την περίοδο καλλιέργειας, όπως παραθέτει ο Πίνακας 3-1, ορίζοντας την αρχική κατάσταση υγρασίας της λεκάνης πριν από το καταιγιδοφόρο συμβάν ενδιαφέροντος. Οι ξηρές συνθήκες υγρασίας των προηγούμενων 5 ημερών αντιπροσωπεύουν ένα ξηρό έδαφος αλλά όχι σε σημείο μαρασμού, οι κανονικές συνθήκες συνιστούν μέτρια υγρασία του εδάφους, ενώ οι υγρές συνθήκες συνιστούν ένα κορεσμένο έδαφος. Τα εύρη των συνθηκών πρότερης υγρασίας (Σ.Π.Υ.) του εδάφους, που επηρεάζουν τον CN , διαφέρουν σημαντικά μεταξύ της μη καλλιεργητικής και της καλλιεργητικής περιόδου.

Πίνακας 3-1. Βροχόπτωση προηγούμενων 5 ημερών, ανά περιόδους καλλιέργειας (USDA, 1956; Chow et al., 1988).

5 ημερών Συνθήκες Πρότερης Υγρασίας	Μη καλλιεργητική περίοδος	Καλλιεργητική περίοδος
Ξηρές (Τύπος I)	< 12.7 mm	< 35.56 mm
Κανονικές (Τύπος II)	> 12.7 mm και < 27.94 mm	> 35.56 mm και < 53.34 mm
Υγρές (Τύπος III)	> 27.94 mm	> 53.34 mm

Για διαφορετικές χρήσεις γης (LU) και διαφορετικούς τύπους εδάφους (SG), ο CN μιας λεκάνης απορροής προσδιορίζεται αθροίζοντας κάθε CN που αντιστοιχεί σε κανονικές συνθήκες πρότερης υγρασίας (Τύπου II) πολλαπλασιασμένο με το σταθμισμένο ως προς την έκταση επίπεδο στοιχείο χρήσης γης/ομάδας εδάφους, ως εξής:

$$CN_{II} = \frac{\sum_{i=1}^n (A_{i,LU-SG} \times CN_{II,i})}{A_{total}} \quad (5)$$

Οι εξισώσεις υπολογισμού του CN που σχετίζονται με ξηρές συνθήκες (Σ.Π.Υ. Τύπου I) και υγρές συνθήκες (Σ.Π.Υ. Τύπου III) αντίστοιχα (Chow et al., 1988), δίδονται ως εξής:

$$CN_I = \frac{4.2 \times CN_{II}}{10 - (0.058 \times CN_{II})} \quad (6)$$

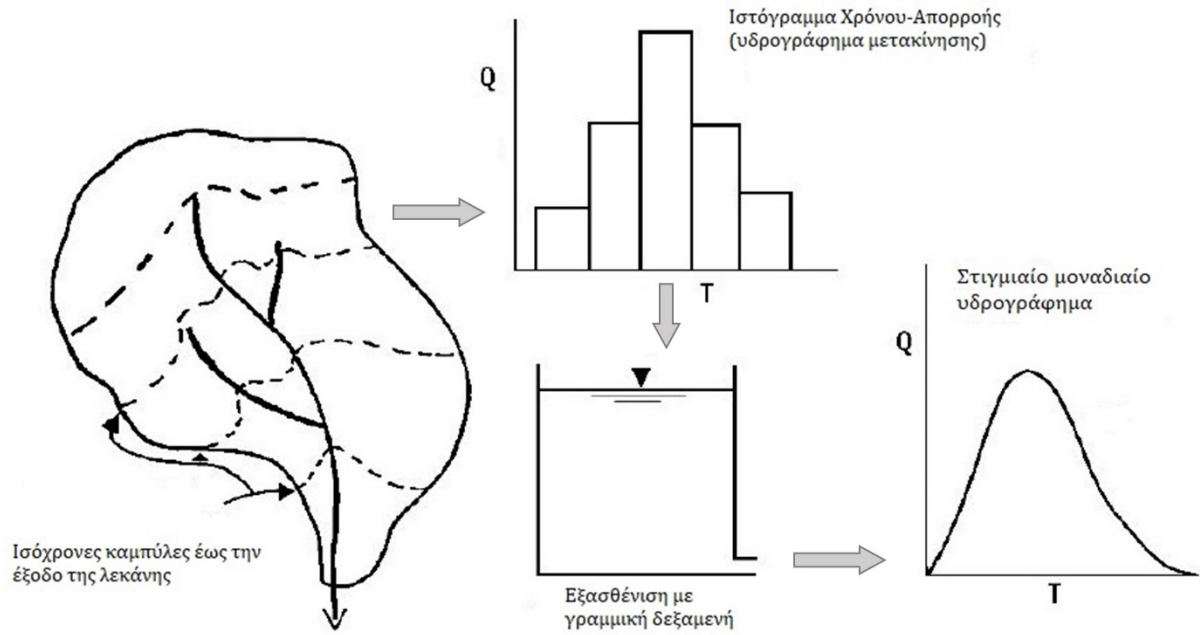
$$CN_{III} = \frac{23 \times CN_{II}}{10 + (0.13 \times CN_{II})} \quad (7)$$

Πέραν του CN , η άλλη παράμετρος που αφορά το μοντέλο SCS Curve Number είναι η % αδιαπερατότητα. Η συνολική % αδιαπερατότητα μιας λεκάνης υπολογίζεται αθροίζοντας την % αδιαπερατότητα κάθε μίας χρήσης γης πολλαπλασιασμένη με τη σταθμισμένη έκταση έκαστης χρήσης γης, ως εξής:

$$\%Ολική \text{ Αδιαπερατότητα} = \frac{\sum_{i=1}^n (A_{i,LU} \times \%Αδιαπερατότητα_i)}{A_{total}} \quad (8)$$

3.2.2 Μοντέλο Clark Unit Hydrograph μεθόδου άμεσης απορροής

Το μοντέλο Clark Unit Hydrograph είναι ένα συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα (UH) το οποίο συσχετίζει τις παραμέτρους των προς επίλυση εξισώσεων για τον υπολογισμό του μοναδιαίου υδρογραφήματος με τα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής. Το μοντέλο βασίζεται σε έναν οιονεί-εννοιολογικό υπολογισμό της αποθήκευσης της λεκάνης. Οι δύο κρίσιμες διαδικασίες που αναπαριστώνται για το μετασχηματισμό της περίσσειας κατακρήμνισης σε απορροή, είναι: (i) η μετακίνηση (translation) της περίσσειας βροχόπτωσης που δεν κατεισδύει από το σημείο εισόδου της έως την έξοδο της λεκάνης μέσω της απορροής, και (ii) η εξασθένιση (attenuation) του μεγέθους της απορροής καθώς η περίσσεια βροχόπτωσης αποθηκεύεται στην υδρολογική λεκάνη (Feldman, 2000). Η θεώρηση του μοντέλου βασίζεται στη μοναδιαία περίσσεια βροχόπτωσης που εμφανίζεται στιγμιαία στη λεκάνη. Το υδρογράφημα μετακίνησης μπορεί να προκύψει προσδιορίζοντας από μια σχέση χρόνου-επιφάνειας την έκταση της λεκάνης που συμβάλλει στην απορροή στην έξοδο κατά τη διάρκεια κάθε χρονικού βήματος μετά από τη στιγμιαία αιχμή της μοναδιαίας περίσσειας. Ο χρόνος κατά τον οποίο το βρόχινο νερό θα φτάσει στην έξοδο, μπορεί να προσδιοριστεί από τις ισόχρονες καμπύλες. Η δρομολόγηση του υδρογραφήματος μετακίνησης στην έξοδο της λεκάνης γίνεται μέσω μιας γραμμικής δεξαμενής, που αναπαριστά τη βραχυπρόθεσμη αποθήκευση σε όλη τη λεκάνη (έδαφος, επιφάνεια και κανάλια ροής) και επιδρά στην εξασθένιση της μετακίνησης. Η προκύπτουσα εκροή αντιπροσωπεύει το στιγμιαίο μοναδιαίο υδρογράφημα της λεκάνης (USACE, 1994). Οι διαδικασίες του μοναδιαίου υδρογραφήματος Clark φαίνονται στην [Εικόνα 3-3](#).



Εικόνα 3-3. Διαδικασίες μοντέλου Clark Unit Hydrograph.

Το μοντέλο της γραμμικής δεξαμενής ξεκινά με την εξίσωση συνέχειας, ως:

$$\frac{dS}{dt} = I_t - O_t \quad (9)$$

όπου dS/dt είναι ο ρυθμός μεταβολής της ποσότητας νερού στην αποθήκευση τη στιγμή t , I_t είναι η μέση εισροή στην αποθήκευση τη στιγμή t , και O_t είναι η εκροή από την αποθήκευση τη στιγμή t . Τη στιγμή t , η αποθήκευση S_t σχετίζεται με την εκροή ως:

$$S_t = RO_t \quad (10)$$

όπου R είναι ο συντελεστής αποθήκευσης για γραμμική δεξαμενή. Με συνδυασμό και επίλυση των εξισώσεων προκύπτει η εκροή O_t ως εξής:

$$O_t = \frac{\Delta t}{R + 0.5\Delta t} I_t + \left(1 - \frac{\Delta t}{R + 0.5\Delta t}\right) O_{t-1} \quad (11)$$

όπου Δt είναι το χρονικό βήμα, και O_{t-1} είναι η εκροή από την αποθήκευση την προηγούμενη στιγμή $t-1$ (Feldman, 2000).

Οι παράμετροι που αφορούν το μοντέλο αναπαράστασης της άμεσης απορροής Clark Unit Hydrograph, είναι: (α) ο χρόνος συγκέντρωσης T_c (h) που εκφράζει τον απαιτούμενο χρόνο ώστε το κατακρημνισμένο νερό από το πιο απομακρυσμένο σημείο της λεκάνης να φτάσει στην έξοδο αυτής (USDA, 2010), και χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη του υδρογραφήματος μετακίνησης, και (β) ο συντελεστής R (h) βραχύβιας αποθήκευσης της περίσσειας βροχόπτωσης στην υδρολογική λεκάνη έως την απορροή

της στην έξοδο (Feldman, 2000), και χρησιμοποιείται στη γραμμική δεξαμενή για τον υπολογισμό της επίδρασης της αποθήκευσης (USACE, 1994). Ο χρόνος συγκέντρωσης T_c μπορεί να καθορισθεί είτε με βαθμονόμηση (Feldman, 2000) είτε με εμπειρικές εξισώσεις. Κάποιες από τις εμπειρικές εξισώσεις είναι αυτές του Giandotti (1934), του Kirpich (1940), των Simas-Hawkins (Simas and Hawkins, 2002; Fang et al., 2005), των Johnstone-Cross (Johnstone and Cross, 1949), του Williams (1922), και του Carter (1961). Διάφορες μελέτες έχουν επαληθεύσει ότι ο όρος $R/(T_c+R)$ μιας λεκάνης απορροής παραμένει σταθερός, με εύρος τιμών από 0.1, στην περίπτωση μιας αστικής λεκάνης απορροής, έως 0.7, στην περίπτωση μιας ελώδους και επίπεδης λεκάνης απορροής (USACE, 1994).

3.2.3 Μοντέλο εκθετικής ύφεσης Recession μεθόδου βασικής απορροής

Το μοντέλο εκθετικής ύφεσης Recession αναπαριστά τη βασική απορροή (Chow et al., 1988) εξηγώντας την αποστράγγιση μιας υδρολογικής λεκάνης από τη φυσική αποθήκευση (Linsley et al., 1982). Η εξίσωση υπολογισμού της βασικής απορροής Q_t ανά πάσα χρονική στιγμή t καθορίζεται ως εξής:

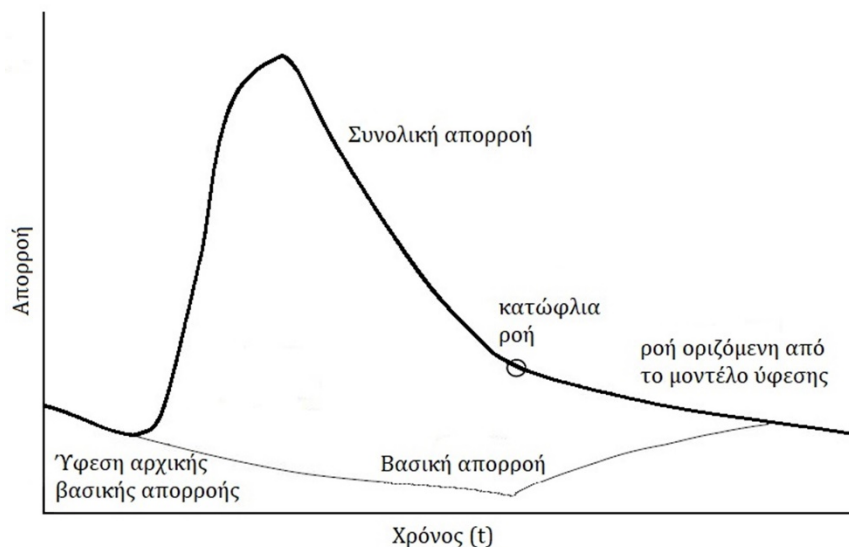
$$Q_t = Q_0 k^t \quad (12)$$

όπου Q_0 είναι η αρχική βασική απορροή τη στιγμή t_0 , και k είναι μια εκθετική σταθερά φθοράς που εκφράζει τη μείωση της ροής με το χρόνο.

Οι παράμετροι που αφορούν το μοντέλο εκθετικής ύφεσης είναι: (α) η αρχική απορροή ανά επιφάνεια Q_0 ($\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$), (β) η σταθερά ύφεσης k , και (γ) μια κατώφλια μεταβλητή που ορίζεται ως η αναλογία έως τη βασική απορροή αιχμής. Η αρχική απορροή ανά επιφάνεια αφορά τη βασική απορροή στην αρχή της προσομοίωσης. Η σταθερά ύφεσης εκφράζει τη μείωση του ρυθμού βασικής απορροής μεταξύ δύο γεγονότων βροχής, και προσδιορίζεται ως ο λόγος της βασικής απορροής σε μια συγκεκριμένη στιγμή προς τη βασική απορροή της προηγούμενης ημέρας (Scharffenberg, 2016). Η σταθερά ύφεσης λαμβάνει τιμές μεταξύ 0.3, στην περίπτωση μικρών λεκανών, και 0.8, προκειμένου για μεγάλες λεκάνες απορροής (Pilgrim and Cordery, 1993). Η κατώφλια παράμετρος της αναλογίας έως τη βασική απορροή αιχμής, κατά τη διάρκεια ενός γεγονότος βροχής, επαναφέρει τη βασική απορροή στην αρχική της τιμή, και συμβαίνει όταν η τρέχουσα βασική απορροή διαιρεμένη με τη μέγιστη βασική απορροή μειώνεται στην καθορισμένη

τιμή (Scharffenberg, 2016). Οι παράμετροι του μοντέλου δύνανται να καθορισθούν έπειτα από βαθμονόμηση.

Το μοντέλο εκθετικής ύφεσης εφαρμόζεται τόσο στην αρχή της προσομοίωσης ενός βροχοπτώτικού συμβάντος αλλά και στη συνέχεια, λόγω της καθυστερημένης υπόγειας απορροής που οδηγείται στα κανάλια της λεκάνης. Η συνολική απορροή υπολογίζεται ως το άθροισμα της βασικής απορροής και της άμεσης επιφανειακής απορροής. Έπειτα από την αιχμή της άμεσης απορροής, μια κατώφλια ροή καθορίζει τον χρόνο κατά τον οποίο το μοντέλο ύφεσης θα προσδιορίσει τη συνολική απορροή. Οι μεταγενέστερες συνολικές απορροές εκτιμώνται με το Q_0 να είναι ίσο με την καθορισμένη κατώφλια ροή (Feldman, 2000). Η επίδραση της βασικής απορροής στο υδρογράφημα φαίνεται στην [Εικόνα 3-4](#).



Εικόνα 3-4. Απεικόνιση της επίδρασης της βασικής απορροής στη συνολική απορροή.

3.2.4 Μοντέλο Muskingum μεθόδου ροής ανοικτού αγωγού

Το μοντέλο διόδευσης Muskingum ικανοποιεί την επαναλαμβανόμενη σύνδεση μεταξύ αποθήκευσης και εκροής που υφίσταται στα ρέματα. Η αποθήκευση προσομοιώνεται ως το άθροισμα της πρισματικής και της σφηνοειδούς αποθήκευσης. Η πρισματική αποθήκευση (prism) αναφέρεται στην αποθήκευση κάτω από την επιφάνεια του νερού κατά μήκος καναλιού σταθερής ροής. Η σφηνοειδής αποθήκευση (wedge) αναφέρεται στην πρόσθετη αποθήκευση κάτω από την επιφάνεια του πλημμυρικού κύματος. Κατά την άνοδο του πλημμυρικού κύματος, η εισροή είναι μεγαλύτερη της εκροής, προκαλώντας θετική σφηνοειδή αποθήκευση, η οποία προστίθεται στην πρισματική αποθήκευση. Απ' την άλλη, κατά την ύφεση του κύματος, η εκροή είναι μεγαλύτερη της

εισροής, παράγοντας αρνητική σφηνοειδή αποθήκευση, η οποία αφαιρείται από την πρισματική αποθήκευση (USACE, 1994; Chow et al., 1988). Το μοντέλο χρησιμοποιεί μια απλή προσέγγιση πεπερασμένων διαφορών της εξίσωσης συνέχειας, ως εξής:

$$\left(\frac{I_{t-1} + I_t}{2}\right) - \left(\frac{O_{t-1} + O_t}{2}\right) = \left(\frac{S_t - S_{t-1}}{\Delta t}\right) \quad (13)$$

όπου I_{t-1} και I_t είναι οι εισροές στο κανάλι τις στιγμές $t-1$ και t αντίστοιχα, O_{t-1} και O_t είναι οι εκροές από το κανάλι τις στιγμές $t-1$ και t αντίστοιχα, S_t και S_{t-1} είναι η αποθήκευση στο κανάλι τις στιγμές t και $t-1$ αντίστοιχα, και Δt είναι το χρονικό βήμα. Η αποθήκευση τη στιγμή t ορίζεται ως μια γραμμική συνάρτηση σταθμισμένης εισροής και εκροής, ως:

$$S_t = S_{prism} + S_{wedge} = KO_t + KX(I_t - O_t) = K[XI_t + (1 - X)O_t] \quad (14)$$

όπου η παράμετρος Muskingum K (h) εκφράζει το χρόνο κατά τον οποίο το πλημμυρικό κύμα διαδίδεται κατά μήκος του αγωγού διόδευσης (Scharffenberg, 2016), και η παράμετρος Muskingum X είναι ένας αδιάστατος παράγοντας στάθμισης εισροών και εκροών. Η Muskingum X κυμαίνεται από 0, στην περίπτωση μέγιστης εξασθένησης του πλημμυρικού κύματος κατά την οποία η καμπύλη του επιπεδώνεται, και αναπαριστά το μοντέλο γραμμικής δεξαμενής, έως 0.5, στην περίπτωση μη εξασθένησης του πλημμυρογραφήματος κατά τη μετακίνησή του στο κανάλι (Feldman, 2000). Μια τελευταία παράμετρος του μοντέλου είναι ο αριθμός των ρεμάτων του καναλιού (Scharffenberg, 2016), η οποία δεν προκαλεί σημαντικές διαφορές στο υδρογράφημα στην έξοδο της υπολεκάνης, ανεξάρτητα εάν το σύστημα διόδευσης του ανοικτού αγωγού αποτελείται από ένα ή περισσότερα ρέματα (Perumal, 1994).

3.3 Υδρολογικό μοντέλο HBV-light

Το υδρολογικό μοντέλο HBV-light, που αναπτύχθηκε από το Πανεπιστήμιο της Ζυρίχης, είναι ένα εννοιολογικό ημικαταναμεμημένο μοντέλο, ικανό να προσομοιώνει την απορροή μιας υδρολογικής λεκάνης που αποτελείται από πολλές υπολεκάνες. Το μοντέλο δύναται να προσομοιώσει την απορροή μεμονωμένων καταιγιδόφορων γεγονότων εισάγοντας δεδομένα βροχόπτωσης, θερμοκρασίας αέρα και δυνητικής εξάτμισης (Seibert and Vis, 2012). Το αρχικό μοντέλο, Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning (HBV) αναπτύχθηκε πρωτίστως από το Σουηδικό Μετεωρολογικό και Υδρολογικό Ινστιτούτο (SMHI) (Bergström, 1976; Bergström, 1992). Αν και το μοντέλο HBV-light είναι μια

σχετικά πρόσφατη έκδοση, η ερευνητική κοινότητα το χρησιμοποιεί ήδη εκτεταμένα για την πρόβλεψη πλημμυρών και για την παραγωγή έγκυρων υδρολογικών αποτελεσμάτων (Steele-Dunne et al., 2008; Radchenko et al., 2014; Finger et al., 2015; Westerberg and Birkel, 2015; Poméon et al., 2017; Sucozhañay and Célleri, 2018). Η έκδοση HBV-light χρησιμοποιεί μια περίοδο αρχικοποίησης, έτσι ώστε οι μεταβλητές κατά τις αρχικές συνθήκες να μεταβούν προοδευτικά στις σωστές τους τιμές σύμφωνα με τα μετεωρολογικά δεδομένα και τις βαθμονομημένες παραμέτρους (Seibert and Vis, 2012; Seibert, 2005). Μία υδρολογική λεκάνη, εκτός από το ότι μπορεί να διαμερίζεται σε διάφορες υπολεκάνες, δύναται επίσης να χωριστεί σε πολλαπλές υψομετρικές ζώνες—με μέσα υψόμετρα—οι οποίες αντιπροσωπεύουν την επιφάνεια διαφορετικών κατηγοριών βλάστησης/χρήσεων γης με τη μορφή ποσοστών.

Το μοντέλο χρησιμοποιεί τέσσερις ρουτίνες για την υδρολογική προσομοίωση μιας λεκάνης: (α) τη ρουτίνα χιονιού, που εκφράζει τη συσσώρευση χιονόπτωσης και την τήξη του χιονιού, (β) τη ρουτίνα εδαφικής υγρασίας, που αντιπροσωπεύει την πραγματική εξάτμιση και την αναπλήρωση των υπόγειων υδάτων ως συναρτήσεις της χωρητικότητας αποθήκευσης νερού για κάθε υψομετρική ζώνη ή κατηγορία βλάστησης, (γ) τη ρουτίνα απόκρισης, που υπολογίζει την απορροή ως συνάρτηση της στάθμης των αποθηκευμένων υπόγειων υδάτων, και (δ) τη ρουτίνα διόδευσης, που προσομοιώνει τη διαδρομή της απορροής στην έξοδο της υδρολογικής λεκάνης μέσω μιας τριγωνικής συνάρτησης στάθμισης (Seibert and Vis, 2012).

3.3.1 Ρουτίνα χιονιού

Στη ρουτίνα χιονιού, η κατακρήμνιση διαφοροποιείται από χιόνι σε βροχή εφόσον η θερμοκρασία αέρα είναι κάτω ή επάνω από ένα κατώφλι θερμοκρασίας T_T (°C). Το T_T θα πρέπει συνήθως να είναι κοντά στους 0 °C. Η συσσώρευση χιονόπτωσης πολλαπλασιάζεται με ένα συντελεστή διόρθωσης της χιονόπτωσης, τον $SFCF$ [-], που αντισταθμίζει τα σφάλματα κατά την εκτίμηση της χιονόπτωσης από το μοντέλο λόγω της εξάτμισης νερού από το συσσωρευμένο χιόνι.

Η τήξη του χιονιού, $melt$ (mm/Δt), υπολογίζεται με μία μέθοδο που χρησιμοποιεί έναν συντελεστή σύνδεσης της θερμοκρασίας με το χρονικό βήμα (degree-time), τον $CFMAX$ (mm/Δt °C) (Seibert and Vis, 2012; Seibert, 2005), σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$melt = CFMAX \cdot (T_{(t)} - TT) \quad (15)$$

όπου $T_{(t)}$ είναι η θερμοκρασία αέρα. Για ωριαίο βήμα δεδομένων, ο $CFMAX$ κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 0.0625 και 0.167 mm/h °C (Seibert, 2005). Ο συντελεστής $CFMAX$ δύναται να παρουσιάζει μια εποχιακή μεταβλητότητα, που εκφράζεται από το συντελεστή SP . Η συνήθης τιμή του SP είναι 1.

Το λιωμένο χιόνι και η βροχή διατηρούνται εντός του στρώματος χιονιού μέχρι να ξεπεράσουν ένα ορισμένο κλάσμα του ισοδύναμου νερού του χιονιού, που εκφράζεται από το συντελεστή κατακράτησης νερού CWH [-]. Η συνήθης τιμή του CWH είναι ίση με 0.1. Εφόσον η θερμοκρασία πέσει κάτω από το κατώφλι TT , τότε η ποσότητα του λιωμένου χιονιού που καταψύχεται εκ νέου μέσα στο συσσωρευμένο χιόνι, *refreezing melt* (mm/Δt), υπολογίζεται χρησιμοποιώντας έναν συντελεστή εκ νέου κατάψυξης του νερού μέσα στο στρώμα χιονιού, τον CFR [-] (Seibert and Vis, 2012; Seibert, 2005), κατά την εξίσωση:

$$refreezing\ melt = CFR \cdot CFMAX \cdot (TT - T_{(t)}) \quad (16)$$

Η συνήθης τιμή του CFR είναι ίση με 0.05 (Seibert, 2005).

3.3.2 Ρουτίνα εδαφικής υγρασίας

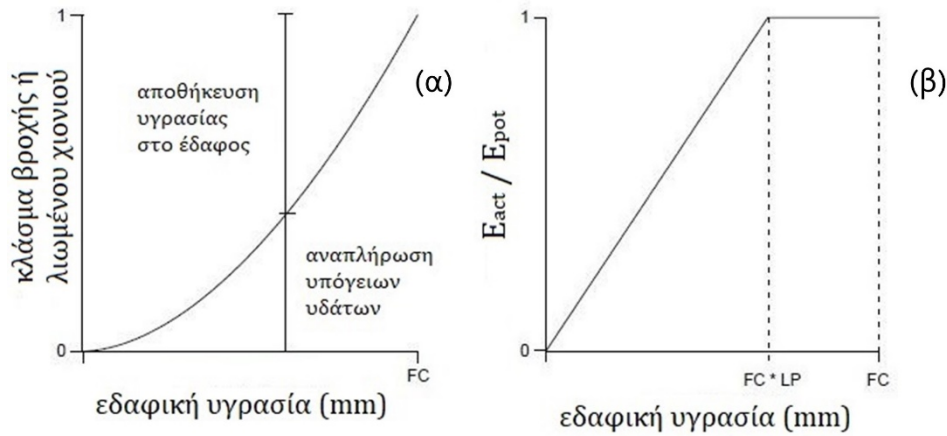
Στη ρουτίνα εδαφικής υγρασίας, το άθροισμα της βροχόπτωσης και του λιωμένου χιονιού σε ένα συγκεκριμένο χρονικό βήμα $P_{(t)}$ (mm/Δt) διαχωρίζονται σε νερό που προστίθεται στο έδαφος και σε νερό που αναπληρώνει τα υπόγεια ύδατα *recharge* (mm/Δt) με βάση τη σχέση της τρέχουσας περιεκτικότητας του εδάφους σε νερό $SM_{(t)}$ (mm) και της μέγιστης περιεκτικότητας του εδάφους σε νερό FC (mm), όπως φαίνεται στην εξίσωση:

$$\frac{recharge}{P_{(t)}} = \left(\frac{SM_{(t)}}{FC} \right)^{BETA} \quad (17)$$

όπου $BETA$ [-] μια παράμετρος που ρυθμίζει τη σχετική συμβολή της βροχής ή του λιωμένου χιονιού στην απορροή (Seibert and Vis, 2012; Seibert, 2005). Οι μεταβλητές FC και $BETA$ θα πρέπει να είναι μεγαλύτερες από το μηδέν (Seibert, 2005). Η πραγματική εξάτμιση E_{act} (mm) από το έδαφος ισούται με τη δυνητική εξάτμιση E_{pot} (mm) εφόσον ο λόγος $SM_{(t)}/FC$ είναι μεγαλύτερος από το γινόμενο $LP \cdot FC$, ενώ μειώνεται γραμμικά όταν ο λόγος $SM_{(t)}/FC$ είναι μικρότερος από αυτή την τιμή, κατά την εξίσωση:

$$E_{act} = E_{pot} \cdot \min\left(\frac{SM_{(t)}}{FC \cdot LP}, 1\right) \quad (18)$$

όπου LP [-] είναι μια τιμή κατωφλίου κατά την οποία η πραγματική εξάτμιση μεταβαίνει σε δυνητική εξάτμιση (Seibert and Vis, 2012; Seibert, 2005). Τα όρια τιμών για το LP είναι 0 και 1 (Seibert, 2005). Η σύνοψη των διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στη ρουτίνα εδαφικής υγρασίας του μοντέλου φαίνονται στην [Εικόνα 3-5](#).



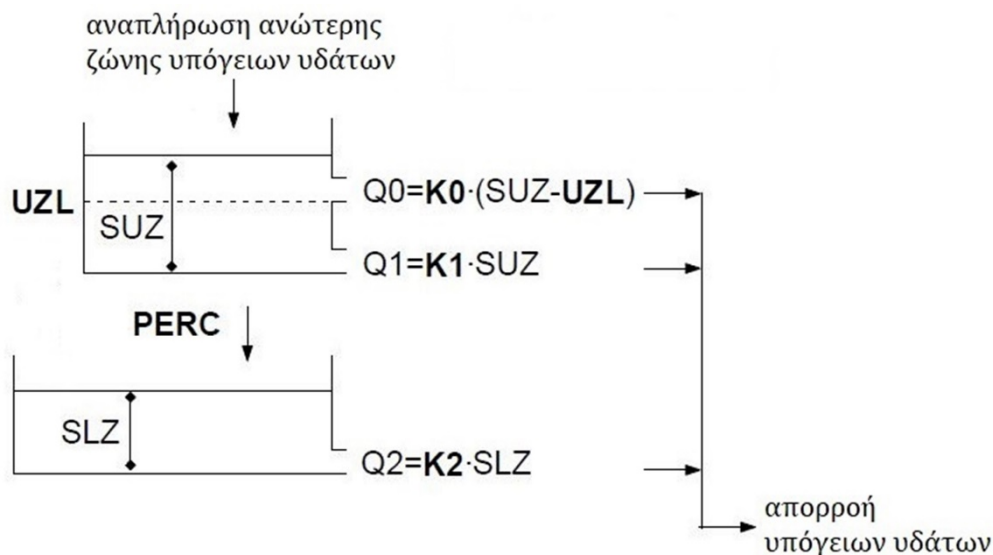
Εικόνα 3-5. (α) Συνεισφορά της βροχής ή του λιωμένου χιονιού στην αποθήκευση νερού στο έδαφος και στην ανώτερη ζώνη των υπόγειων υδάτων, (β) γραμμική μείωση της δυνητικής εξάτμισης ανάλογα με την περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό.

3.3.3 Ρουτίνα απόκρισης

Στη ρουτίνα απόκρισης, η αναπλήρωση υπόγειων υδάτων (recharge) προστίθεται στην ανώτερη ζώνη των υπογείων υδάτων SUZ (mm). Η παράμετρος $PERC$ (mm/Δt) καθορίζει το μέγιστο ρυθμό διήθησης από την ανώτερη προς την κατώτερη ζώνη των υπόγειων υδάτων SLZ (mm). Η απορροή από τις ζώνες υπόγειων υδάτων $Q_{GW(t)}$ (mm/Δt) υπολογίζεται ως το άθροισμα δύο ή τριών γραμμικών εξισώσεων εκροής ανάλογα με το εάν η αποθήκευση στην κατώτερη ζώνη (SUZ) είναι πάνω από μια κατώτατη τιμή ποσότητας των υπόγειων υδάτων UZL (mm) ή όχι, σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$Q_{GW(t)} = K_2 \cdot SLZ + K_1 \cdot SUZ + K_0 \cdot \max(SUZ - UZL, 0) \quad (19)$$

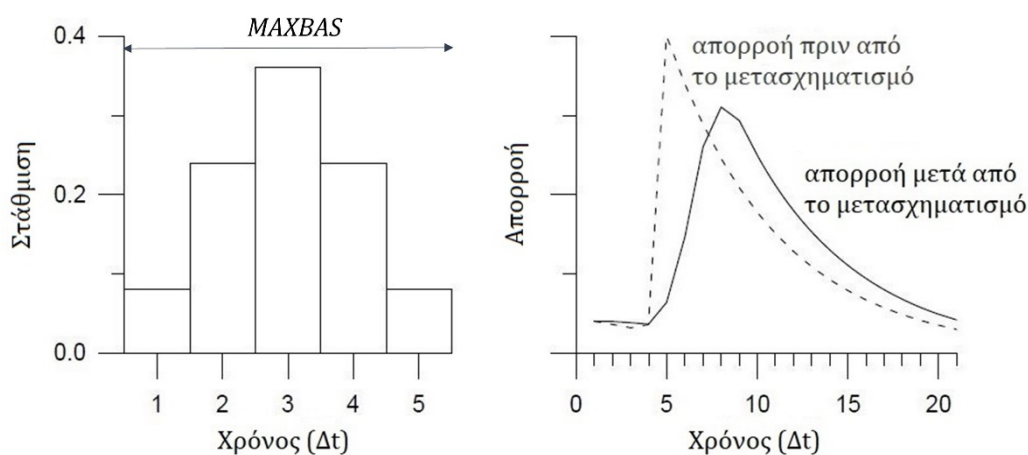
όπου K_0 , K_1 και K_2 (1/Δt) είναι οι συντελεστές ύφεσης για την ανώτερη, ενδιάμεση, και κατώτερη ζώνη υπόγειων υδάτων, αντίστοιχα (Seibert and Vis, 2012; Seibert, 2005). Η αποθήκευση στην ανώτερη ζώνη υπόγειων υδάτων (SUZ) δεν έχει ανώτερο όριο, ενώ το γινόμενο $K_2 \cdot SLZ$ δεν υπερβαίνει ποτέ το $PERC$. Όλοι οι συντελεστές ύφεσης λαμβάνουν τιμές από μηδέν έως μικρότερες από ένα (Seibert, 2005). Οι διεργασίες στη ρουτίνα απόκρισης του μοντέλου φαίνονται στην [Εικόνα 3-6](#).



Εικόνα 3-6. Αναπαράσταση της ρουτίνας απόκρισης.

3.3.4 Ρουτίνα διόδευσης

Στη ρουτίνα διόδευσης, η απορροή από τις ζώνες υπόγειων υδάτων $Q_{GW(t)}$ μετασχηματίζεται με μια ισόπλευρη τριγωνική συνάρτηση στάθμισης, ώστε να υπολογιστεί η προσομοιωμένη απορροή (mm/ Δt). Ο μετασχηματισμός γίνεται μέσω της παραμέτρου *MAXBAS* (Δt) που καθορίζει το χρόνο διόδευσης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-7 (Seibert and Vis, 2012; Seibert, 2005). Η παράμετρος *MAXBAS* θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από ένα χρονικό βήμα προσομοίωσης (Seibert, 2005).



Εικόνα 3-7. Επίδραση της συνάρτησης μετασχηματισμού στην προσομοιωμένη απορροή.

3.4 Βαθμονόμηση

Για τη λεκάνη χωρίς καταγεγραμμένη απορροή, για τη βαθμονόμηση υδρολογικού μοντέλου, χρησιμοποιήθηκαν έμμεσα στοιχεία πεδίου που συλλέχθηκαν μετά την πλημμύρα από την πληγείσα περιοχή.

Για τη λεκάνη που υπήρχαν δεδομένα μετρήσεων απορροής, κατά τη διαδικασία βαθμονόμησης δύο υδρολογικών μοντέλων, χρησιμοποιήθηκαν δύο δείκτες ώστε να ελεγχθεί η απόκλιση των προσομοιωμένων αποτελεσμάτων από τις καταγεγραμμένες τιμές τους. Ο πρώτος δείκτης που χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να μετρηθεί η απόδοση των μοντέλων ήταν ο συντελεστής συνέπειας Nash–Sutcliffe (NSE) (Nash and Sutcliffe, 1970), ο οποίος δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_{obs,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (20)$$

όπου $Q_{sim,i}$ (m³/s) είναι οι προσομοιωμένες τιμές απορροής στο χρονικό διάστημα i , $Q_{obs,i}$ (m³/s) είναι οι καταγεγραμμένες τιμές απορροής στο χρονικό διάστημα i , $\overline{Q_{obs}}$ (m³/s) είναι η μέση καταγεγραμμένη τιμή απορροής, και n είναι ο αριθμός των χρονικών βημάτων. Για ροή ρεμάτων σε υδρολογικές λεκάνες, σε ημερήσια χρονική κλίμακα, τιμές του Nash-Sutcliffe μεγαλύτερες από 0.8 είναι πολύ καλές, από 0.7 έως και 0.8 είναι καλές, από 0.5 έως και 0.7 είναι ικανοποιητικές, ενώ μικρότερες ή ίσες με 0.5 είναι μη ικανοποιητικές (Moriassi et al., 2015).

Ο δεύτερος δείκτης που χρησιμοποιήθηκε για να ελεγχθεί η απόδοση των μοντέλων ήταν το σφάλμα συνολικού όγκου βροχής γεγονότος, και δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$diff(V)[\%] = \frac{V_{sim} - V_{obs}}{V_{obs}} \times 100\% \quad (21)$$

όπου V_{sim} (m³) και V_{obs} (m³) είναι ο συνολικός προσομοιωμένος και καταγεγραμμένος όγκος απορροής, αντίστοιχα, κάθε εξεταζόμενου γεγονότος. Το μοντέλο αποδίδει καλύτερα όταν το % σφάλμα συνολικού όγκου βροχής ελαχιστοποιείται.

Ένας άλλος δείκτης απόδοσης των μοντέλων είναι το phase error, ήτοι η διαφορά χρόνου εμφάνισης της προσομοιωμένης και καταγεγραμμένης απορροής αιχμής, του οποίου η ελαχιστοποίηση ελήφθη υπόψη κατά τη βαθμονόμηση των παραμέτρων των υδρολογικών μοντέλων και στις δύο λεκάνες απορροής.

3.5 Υδραυλικό μοντέλο HEC-RAS

3.5.1 Μονοδιάστατη (1D) μη μόνιμη ροή

Το υδραυλικό μοντέλο 1D HEC-RAS, που αναπτύχθηκε από το κέντρο υδρολογικής μηχανικής του Σώματος Μηχανικών του Στρατού των ΗΠΑ (U.S. Army Corps of Engineers), είναι κατάλληλο για την πραγματοποίηση υδραυλικών υπολογισμών μονοδιάστατης μη μόνιμης ροής φυσικών καναλιών (Brunner, 2016). Ως μη μόνιμη ροή σε ένα ανοικτό κανάλι χαρακτηρίζεται η ροή κατά την οποία το βάθος ροής μεταβάλλεται συναρτήσει του χρόνου. Οι πλημμύρες είναι τυπικό παράδειγμα μη μόνιμης ροής, στις οποίες η στάθμη ροής μεταβάλλεται ξαφνικά (Chow, 1959). Η συνιστώσα προσομοίωσης μη μόνιμης ροής του μοντέλου HEC-RAS δύναται να προσομοιώνει 1D μη μόνιμη ροή μέσω ενός πλήρους δικτύου ανοικτών καναλιών, εκτελώντας υπολογισμούς υποκρίσιμης, υπερκρίσιμης και μικτού καθεστώτος ροής. Οι υδραυλικοί υπολογισμοί δύνανται, μεταξύ άλλων, να πραγματοποιηθούν σε διατομές και γέφυρες (Brunner and CEIWR-HEC, 2016b).

Βασικά βήματα για την εκτέλεση 1D προσομοίωσης μη μόνιμης ροής με το HEC-RAS, είναι: (i) γεωαναφορά μοντέλου, εφόσον πρόκειται να γίνει χαρτογράφηση των πλημμυρικών αποτελεσμάτων, (ii) εισαγωγή γεωμετρικών δεδομένων, όπως ποτάμιο σύστημα, συμβολές ρεμάτων, διατομές, γέφυρες, (iii) καθορισμός των συντελεστών τραχύτητας Manning n στις διατομές, (iv) εισαγωγή δεδομένων για τις οριακές συνθήκες, όπως υδρογραφήματα, κανονικό βάθος, κλπ., στις διατομές που αποτελούν εξωτερικά όρια του συστήματος, καθώς και δεδομένων για τις αρχικές συνθήκες στην έναρξη της προσομοίωσης μη μόνιμης ροής, (v) καθορισμός των υπολογιστικών επιλογών και ρυθμίσεων για 1D ροή, (vi) εκτέλεση της προσομοίωσης μη μόνιμης ροής, και (vii) ανασκόπηση των 1D αποτελεσμάτων (Brunner and CEIWR-HEC, 2020b).

3.5.2 Εξισώσεις υδροδυναμικής για 1D μη μόνιμη ροή

Οι αρχές που διέπουν τη ροή νερού σε ένα ρέμα είναι η διατήρηση της μάζας (συνέχεια) και η διατήρηση της ορμής, οι οποίες εκφράζονται μαθηματικά με τις μερικές διαφορικές εξισώσεις της συνέχειας και της ορμής, αντίστοιχα. Η διατήρηση της μάζας για έναν όγκο ελέγχου ορίζει ότι ο καθαρός ρυθμός ροής στον όγκο είναι ίσος με τον ρυθμό μεταβολής της αποθήκευσης εντός του όγκου (Brunner, 2016). Η τελική μορφή της εξίσωσης της συνέχειας για 1D μη μόνιμη, μεταβαλλόμενη ροή δίδεται ως εξής:

$$\frac{\partial A_T}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_L = 0 \quad (22)$$

όπου A_T (m²) είναι η συνολική επιφάνεια της πλημμύρας, Q (m³/s) είναι η συνολική ροή ως συνάρτηση της απόστασης x κατά μήκος του καναλιού, και του χρόνου t , και q_L (m²/s) είναι η πλευρική εισροή ανά μονάδα μήκους (Brunner, 2016).

Η διατήρηση της ορμής για έναν όγκο ελέγχου εκφράζεται με το 2^ο νόμο του Νεύτωνα, υποδεικνύοντας ότι ο καθαρός ρυθμός ορμής που εισέρχεται στον όγκο αθροιζόμενος με όλες τις εξωτερικές δυνάμεις που ασκούνται στον όγκο είναι ίσος με το ρυθμό συσσώρευσης της ορμής (Brunner, 2016). Η τελική μορφή της εξίσωσης ορμής δίδεται ως εξής:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QV}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial z}{\partial x} + S_f \right) = 0 \quad (23)$$

όπου Q (m³/s) είναι η συνολική ροή ως συνάρτηση της απόστασης x και του χρόνου t , V (m/s) είναι η ταχύτητα, g (m/s²) είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας, A (m²) είναι η συνολική επιφάνεια της πλημμύρας, $\partial z / \partial x$ [-] είναι η κλίση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού, και S_f [-] είναι ο ρυθμός απωλειών λόγω τριβής (Brunner, 2016).

3.5.3 Αριθμητικές μέθοδοι επίλυσης εξισώσεων 1D μη μόνιμης ροής

Έως και την έκδοση 5.0 του HEC-RAS, η επίλυση των 1D μερικών διαφορικών εξισώσεων μη μόνιμης ροής επιτυγχανόταν μέσω ενός άρρητου σχήματος πεπερασμένων διαφορών με χρήση ενός skyline/gaussian μειωτικού επιλυτή μήτρας. Για δενδριτικά συστήματα ποταμών, ο skyline επιλυτής μήτρας είναι γενικά ταχύς. Επίσης, το άρρητο σχήμα των πεπερασμένων διαφορών είναι αποτελεσματικό στην περίπτωση δύο διατομών που είναι πολύ κοντά μεταξύ τους, καθώς οι 1D εξισώσεις υπολογίζουν τη διαφοροποίηση στη στάθμη του νερού και στην ταχύτητα, και όχι στον όγκο, επομένως δεν υπάρχει περιορισμός στη χρήση μικρού ή μεγάλου υπολογιστικού χρονικού βήματος. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η επίλυση των 1D εξισώσεων με το σχήμα των πεπερασμένων διαφορών έχει κάποια μειονεκτήματα, όπως: (i) για εξαιρετικά ταχέως αναπτυσσόμενα υδρογραφήματα, το μοντέλο δύναται να σταθεροποιηθεί με δυσκολία, (ii) το μικτό καθεστώς ροής γίνεται προσεγγιστικά, και (iii) στην περίπτωση συμβολής υδατορεμάτων, δε μεταφέρεται ορμή (Brunner and CEIWR-HEC, 2020b).

Από την έκδοση 6.0 του HEC-RAS και μετέπειτα, υπάρχει η δυνατότητα επίλυσης των 1D εξισώσεων μη μόνιμης ροής με τον αλγόριθμο των πεπερασμένων όγκων που διαχειρίζεται καλά τα προαναφερθέντα μειονεκτήματα που προκύπτουν με τις πεπερασμένες διαφορές. Συγκεκριμένα: (i) ο αλγόριθμος διαχειρίζεται καλά τα εξαιρετικά ταχέως αναπτυσσόμενα υδρογραφήματα χωρίς να δημιουργούνται αστάθειες, (ii) διαχειρίζεται καλύτερα τη μετάβαση της υποκρίσιμης σε υπερκρίσιμη ροή, και σε υδραυλικά άλματα απ' ό,τι οι πεπερασμένες διαφορές, και (iii) η συμβολή υδατορεμάτων αντιπροσωπεύεται από ένα μεμονωμένο 2D κελί, στο οποίο διατηρείται η συνέχεια και η ορμή. Συγχρόνως, ο αλγόριθμος των πεπερασμένων όγκων δίνει πολύ σταθερές επιλύσεις στην περίπτωση προσομοίωσης χαμηλών ροών. Στα μειονεκτήματα της μεθόδου ανήκουν: (α) η ευαισθησία έναντι του όγκου νερού και της αλλαγής του σε κάθε χρονικό βήμα ανάμεσα σε δύο διατομές, και κυρίως σε αυτές που βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους όπου μετακινείται μικρός όγκος, οπότε τίθεται η αναγκαιότητα για χρήση μικρότερου υπολογιστικού χρονικού βήματος για την καλύτερη διαχείριση, και (β) η πιο αργή υπολογιστική επίλυση σε σχέση με τις πεπερασμένες διαφορές, καθώς η μέθοδος επιλύει ξεχωριστά τις εξισώσεις άνωθεν της αριστερής και δεξιάς όχθης–σε αντίθεση με τις πεπερασμένες διαφορές, όπου οι ιδιότητες άνωθεν της αριστερής και δεξιάς όχθης συνδυάζονται για την επίλυση των εξισώσεων–και κατά συνέπεια με τον αλγόριθμο των πεπερασμένων όγκων απαιτείται περισσότερος υπολογιστικός χρόνος, ωστόσο η λύση είναι πιο ακριβής (Brunner and CEIWR-HEC, 2020b).

Για να μην υπάρχουν προβλήματα αστάθειας στο μοντέλο στην περίπτωση μικτού καθεστώτος ροής, ακολουθείται η μέθοδος επίλυσης που ονομάζεται μερική τοπική αδράνεια, και αναπτύχθηκε από τους Fread et al. (1996). Σύμφωνα με τη μέθοδο εφαρμόζεται ένας μειωτικός συντελεστής στους δύο όρους αδράνειας της εξίσωσης διατήρησης της ορμής όταν ο αριθμός Froude υπερβαίνει μια κατώφλια τιμή. Αυτή η μείωση στους όρους αδράνειας δύναται να αυξήσει την ευστάθεια του μοντέλου, με τον έλεγχο του αριθμού Froude να γίνεται σε όλες τις διατομές, για κάθε υπολογιστικό χρονικό βήμα (Brunner and CEIWR-HEC, 2020b).

3.5.4 Δισδιάστατη (2D) μη μόνιμη ροή

Το υδραυλικό μοντέλο 2D HEC-RAS του κέντρου υδρολογικής μηχανικής του Σώματος Μηχανικών του Στρατού των ΗΠΑ (U.S. Army Corps of Engineers) δύναται να εκτελεί δισδιάστατη υδροδυναμική δρομολόγηση μη μόνιμης ροής ποτάμιων πλημμυρών, καθώς

και χαρτογράφηση της έκτασης των πλημμυρών, με δυνατότητες και λειτουργίες συνδεδεμένες με γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών (GIS) (Brunner and CEIWR-HEC, 2020a).

Τα βασικά βήματα για την εκτέλεση 2D (αλλά και συζευγμένης 1D/2D) προσομοίωσης μη μόνιμης ροής με το HEC-RAS, είναι: (i) επιλογή μιας οριζόντιας προβολής συντεταγμένων για το προς προσομοίωση μοντέλο, από ένα γεωχωρικό διανυσματικό αρχείο (shapefile) σε ArcGIS περιβάλλον, (ii) ανάπτυξη ενός λεπτομερούς και με ακρίβεια μοντέλου εδάφους, (iii) ταξινόμηση των χρήσεων γης για τον καθορισμό των συντελεστών τραχύτητας Manning n , εντός των 2D επιφανειών ροής, (iv) προσθήκη πρόσθετων επιπέδων χαρτογράφησης, όπως αεροφωτογραφίες, θέσεις αναχωμάτων, οδικό δίκτυο, κλπ., για καλύτερη οπτικοποίηση, (v) σχεδιασμός του πολυγωνικού ορίου για κάθε μία από τις 2D επιφάνειες ροής που θα μοντελοποιηθούν, (vi) σχεδιασμός διαχωριστικών γραμμών εντός κάθε 2D επιφάνειας ροής για την αντιπροσώπευση σημαντικών εμποδίων προς την ροή, όπως αναχώματα, δρόμοι, όχθες ρεμάτων, γέφυρες, κ.ά., (vii) δημιουργία του 2D υπολογιστικού πλέγματος για κάθε 2D επιφάνεια ροής, (viii) επεξεργασία του 2D πλέγματος με πρόσθετες διαχωριστικές γραμμές, είτε μεταβολή της πυκνότητας του πλέγματος, είτε προσθήκη, μετακίνηση ή διαγραφή πλεγματικών κελιών, (ix) προσθήκη υδραυλικών δομών ή γεφυρών εντός κάθε 2D επιφάνειας ροής, (x) εκτέλεση του 2D γεωμετρικού προ-επεξεργαστή για τη δημιουργία πινάκων με τις υδραυλικές ιδιότητες των κελιών, (xi) σύνδεση των 2D επιφανειών ροής με τα 1D υδραυλικά στοιχεία (ποτάμια, πλευρικές κατασκευές), στην περίπτωση συζευγμένου 1D/2D μοντέλου, (xii) σχεδιασμός γραμμών εξωτερικών οριακών συνθηκών κατά μήκος της περιμέτρου των 2D επιφανειών ροής, (xiii) εισαγωγή δεδομένων για τις οριακές και αρχικές συνθήκες στις 2D επιφάνειες ροής, (xiv) καθορισμός των υπολογιστικών επιλογών και ρυθμίσεων για τις 2D επιφάνειες ροής, (xv) εκτέλεση της προσομοίωσης μη μόνιμης ροής, (xvi) ανασκόπηση των 2D ή 1D/2D αποτελεσμάτων (Brunner and CEIWR-HEC, 2020a).

3.5.5 Εξισώσεις υδροδυναμικής για 2D μη μόνιμη ροή

Το HEC-RAS χρησιμοποιεί δύο διαφορετικά σύνολα εξισώσεων για την επίλυση της ροής που κινείται στο 2D υπολογιστικό πλέγμα: τις 2D εξισώσεις Saint Venant, που συχνά αναφέρονται ως εξισώσεις ρηχών υδάτων (shallow water equations - SWE) (πλήρους ορμής), και τις 2D εξισώσεις διάχυσης κύματος (diffusion wave equations - DWE). Οι

DWE δεν περιλαμβάνουν τους όρους της τοπικής επιτάχυνσης και της μεταγωγικής επιτάχυνσης, οι οποίοι είναι σημαντικοί για τα ταχέως αναπτυσσόμενα πλημμυρικά κύματα, όπως αυτά που οφείλονται σε ξαφνικές πλημμύρες από βροχοπτώσεις υψηλής έντασης, και για τα οποία οι SWE θα πρέπει να χρησιμοποιούνται. Συγχρόνως, οι μεγαλύτερης ακρίβειας SWE θα πρέπει να χρησιμοποιούνται και για τη μετακίνηση κύματος γύρω από τα μεσόβαθρα γεφυρών (Brunner and CEIWR-HEC, 2020a). Η μορφή της μερικής διαφορικής εξίσωσης διατήρησης μάζας (συνέχεια) για δισδιάστατη μη μόνιμη, μεταβαλλόμενη ροή, με την υπόθεση ενός ασυμπίεστου ρευστού, με ομοιόμορφη πυκνότητα και υδροστατική πίεση (Brunner, 2020), δίδεται ως:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + q = 0 \quad (24)$$

όπου $H(x,y,t)=z(x,y)+h(x,y,t)$ είναι το υψόμετρο της επιφάνειας του νερού (m), z (m) είναι το υψόμετρο του πυθμένα, h (m) είναι το βάθος του νερού, t είναι ο χρόνος, u και v (m/s) είναι οι συνιστώσες της ταχύτητας στις κατευθύνσεις x - και y -, αντίστοιχα, και q (m/s) είναι ένας όρος για την εισερχόμενη ροή.

Οι δισδιάστατες εξισώσεις πλήρους ορμής ρηχών υδάτων (Saint Venant) (Brunner, 2020), δίδονται από τις εξισώσεις:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left(v_{xx} h \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left(v_{yy} h \frac{\partial u}{\partial y} \right) - c_f u \quad (25)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left(v_{xx} h \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left(v_{yy} h \frac{\partial v}{\partial y} \right) - c_f v \quad (26)$$

όπου g (m/s²) είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας, H (m) είναι το υψόμετρο της επιφάνειας του νερού, h (m) είναι το βάθος του νερού, v_{xx} και v_{yy} είναι οι οριζόντιοι συντελεστές κινηματικού ιξώδους στις κατευθύνσεις x - και y -, c_f (s⁻¹) είναι ο συντελεστής τριβής του πυθμένα, και u και v (m/s) είναι οι συνιστώσες της ταχύτητας στις κατευθύνσεις x - και y -, αντίστοιχα.

Οι SWE είναι περισσότερο συντηρητικές στην ορμή, χρησιμοποιώντας την Eulerian προσέγγιση στη συμμεταφορά, εντούτοις απαιτούν ένα σχετικά μικρό υπολογιστικό χρονικό βήμα. Η επιλογή ενός κατάλληλου υπολογιστικού βήματος για τις 2D εξισώσεις ρηχών υδάτων (Brunner and CEIWR-HEC 2020a) συνίσταται να εξασφαλίζει έναν αριθμό Courant που ικανοποιεί την εξίσωση:

$$C = \frac{V_w \Delta T}{\Delta X} \leq 1.0 \text{ (με } \max C = 1.0) \text{ ή } \Delta T \leq \frac{\Delta X}{V_w} \text{ (με } C = 1.0) \quad (27)$$

όπου $C [-]$ είναι ο αριθμός Courant, V_w (m/s) είναι η ταχύτητα του πλημμυρικού κύματος, ΔT (s) είναι το υπολογιστικό χρονικό βήμα, και ΔX (m) είναι το μέσο μέγεθος κελιού.

Μια καινούρια δυνατότητα που επιτρέπει ένα μεταβαλλόμενο υπολογιστικό χρονικό βήμα, προσαρμοσμένο να ικανοποιεί τον αριθμό Courant, είναι διαθέσιμο από την έκδοση 6.0 του HEC-RAS και τις μετέπειτα εκδόσεις, και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βελτίωση της σταθερότητας του μοντέλου. Η δυνατότητα αυτή είναι διαθέσιμη τόσο για 1D όσο και για 2D προσομοίωση μη μόνιμης ροής (Brunner and CEIWR-HEC 2020a).

3.5.6 Αριθμητική μέθοδος επίλυσης εξισώσεων 2D μη μόνιμης ροής

Η επίλυση των 2D εξισώσεων μη μόνιμης ροής επιτυγχάνεται με χρήση ενός ρητού σχήματος επίλυσης αλγόριθμου πεπερασμένων όγκων σε κάθε κελί του 2D υπολογιστικού πλέγματος (Brunner, 2020). Ο επιλυτής μήτρας ονομάζεται pardiso (Schenk και Gärtner, 2020), και πρόκειται για έναν άμεσο επιλυτή, ο οποίος παράγει μια σταθερή και με ακρίβεια λύση (Brunner and CEIWR-HEC, 2020b; 2020a).

3.5.7 Συζευγμένη 1D/2D μη μόνιμη ροή

Το συζευγμένο υδραυλικό μοντέλο 1D/2D HEC-RAS του κέντρου υδρολογικής μηχανικής του Σώματος Μηχανικών του Στρατού των ΗΠΑ είναι κατάλληλο για τη διεξαγωγή υδραυλικής/υδροδυναμικής προσομοίωσης ενιαίας μονοδιάστατης/δισδιάστατης μη μόνιμης ροής ποτάμιων πλημμυρών. Ο αλγόριθμος 2D προσομοίωσης ροής του μοντέλου HEC-RAS δύναται να εκτελεί συζευγμένη 1D/2D προσομοίωση εντός των ορίων της ίδιας μη μόνιμης ροής σε σύνθετα συστήματα ποταμών, πραγματοποιώντας 1D προσομοίωση στο κύριο κανάλι και 2D προσομοίωση σε περιοχές που απαιτούν υψηλότερο επίπεδο υδροδυναμικής αξιοπιστίας. Κατά τις συζευγμένες 1D/2D επιλύσεις, οι 1D και 2D αλγόριθμοι επίλυσης συνδέονται στενά μεταξύ τους ανά χρονικό βήμα μέσω επαναλήψεων ανάμεσα στις 1D και 2D μεταφορές ροής, επιτρέποντας άμεση ανάδραση μεταξύ των 1D και 2D στοιχείων ροής σε κάθε χρονικό βήμα (Brunner and CEIWR-HEC, 2016a).

3.5.8 Εξισώσεις υδροδυναμικής για συζευγμένη 1D/2D μη μόνιμη ροή

Οι εξισώσεις συνέχειας και διατήρησης της ορμής για 1D μη μόνιμη ροή παρουσιάστηκαν αναλυτικά στην §3.5.1. Για 2D μη μόνιμη ροή, η εξίσωση συνέχειας και οι SWE πλήρους ορμής αναλύθηκαν ενδελεχώς στην §3.6.1. Εδώ θα γίνει μνεία για τις 2D εξισώσεις διάχυσης κύματος (DWE). Οι 2D DWE για την ορμή, βασίζονται στις 2D εξισώσεις πλήρους ορμής (Saint Venant), στις οποίες οι κυρίαρχοι όροι αφορούν τη βαρύτητα και την τριβή στον πυθμένα, ενώ οι όροι που αφορούν το κινηματικό ιξώδες, τη μεταγωγική επιτάχυνση και την τοπική επιτάχυνση αγνοούνται (Brunner, 2016). Επομένως, οι 2D εξισώσεις διάχυσης κύματος για την ορμή διαμορφώνονται ως:

$$-g \frac{\partial H}{\partial x} = c_f u \quad (28)$$

$$-g \frac{\partial H}{\partial y} = c_f v \quad (29)$$

όπου g (m/s^2) είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας, H (m) είναι το υψόμετρο της επιφάνειας του νερού, c_f (s^{-1}) είναι ο συντελεστής τριβής του πυθμένα, και u και v (m/s) είναι οι συνιστώσες της ταχύτητας στις κατευθύνσεις x - και y -, αντίστοιχα.

Η επίλυση των 2D εξισώσεων διάχυσης κύματος από το μοντέλο δύναται να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας μεγαλύτερα υπολογιστικά χρονικά βήματα σε σχέση με τις εξισώσεις Saint Venant, αποδίδοντας αριθμητικά σταθερές και με ακρίβεια λύσεις. Η επιλογή του υπολογιστικού χρονικού βήματος για την επίλυση των 2D εξισώσεων διάχυσης κύματος (Brunner and CEIWR-HEC, 2016a) συνίσταται να ικανοποιεί την εξίσωση:

$$C = \frac{V_w \Delta T}{\Delta X} \leq 2.0 \text{ (με } \max C = 5.0) \text{ ή } \Delta T \leq \frac{2 \Delta X}{V_w} \text{ (με } C = 1.0) \quad (30)$$

όπου C [-] είναι ο αριθμός Courant, V_w (m/s) είναι η ταχύτητα του πλημμυρικού κύματος, ΔT (s) είναι το υπολογιστικό χρονικό βήμα, και ΔX (m) είναι το μέσο μέγεθος κελιού.

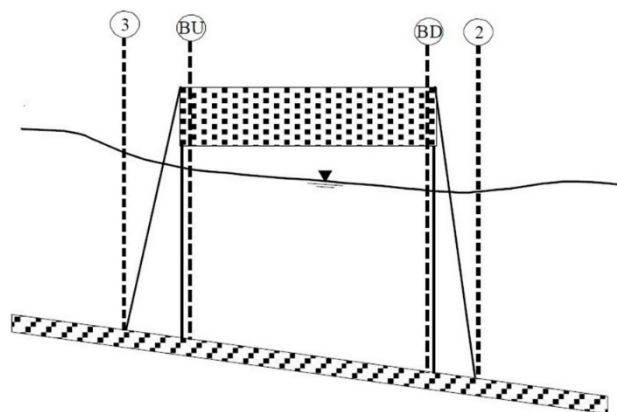
3.5.9 Υδραυλικοί υπολογισμοί γεφυρών

Οι υδραυλικοί υπολογισμοί γεφυρών αφορούν τόσο την 1D όσο και την 2D προσομοίωση. Οι ρουτίνες που αφορούν τις γέφυρες στο HEC-RAS, έχουν τη δυνατότητα να προσομοιώνουν τόσο χαμηλή όσο και υψηλή ροή.

Χαμηλή ροή υφίσταται στην περίπτωση ροής ανοικτού καναλιού κάτω από τη γέφυρα, δηλαδή για επιφάνεια νερού χαμηλότερα από το υψηλότερο σημείο της κάτω παρειάς της ανωδομής της γέφυρας. Η χαμηλή ροή κατατάσσεται ως κατηγορίας A, εφόσον η ορμή στα κατάντη είναι μεγαλύτερη από την ορμή του κρίσιμου βάθους στη γέφυρα (υποκρίσιμη ροή). Απ' την άλλη, η χαμηλή ροή κατατάσσεται ως κατηγορίας B, εάν η ορμή στα κατάντη είναι μικρότερη από την ορμή του κρίσιμου βάθους στη γέφυρα, επομένως η στένωση θα προκαλέσει στη ροή να περάσει μέσω του κρίσιμου βάθους και θα δημιουργηθεί υδραυλικό άλμα σε κάποια απόσταση στα κατάντη.

Για τους υπολογισμούς χαμηλής ροής κατηγορίας A, το HEC-RAS διαθέτει δύο μεθόδους: την εξίσωση της ενέργειας και τη διατήρηση της ορμής (Brunner, 2020).

Η μέθοδος που βασίζεται στην εξίσωση της ενέργειας διαχειρίζεται μια γέφυρα όπως μια διατομή ποταμού, με τη διαφορά ότι αφαιρείται από τη συνολική επιφάνεια πλημμύρας στη γέφυρα το εμβαδόν της γέφυρας κάτω από την επιφάνεια του νερού, ενώ αυξάνεται η βρεχόμενη περίμετρος όπου το νερό έρχεται σε επαφή με τη δομή της γέφυρας. Η ακολουθία υδραυλικών υπολογισμών ξεκινά με ένα τυπικό χρονικό βήμα από τη διατομή κατάντη της γέφυρας (θέση 2) έως την κατάντη όψη της γέφυρας (θέση BD-bridge downstream). Στη συνέχεια, το πρόγραμμα εκτελεί ένα τυπικό βήμα εντός της γέφυρας, από την κατάντη όψη (θέση BD) έως την ανάντη όψη (θέση BU-bridge upstream). Ο τελευταίος υπολογισμός είναι με τυπικό χρονικό βήμα από την ανάντη όψη της γέφυρας (θέση BU) έως τη διατομή ανάντη της γέφυρας (θέση 3) (Brunner, 2020). Οι θέσεις επί των οποίων γίνονται οι υδραυλικοί υπολογισμοί φαίνονται στην [Εικόνα 3-8](#). Στην εξίσωση της ενέργειας ωστόσο, δε λαμβάνονται υπόψη οι απώλειες που σχετίζονται με τη γεωμετρία των μεσοβάθρων μιας γέφυρας.



Εικόνα 3-8. Θέσεις διατομών πριν, εντός, και μετά τη γέφυρα για τους υδραυλικούς υπολογισμούς.

Απ' την άλλη, η διατήρηση της ορμής πραγματοποιείται μεταξύ των διατομών μετά και πριν από τη γέφυρα, ενώ εκτελείται σε 3 βήματα:

- από τη διατομή μετά τη γέφυρα έως την κατάντη όψη της γέφυρας, ως εξής:

$$A_{BD}\bar{Y}_{BD} + \frac{\beta_{BD}Q_{BD}^2}{gA_{BD}} = A_2\bar{Y}_2 + \frac{\beta_2Q_2^2}{gA_2} - A_{PBD}\bar{Y}_{PBD} + F_f - W_x \quad (31)$$

όπου A_{BD} και A_2 είναι οι υγρές διατομές στην κατάντη όψη της γέφυρας και στη θέση της διατομής μετά τη γέφυρα, αντίστοιχα, \bar{Y}_{BD} και \bar{Y}_2 είναι οι κατακόρυφες αποστάσεις από την επιφάνεια του νερού έως το κέντρο βάρους της επιφάνειας ροής στην κατάντη όψη της γέφυρας και στη διατομή μετά τη γέφυρα, αντίστοιχα, β_{BD} και β_2 είναι οι συντελεστές στάθμισης της ταχύτητας στην κατάντη όψη της γέφυρας και στη διατομή μετά τη γέφυρα, αντίστοιχα, Q_{BD} και Q_2 είναι η απορροή στην κατάντη όψη της γέφυρας και στη διατομή μετά τη γέφυρα, αντίστοιχα, g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας, A_{PBD} είναι η επιφάνεια των μεσοβάθρων που παρεμποδίζει τη ροή στην κατάντη όψη, \bar{Y}_{PBD} είναι η κατακόρυφη απόσταση από την επιφάνεια του νερού έως το κέντρο βάρους της βρεχόμενης επιφάνειας μεσοβάθρων στην κατάντη όψη, F_f είναι η δύναμη τριβής ανά μονάδα βάρους του νερού, και W_x είναι το βάρος του νερού στην κατεύθυνση ροής, ανά μονάδα βάρους του νερού,

- από την κατάντη όψη της γέφυρας έως την ανάντη όψη της γέφυρας, ως εξής:

$$A_{BU}\bar{Y}_{BU} + \frac{\beta_{BU}Q_{BU}^2}{gA_{BU}} = A_{BD}\bar{Y}_{BD} + \frac{\beta_{BD}Q_{BD}^2}{gA_{BD}} + F_f - W_x \quad (32)$$

όπου A_{BU} είναι η υγρή διατομή στην ανάντη όψη της γέφυρας, \bar{Y}_{BU} είναι η κατακόρυφη απόσταση από την επιφάνεια του νερού έως το κέντρο βάρους της επιφάνειας ροής στην ανάντη όψη της γέφυρας, β_{BU} είναι ο συντελεστής στάθμισης της ταχύτητας στην ανάντη όψη της γέφυρας, και Q_{BU} είναι η απορροή στην ανάντη όψη της γέφυρας,

- από την ανάντη όψη της γέφυρας έως τη διατομή πριν από τη γέφυρα, ως εξής:

$$A_3\bar{Y}_3 + \frac{\beta_3Q_3^2}{gA_3} = A_{BU}\bar{Y}_{BU} + \frac{\beta_{BU}Q_{BU}^2}{gA_{BU}} + A_{PBU}\bar{Y}_{PBU} + \frac{1}{2}C_D\frac{A_{PBU}Q_3^2}{gA_3^2} + F_f - W_x \quad (33)$$

όπου A_3 είναι η υγρή διατομή στη θέση της διατομής πριν από τη γέφυρα, \bar{Y}_3 είναι η κατακόρυφη απόσταση από την επιφάνεια του νερού έως το κέντρο βάρους της επιφάνειας ροής στη διατομή πριν από τη γέφυρα, β_3 είναι ο συντελεστής στάθμισης της ταχύτητας στη διατομή πριν από τη γέφυρα, Q_3 είναι η απορροή στη διατομή πριν από

τη γέφυρα, $A_{P_{BU}}$ είναι η επιφάνεια των μεσοβάθρων που παρεμποδίζει τη ροή στην ανάντη όψη, $\bar{Y}_{P_{BU}}$ είναι η κατακόρυφη απόσταση από την επιφάνεια του νερού έως το κέντρο βάρους της βρεχόμενης επιφάνειας μεσοβάθρων στην ανάντη όψη, και C_D είναι ο συντελεστής αντίστασης της ροής γύρω από τα μεσόβαθρα (Brunner, 2020). Ο τυπικός συντελεστής αντίστασης C_D για κυκλικής διατομής μεσόβαθρα ισούται με 1.2.

Κατά τη χαμηλή ροή κατηγορίας B χρησιμοποιείται η διατήρηση της ορμής για τον υπολογισμό της επιφάνειας του νερού στα ανάντη υψηλότερα από το κρίσιμο βάθος στη γέφυρα, και της επιφάνειας του νερού στα κατάντη χαμηλότερα από το κρίσιμο βάθος στη γέφυρα. Εάν η εξίσωση διατήρησης της ορμής δεν συγκλίνει σε μια απάντηση κατά τους υπολογισμούς ροής κατηγορίας B, το πρόγραμμα θα μεταβεί αυτόματα σε υπολογισμούς με τη μέθοδο που βασίζεται στην εξίσωση της ενέργειας.

Υψηλή ροή υφίσταται στην περίπτωση ροής που έρχεται σε επαφή με το υψηλότερο σημείο της κάτω παρειάς της ανωδομής της γέφυρας. Για τους υπολογισμούς υψηλής ροής, το HEC-RAS διαθέτει δύο μεθόδους: την εξίσωση της ενέργειας και τη ροή υπό πίεση ή/και ροή υδατοφράκτη (Brunner, 2020).

Η μέθοδος που βασίζεται στην εξίσωση της ενέργειας σε μια γέφυρα, εφαρμόζεται σε υψηλές ροές με τον ίδιο τρόπο που εφαρμόζεται σε χαμηλές ροές. Η μέθοδος χρησιμοποιείται όταν η ανωδομή της γέφυρας αποτελεί μικρό εμπόδιο στη ροή και το πέρασμα κάτω από τη γέφυρα δε λειτουργεί σαν στόμιο υπό πίεση, καθώς και όταν η γέφυρα καταβυθίζεται κατά πολύ, και επομένως δε λειτουργεί ως υδατοφράκτης.

Για τη μέθοδο ροής υπό πίεση ή/και υδατοφράκτη, ροή υπό πίεση εμφανίζεται για ροή ερχόμενη σε επαφή με την κάτω παρειά της γέφυρας. Εφόσον η ροή έρθει σε επαφή με την ανάντη όψη της γέφυρας, και το κατάστρωμα της γέφυρας αποτελεί μεγάλο εμπόδιο στη ροή, τότε πραγματοποιείται κίνηση των υδάτων προς τα πίσω λόγω στένωσης της ροής, και δημιουργείται ροή στομίου. Στην περίπτωση που μόνο η ανάντη όψη της γέφυρας έρχεται σε επαφή με το νερό, τότε η εξίσωση της ροής υπό πίεση δίδεται ως:

$$Q = C_d A_{BU} \sqrt{2g} \left[Y_3 - \frac{Z}{2} + \frac{\alpha_3 V_3^2}{2g} \right]^{1/2} \quad (34)$$

όπου Q είναι η ολική απορροή υπό πίεση κάτω από τη γέφυρα, C_d είναι ο συντελεστής απορροής για ροή υπό πίεση, με τυπικές τιμές να κυμαίνονται μεταξύ 0.27 και 0.5, A_{BU} είναι η καθαρή επιφάνεια κάτω από τη γέφυρα στην ανάντη όψη της γέφυρας, Y_3 είναι

το υδραυλικό βάθος στη διατομή πριν από τη γέφυρα, Z είναι η κατακόρυφη απόσταση από το υψηλότερο σημείο της κάτω παρειάς της ανωδομής μέχρι το μέσο υψόμετρο της κοίτης του ποταμού στην ανάντη όψη της γέφυρας, α_3 είναι ο συντελεστής στάθμισης της ταχύτητας στη διατομή πριν από τη γέφυρα, και V_3 είναι η ταχύτητα στη διατομή πριν από τη γέφυρα.

Στην περίπτωση που όλη η κάτω παρειά της ανωδομής είναι βυθισμένη, τόσο στην ανάντη όψη όσο και στην κατάντη όψη της γέφυρας, όντας σε ροή υπό πίεση, τότε η εξίσωση της πλήρους ροής στομίου δίδεται ως:

$$Q = CA\sqrt{2gH} \quad (35)$$

όπου C είναι ο συντελεστής απορροής για πλήρως βυθισμένη ροή υπό πίεση, με τυπική τιμή ίση με 0.8, A είναι η καθαρή επιφάνεια κάτω από τη γέφυρα, και H είναι η διαφορά της στάθμης της γραμμής ενέργειας στα ανάντη της γέφυρας και της στάθμης νερού στα κατάντη της γέφυρας.

Απ' την άλλη, ροή υδατοφράκτη της μεθόδου εμφανίζεται για ροή επάνω από τη γέφυρα (υπερχειλίση), όταν συγχρόνως η γέφυρα δεν είναι κατά πολύ βυθισμένη από το νερό. Η τυπική εξίσωση υπολογισμού της ροής υδατοφράκτη καθορίζεται ως εξής:

$$Q = CLH^{3/2} \quad (36)$$

όπου Q είναι η ολική απορροή πάνω από τη στέψη του υδατοφράκτη, C είναι ο συντελεστής απορροής για ροή υδατοφράκτη, με τυπικές τιμές από 1.38 έως 1.71 για υπερχειλιστές ευρείας στέψης, L είναι το ενεργό μήκος της στέψης του υδατοφράκτη, και H είναι η διαφορά στάθμης της γραμμής ενέργειας στα ανάντη και κατάντη της γέφυρας (Brunner, 2020).

3.5.10 Υπολογιστική διαδικασία αλγόριθμου επίλυσης εξισώσεων

Η επίλυση των 1D εξισώσεων μη μόνιμης ροής (συνέχεια και διατήρηση ορμής) επιτυγχάνεται—από προεπιλογή—με χρήση ενός μοναδικού άρρητου επιλυτή μήτρας πεπερασμένων διαφορών που αναπτύχθηκε από τον Barkau (Barkau, 1996), και ονομάζεται skyline, ο οποίος πρόκειται για έναν αλγόριθμο αποθήκευσης σε μια αραιά κατανεμημένη μήτρα. Για την επίλυση των 2D εξισώσεων μη μόνιμης ροής χρησιμοποιείται ένας ρητός επιλυτής μήτρας πεπερασμένων όγκων σε κάθε κελί του 2D υπολογιστικού πλέγματος, ο pardiso, που παράγει σταθερές και με ακρίβεια λύσεις

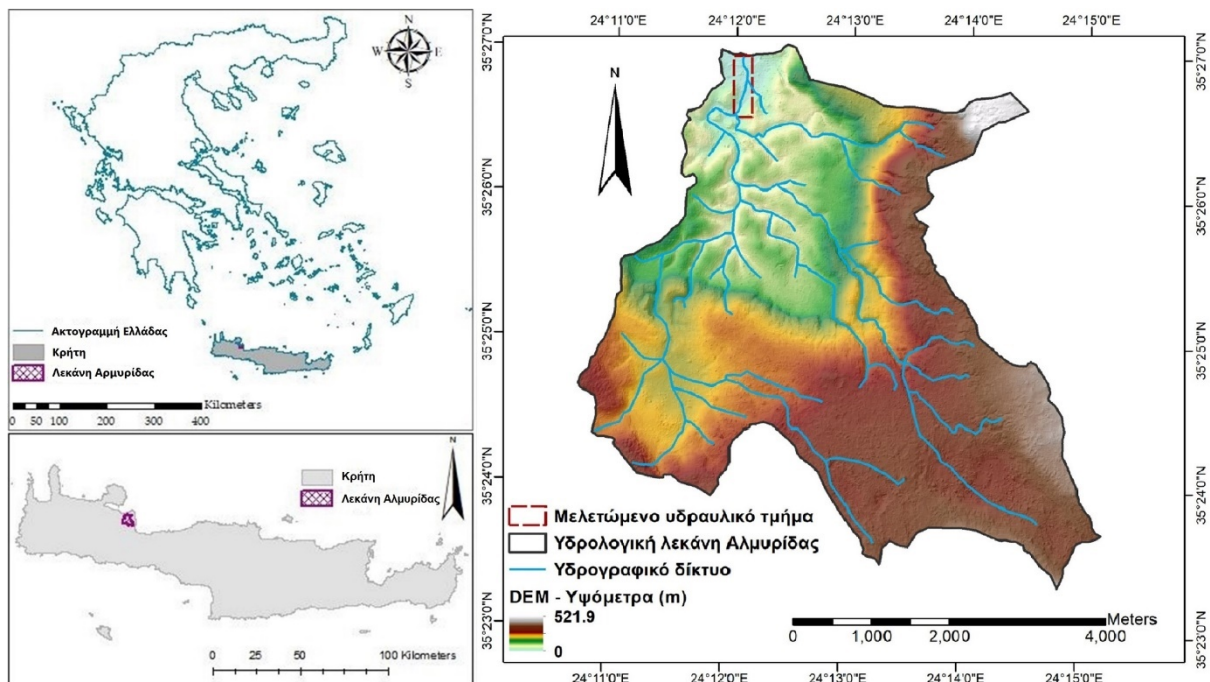
(Brunner, 2016). Η πλημμυρική στάθμη σε κάθε διατομή/γέφυρα, είτε 2D κελί, επιλύεται κατά την ακόλουθη υπολογιστική διαδικασία: (i) ο επιλυτής κάνει μια αρχική δοκιμή για την επιφάνεια του νερού, τη ροή, και τις παραγώγους των προς επίλυση υδραυλικών στοιχείων σε κάθε διατομή/γέφυρα, ή 2D κελί, και επιλύονται οι εξισώσεις μη μόνιμης ροής, (ii) ελέγχεται εάν η υπολογισμένη πλημμυρική στάθμη μείον την προηγούμενη τιμή της είναι μικρότερη από την ανοχή αριθμητικής επίλυσης, (iii) εάν το σφάλμα είναι μικρότερο, τότε οι εξισώσεις έχουν επιλυθεί σωστά για το συγκεκριμένο χρονικό βήμα, και ο επιλυτής προχωρά στην επόμενη χρονική στιγμή, (iv) εάν το σφάλμα είναι μεγαλύτερο από την ανοχή αριθμητικής επίλυσης, επαναλαμβάνεται η επίλυση των εξισώσεων με νέα εκτίμηση όλων των παραγώγων, (v) κατά τις επαναλήψεις, εάν βρεθεί λύση με αριθμητικό σφάλμα μικρότερο από την ανοχή σε όλες τις διατομές/γέφυρες, ή 2D κελιά, οι λύσεις των εξισώσεων της συγκεκριμένης επανάληψης είναι σωστές και ο επιλυτής προχωρά στην επόμενη χρονική στιγμή, (vi) κατά τις επαναλήψεις (ακόμη και κατά την πρώτη δοκιμή), αποθηκεύονται οι πλημμυρικές στάθμες και ροές σε όλες τις διατομές/γέφυρες, ή 2D κελιά, από τη δοκιμή που φέρεται ως η τρέχουσα καλύτερη λύση με το μικρότερο αριθμητικό σφάλμα, (vii) κάθε επανάληψη με καλύτερο αποτέλεσμα, χωρίς όμως να πληροί την ανοχή, αποθηκεύεται ως η τρέχουσα καλύτερη λύση, (viii) εάν ο επιλυτής εξαντλήσει τον αριθμό επαναλήψεων, χρησιμοποιείται η λύση της δοκιμής με το καλύτερο αποτέλεσμα, ενώ παράλληλα εκτυπώνεται η θέση με το μεγαλύτερο αριθμητικό σφάλμα και το μέγεθος του σφάλματος (Brunner, 2016).

4. ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

4.1 Υδρολογική λεκάνη του ρέματος Αλμυρίδας

4.1.1 Περιγραφή περιοχής μελέτης

Η υδρολογική λεκάνη του ρέματος της Αλμυρίδας (γεωγρ. μήκος $24^{\circ}12'$, γεωγρ. πλάτος $35^{\circ}26'$) χωροθετείται στη δυτική Κρήτη, και στο βορειοανατολικό τμήμα της Π.Ε. Χανίων (Εικόνα 4-1), περίπου 20 km μακριά από την πόλη των Χανίων. Η λεκάνη καλύπτει μια επιφάνεια 23.17 km^2 και έχει περίμετρο 37.86 km. Έχει μέτρια ορειογραφία, με μέσο υψόμετρο τα 197 m, και εύρος υψομέτρων μεταξύ 0 και 522 m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Η τοπογραφία της περιοχής ποικίλλει, αποτελούμενη από ήπιες κλίσεις ως επί το πλείστον, με εξαίρεση μερικές περιοχές με κλίσεις άνω του 10%.



Εικόνα 4-1. Υδρολογική λεκάνη του ρέματος Αλμυρίδας στο νησί της Κρήτης.

Το δίκτυο του ρέματος της Αλμυρίδας είναι δενδριτικό, συνθέτοντας ένα αρκετά πυκνό σύστημα αποστράγγισης. Από καταγραφές 32 ετών (1975-2007), η μέση ετήσια βροχόπτωση στη λεκάνη βρέθηκε ίση με 648.7 mm (Tsanis et al., 2013; Koutroulis et al., 2015; Grillakis et al., 2016). Για τα έτη 2016 έως 2018, η μέση ετήσια βροχόπτωση στη λεκάνη καταγράφηκε ίση με 718 mm από το γειτνιάζοντα βροχομετρικό σταθμό των Αγ.

Πάντων. Η αποστράγγιση της λεκάνης είναι εφήμερη, λαμβάνοντας χώρα μόνο κατά τη διάρκεια βροχοπτώσεων (Grillakis et al., 2016). Πρόκειται για μια μικρής έκτασης υδρολογική λεκάνη της Μεσογείου, χωρίς μετρητή καταγραφής του ρυθμού απορροής.

Το κλίμα στην ευρύτερη περιοχή ανήκει στη μεσογειακή κλιματική ζώνη. Χαρακτηρίζεται από ζεστά ξηρά καλοκαίρια και ήπιους χειμώνες (Grillakis et al., 2016). Περίπου το 53% των ετήσιων βροχοπτώσεων λαμβάνει χώρα το χειμώνα, το 23% κατά το φθινόπωρο, και το 20% τους ανοιξιάτικους μήνες, ενώ το καλοκαίρι οι βροχοπτώσεις είναι αμελητέες (Tsanis et al., 2013). Στην Κρήτη, η μέση ετήσια βροχόπτωση κυμαίνεται από 440 mm στα ανατολικά, έως και πάνω από 2000 mm στα δυτικά, όπου η επίδραση της έντονης ορεογραφίας τείνει να αυξάνει τη συχνότητα και την ένταση των χειμερινών βροχοπτώσεων (Koutroulis et al., 2010). Τα παραπάνω χαρακτηριστικά, σε συνδυασμό με το τραχύ έδαφος θέτουν τις μικρές λεκάνες της Κρήτης σε κίνδυνο από πλημμύρες (Tsanis et al., 2013).

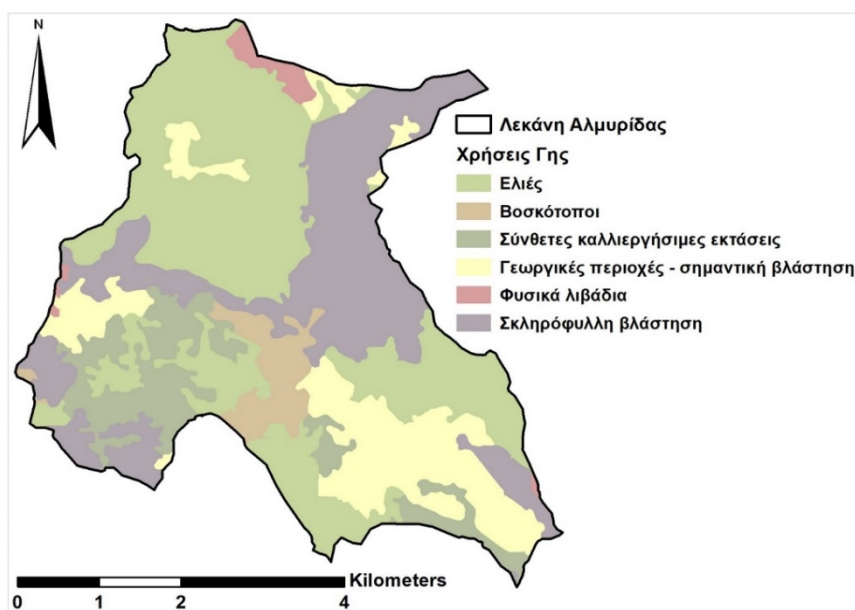
4.1.2 Δεδομένα υδρογραφικά, υδρογεωλογικά & χρήσεων γης

Η [Εικόνα 4-1](#) παρουσιάζει την έκταση της λεκάνης απορροής της Αλμυρίδας και το υφιστάμενο δίκτυο ρεμάτων, όπως προέκυψε μέσω της οριοθέτησης της λεκάνης απορροής από το ψηφιακό μοντέλο υψομετρίας (Digital Elevation Model - DEM) σε υψηλή χωρική ανάλυση 5 m × 5 m, που παρέχεται από το Εθνικό Κτηματολόγιο, με χρήση του ArcGIS. Το υδρογραφικό δίκτυο αποτελείται από μία κύρια μισγάγγεια, τρία δευτερεύοντα ρέματα που εκβάλλουν στο κύριο ρέμα, και είκοσι έξι μικρές διακλαδώσεις. Η κύρια μισγάγγεια έχει μήκος 11.7 km και διαμήκη κλίση 0.026 m/m, ξεκινώντας από υψόμετρο 306 m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, ενώ εκβάλλει στο Κρητικό πέλαγος. Τα δευτερεύοντα ρέματα έχουν μήκος 5.83 km, 8.01 km, και 4.92 km αντίστοιχα, με αντίστοιχες κλίσεις 4.49%, 4.03% και 10.33%.

Από υδρογεωλογική σκοπιά, στο νότιο τμήμα της λεκάνης εντοπίζονται κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι και κατά τόπους μάρμαρα (29.4%), καθώς και βιογενείς ασβεστόλιθοι, μάρμες, άργιλοι και κροκαλοπαγή (40%). Σε μικρότερο βαθμό απαντώνται καρστικές κοιλότητες με αποθέσεις αργίλου (9.4%). Στο βόρειο τμήμα της λεκάνης εντοπίζονται μάρμαρα, φυλλίτες, δολομίτες, χαλαζίτες και κροκαλοπαγή σε διαδοχικές στρώσεις (11.8%), καθώς και αλλουβιακές αποθέσεις κυρίως στις όχθες των ρεμάτων (4.4%). Ταυτόχρονα, καθ' όλο το μήκος της λεκάνης απαντώνται ανθρακικά στρώματα

ασβεστολίθων και δολομιτών (5%). Οι καρστικοί ασβεστόλιθοι και δολομίτες, αλλά και τα μάρμαρα είναι κοκκώδεις ή κρυσταλλικοί υδατοπερατοί σχηματισμοί, επιτρέποντας τη μεταφορά νερού μέσω διήθησης και κατείσδυσης διαμέσου των κόκκων τους. Οι χαλαζίτες, φυλλίτες και τα κροκαλοπαγή είναι χαμηλής διαπερατότητας. Οι άργιλοι και οι μάργες είναι πρακτικά αδιαπέρατοι σχηματισμοί (Parisi et al., 2013). Από την άλλη, το μικρό ποσοστό των αλλουβιακών αποθέσεων είναι μεταφερόμενα υλικά σε μεγάλες αποστάσεις μέσω τρεχούμενων νερών (Verheye and de la Rosa, 2006), απαρτιζόμενα από χαλίκια και άμμο (Nemec and Postma, 1993), καθώς και από άργιλο, πηλό και οργανική λάσπη (Shahrugh et al., 2012). Έγινε η θεώρηση ότι από το 40% των βιογενών ασβεστολίθων, μαργών, αργίλων και κροκαλοπαγών, το 15% αποτελεί τους υψηλής διαπερατότητας βιογενείς ασβεστολίθους, ενώ το 25% συντίθεται από τους χαμηλής διαπερατότητας ή αδιαπέρατους σχηματισμούς, αποτελούμενο από μάργες, αργίλους και κροκαλοπαγή. Επιπρόσθετα, θεωρήθηκε ότι το 11.8% των μαρμάρων, φυλλιτών, δολομιτών, χαλαζιτών και κροκαλοπαγών μοιράστηκε ισομερώς ως 2.36% σε κάθε σχηματισμό. Επομένως, ταξινομώντας τα πετρώματα ως προς τη διαπερατότητά τους, υπολογίστηκε ότι οι καρστικοί βράχοι της περιοχής μελέτης (κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι και κατά τόπους μάρμαρα, βιογενείς ασβεστόλιθοι, καρστικές κοιλότητες με αποθέσεις αργίλου, μάρμαρα, δολομίτες, ανθρακικά στρώματα ασβεστολίθων και δολομιτών), που απαντώνται κυρίως σε μεγαλύτερα υψόμετρα, έφτασαν το 64%, ενώ οι άργιλοι (μάργες-άργιλοι-κροκαλοπαγή, φυλλίτες, χαλαζίτες, κροκαλοπαγή, αλλουβιακές αποθέσεις) που συναντώνται στην πεδιάδα θεωρήθηκε ότι συνίστανται στο 36%.

Η περιοχή μελέτης είναι αγροτική, αποτελούμενη κυρίως από ελαιόδεντρα. Σύμφωνα με τους χάρτες κάλυψης γης CORINE 2000 της Ευρωπαϊκής Ένωσης (EEA, 2016), η υδρολογική λεκάνη της Αλμυρίδας καλύπτεται από ελιές (40.56%), βοσκότοπους (4.52%), σύνθετες καλλιεργήσιμες εκτάσεις (10.94%), περιοχές κυρίως γεωργικές, με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης (16.34%), φυσικά λιβάδια (1.57%) και σκληρόφυλλη βλάστηση (26.07%) (Εικόνα 4-2).



Εικόνα 4-2. Χρήσεις γης στην υδρολογική λεκάνη του ρέματος Αλμυρίδας (EEA, 2016).

4.1.3 Αιφνίδιο πλημμυρικό γεγονός στις 17/10/2006

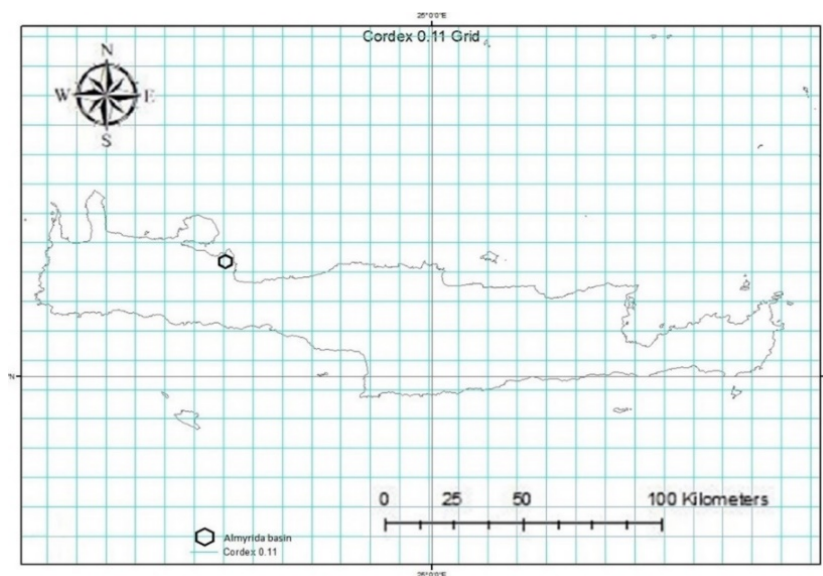
Στις 16 Οκτωβρίου 2006, ένα χαμηλό βαρομετρικό με κέντρο τα 1010 hPa, τοποθετημένο στην κεντρική Μεσόγειο κοντά στη Μάλτα, κινήθηκε προς τα ανατολικά διασχίζοντας την Κρήτη, με εκτιμώμενη ταχύτητα περίπου 65 km/h. Το φαινόμενο χαρακτηρίζεται ως μεσογειακή τροπική καταιγίδα. Στις 17 Οκτωβρίου 2006 στις 00:00 UTC, το χαμηλό βαρομετρικό επικεντρώθηκε δυτικά της Κρήτης, όπου ο κυκλώνας βάθυνε σε ακόμη χαμηλότερα επίπεδα πίεσης από 1008 hPa (Tsanis et al., 2013), προκαλώντας ένα υψηλής έντασης και μικρής διάρκειας έντονο βροχοπτώτικό συμβάν. Το αποτέλεσμα ήταν μια ξαφνική πλημμύρα στην περιοχή της Αλμυρίδας. Μετεωρολογικά δεδομένα ραντάρ έδειξαν ότι το σύστημα ήταν ένας μεγάλος κυκλώνας με μέγιστη διάμετρο περίπου 200 km. Κατά τη διάρκεια της καταιγίδας υπήρξε μετακίνηση μεμονωμένων καταιγιδοφόρων κυττάρων μέσα στο σχηματισμό του κυκλώνα, με το κέντρο του κυκλώνα να εστιάζει στα βορειοανατολικά της περιοχής μελέτης, η οποία αποτελεί μια θέση ορειογραφικής ανύψωσης των ορεινών όγκων που απαντώνται στα νότια της λεκάνης (Daliakopoulos and Tsanis, 2012). Λόγω της εφήμερης ροής στην υδρολογική λεκάνη, δεν υπήρχε εξοπλισμός μέτρησης στην περιοχή (Grillakis et al., 2016). Οι πλησιέστεροι μετεωρολογικοί σταθμοί ήταν το βροχόμετρο στον κόλπο της Σούδας, σε απόσταση 16 km από την περιοχή, το οποίο κατέγραψε μέγιστη ωριαία βροχόπτωση 25.2 mm, καθώς και το βροχόμετρο στις Καλύβες, σε μόλις 3 km απόσταση από τη λεκάνη, που κατέγραψε ημερήσια βροχόπτωση 220 mm. Η ημερήσια καταγραφή

υπερέβη κατά πολύ το 1% της Ετήσιας Πιθανότητας Υπέρβασης (Annual Exceedance Probability - AEP) του σταθμού, για περίοδο επαναφοράς 100 ετών (Koutroulis et al., 2015). Ο κύριος όγκος κατακρήμνισης συνέβη από τις 07:00 έως τις 14:00 τοπική ώρα (Tsanis et al., 2013). Από χερσαία δεδομένα και δεδομένα ραντάρ, η μέγιστη ένταση βροχόπτωσης εκτιμήθηκε περίπου 23 mm/h (Daliakopoulos and Tsanis, 2012), η οποία αύξησε την επιφανειακή ροή και προκάλεσε μια εκτιμώμενη παροχή αιχμής περίπου 120 m³/s. Από μέτρηση μετά την πλημμύρα σε σημείο ελέγχου κοντά στην έξοδο της λεκάνης όπου η μέγιστη στάθμη του νερού άφησε ορατό σημάδι, καθώς και από συλλογή φωτογραφιών και αναφορές των μόνιμων κατοίκων (Tsanis et al., 2013), το πλημμυρικό βάθος εκτιμήθηκε ίσο με 2 m. Η θεώρηση της αβεβαιότητας στο μετρούμενο πλημμυρικό βάθος είναι ποιοτική, λόγω εναπόθεσης λάσπης, λύος και χαλικιών στη διατομή ελέγχου κατά τη διάρκεια της βροχόπτωσης, με αποτέλεσμα την υψομετρική μεταβολή της κοίτης του ρέματος. Η υγρασία του εδάφους ήταν πολύ χαμηλή πριν από την ισχυρή βροχόπτωση, ενώ αυξήθηκε σχεδόν κατά 50% μετά την αιφνίδια πλημμύρα (Grillakis et al., 2016). Εξαιτίας της πλημμύρας προκλήθηκαν ζημιές άνω του 1 εκατ. € στην περιοχή της Αλμυρίδας, ενώ το συνολικό ποσό των ζημιών ανήλθε σε 3 εκατ. €. Επιπλέον, καταγράφηκε απώλεια μιας ανθρώπινης ζωής στην πληγείσα περιοχή (Koutroulis et al., 2015).

4.1.4 Δεδομένα κλιματικών μοντέλων

Η βάση δεδομένων EURO-CORDEX χρησιμοποιεί τα σενάρια εξέλιξης της συγκέντρωσης (Representative Concentration Pathways - RCPs) που ορίζονται από την 5^η έκθεση αξιολόγησης της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC) (IPCC, 2014). Τα περιλαμβανόμενα RCPs αφορούν το σενάριο αυστηρού μετριασμού των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου RCP2.6, το ενδιάμεσο σενάριο RCP4.5, και το σενάριο RCP8.5 με πολύ αυξημένες εκπομπές αερίων θερμοκηπίου (Jacob et al., 2014). Το τμήμα Υδατικών Πόρων της Αποκεντρωμένης Διοίκησης Κρήτης παρείχε δεδομένα βροχόπτωσης της ιστορικής περιόδου 1981–2010, από καταγραφές 21 υδρομετεωρολογικών σταθμών. Για τα ιστορικά δεδομένα βροχόπτωσης έγινε διόρθωση του μεροληπτικού σφάλματος με τη μέθοδο πολυτμηματικής στατιστικής διόρθωσης μεροληπτικού σφάλματος (Multi-segment Statistical Bias Correction method) (Grillakis et al., 2013), βάσει των αρχών αντιστοίχισης ποσοστημορίων. Τα διορθωμένα δεδομένα προβάλλονται έως το 2100 και ακολουθούν τη διαδικασία των δεδομένων κλιματικών

σεναρίων που παράγονται από προσομοιώσεις του περιοχικού κλιματικού μοντέλου (RCM) του κλιματικού υπηρεσιακού κέντρου REMO (CSC-REMO), όπως προκύπτουν από επανανάλυση-1 από το παγκόσμιο κλιματικό μοντέλο (GCM) του Ινστιτούτου Max Planck, χαμηλής ανάλυσης (MPI-ESM-LR-r1). Πλήρης ανάλυση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στο νησί της Κρήτης πραγματοποιήθηκε από τους Nerantzaki et al. (2019) και Taroglou et al. (2019), για την περίοδο 1981–2100. Η επίδραση της κλιματικής αλλαγής στις βροχοπτώσεις περιορίστηκε σε ημερήσια δεδομένα, με τη μέγιστη ημερήσια βροχόπτωση να είναι ίση με 345 mm, όπως προέκυψε από το GCM-RCM μοντέλο για το RCP4.5 σενάριο εκπομπών θερμοκηπικών αερίων. Ωστόσο, η ημερήσια βροχόπτωση δεν είναι κατάλληλη για προσομοίωση αιφνίδιων πλημμυρών σε μικρές λεκάνες. Η **Εικόνα 4-3** αναπαριστά το πλέγμα κλιματικών δεδομένων βροχόπτωσης EURO-CORDEX, με χωρική ανάλυση 12.5 km x 12.5 km (ανάλυση 0.11°) για το νησί της Κρήτης, και κατ' επέκταση για τη λεκάνη απορροής της Αλμυρίδας.

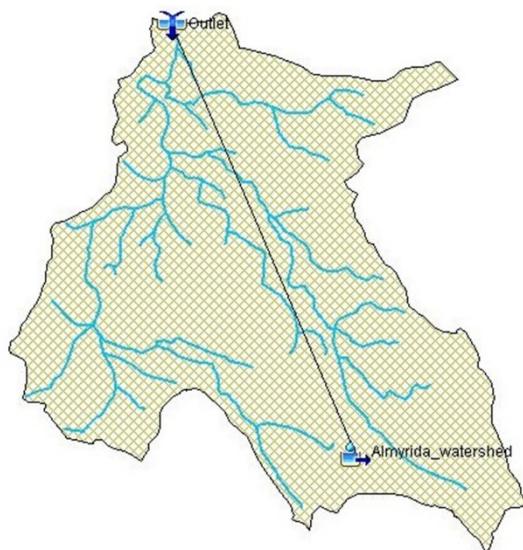


Εικόνα 4-3. Πλέγμα βροχοπτωτικών δεδομένων CORDEX, χωρικής ανάλυσης 12.5 km x 12.5 km, για την Κρήτη και τη λεκάνη της Αλμυρίδας.

4.1.5 Δεδομένα υδρολογικού μοντέλου HEC-HMS για το βροχοπτωτικό συμβάν της 17/10/2006

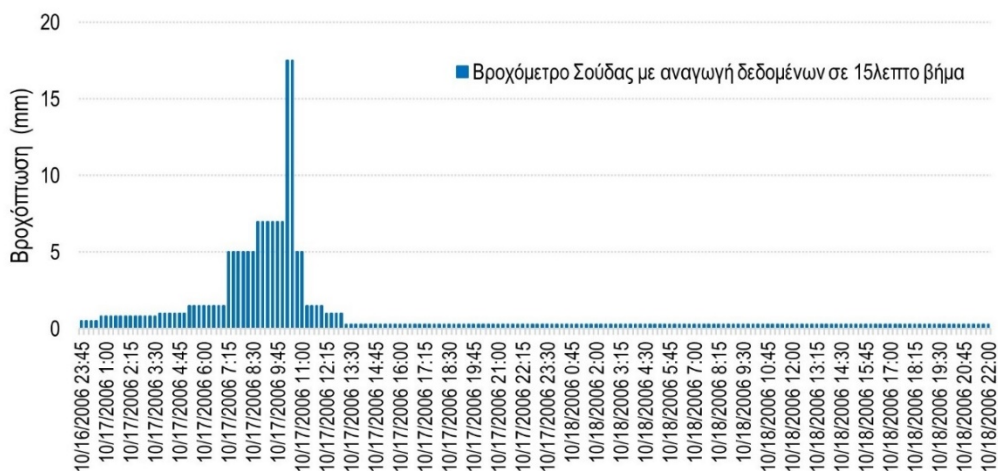
Η οριοθέτηση της λεκάνης απορροής και του υδρογραφικού δικτύου προέκυψε από το ψηφιακό μοντέλο υψομετρίας (DEM) υψηλής ανάλυσης 5m x 5m, μέσω του ArcGIS. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της υδρολογικής λεκάνης εισήχθησαν ως γεωχωρικά διανυσματικά δεδομένα (shapefiles) στο υδρολογικό μοντέλο HEC-HMS, για την προσομοίωση του καταγεγραμμένου βροχοπτωτικού γεγονότος του 2006. Το

εξεταζόμενο υδρολογικό σύστημα συντίθεται από μια υπολεκάνη και μια έξοδο του συστήματος, όπως φαίνεται στην [Εικόνα 4-4](#).



Εικόνα 4-4. Υδρολογικό σύστημα προσομοίωσης ρέματος Αλμυρίδας με το μοντέλο HEC-HMS.

Δημιουργήθηκε το μετεωρολογικό μοντέλο, και ως μέθοδος βροχόπτωσης επιλέχθηκε η στάθμιση καταγραφών των βροχογράφων (Gage Weights). Στην περίπτωση της Αλμυρίδας, οι καταγραφές ήταν με χρονικό βήμα 3 h, από ένα βροχομετρικό σταθμό της αεροπορίας τοποθετημένο στον κόλπο της Σούδας, με αθροιστική βροχόπτωση ίση με 196.2 mm. Οι καταγραφές ανάχθηκαν σε χρονοσειρά βροχοπτωτικών δεδομένων με βήμα 15 λεπτών, από τις 16 Οκτωβρίου 2006 στις 23:30 έως τις 18 Οκτωβρίου 2006 στις 22:00, όπως φαίνεται στην [Εικόνα 4-5](#). Επί του ίδιου χρονικού πλαισίου πραγματοποιήθηκαν και οι υπολογισμοί υδρολογικής προσομοίωσης.



Εικόνα 4-5. Αναγωγή καταγεγραμμένων τριώρων δεδομένων βροχόπτωσης στο βροχομετρικό σταθμό της Σούδας σε 15λεπτο βήμα (συνολική βροχόπτωση 196.2 mm).

Για τη μέθοδο απωλειών SCS Curve Number, ο *CN* της λεκάνης εξαρτάται από τις χρήσεις γης, τον τύπο εδάφους και τις συνθήκες πρότερης εδαφικής υγρασίας. Τόσο το νότιο όσο και το βόρειο τμήμα της λεκάνης αποτελούνται από καρστικά πετρώματα με εναποθέσεις αργίλου, είτε από αργιλώδη πετρώματα με άμμο, και όχι από αργίλους ή αργιλώδεις ιλύες. Για το λόγο αυτό, ο τύπος του εδάφους δεν αξιολογήθηκε ως χωρικά μεταβαλλόμενος. Συνεπώς, χρησιμοποιήθηκε η ομάδα εδάφους τύπου A, αποτελούμενη από άμμο, αργιλώδη άμμο ή αμμώδη άργιλο.

Οι υδρολογικές συνθήκες της περιοχής θεωρούνται ικανοποιητικές (Feldman, 2000; USDA, 1989). Σχετικά με την εδαφική υγρασία, για την περιοχή της Αλμυρίδας, νωρίτερα από την αιφνίδια πλημμύρα της 17^{ης} Οκτωβρίου 2006 δεν σημειώθηκαν βροχοπτώσεις για περίοδο πέντε μηνών, εκτός από την 11^η και 12^η Οκτωβρίου όπου καταγράφηκε ύψος υετού 21 mm (Grillakis et al., 2016). Επομένως, οι εδαφικές συνθήκες υγρασίας για τη μη καλλιεργητική περίοδο του Οκτωβρίου, αναφερόμενες στις βροχοπτώσεις που σημειώθηκαν κατά τις προηγούμενες 5 ημέρες, χαρακτηρίζονται ως Τύπου II (κανονικές), οι οποίες ταξινομούνται μεταξύ του εύρους τιμών των 12.7 mm και 27.94 mm (USDA, 1956).

Κατά συνέπεια, οι υπολογισμοί των *CN* ανά χρήση γης, για καλλιεργούμενες και άλλες γεωργικές εκτάσεις, για τη λεκάνη της Αλμυρίδας, έγιναν για ομάδα εδάφους A, ικανοποιητικές υδρολογικές συνθήκες και κανονικές συνθήκες πρότερης εδαφικής υγρασίας (USDA, 1989). Οι χρήσεις γης προσδιορίστηκαν από τους χάρτες κάλυψης γης του 2000 (EEA, 2016), επομένως ενδέχεται να υπάρχουν διαφοροποιήσεις με τις τρέχουσες υφιστάμενες χρήσεις. Οι τιμές του *CN_{II}* για τις απαντώμενες κατηγορίες χρήσεων γης είναι: ελαιόδεντρα (64), βοσκότοποι (49), σύνθετες καλλιεργήσιμες εκτάσεις (69.5), εκτάσεις κυρίαρχα αγροτικές, με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης (69.5), φυσικά λιβάδια (30), και σκληρόφυλλη βλάστηση (35). Επομένως, ο *CN_{II}* της λεκάνης προσδιορίστηκε από την εξίσωση (5) ίσος με 56.7.

Οι αρχικές απώλειες (*I_a*) εκφράζουν την ποσότητα βροχόπτωσης στο έδαφος πριν από την επιφανειακή απορροή, και ορίζονται ως το 20% της πιθανής μέγιστης κατακράτησης (*S*) (Scharffenberg, 2016; Feldman, 2000), ενώ υπολογίστηκαν σε mm από την εξίσωση (4), ίσος με 38.75 mm. Για τον υπολογισμό του *CN*, θεωρήθηκε ποιοτικά μια αβεβαιότητα στην τιμή του, λόγω των πιθανών μικρών διαφοροποιήσεων των χαρτών κάλυψης γης του 2000 σε σχέση με τις τρέχουσες χρήσεις γης. Η βαθμονόμηση του υδρολογικού

μοντέλου έγινε με την προσέγγιση χρήσης μιας παραμέτρου τη φορά. Δεδομένου ότι δεν είναι γνωστή η τρέχουσα κάλυψη γης, γίνεται θεώρηση μιας ποιοτικής αβεβαιότητας στον *CN*, καθώς δεν υπάρχουν στοιχεία για τον ποσοτικό προσδιορισμό της. Δοκιμές αβεβαιότητας στον *CN* κατά $\pm 5\%$ οδηγεί σε ένα εύρος τιμών από 53.9 έως 59.6, ενώ η αβεβαιότητα κατά $\pm 15\%$ οδηγεί σε τιμές από 48.2 έως 65.2. Η προσέγγιση εξέτασης της αβεβαιότητας του *CN* με δοκιμές Monte Carlo θα ήταν κατάλληλη εάν υπήρχαν επαρκή δεδομένα πεδίου, αν και δεν θα βελτίωνε τις προβλέψεις.

Για τη λεκάνη της Αλμυρίδας, δεν υπήρχαν στοιχεία πεδίου για την % αδιαπερατότητα κάθε μίας χρήσης γης, και δεν μπορούσε να εφαρμοστεί η εξίσωση (8). Έγινε η θεώρηση υπολογισμού της ολικής αδιαπερατότητας της λεκάνης απορροής βάσει της γεωλογικής της σύνθεσης και της αναλογούμενης βροχόπτωσης σύμφωνα με την υψομετρία (Εξίσωση (37)). Επομένως, η συνολική % αδιαπερατότητα της λεκάνης της Αλμυρίδας υπολογίστηκε αθροίζοντας την % αδιαπερατότητα κάθε γεωλογικού σχηματισμού πολλαπλασιασμένη με τη σταθμισμένη έκταση έκαστου σχηματισμού (*GF*), επί την σταθμισμένη ποσότητα βροχόπτωσης βάσει της υψομετρικής χωροθέτησης έκαστου σχηματισμού, ως εξής:

$$\%Total\ Impervious = \frac{\sum_{i=1}^n (A_{i,GF} \times R_{i,GF} \times \%Impervious_i)}{A_{total} \times R_{total}} \quad (37)$$

Ο Πίνακας 4-1 παρουσιάζει το εύρος για το οποίο θα γίνει η βαθμονόμηση της % αδιαπερατότητας, από 16.1% έως 29.1%. Όπως επισημάνθηκε στην §4.1.3, τα καρστικά πετρώματα που απαντώνται κυρίως στα μεγαλύτερα υψόμετρα της περιοχής μελέτης αποτελούν το 64% των γεωλογικών σχηματισμών, ενώ οι άργιλοι που απαντώνται στην πεδιάδα αποτελούν το 36% των γεωλογικών σχηματισμών. Έγινε η θεώρηση ότι στα υψηλότερα υψόμετρα κατακρημνίζεται το 60% της βροχής, ενώ στα χαμηλότερα υψόμετρα πέφτει το 40% της βροχής. Επίσης, θεωρήθηκε ότι τα καρστικά πετρώματα στα μεγαλύτερα υψόμετρα της περιοχής μελέτης δύνανται να είναι αδιαπέρατα κατά ένα εύρος από 10% έως 40%, ενώ το ποσοστό αδιαπερατότητας των αργίλων στα πεδινά δύνανται να κυμαίνεται από 85% έως 95%.

Πίνακας 4-1. Υπολογισμός του % εύρους της ολικής αδιαπερατότητας της λεκάνης.

% Καρστικά κυρίως στα Υψηλά Υψόμετρα	% Άργιλοι κυρίως στα Πεδινά	% Βροχό- πτωση στα Υψηλά Υψόμετρα	% Βροχό- πτωση στα Πεδινά	% Αδια- περατότητα στα Υψηλά Υψόμετρα	% Αδια- περατότητα στα Πεδινά	% εύρος Ολικής Αδια- περατότητας της λεκάνης
64	36	60	40	10	85	16.1
64	36	60	40	10	90	16.8
64	36	60	40	10	95	17.5
64	36	60	40	15	85	18
64	36	60	40	15	90	18.7
64	36	60	40	15	95	19.4
64	36	60	40	20	85	19.9
64	36	60	40	20	90	20.6
64	36	60	40	20	95	21.4
64	36	60	40	25	85	21.8
64	36	60	40	25	90	22.6
64	36	60	40	25	95	23.3
64	36	60	40	30	85	23.8
64	36	60	40	30	90	24.5
64	36	60	40	30	95	25.2
64	36	60	40	35	85	25.7
64	36	60	40	35	90	26.4
64	36	60	40	35	95	27.1
64	36	60	40	40	85	27.6
64	36	60	40	40	90	28.3
64	36	60	40	40	95	29.1

Για τη μέθοδο αναπαράστασης της άμεσης απορροής Clark Unit Hydrograph, υπάρχουν πολλές εμπειρικές εξισώσεις για τον υπολογισμό του χρόνου συγκέντρωσης T_c , οι οποίες σχετίζονται με διάφορες γεωμορφολογικές παραμέτρους. Μία εξίσωση που χρησιμοποιήθηκε για την περιοχή μελέτης ήταν ο εμπειρικός τύπος του Giandotti, ο οποίος αναπτύχθηκε για λεκάνες απορροής της Ιταλίας που κυμαίνονταν από 170 km² έως 70000 km², και χρησιμοποιείται ευρέως στις λεκάνες απορροής της Μεσογείου για τον υπολογισμό του T_c (h) (Giandotti, 1934), ενώ δίδεται από την εξίσωση:

$$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{\Delta H}} \quad (38)$$

όπου A είναι το εμβαδόν της λεκάνης ίσο με 23.17 km², L είναι το μήκος της κύριας μισγάγγειας ίσο με 11.705 km, και ΔH είναι η διαφορά του μέσου υψομέτρου από το υψόμετρο στην έξοδο ίση με 197.17 m, όπως προκύπτει από το σχεδιασμό στο ArcGIS.

Ένας άλλος εμπειρικός τύπος που χρησιμοποιήθηκε στην περιοχή μελέτης, και χρησιμοποιείται ευρύτατα για τον υπολογισμό του T_c (h), είναι αυτός του Kirpich, ο οποίος αναπτύχθηκε για αγροτικές λεκάνες απορροής στο Τενεσί που κυμαίνονταν από 0.004 km² έως 0.453 km², με κλίσεις από 3% έως 10% (Kirpich, 1940), ως εξής:

$$T_c = 0.0663 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \quad (39)$$

όπου L είναι το μήκος της κύριας μισγάγγειας ίσο με 11.705 km, και S είναι η κλίση της κύριας μισγάγγειας ίση με 0.026 m/m, όπως μετρήθηκαν στο ArcGIS.

Επομένως, ο T_c υπολογίστηκε ίσος με 3.3 h σύμφωνα με τον τύπο του Giandotti, ενώ ήταν ίσος με 1.8 h κατά τον τύπο του Kirpich. Σε πολλές μελέτες έχουν τεθεί συντελεστές προσαρμογής, ώστε να διορθωθούν σφάλματα στις εκτιμήσεις του T_c από την εφαρμογή των προαναφερθέντων εμπειρικών τύπων σε λεκάνες απορροής διαφορετικής τοποθεσίας και γεωμορφολογίας από αυτές στις οποίες αρχικά εφαρμόστηκαν (Sharifi and Hosseini, 2011; Efstratiadis et al., 2014; Perdikaris et al., 2018). Ένας διορθωτικός συντελεστής 2.0 μπορεί να εφαρμοστεί σε χερσαία γενικώς ροή και σε κανάλια με χορτάρια, ενώ ένας διορθωτικός συντελεστής 1.0 μπορεί να εφαρμοστεί για χερσαία ροή σε γυμνό έδαφος ή σε τάφρους παρά την οδό (Chow et al., 1988). Η μελετώμενη περιοχή θεωρήθηκε ότι καλύπτεται από χορτάρια ή ότι είναι γυμνό έδαφος. Επομένως, και συγχρόνως λόγω της διαφοροποίησης στις υπολογισμένες τιμές του T_c μέσω των τύπων του Kirpich και του Giandotti, εξετάστηκε αβεβαιότητα για τους συντελεστές προσαρμογής που εφαρμόστηκαν στην εξίσωση Kirpich, με τιμές ίσες με 1.15, 1.3, και 1.42, οι οποίοι οδήγησαν σε τιμές του T_c ίσες με 2.1 h, 2.3 h, και 2.55 h αντίστοιχα.

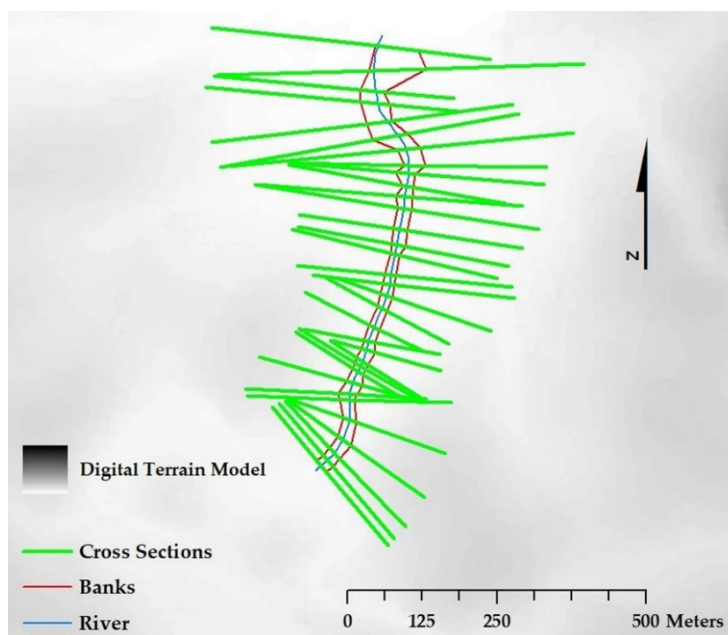
Σε ό,τι αφορά τον όρο $R/(T_c + R)$, που παραμένει σταθερός με όρια τιμών από 0.1 έως 0.7 (USACE, 1994), η λεκάνη της Αλμυρίδας δεν είναι αστική περιοχή, εκτός από μία πολύ μικρή έκταση στην έξοδό της, και ταυτόχρονα δεν είναι επίπεδη και βαλτώδης περιοχή, καθώς εκτός από φυσικά λιβάδια και γεωργικές εκτάσεις, αποτελείται κατά ~67% από ελαιόδεντρα και σκληρόφυλλη βλάστηση. Επομένως, η προσέγγιση του όρου $R/(T_c + R)$ με εύρος τιμών να κυμαίνεται για τη βαθμονόμηση από 0.2 έως 0.35, θεωρείται ότι αντιπροσωπεύει αρκετά την πραγματικότητα.

Τέλος, για τη μέθοδο υπολογισμού της βασικής απορροής *Recession*, με τη βασική απορροή να ακολουθεί εκθετική ύφεση μετά το βροχοπτωτικό γεγονός στην υδρολογική λεκάνη, η αρχική απορροή ανά επιφάνεια θεωρήθηκε αρκετά χαμηλή και ίση με 0.025 m³/s/km², καθότι η υγρασία του εδάφους ήταν αρκετά χαμηλή πριν από την ακραία βροχόπτωση (Grillakis et al., 2016), οδηγώντας σε μια αρχική βασική απορροή ίση με 0.6 m³/s. Η σταθερά εκθετικής ύφεσης τέθηκε ίση με 0.3, αντιπροσωπεύοντας μικρές λεκάνες απορροής (Pilgrim and Cordery, 1993). Δοκιμές στην αναλογία έως τη βασική

απορροή αιχμής–της κατώφλιας παραμέτρου που επαναφέρει τη βασική απορροή στην αρχική της τιμή–μεταξύ των τιμών 0.05 και 0.2 δεν προκάλεσαν καμία αλλαγή στην παροχή αιχμής. Έτσι, θεωρήθηκε ότι η αναλογία έως τη βασική απορροή αιχμής ήταν ίση με 0.05.

4.1.6 Δεδομένα γεωμετρίας στο ArcGIS–Σύνδεση και ανάλυση με το υδραυλικό μοντέλο 1D HEC-RAS

Χρησιμοποιώντας το λογισμικό γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών ArcGIS, εισήχθη το ψηφιακό μοντέλο υψομετρίας (Digital Elevation Model – DEM) υψηλής ανάλυσης 5 m x 5 m, το οποίο συστάθηκε με το Παγκόσμιο Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς (World Geodetic System – WGS'84), εφαρμόζοντας την Παγκόσμια Εγκάρσια Μερκατορική Απεικόνιση (Universal Transverse Mercator – UTM) της Ζώνης 35. Το DEM μετατράπηκε σε μοντέλο τριγωνικού ακανόνιστου δικτύου (Triangulated Irregular Network – TIN), ώστε να χρησιμοποιηθεί το HEC-GeoRAS, μια επέκταση του υδραυλικού μοντέλου HEC-RAS στο ArcGIS, για την ψηφιοποίηση της γεωμετρίας. Τα στοιχεία που ψηφιοποιήθηκαν ήταν (α) το κάταντες τμήμα της κεντρικής γραμμής του ρέματος της Αλμυρίδας, μήκους 784 m, (β) οι γραμμές για τις όχθες του ρέματος, (γ) οι γραμμές των διαδρομών ροής επάνω από τις όχθες και κατά μήκος του κύριου καναλιού, καθώς και (δ) 33 διατομές, κατά πλειοψηφία κάθετες στην κεντρική γραμμή του ρέματος, όπως φαίνεται στην [Εικόνα 4-6](#). Το πλάτος κάθε διατομής καλύπτει την επιφάνεια της πλημμυρικής πεδιάδας, με εύρος από 178 m έως 612 m. Μετά την απόδοση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών στην κεντρική γραμμή του ρέματος της Αλμυρίδας και στις διατομές (χιλιομετρικές θέσεις, συντεταγμένες, μήκη), τα δεδομένα γεωμετρίας εξήχθησαν στο HEC-RAS (Cameron and Ackerman, 2012), για την 1D υδραυλική προσομοίωση της αιφνίδιας πλημμύρας της 17^{ης} Οκτωβρίου 2006.



Εικόνα 4-6. Κοίτη ρέματος Αλμυρίδας, όχθες & διατομές, βάσει του DEM υψηλής ανάλυσης 5 m × 5 m.

Για μη μόνιμη ροή, όπως χαρακτηρίζεται η μελετώμενη λόγω της ξαφνικής μεταβολής της στάθμης ροής από την αιφνίδια πλημμύρα, ορίστηκαν στο HEC-RAS εμπειρικοί συντελεστές συστολής και διαστολής ίσοι με 0.1 και 0.3, αντίστοιχα, για τις 33 διατομές (Brunner and CEIWR-HEC, 2016b). Ορίστηκε επίσης ο συντελεστής τραχύτητας Manning n , ο οποίος για κανάλια ροής ποικίλλει ανάλογα με τον τύπο, το υλικό έδρασης, την έκταση της βλάστησης, και το βαθμό μαιανδρισμού. Για την κοίτη του ρέματος των 33 διατομών, η οποία είναι πεδινή, καθαρή, ευθεία, χωρίς ρωγμές ή βαθείς λάκκους, με κάποιες πέτρες και αγριόχορτα, ελήφθη η μέγιστη τιμή του συντελεστή τραχύτητας Manning που αντιστοιχεί σε 0.04, ενώ για τις πλημμυρικές επιφάνειες που αφορούν καθαρή γη με κορμούς δέντρων και έντονη ανάπτυξη βλαστών, η μέγιστη τιμή που ελήφθη αντιστοιχεί σε 0.08 (Chow, 1959).

Δημιουργήθηκε επίσης η διατομή γέφυρας σε απόσταση 113.16 m πριν από την εκβολή του ρέματος. Η ανάντη απόσταση της γέφυρας από την προηγούμενη διατομή είναι 4 m. Η ανωδομή χωροθετείται σε υψόμετρο +4.74 m επάνω από τη στάθμη της θάλασσας, έχει πλάτος 9.50 m και πάχος 1.40 m, σύμφωνα με δορυφορικές εικόνες και την τοπογραφία. Ο συντελεστής υδατοφράκτη για ροή επάνω από την ανωδομή της γέφυρας ορίστηκε ίσος με 1.4. Το μέγιστο επιτρεπόμενο ποσοστό καταβύθισης κατά τους υπολογισμούς της ροής υδατοφράκτη επάνω από το κατάστρωμα της γέφυρας ορίστηκε ίσο με 0.98, ενώ σε περίπτωση υπέρβασης του ορίου, οι υδραυλικοί υπολογισμοί της γέφυρας γίνονται με την εξίσωση της ενέργειας αντί για τη ροή υπό

πίεση και υδατοφράκτη. Η μέγιστη ανύψωση του νερού επάνω από τη γέφυρα ορίστηκε σε υψόμετρο +6 m. Το HEC-RAS δημιουργεί καμπύλες ταξινόμησης για να προσδιορίσει όλους τους πιθανούς συνδυασμούς βάθους-ροής στην ανάντη όψη της γέφυρας. Επομένως, ορίστηκε ο αριθμός των σημείων της καμπύλης ελεύθερης ροής ίσος με 50, καθώς και ο αριθμός των καμπυλών καταβύθισης ίσος προς 50, με έως 20 σημεία να ορίζουν κάθε καμπύλη (Brunner and CEIWR-HEC, 2016b).

Εισήχθησαν επίσης οι οριακές συνθήκες μη μόνιμης ροής. Στην ανάντη διατομή του μελετώμενου ρέματος εισήχθη το υδρογράφημα, όπως προέκυψε από το HEC-HMS, από τις 17/10/2006 στις 08:00 έως τις 18:00, με χρονικό βήμα 15 λεπτών. Στην κατάντη διατομή εισήχθη η οριακή συνθήκη κανονικού βάθους της μη μόνιμης ροής, η οποία χρησιμοποιεί την εξίσωση Manning για την εκτίμηση του βάθους ροής. Η τιμή για το ρυθμό απωλειών λόγω τριβής τέθηκε ίση με 0.03 (Brunner and CEIWR-HEC, 2016b).

Οι υδραυλικοί υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν από τις 17 Οκτωβρίου 2006 στις 08:00 έως τις 18:00, με υπολογιστικό βήμα προσομοίωσης τα 10 sec. Εκτελέστηκαν ο προεπεξεργαστής γεωμετρίας για την επιτάχυνση των υπολογισμών μη μόνιμης ροής, ο προσομοιωτής μη μόνιμης ροής, και ο μετα-επεξεργαστής για την εξαγωγή αποτελεσμάτων, τα οποία παράχθηκαν ανά 10 min, ενώ η χαρτογράφηση των αποτελεσμάτων παράχθηκε ανά 2 min. Επίσης, το καθεστώς ροής τέθηκε μικτό, για το οποίο ορίστηκε η κατώφλια τιμή του αριθμού Froude προκειμένου να εξαλείφονται οι επιταχύνσεις ίση με 0, μειωμένη από την προκαθορισμένη τιμή του λογισμικού (0.8), επιδιώκοντας μεγαλύτερη σταθερότητα του συστήματος, ενώ ο εκθέτης του μειωτικού συντελεστή του αριθμού Froude ορίστηκε ίσος με 10, αυξημένος από την προκαθορισμένη τιμή (4), επιδιώκοντας μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα. Η υποδιαίρεση χρόνου ορίστηκε να ξεκινά μετά την πέμπτη επανάληψη, με ελάχιστο χρονικό βήμα επανάληψης κάθε 0.01 h. Ορίστηκαν επίσης κάποιες επιλογές υπολογισμών και όρια ανεκτικότητας για την 1D προσομοίωση μη μόνιμης ροής. Συγκεκριμένα, ο άρρητος συντελεστής στάθμισης theta—που χρησιμοποιείται στην επίλυση με το σχήμα των πεπερασμένων διαφορών—ορίστηκε ίσος με 1, τόσο κατά τους υπολογισμούς, όσο και κατά την προθέρμανση, παρέχοντας μεγαλύτερη σταθερότητα στη λύση, η οποία μπορεί να μην είναι εξίσου ακριβής. Το όριο ανεκτικότητας υπολογισμού της στάθμης της επιφάνειας του νερού σε σχέση με την αρχικώς θεωρούμενη, για κάθε διατομή, ορίστηκε ίσο με 0.006 m. Ο μέγιστος αριθμός

επαναλήψεων για την επίλυση των εξισώσεων μη μόνιμης ροής ορίστηκε ίσος με 40, που είναι το ανώτερο επιτρεπόμενο όριο. Ο αριθμός των χρονικών βημάτων προθέρμανσης του μοντέλου με σταθερές εισροές, με σκοπό την εξομάλυνση του προφίλ του ρέματος πριν την έναρξη της προσομοίωσης, ορίστηκε ίσος με 200. Κατά τη διάρκεια μιας απότομης ανόδου ή πτώσης της ροής δύναται να υποδιαιεθεί το χρονικό υπολογιστικό βήμα με παρεμβαλλόμενα χρονικά βήματα, με μέγιστο τιθέμενο αριθμό ίσο με 20. Ο συντελεστής εκθετικής φθοράς λόγω καταβύθισης της γέφυρας κατά τη ροή υδατοφράκτη τέθηκε ίσος με 1. Τέλος, ως μέθοδος υπολογισμού του ρυθμού απωλειών λόγω τριβής στις διατομές και στη γέφυρα, για την εξίσωση διατήρησης της ορμής, επιλέχθηκε η μέση τιμή του ρυθμού απωλειών. Κατά τον προ-επεξεργαστή γεωμετρίας, η εσωτερική οριακή συνθήκη των υπολογισμένων καμπυλών ταξινόμησης βάθους στη θέση της γέφυρας χρησιμοποιήθηκε από το λογισμικό σε κάθε εκτέλεσή του. Οι υπολογισμοί της 1D μη μόνιμης ροής έγιναν με το άρρητο σχήμα πεπερασμένων διαφορών skyline/gaussian (Brunner and CEIWR-HEC, 2016b).

4.1.7 Δεδομένα γεωμετρίας στο ArcGIS–Σύνδεση και ανάλυση με το συζευγμένο υδραυλικό μοντέλο 1D/2D HEC-RAS

Για τη συζευγμένη 1D/2D υδραυλική προσομοίωση, τα γεωμετρικά δεδομένα του κάταντες τμήματος του ρέματος της Αλμυρίδας προέκυψαν από δύο DEM υψηλής ακρίβειας, σε χωρικές αναλύσεις 5 m και 2 m–γεωαναφερμένα στο Παγκόσμιο Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς WGS'84 με την Παγκόσμια Εγκάρσια Μερκατορική Απεικόνιση της Ζώνης 35–μέσω του HEC-GeoRAS, της επέκτασης του υδραυλικού μοντέλου HEC-RAS στο ArcGIS. Τα στοιχεία που ψηφιοποιήθηκαν–κατ' αντιστοιχία με την 1D προσομοίωση–ήταν (i) η κεντρική γραμμή του καναλιού στα κατάντη, με μήκος 784 m, (ii) οι γραμμές για τις όχθες, (iii) οι διαδρομές ροής επάνω από τις όχθες και κατά μήκος του καναλιού, και (iv) 33 διατομές, κατά κύριο λόγο κάθετες στη ροή του ρέματος, όπου κάθε διατομή τροποποιήθηκε σε σχέση με την 1D προσομοίωση, καλύπτοντας τα υψόμετρα από την κοίτη του ρέματος έως τις όχθες, με πλάτος από περίπου 30 m έως 126 m. Μέσω των DEM αποδόθηκαν η χιλιομετρική θέση των διατομών κατά μήκος της γραμμής του ρέματος, οι συντεταγμένες του ρέματος, των οχθών, και των διατομών, αλλά και τα μήκη των τμημάτων στα κατάντη τόσο για το ρέμα όσο και για τις διαδρομές πάνω από τις όχθες. Ακολουθώντας, τα γεωμετρικά στοιχεία εξήχθησαν στο μοντέλο HEC-RAS (Cameron και Ackerman, 2012), ώστε να προχωρήσει η σχεδίαση των 2D

επιφανειών ροής και η σύνδεσή τους με το 1D ρέμα μέσω πλευρικών δομών, για τη συζευγμένη 1D/2D υδραυλική προσομοίωση της ξαφνικής πλημμύρας στις 17/10/2006.

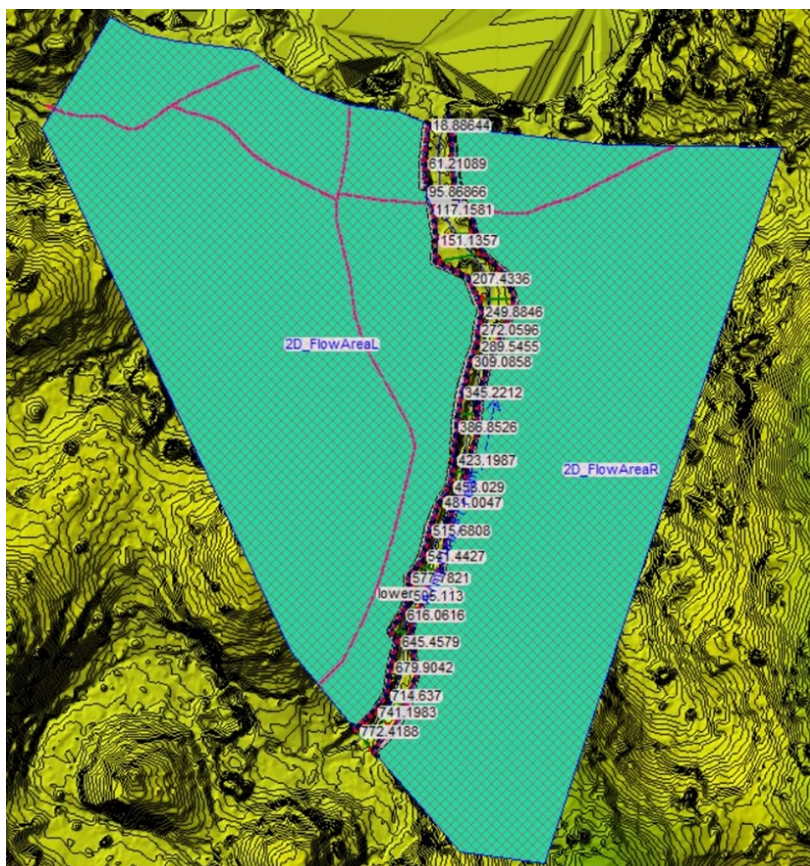
Οι συντελεστές συστολής και διαστολής για τις διατομές, ο συντελεστής τραχύτητας Manning n_c για το κανάλι, καθώς και ο σχεδιασμός της διατομής της υφιστάμενης γέφυρας, ορίστηκαν σύμφωνα με την 1D προσομοίωση.

Πέραν των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του ρέματος και των διατομών, η τοπογραφία από τα δύο DEM υψηλής ευκρίνειας απέδωσε επίσης τα χαρακτηριστικά των πλημμυρικών πεδιάδων. Επομένως, στο HEC-RAS σχεδιάστηκαν οι 2D επιφάνειες ροής ως πολύγωνα αριστερά και δεξιά από τις όχθες και καθ' όλο το μήκος του ρέματος, καθορίζοντας τα όρια εντός των οποίων θα γίνουν οι υδραυλικοί υπολογισμοί. Συνιστάται η σχεδίαση γραμμών διαχωρισμού σε θέσεις εντός των 2D επιφανειών ροής που φράσσουν τη ροή του ρέματος ή επηρεάζουν την κατεύθυνση ροής. Τέτοια εμπόδια αποτελούν οι δρόμοι. Βάσει της τοπογραφίας, υπάρχουν τέσσερις οδοί εντός των σχεδιασμένων 2D επιφανειών ροής, κατά μήκος των αξόνων των οποίων ψηφιοποιήθηκαν τέσσερις γραμμές διαχωρισμού. Οι γραμμές διαχωρισμού θα αποτρέψουν την ανακατεύθυνση ροής του ρέματος μέσω της ενίσχυσής τους με πεπερασμένα στοιχεία κατά μήκος τους, κατά τη δημιουργία του 2D υπολογιστικού πλέγματος (Brunner and CEIWR-HEC, 2016b).

Και για τις δύο 2D επιφάνειες ροής, ο συντελεστής τραχύτητας Manning n_f θα βαθμονομηθεί μεταξύ των τιμών 0.035 και 0.08 (Chow, 1959). Δημιουργήθηκαν τα κελιά του 2D υπολογιστικού πλέγματος, συμπεριλαμβανομένων όλων των γραμμών διαχωρισμού, οι οποίες ενισχύθηκαν σε όλο το μήκος τους ώστε η ροή να μην περνά από τα κελιά αυτών, έως ότου η στάθμη του νερού να είναι υψηλότερα από το έδαφος. Η απόσταση μεταξύ των σημείων υπολογισμού (κέντρα των κελιών) ορίστηκε ως πλέγμα, $DX \times DY$, ίσο με $4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$. Ως αποτέλεσμα, με το DEM 5 m δημιουργήθηκαν 13868 πεπερασμένα στοιχεία για την αριστερή 2D επιφάνεια ροής και 12275 για τη δεξιά, ενώ μέσω του DEM 2 m, η αριστερή 2D επιφάνεια ροής αποτελούνταν από 14142 πλεγματικά κελιά και η δεξιά από 12693 κελιά (Brunner and CEIWR-HEC, 2016b). Τέθηκαν επίσης άλλες τέσσερις παράμετροι που αφορούν τα κελιά του 2D υπολογιστικού πλέγματος, ως εξής: (i) η ανεκτικότητα βάθους ροής των κελιών, ίση με 0.003 m, για τη μείωση του αριθμού των σημείων στις καμπύλες όγκου-βάθους ροής σε κάθε κελί, (ii) η ανεκτικότητα βάθους ροής των μετώπων των κελιών, ίση με 0.003 m, για τη μείωση του

αριθμού των σημείων που εξάγονται από το DEM για κάθε μέτωπο κελιού, (iii) η ανεκτικότητα βάθους ροής ως προς την επιφάνεια κάθε μετώπου κελιού, ίση με 0.003 m, για τη μείωση του αριθμού των σημείων στους πίνακες υδραυλικών ιδιοτήτων των μετώπων των κελιών, και (iv) η ανεκτικότητα στην αναλογία διάδοσης της ροής στο μέτωπο, ίση με 0.02, ώστε να εξακριβωθεί εάν απαιτούνται περισσότερα ή λιγότερα σημεία στο κάτω άκρο των πινάκων υδραυλικών ιδιοτήτων των μετώπων κάθε κελιού. Ακολούθως, έγινε ο υπολογισμός των υδραυλικών πινάκων των 2D επιφανειών ροής.

Το όριο μεταξύ της 1D ροής του ρέματος και κάθε 2D επιφάνειας ροής είναι το υψηλό έδαφος που διαχωρίζει το ρέμα από την πλημμυρική πεδιάδα. Η σύνδεση της 1D ροής του ρέματος με τις 2D επιφάνειες ροής πίσω από τα αναχώματα, έγινε μέσω τεσσάρων πλευρικών δομών σχεδιασμένων κατά μέτωπο με τα πεπερασμένα στοιχεία του υπολογιστικού πλέγματος, άνω της αριστερής και δεξιάς όχθης αντίστοιχα. Οι δύο πλευρικές δομές σχεδιάστηκαν από την ανάντη διατομή έως τη διατομή πριν από τη γέφυρα, και οι άλλες δύο από τη διατομή μετά τη γέφυρα έως την κατάντη διατομή, εισάγοντας τα υψόμετρα στις θέσεις των σταθμών που αντιπροσωπεύουν την κεντρική γραμμή της στέψης κάθε δομής. Οι πλευρικές δομές αντιπροσωπεύουν το υψηλό έδαφος επάνω από τις όχθες του ρέματος και χρησιμοποιήθηκαν για να προσομοιωθεί η ροή επάνω από τα αναχώματα ως ροή υδατοφράκτη (Brunner and CEIWR-HEC, 2016a). Στην [Εικόνα 4-7](#) παρουσιάζεται η γεωμετρία της 1D ροής, αποτελούμενη από το κανάλι του ρέματος, τις όχθες και τις διατομές, καθώς και οι 2D επιφάνειες ροής, με τις γραμμές διαχωρισμού και τα πλεγματικά κελιά—όπως σχεδιάστηκαν εξωτερικά από τις όχθες του ρέματος—αλλά και οι πλευρικές δομές σύνδεσης της 1D ροής με τις 2D πλημμυρικές πεδιάδες.



Εικόνα 4-7. Γεωμετρία 1D ροής του μελετώμενου ρέματος (κανάλι, όχθες, διατομές), συμπεριλαμβανομένων των 2D επιφανειών ροής με τα 2D πεπερασμένα στοιχεία, των γραμμών διαχωρισμού (ροζ), καθώς και των πλευρικών δομών σύνδεσης της 1D ροής με τις 2D επιφάνειες ροής (μαύρη-κόκκινη διακεκομμένη γραμμή), βάσει του DEM υψηλής ανάλυσης 2 m × 2 m.

Για τα τέσσερα αναχώματα που αντιπροσωπεύονται από τις πλευρικές δομές, ως επίπεδο αναφοράς της ροής υδατοφράκτη ορίστηκε η στάθμη της επιφάνειας του νερού, το σχήμα στην κορυφή του υδατοφράκτη ήταν ευρείας στέψης, ενώ οι υδραυλικοί υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν με την τυπική εξίσωση ροής υδατοφράκτη. Ο συντελεστής υδατοφράκτη είναι συνάρτηση της επιτάχυνσης της βαρύτητας και επομένως δεν είναι αδιάστατος. Επειδή οι πλευρικές δομές χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά ροής από το 1D κανάλι του ρέματος στις 2D επιφάνειες ροής, ο συντελεστής υδατοφράκτη πρέπει να είναι αρκετά χαμηλός, διαφορετικά θα μεταφερθεί ασυνήθιστα μεγάλη ροή. Για τη μελετώμενη περιοχή του ρέματος, όταν δεν ανυψώνεται το έδαφος επάνω από την όχθη, και επομένως η πλευρική δομή δεν ανυψώνεται επάνω από το έδαφος, τότε η χερσαία ροή διαφεύγει από το κύριο ρέμα και ο συντελεστής υδατοφράκτη κυμαίνεται μεταξύ 0.11 και 0.28. Επιπλέον, όταν το φυσικό έδαφος είναι ψηλά και λειτουργεί ως εμπόδιο, με ύψος από 0.33 m έως 1 m, τότε η πλευρική δομή δε λειτουργεί ακριβώς ως υδατοφράκτης, αλλά το νερό θα πρέπει να ρέει επάνω από το

υψηλό έδαφος για να εισέλθει στην 2D επιφάνεια ροής, οπότε ο συντελεστής υδατοφράκτη λαμβάνει τιμές από 0.28 έως 0.55 (Brunner and CEIWR-HEC, 2016a). Επομένως, για τις τέσσερις πλευρικές δομές, ο συντελεστής υδατοφράκτη βαθμονομήθηκε για ροή επάνω από τα αναχώματα σε εύρος τιμών 0.11-0.55, σε μονάδες SI.

Ορίστηκαν επίσης ως οριακές συνθήκες μη μόνιμης ροής στην ανάντη και κατάντη διατομή, οι ίδιες με αυτές της 1D προσομοίωσης (Brunner and CEIWR-HEC, 2016b). Οι υδραυλικοί υπολογισμοί μη μόνιμης ροής αφορούν την 1D προσομοίωση της ροής του ρέματος, την 2D προσομοίωση της ροής στις πλημμυρικές πεδιάδες, και τη συζευγμένη 1D/2D προσομοίωση της σύνδεσης της 1D ροής του ρέματος με τις 2D επιφάνειες ροής πίσω από τα αναχώματα.

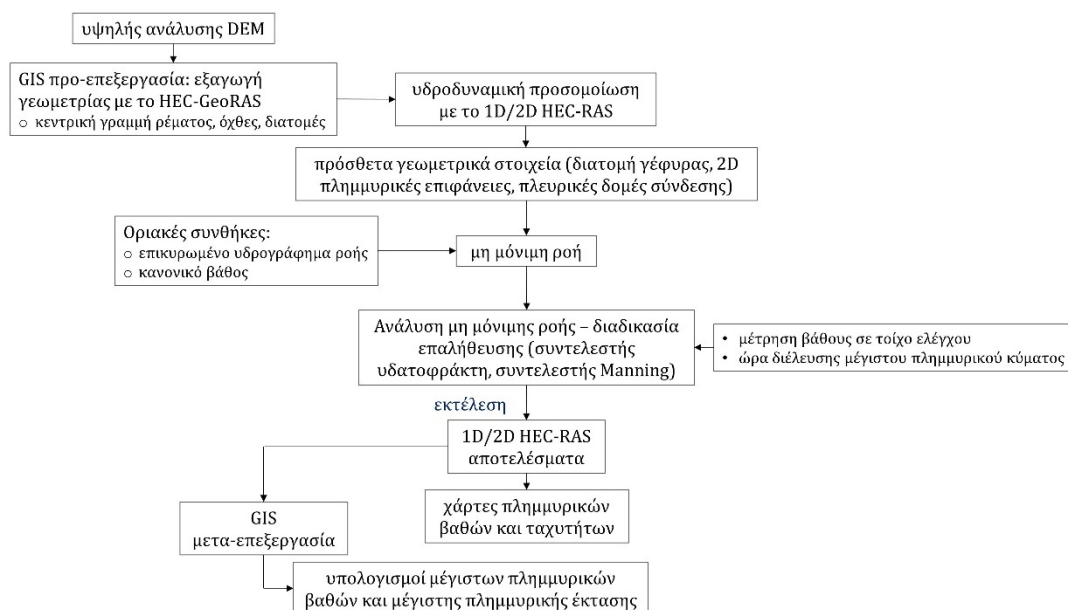
Για τους υδραυλικούς υπολογισμούς της 1D προσομοίωσης ροής, οι ρυθμίσεις σχετικά με το καθεστώς ροής και τον αριθμό Froude, την υποδιαίρεση χρόνου, τη μέθοδο υπολογισμού του ρυθμού απωλειών λόγω τριβής στις διατομές και στη γέφυρα, καθώς και οι επιλογές υπολογισμών σε ό,τι αφορά τον άρρητο συντελεστή στάθμισης, το όριο ανεκτικότητας υπολογισμών του πλημμυρικού βάθους στις διατομές σε σχέση με το αρχικώς θεωρούμενο, το μέγιστο αριθμό επαναλήψεων, τα χρονικά βήματα προθέρμανσης, τα παρεμβαλλόμενα βήματα κατά την υποδιαίρεση χρόνου, το συντελεστή φθοράς κατά την καταβύθιση της γέφυρας, αλλά και οι επιλογές για τον προ-επεξεργαστή και τον επιλυτή των 1D εξισώσεων, ορίστηκαν σύμφωνα με το 1D μοντέλο. Τέθηκε επίσης ο συντελεστής σταθερότητας της ροής στις πλευρικές δομές ίσος με 2, επιδιώκοντας μια σταθερή και με ακρίβεια λύση.

Για τους υδραυλικούς υπολογισμούς της 2D προσομοίωσης ροής, εισήχθησαν επίσης επιλογές υπολογισμών και όρια ανεκτικότητας. Ειδικότερα, ο άρρητος συντελεστής στάθμισης θ —που σταθμίζει την επίλυση των μερικών παραγώγων στο χρόνο—ορίστηκε ίσος με 1, τόσο κατά τους υπολογισμούς όσο και κατά την προθέρμανση, για μια σταθερότερη λύση, πιθανώς με μικρότερη ακρίβεια. Το όριο ανεκτικότητας υπολογισμών της στάθμης της επιφάνειας του νερού προσδιορίστηκε ίσο με 0.003 m. Ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων για την επίλυση των εξισώσεων μη μόνιμης ροής ορίστηκε ίσος με 20, προκειμένου να αποδίδεται μικρότερο αριθμητικό σφάλμα από την καθορισμένη ανεκτικότητα στη στάθμη του νερού, σε όλες τις θέσεις του 2D υπολογιστικού πλέγματος. Χρησιμοποιήθηκαν οι 2D εξισώσεις διάχυσης κύματος

(DWE), καθώς εκτελούνται ταχύτερα και χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη σταθερότητα. Τέλος, ενώ δίδεται η δυνατότητα ρύθμισης διαφορετικού υπολογιστικού βήματος για τις 2D επιφάνειες ροής, ως υποδιαίρεση του βήματος προσομοίωσης της μη μόνιμης ροής, εντούτοις, η υποδιαίρεση τέθηκε ίση με 1. Επομένως οι 2D επιφάνειες ροής χρησιμοποιούν το ίδιο υπολογιστικό βήμα με τη συνολική λύση της μη μόνιμης ροής (Brunner and CEIWR-HEC, 2016b).

Ορίστηκαν ακόμη επιλογές υπολογισμών και όρια ανεκτικότητας για τους υδραυλικούς υπολογισμούς της συζευγμένης 1D/2D προσομοίωσης ροής. Συγκεκριμένα, στις πλευρικές δομές σύνδεσης της 1D ροής με τις 2D επιφάνειες ροής ορίστηκε ότι δε θα γίνονται επιπλέον επαναλήψεις για τους υπολογισμούς. Το όριο ανεκτικότητας υπολογισμών της στάθμης της επιφάνειας του νερού στις δομές σύνδεσης ορίστηκε ίσο με 0.003 m. Τέθηκε επίσης ένα όριο ανεκτικότητας στους υπολογισμούς ροής από τις πλευρικές δομές, ίσο με 0.1%. Η ανεκτικότητα υπολογισμών ελάχιστης ροής ορίστηκε ίση με 0.3 m³/s, έτσι ώστε το λογισμικό να μην προβαίνει σε επαναλήψεις όταν η ροή που διέρχεται από ένα 1D στοιχείο σε ένα 2D στοιχείο είναι πολύ μικρή και ασήμαντη για τη λύση (Brunner and CEIWR-HEC, 2016b).

Οι υδραυλικοί υπολογισμοί της 1D/2D προσομοίωσης μη μόνιμης ροής πραγματοποιήθηκαν από τις 17 Οκτωβρίου 2006 στις 08:00 έως τις 18:00, με υπολογιστικό βήμα τα 10 sec είτε τα 2 sec. Κατ' αντιστοιχία με την 1D προσομοίωση, εκτελέστηκαν ο προ-επεξεργαστής γεωμετρίας, ο προσομοιωτής μη μόνιμης ροής, και ο μετα-επεξεργαστής για την εξαγωγή αποτελεσμάτων, με βήμα αποτελεσμάτων τα 10 min, ενώ η χαρτογράφησή τους εξήχθη ανά 2 min (Brunner and CEIWR-HEC, 2016b). Όλες οι ενέργειες για τη συζευγμένη 1D/2D προσομοίωση συνοψίζονται σε ένα διάγραμμα διαδικασίας στην [Εικόνα 4-8](#).



Εικόνα 4-8. Διάγραμμα διαδικασίας για την 1D/2D συζευγμένη υδραυλική προσομοίωση του κάταντες τμήματος του ρέματος Αλμυρίδας.

4.2 Υδρολογική λεκάνη του ποταμού Humber

4.2.1 Περιγραφή περιοχής μελέτης

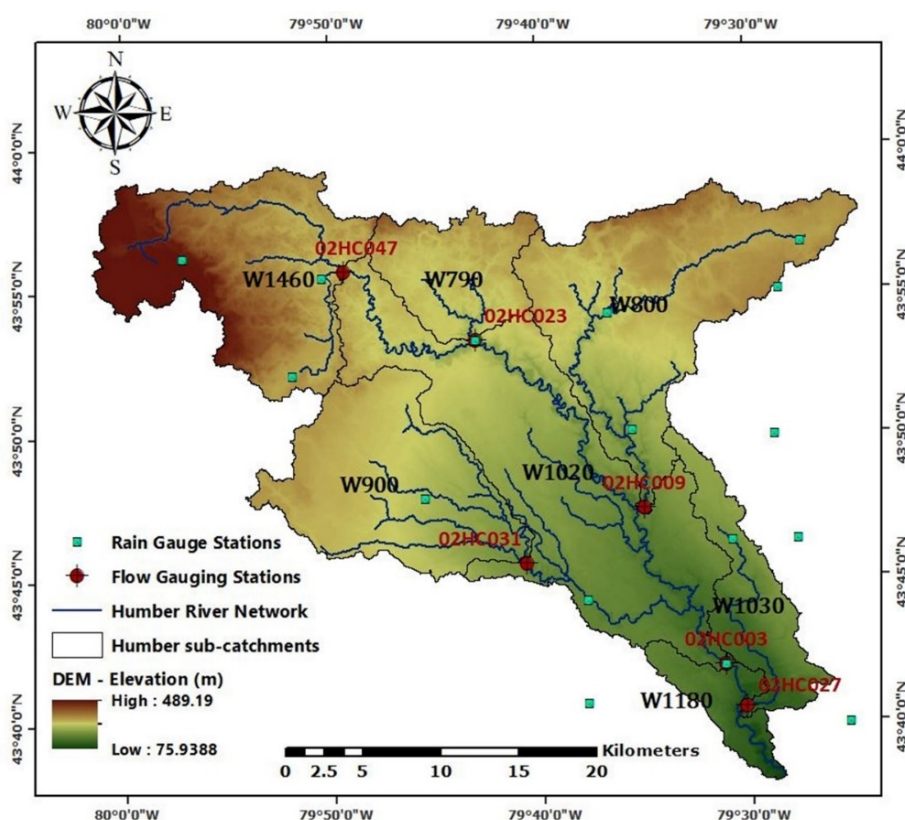
Η υδρολογική λεκάνη του ποταμού Humber χωροθετείται στην ευρύτερη περιοχή του Τορόντο, στο νότιο Οντάριο του Καναδά. Έχει έκταση 889 km², και διαμερίζεται σε επτά υπολεκάνες. Ο Πίνακας 4-2 παρουσιάζει την έκταση κάθε υπολεκάνης, μαζί με το μήκος και την κλίση της κύριας μισγάγγειας.

Πίνακας 4-2. Χαρακτηριστικά των υπολεκανών του ποταμού Humber.

Υπολεκάνη	Επιφάνεια (km ²)	Μήκος κύριας μισγάγγειας (km)	Κλίση κύριας μισγάγγειας (m/m)	Σταθμός μέτρησης απορροής στην έξοδο υπολεκάνης
W1460	161.6319	30.490527	0.007277	02HC047
W790	63.2952	15.446972	0.007888	02HC023
W800	192.4848	53.400175	0.003251	02HC009
W900	140.3595	27.587806	0.004841	02HC031
W1030	60.246	31.909755	0.004202	02HC027
W1020	241.1919	76.009458	0.002489	02HC003
W1180	29.8854	19.110794	0.004919	-

Η Εικόνα 4-9 δείχνει την έκταση της λεκάνης απορροής του ποταμού Humber και το υφιστάμενο δίκτυο ποταμών, όπως προέκυψε μέσω της οριοθέτησης της λεκάνης απορροής από το ψηφιακό μοντέλο υψομετρίας (Digital Elevation Model - DEM) σε χωρική ανάλυση 30 m × 30 m, που παρέχεται από το Υπουργείο Φυσικών Πόρων του

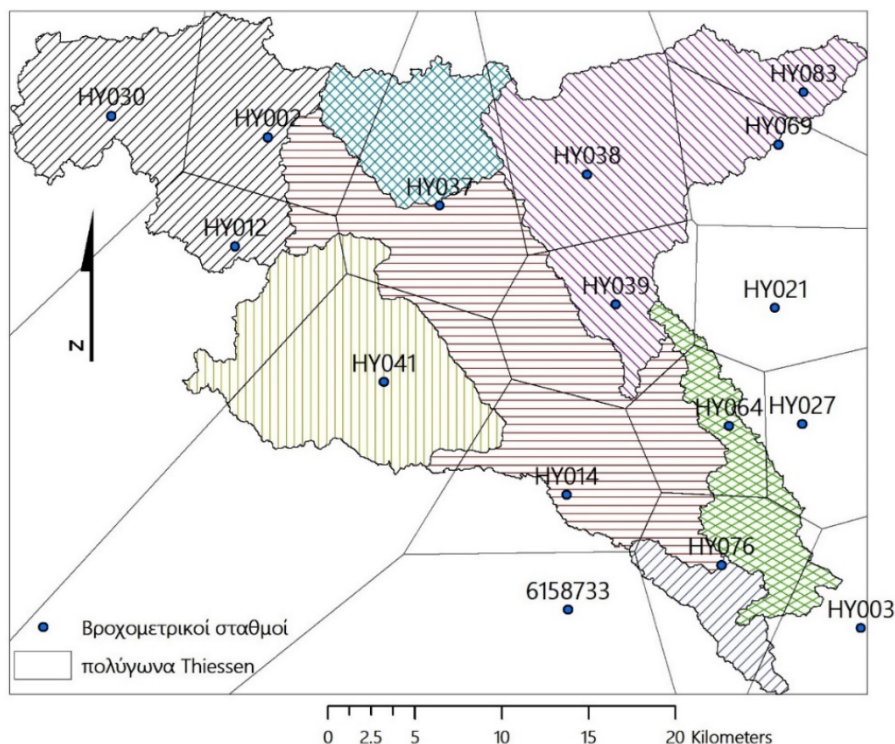
Οντάριο (OMNR, 2013), με χρήση της επέκτασης HEC-GeoHMS του ArcGIS. Τα υψόμετρα κυμαίνονται μεταξύ 75 m και 489 m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, με το βορειοδυτικό τμήμα να παρουσιάζει απότομες κλίσεις (TRCA, 2008), ενώ το κεντρικό τμήμα να είναι συγκριτικά επίπεδο. Για την παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των πολυγώνων Thiessen για την εκτίμηση της μέσης περιοχικής βροχόπτωσης σε κάθε μία από τις επτά υπολεκάνες απορροής μέσω της στάθμισης δεκαέξι βροχόμετρων σε ολόκληρη την υδρολογική λεκάνη. Χρησιμοποιήθηκαν επίσης δεδομένα καταγεγραμμένης απορροής από τους έξι σταθμούς μέτρησης ροής που βρίσκονται στην έξοδο των έξι υπολεκανών. Τα καταγεγραμμένα δεδομένα με χρονικό βήμα 1 h συγκεντρώθηκαν από την Αρχή Διατήρησης του Τορόντο και της Περιφέρειας (TRCA, 2020), καθώς και την υπηρεσία Περιβάλλοντος και Κλιματικής Αλλαγής του Καναδά (GC-ECCC, 2020). Από παρατηρήσεις 30ετίας (1971–2000), η μέση ετήσια βροχόπτωση στη λεκάνη βρέθηκε να είναι ίση με 834 mm, σύμφωνα με καταγραφές σταθμού στην πόλη του Τορόντο, που βρίσκεται στην παράκτια ζώνη της λίμνης Οντάριο (TRCA, 2008).



Εικόνα 4-9. Τοποθεσία της λεκάνης απορροής του ποταμού Humber στο Νότιο Οντάριο, με τους σταθμούς μέτρησης βροχόπτωσης και απορροής.

Στην [Εικόνα 4-10](#) παρουσιάζονται τα πολύγωνα Thiessen όπως παράχθηκαν με χρήση του ArcGIS από την επιρροή συνολικά δεκαέξι βροχομετρικών σταθμών στη λεκάνη

απορροής του ποταμού Humber. Ο Πίνακας 4-3 παραθέτει τη στάθμιση από την επιρροή των βροχομετρικών σταθμών σε κάθε υπολεκάνη.



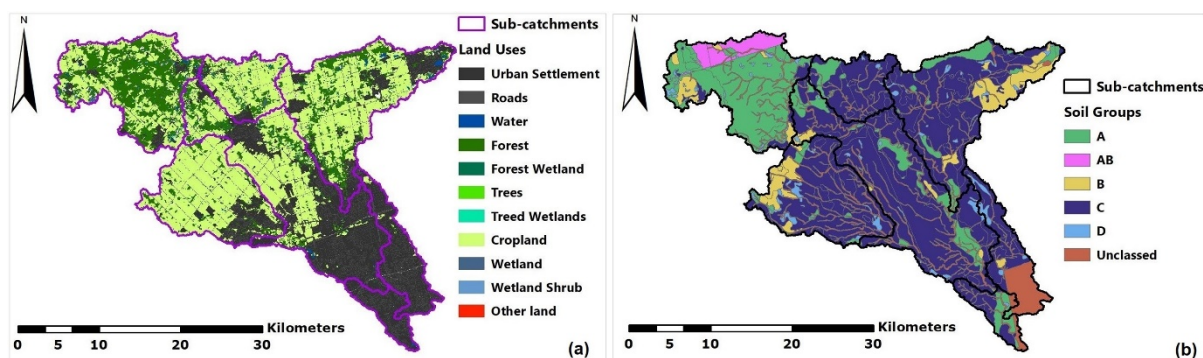
Εικόνα 4-10. Πολύγωνα Thiessen από 16 βροχομετρικούς σταθμούς, και περιοχές επιρροής των βροχογράφων στις επτά υπολεκάνες της υδρολογικής λεκάνης του ποταμού Humber.

Πίνακας 4-3. Στάθμιση επιρροής των βροχομετρικών σταθμών στις υπολεκάνες.

Επιρροή από βροχομετρικό σταθμό	Στάθμιση επιρροής στις υπολεκάνες						
	W1460	W790	W800	W900	W1030	W1020	W1180
HY002	0.33	0.21	-	-	-	0.07	-
HY003	-	-	-	-	0.08	-	0.05
HY012	0.2	-	-	0.22	-	0.03	-
HY014	-	-	-	0.02	-	0.25	0.01
HY021	-	-	-	-	0.01	-	-
HY027	-	-	-	-	0.05	-	-
HY030	0.47	-	-	-	-	-	-
HY037	-	0.76	0.02	0.04	-	0.24	-
HY038	-	0.03	0.48	-	-	0.01	-
HY039	-	-	0.19	-	0.06	0.17	-
HY041	-	-	-	0.72	-	0.08	-
HY064	-	-	-	-	0.36	0.1	-
HY069	-	-	0.15	-	-	-	-
HY076	-	-	-	-	0.44	0.05	0.93
HY083	-	-	0.16	-	-	-	-
6158733	-	-	-	-	-	-	0.01

4.2.2 Δεδομένα χρήσεων γης & υδρολογικών κατηγοριών εδάφους

Σύμφωνα με τους Γενικούς χάρτες Χρήσεων Γης του 2010, η μελετώμενη λεκάνη απορροής αποτελείται από αγροτικές εκτάσεις, αστικές δομές, φυσική βλάστηση και υδάτινα σώματα. Συγκεκριμένα, η λεκάνη απορροής του ποταμού Humber καλύπτεται από αστικό ιστό (28.1%), δρόμους (8.8%), λίμνες (0.9%), δάση (15.9%), δασικούς υγροτόπους (0.4%), δέντρα (0.4%), δενδρώδεις υγροτόπους (0.2%), καλλιεργήσιμες εκτάσεις (44.2%), υγροβιοτόπους (1.0%), θαμνώδεις υγροτόπους (0.1%) και άλλες εκτάσεις (0.01%), όπως φαίνεται στην [Εικόνα 4-11α](#), στοιχεία που παρέχονται από τις Χρήσεις Γης της υπηρεσίας Γεωργίας και Γεωργικών Τροφίμων του Καναδά (GC-AAC, 2019). Επομένως, η μελετώμενη λεκάνη απορροής χαρακτηρίζεται εν μέρει αγροτική και εν μέρει αστική. Όσον αφορά τον αστικό ιστό, η υπολεκάνη W1460 είναι κατά 35% υψηλά οικιστική, κατά 60% αποτελείται από οικιστικά αγροκτήματα, και κατά 5% από γήπεδα γκολφ. Η υπολεκάνη W790 είναι κατά 50% υψηλά οικιστική και κατά 50% αποτελείται από οικιστικά αγροκτήματα. Η υπολεκάνη W800 είναι κατά 70% υψηλά οικιστική και κατά 30% αποτελείται από οικιστικά αγροκτήματα. Η υπολεκάνη W900 είναι κατά 50% υψηλά οικιστική, κατά 45% αποτελείται από οικιστικά αγροκτήματα, και κατά 5% από γήπεδα γκολφ. Η υπολεκάνη W1030 είναι κατά 70% υψηλά οικιστική και κατά 30% βιομηχανική. Η υπολεκάνη W1020 είναι κατά 60% υψηλά οικιστική και κατά 40% βιομηχανική. Τέλος, η υπολεκάνη W1180 είναι κατά 100% υψηλά οικιστική, με βάση την ερμηνεία χαρτών από συνεργασία της Civica Infrastructure Inc. (CIVICA) και της Αρχής Διατήρησης του Τορόντο και της Περιφέρειας (TRCA) (CIVICA and TRCA, 2015) καθώς και της TRCA (2008). Όσον αφορά τους δρόμους, οι υπολεκάνες W1460, W790, W800 και W900 αποτελούνται από χαλικόστρωτους δρόμους, οι W1030 και W1180 αποτελούνται από ασφαλτοστρωμένους δρόμους με δίκτυο ομβρίων, ενώ τόσο χαλικόστρωτοι όσο και ασφαλτοστρωμένοι δρόμοι με δίκτυο ομβρίων διέρχονται από την W1020 σε ίσα ποσοστά, από ερμηνεία χαρτών του (CIVICA and TRCA, 2015).



Εικόνα 4-11. (α) Χρήσεις γης και (β) Κατηγορίες εδάφους της λεκάνης απορροής του ποταμού Humber. Οι χάρτες ανατυπώθηκαν από το Agriculture and Agri-Food Canada υπό την ανοικτής πρόσβασης κυβερνητική άδεια του Καναδά, έκδοση 2.0 (<https://open.canada.ca/en/open-government-licence-canada>, πρόσβαση στις 11 Μαΐου 2020).

Οι τύποι εδάφους της περιοχής ποικίλλουν χωρικά. Ο χάρτης με τις κατηγορίες εδάφους που φαίνεται στην [Εικόνα 4-11β](#) σχεδιάστηκε στο ArcGIS σύμφωνα με υδρογεωλογικά δεδομένα και δεδομένα ταξινόμησης εδάφους, που παρέχονται από την Canadian Soil Information Service, Detailed Soil Survey Compilations (GC-CSIS, 2014) και Agriculture and Agri-food Canada, Ontario Detailed Soil Survey (GC-AAC, 2015). Οι υδρολογικοί τύποι εδάφους που απαντώνται είναι A, AB, B, Γ, Δ και αταξινομήτοι, με τους τελευταίους να θεωρούνται ως μείξη των τεσσάρων τύπων εδάφους (A, B, Γ και Δ) σε ίσες αναλογίες. Τα εδάφη της κατηγορίας A έχουν μικρή δυνητικότητα απορροής και υψηλό ρυθμό διήθησης, ενώ τα εδάφη της κατηγορίας Δ παρουσιάζουν υψηλή δυνατότητα απορροής με χαμηλό ρυθμό διήθησης (USDA, 1989). Οι διαφορετικοί απαντώμενοι υδρολογικοί τύποι εδάφους, μαζί με τις διαφοροποιήσεις στις χρήσεις γης, επηρεάζουν την αποστράγγιση κάθε υπολεκάνης.

4.2.3 Δεδομένα βροχόπτωσης έξι μεμονωμένων γεγονότων

Η επίδοση των υδρολογικών προσομοιώσεων ελέγχθηκε μέσω της μελέτης έξι μεμονωμένων γεγονότων βροχόπτωσης, που εξετάστηκαν σε ζεύγη με παρόμοια χαρακτηριστικά. Τα επιλεγμένα γεγονότα έπληξαν την υδρολογική λεκάνη από το 2010 έως το 2017, κυρίως κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου (άνοιξη και καλοκαίρι). Τα χαρακτηριστικά που κατέστησαν σημαντικά τα εξεταζόμενα γεγονότα, μελετώντας τα σε ζεύγη, ήταν:

- η υψηλή ένταση βροχόπτωσης σε όλες τις υπολεκάνες, μεγαλύτερη από 10 mm/h, με τιμές ακόμη και ίσες με 26 mm/h, υπό ξηρές συνθήκες πρότερης υγρασίας (Σ.Π.Υ.) του εδάφους (Τύπου I),

- δύο υδρολογικές αιχμές σε σύντομο χρονικό διάστημα, επίσης υπό ξηρές Σ.Π.Υ.,
- διάφορες Σ.Π.Υ. του εδάφους, συγκεκριμένα, κανονικές (Τύπου II) έως υγρές (Τύπου III) στις κυρίαρχα αγροτικές υπολεκάνες, ενώ ξηρές (Τύπου I) στις κυρίαρχα αστικές υπολεκάνες.

Σε όλες τις προαναφερθείσες κατηγορίες, η αθροιστική βροχόπτωση ήταν μεγαλύτερη στο δεύτερο μελετώμενο γεγονός κάθε ζεύγους. Ο Πίνακας 4-4 παραθέτει τα υδρομετρικά χαρακτηριστικά των έξι μελετώμενων γεγονότων βροχόπτωσης που εξετάστηκαν σε ζεύγη, μαζί με τις καταγεγραμμένες μέγιστες απορροές. Από τα συμβάντα υψηλής έντασης βροχόπτωσης, το δεύτερο γεγονός εμφάνισε σχεδόν διπλάσια αθροιστική βροχόπτωση απ' ό,τι το πρώτο στις επιμέρους υπολεκάνες. Από τα συμβάντα δύο υδρολογικών αιχμών, το πρώτο γεγονός–μικρότερης βροχόπτωσης–εμφάνισε μέγιστη ένταση βροχής στη δεύτερη υδρολογική αιχμή, ενώ το δεύτερο γεγονός–μεγαλύτερης βροχόπτωσης–εμφάνισε μέγιστη ένταση βροχής κατά πλειοψηφία στην πρώτη υδρολογική αιχμή. Για τα γεγονότα με κανονικές έως υγρές συνθήκες πρότερης υγρασίας στις κυρίαρχα αγροτικές υπολεκάνες, προσαρμόστηκαν ορισμένοι από τους θεωρούμενους τύπους Σ.Π.Υ.–ένας από τους παράγοντες που καθορίζουν τον αριθμό καμπύλης (curve number, CN)–ώστε να υπάρχει ομοιομορφία στις αρχικές συνθήκες των αντίστοιχων υπολεκανών των δύο γεγονότων. Συγκεκριμένα, και για τα δύο συμβάντα, στην υπολεκάνη W1020 οι Σ.Π.Υ. ήταν πολύ κοντά στο ανώτατο όριο των ξηρών συνθηκών, και έτσι θεωρήθηκαν ως Τύπου I. Για το γεγονός στις 22–25 Ιουνίου 2017, οι Σ.Π.Υ. στην υπολεκάνη W790 ήταν πολύ κοντά στο ανώτατο όριο των κανονικών συνθηκών, και ως εκ τούτου θεωρήθηκαν ως τύπου II. Επιπλέον, οι Σ.Π.Υ. στην υπολεκάνη W900 ήταν πολύ κοντά στο κατώτατο όριο των κανονικών συνθηκών, και επομένως θεωρήθηκαν ως Τύπου II. Τα όρια του ύψους υετού κατά τις προηγούμενες πέντε ημέρες που προσδιορίζουν τον τύπο των Σ.Π.Υ. του εδάφους ανά περίοδο καλλιέργειας όρισε ο Πίνακας 3-1.

Πίνακας 4-4. Χαρακτηριστικά των μελετώμενων βροχοπτώτικών γεγονότων.

No	Έναρξη γεγονότος	Πέρασ γεγονότος	Διάρκεια προσομοίω- σης (h)	Εποχή	Υπο- λεκάνες	Συνθήκες πρότερης υγρασίας 5 ημερών (Σ.Π.Υ.) (mm)	Τύπος Σ.Π.Υ.	Αθροιστική βροχόπτωση (mm)	Μέγιστη ένταση βροχόπτωσης (mm/h)	Καταγεγραμμένη μέγιστη απορροή (m ³ /s)	Σχόλια
1	28 Μαΐου 2013 στις 4:00	30 Μαΐου 2013 στις 20:00	64	Καλλιερ- γητική	W1460	4.6	I	36.6	15.1	6.5	Υψηλής έντασης βροχόπτωση
					W790	3.7	I	36.4	19.0	3.2	
					W800	3.5	I	31.9	10.7	15.7	
					W900	2.9	I	55.8	25.2	62.1	
					W1030	2.1	I	47.8	24.0	122.4	
					W1020	3.0	I	48.3	26.0	107.8	
2	3 Ιουλίου 2013 στις 23:00	10 Ιουλίου 2013 στις 23:00	168	Καλλιερ- γητική	W1460	0.8	I	63.4	10.0	6.5	Υψηλής έντασης βροχόπτωση
					W790	0	I	82.0	25.2	19.3	
					W800	0.2	I	81.6	17.9	69.9	
					W900	0.1	I	77.2	25.2	81.6	
					W1030	0	I	107.3	30.3	201.7	
					W1020	0	I	106.7	26.0	268.2	
3	7 Απριλίου 2013 στις 5:00	15 Απριλίου 2013 στις 23:00	210	Μη καλλιερ- γητική	W1460	0.9	I	74.2	4.2	9.0	2 υδρολογικές αιχμές
					W790	0.5	I	73.6	3.2	5.4	
					W800	0.2	I	67.1	3.7	8.1	
					W900	0.5	I	66.9	3.9	8.8	
					W1030	0.2	I	44.7	2.4	3.5	
					W1020	0.2	I	60.6	3.3	4.7	
4	30 Απριλίου 2017 στις 5:00	7 Μαΐου 2017 στις 22:00	185	Καλλιερ- γητική	W1460	10.3	I	84.1	3.9	3.2	2 υδρολογικές αιχμές
					W790	10.1	I	82.0	4.7	2.6	
					W800	5.5	I	91.4	7.7	2.6	
					W900	11.3	I	91.2	5.5	3.0	
					W1030	11.2	I	89.9	4.1	4.8	
					W1020	8.2	I	86.9	4.6	2.6	
5	26 Ιουνίου 2010 στις 7:00	30 Ιουνίου 2010 στις 12:00	101	Καλλιερ- γητική	W1460	56.7	III	35.3	7.8	6.6	Κανονικές έως υγρές Σ.Π.Υ. στις αγροτικές εκτάσεις
					W790	46.5	II	38.3	7.0	4.0	
					W800	46.0	II	30.9	4.9	7.6	
					W900	38.2	II	35.3	7.9	22.5	
					W1030	27.0	I	43.8	24.1	88.4	
					W1020	37.8	II → I	41.7	12.2	92.7	
6	22 Ιουνίου 2017 στις 15:00	25 Ιουνίου 2017 στις 17:00	74	Καλλιερ- γητική	W1460	57.9	III	65.2	16.6	25.5	Κανονικές έως υγρές Σ.Π.Υ. στις αγροτικές εκτάσεις
					W790	56.3	III → II	54.5	16.6	13.3	
					W800	45.5	II	54.8	13.2	22.4	
					W900	35.2	I → II	42.6	11.2	20.7	
					W1030	33.8	I	44.9	8.4	61.0	
					W1020	38.9	II → I	48.4	10.7	89.4	

Ο Πίνακας 4-5 παρουσιάζει έναν άλλο σημαντικό παράγοντα για την υδρομετρική ανάλυση των εξεταζόμενων γεγονότων, που είναι η χρονική διαφορά Δt (h) μεταξύ της καταγεγραμμένης μέγιστης απορροής και της μέγιστης έντασης της βροχόπτωσης για κάθε υπολεκάνη. Το Δt (h) ισούται με το χρόνο διαδρομής της μέγιστης βροχόπτωσης από την είσοδο της υπολεκάνης μέχρι την έξοδο, όπως εκφράζεται από το αντίστοιχο υδρογράφημα, και δίδεται από την εξίσωση:

$$\Delta t = \frac{L \times 1000}{V \times 3600} \quad (40)$$

όπου L (km) είναι το μήκος της κύριας μισγάγγειας της υπολεκάνης, και V (m/s) είναι η μέση ταχύτητα.

Πίνακας 4-5. Χρονική διαφορά μεταξύ της καταγεγραμμένης μέγιστης απορροής και της μέγιστης έντασης της βροχόπτωσης για τα έξι μελετώμενα γεγονότα βροχής.

Γεγονός	Δt (h) = Χρόνος καταγεγραμμένης Q_{max} – Χρόνος P_{max}					
	W1460	W790	W800	W900	W1030	W1020
28-30 Μαΐου 2013	18	10	6	10	2	14
3-10 Ιουλίου 2013	14	11	13	11	3	15
7-15 Απριλίου 2013	31	29	34	32	23	29
(1 ^η και 2 ^η αιχμή)	13	10	13	10	2	12
30 Απριλίου-7 Μαΐου 2017	13	14	18	28	1	13
(1 ^η και 2 ^η αιχμή)	27	28	29	13	15	25
26-30 Ιουνίου 2010	17	11	5	13	1	2
22-25 Ιουνίου 2017	7	2	6	9	-4	16

Από το πρώτο ζεύγος γεγονότων με υψηλή ένταση βροχόπτωσης, για το συμβάν στις 28-30 Μαΐου 2013, στην υπολεκάνη W800 οι Σ.Π.Υ. για πέντε ημέρες πριν από τη βροχή ήταν ίσες με 3.5 mm, ακολουθούμενες από 11.8 mm βροχόπτωσης κατά τη διάρκεια μόλις 19 h, που υποδεικνύει ότι το έδαφος ήταν ήδη κορεσμένο πριν από τη μέγιστη ένταση της βροχής. Στη συνέχεια, σε 1 h έπεσαν 10.7 mm βροχής, που αποτέλεσαν τη μέγιστη ένταση της βροχόπτωσης, ενώ η μέγιστη απορροή σημειώθηκε σύντομα, μετά από 6 h, κάτι που εκτιμάται αρκετά λογικό. Η προκύπτουσα μέση ταχύτητα της βροχόπτωσης αιχμής θα πρέπει να ήταν ίση με 2.5 m/s, τιμή πολύ ρεαλιστική λόγω του κορεσμένου εδάφους. Απ' την άλλη, για την ίδια υπολεκάνη και το γεγονός στις 3-10 Ιουλίου 2013, για πέντε ημέρες πριν από τη βροχή, οι Σ.Π.Υ. ήταν ίσες με 0.2 mm. Στη συνέχεια, κατά τη διάρκεια 111 h σημειώθηκαν μόλις 18.8 mm βροχόπτωσης, που υποδεικνύουν πολύ ξηρές συνθήκες πριν από τη μέγιστη ένταση της βροχής. Από τότε, σε 4 h έπεσαν 58.1 mm βροχής, από τα οποία, τα 17.9 mm—που ήταν η μέγιστη ένταση της βροχής—έπεσαν μόλις σε 1 h. Επομένως, εξηγείται η εμφάνιση της καταγεγραμμένης μέγιστης απορροής 13 h μετά τη μέγιστη ένταση βροχής, αρκετά αργότερα απ' ό,τι στο πρώτο συμβάν του ζεύγους γεγονότων. Υπό αυτές τις συνθήκες, η μέση ταχύτητα της βροχόπτωσης αιχμής θα πρέπει να ήταν ίση με 1.1 m/s.

Από το δεύτερο ζεύγος βροχοπτώσιων γεγονότων με τις δύο υδρολογικές αιχμές, για το συμβάν στις 7-15 Απριλίου 2013, η δεύτερη αιχμή της έντασης της βροχόπτωσης ήταν υψηλότερη από την πρώτη σε όλες τις υπολεκάνες κατά ένα συντελεστή από 0.42 έως 1.26. Η αύξηση δεν ήταν ανάλογη για τη μέγιστη απορροή. Συγκεκριμένα, οι υπολεκάνες W1460 και W1030 παρουσίασαν μείωση στη δεύτερη απορροή αιχμής σε σύγκριση με την πρώτη. Επιπλέον, η δεύτερη μέγιστη απορροή ήταν μεγαλύτερη από την πρώτη στις υπόλοιπες τέσσερις υπολεκάνες κατά ένα συντελεστή μόλις από 0.26 έως 0.50. Γενικά,

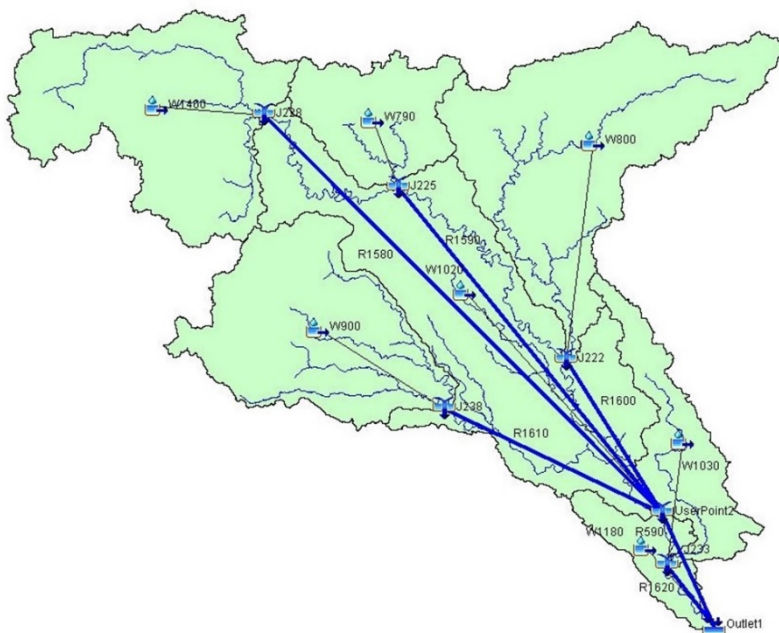
σε όλες τις υπολεκάνες, ο χρόνος εμφάνισης της πρώτης μέγιστης απορροής καθυστέρησε αρκετά σε σχέση με τον χρόνο της πρώτης αιχμής της βροχόπτωσης, επειδή το κατακρημνισμένο νερό μεταξύ των δύο αναφερόμενων χρόνων ήταν σημαντικό. Ενδεικτικά, για την υπολεκάνη W1460, η πρώτη μέγιστη απορροή σημειώθηκε 31 h μετά την πρώτη αιχμή της βροχόπτωσης, ενώ ενδιάμεσα έπεσαν 21 mm βροχής. Γι' αυτή την υπολεκάνη, η προκύπτουσα μέση ταχύτητα της βροχόπτωσης αιχμής θα πρέπει να ήταν πολύ χαμηλή και ίση με 0.28 m/s. Για το γεγονός στις 30 Απριλίου–7 Μαΐου 2017, αν και η πρώτη αιχμή της έντασης της βροχόπτωσης ήταν υψηλότερη από τη δεύτερη σε όλες σχεδόν τις υπολεκάνες εκτός από την W1030, εντούτοις, η δεύτερη μέγιστη απορροή ήταν υψηλότερη από την πρώτη στις περισσότερες από τις υπολεκάνες, με εξαίρεση τις W1030 και W900. Βέβαια, στην W900 οι διαφορές στις μέγιστες απορροές ήταν πολύ μικρές, σχεδόν δυσδιάκριτες. Η παραπάνω παρατήρηση εξηγείται επειδή στις περισσότερες από τις υπολεκάνες πολλά χιλιοστά βροχής έπεσαν μεταξύ της δεύτερης αιχμής της βροχόπτωσης και της δεύτερης μέγιστης απορροής. Ειδικότερα, στις υπολεκάνες W1460, W790 και W800, η δεύτερη μέγιστη ένταση της βροχόπτωσης ήταν μικρή και ίση μόλις με 3.2 mm, 2.6 mm και 2.6 mm αντίστοιχα, ενώ η δεύτερη μέγιστη απορροή συνέβη μετά από 27 h, 28 h και 29 h, αντίστοιχα, έπειτα από αρκετή ποσότητα επιπρόσθετου κατακρημνισμένου ύδατος στις αντίστοιχες υπολεκάνες, ίση με 35.3 mm, 35 mm και 32.9 mm. Οι ανεπτυγμένες μέσες ταχύτητες ήταν ιδιαίτερα χαμηλές.

Για το τρίτο ζεύγος βροχοπτώσιων γεγονότων με κανονικές έως υγρές Σ.Π.Υ. στις αγροτικές εκτάσεις, για το συμβάν στις 26–30 Ιουνίου 2010, στην υπολεκάνη W790 οι Σ.Π.Υ. 5 ημερών ήταν ίσες με 46.5 mm. Έπειτα, έπεσαν 18.2 mm βροχής σε μια περίοδο 35 h, κατατάσσοντας το γεγονός ως μη ξαφνικό, αλλά κυρίως ως μεγαλύτερης διάρκειας. Η μέγιστη ένταση της βροχόπτωσης ίση με 7.0 mm/h—όχι ιδιαίτερα μεγάλη—που σημειώθηκε κατόπιν, δικαιολογεί ότι η μέγιστη απορροή σημειώθηκε καθυστερημένα, 11 h αργότερα. Η προκύπτουσα μέση ταχύτητα της βροχόπτωσης αιχμής θα πρέπει να ήταν ίση με 0.4 m/s. Απ' την άλλη, για την ίδια υπολεκάνη και το γεγονός ξαφνικής πλημμύρας στις 22–25 Ιουνίου 2017, οι Σ.Π.Υ. 5 ημερών ήταν ίσες με 56.3 mm, ακολουθούμενες από 26.3 mm βροχόπτωσης κατά τη διάρκεια μόλις 15 h, υποδεικνύοντας τον ταχύ κορεσμό του εδάφους πριν από τη μέγιστη ένταση της βροχής. Έπειτα, σε 2 h έπεσαν 23.3 mm βροχής, εκ των οποίων τα 16.6 mm κατακρημνίστηκαν σε 1 h, που συνδυαστικά ερμηνεύουν ότι η καταγεγραμμένη μέγιστη απορροή

σημειώθηκε μόλις 2 h μετά τη μέγιστη ένταση της βροχής. Αυτός ο χρόνος διαδρομής είχε ως αποτέλεσμα μια μέση ταχύτητα της βροχόπτωσης αιχμής περίπου ίση με 2 m/s. Για το γεγονός στις 26–30 Ιουνίου 2010, στην υπολεκάνη W1030, μια πλήρως αστική περιοχή, οι Σ.Π.Υ. 5 ημερών ήταν ίσες με 27 mm, ακολουθούμενες από 9.6 mm βροχόπτωσης κατά τη διάρκεια 35 h, με το έδαφος να είναι ήδη πλήρως κορεσμένο λόγω της υψηλής αδιαπερατότητας. Συνεπώς, εξηγείται γιατί η απορροή αιχμής εμφανίστηκε 1 h μετά την πολύ υψηλής έντασης αιχμή της βροχόπτωσης, ίση με 24.1 mm/h. Ο χρόνος διαδρομής της μέγιστης βροχόπτωσης μέχρι την έξοδο της υπολεκάνης θα πρέπει να προέκυψε με μέση ταχύτητα ίση με 9 m/s. Για την ίδια υπολεκάνη και το γεγονός στις 22-25 Ιουνίου 2017, υπήρξαν δύο αιχμές της βροχόπτωσης, μία ίση με 7.4 mm, και μία άλλη που συνέβη 4 h αργότερα, ίση με 8.4 mm, οι οποίες οδήγησαν σε δύο αιχμές της απορροής που συνέβησαν αμέσως. Η πρώτη αιχμή της απορροής ήταν υψηλότερη και εμφανίστηκε 4 h νωρίτερα από τη δεύτερη. Η άμεση απορροή δικαιολογείται επίσης από την υψηλή αδιαπερατότητα της αστικής περιοχής, καθώς και τις υψηλού επιπέδου Σ.Π.Υ. 5 ημερών, ίσων με 33.8 mm. Η μέση ταχύτητα του κύματος θα πρέπει να ήταν επίσης πολύ υψηλή.

4.2.4 Δεδομένα υδρολογικού μοντέλου HEC-HMS για έξι βροχοπτώτικα συμβάντα

Η οριοθέτηση της υδρολογικής λεκάνης και του υδρογραφικού δικτύου προέκυψε από το ψηφιακό μοντέλο υψομετρίας (DEM) χωρικής ανάλυσης 30 m x 30 m με χρήση του ArcGIS. Για την προσομοίωση των έξι καταγεγραμμένων βροχοπτώτικών γεγονότων, το εξεταζόμενο υδρολογικό σύστημα στο μοντέλο HEC-HMS αποτελείται από 7 υπολεκάνες, 6 διασταυρώσεις στην έξοδο των υπολεκανών με μετρητές απορροής, 6 κανάλια δρομολόγησης, και μία έξοδο του συστήματος, όπως φαίνεται στην [Εικόνα 4-12](#).



Εικόνα 4-12. Υδρολογικό σύστημα προσομοίωσης της λεκάνης του ποταμού Humber με το μοντέλο HEC-HMS.

Δημιουργήθηκε το μετεωρολογικό μοντέλο, και ως μέθοδος βροχόπτωσης επιλέχθηκε η στάθμιση καταγραφών από 16 συνολικά βροχομετρικούς σταθμούς (Gage Weights), με χρονοσειρές βροχοπτώσιων δεδομένων σε ωριαίο βήμα. Τις αθροιστικές βροχοπτώσεις ανά υπολεκάνη και ανά βροχοπτώσιό γεγονός, όπως και τα χρονικά πλαίσια ανά γεγονός στα οποία πραγματοποιήθηκαν οι υπολογισμοί υδρολογικής προσομοίωσης παρουσίασε ο Πίνακας 4-4.

Για τη μέθοδο απωλειών SCS Curve Number, ο curve number (CN) κάθε υπολεκάνης ενσωματώνει την επίδραση από τις χρήσεις γης, τον τύπο εδάφους και τις συνθήκες πρότερης εδαφικής υγρασίας. Για τον Καναδά, η μη καλλιεργητική περίοδος ορίζεται από τα μέσα Οκτωβρίου έως τα μέσα Απριλίου. Απ' την άλλη, η καλλιεργητική περίοδος διαρκεί για περίπου πέντε μήνες, από τα τέλη Απριλίου έως τις αρχές Οκτωβρίου. Οι συνθήκες πρότερης υγρασίας (Σ.Π.Υ.) αφορούν τη βροχόπτωση των προηγούμενων 5 ημερών και επιδρούν στον υπολογισμό του τελικού CN. Για τις Σ.Π.Υ., σε κάθε υπολεκάνη, η ποσότητα της βροχόπτωσης των προηγούμενων 5 ημερών υπολογίστηκε με τη μέθοδο των πολυγώνων Thiessen. Σχετικά με τις απαντώμενες χρήσεις γης και τις επιλογές των τυπικών τιμών των CN, έντονα οικιστικές περιοχές θεωρούνται εκείνες στις οποίες οι κατοικίες βρίσκονται σε οικόπεδα με μέσο μέγεθος ίσο με 1/8 στρέμματος ή λιγότερο, και αναφέρονται σε κατοικίες πόλης. Οικιστικά αγροκτήματα θεωρούνται εκείνα στα οποία οι κατοικίες βρίσκονται σε οικόπεδα με μέσο μέγεθος ίσο με 1/2 στρέμματος. Τα

γήπεδα γκολφ θεωρούνται ικανοποιητικής υδρολογικής κατάστασης, με κάλυψη χλοοτάπητα μεταξύ 50% και 75%. Οι δρόμοι είναι είτε ασφαλτοστρωμένοι με πεζοδρόμια και δίκτυο ομβρίων, είτε χαλικόστρωτοι (USDA, 1989). Οι λίμνες, οι δασικοί υγρότοποι, οι δενδρώδεις υγρότοποι, ο υγροβιότοποι, και οι θαμνώδεις υγρότοποι έχουν *CN* ίσο με 100 για όλους τους τύπους εδάφους (WSDT, 2019). Για την επιλογή των τυπικών τιμών του *CN* σε δασικές/δενδρώδεις περιοχές, και καλλιεργήσιμες εκτάσεις, τα δάση θεωρήθηκαν ικανοποιητικής υδρολογικής κατάστασης, βοσκήσιμα χωρίς να καίγονται, ενώ το έδαφος καλύπτεται από κάποια δασικά απορρίμματα. Οι τυπικές τιμές των *CN* για τα δέντρα υπολογίστηκαν ως συνδυασμός κάλυψης από ξύλινους κορμούς και χορτάρια (βοσκότοποι) σε ίσες αναλογίες, με ικανοποιητικές υδρολογικές συνθήκες. Τέλος, οι καλλιέργειες θεωρήθηκαν ικανοποιητικής υδρολογικής κατάστασης, φυτεμένες σε σειρές πάνω σε πλαγιές και με αναβαθμίδες (USDA, 1989). Ο Πίνακας 4-6 παρουσιάζει τις τυπικές τιμές του *CN* για κανονικές συνθήκες απορροής (Τύπου II), για τις απαντώμενες χρήσεις γης στη λεκάνη του ποταμού Humber, ανά κατηγορία εδάφους.

Πίνακας 4-6. Τιμές του *CN* για κανονικές συνθήκες απορροής (Τύπου II) για κάθε χρήση γης και κατηγορία εδάφους (USDA, 1989).

Χρήσεις γης	Curve Number (<i>CN</i>) για κανονικές συνθήκες απορροής (Τύπου II)			
	A	B	Γ	Δ
Υψηλά οικιστικές περιοχές	77	85	90	92
Οικιστικά αγροκτήματα	54	70	80	85
Βιομηχανικές περιοχές	81	88	91	93
Γήπεδα γκολφ	49	69	79	84
Χαλικόστρωτοι δρόμοι	76	85	89	91
Ασφαλτοστρωμένοι δρόμοι	98	98	98	98
Λίμνες και Υγρότοποι (Δασικοί-Δενδρώδεις-Υγροβιότοποι-Θαμνώδεις)	100*	100*	100*	100*
Δάση	36	60	73	79
Δέντρα	43	65	76	82
Καλλιεργήσιμες εκτάσεις	67	76	83	86

Σημειώσεις: *WSDT, 2019

Στο ArcGIS, η τομή των χαρτών χρήσεων γης (*LU*) και υδρολογικών κατηγοριών εδάφους (*SG*), παρήγαγε έναν νέο χάρτη με το συνδυασμό των παραπάνω ιδιοτήτων (*LU-SG*). Βάσει αυτού, δημιουργήθηκε ένας πίνακας που συγκέντρωνε για κάθε πολύγωνο διαφορετικής χρήσης γης και ομάδας εδάφους, την έκτασή του και τον αντίστοιχο αριθμό καμπύλης (*CN*) για κανονικές συνθήκες απορροής (Τύπου II) (USDA, 1989; WSDT, 2019), σε κάθε υπολεκάνη. Οι αναλυτικοί υπολογισμοί του *CN*// κάθε υπολεκάνης παρατίθενται στο Παράρτημα Α.

Το ποσοστό (%) αδιαπερατότητας είναι η άλλη σημαντική παράμετρος της μεθόδου απωλειών για την υδρολογική προσομοίωση. Ο Πίνακας 4-7 παραθέτει τις τυπικές τιμές της παραμέτρου για τις απαντώμενες καλύψεις γης της λεκάνης του ποταμού Humber, βάσει βιβλιογραφίας.

Πίνακας 4-7. Τιμές της % αδιαπερατότητας της επιφάνειας κάθε χρήσης γης της λεκάνης.

Χρήσεις γης	% Αδιαπερατότητα	Αναφορές
Υψηλά οικιστικές περιοχές	65	USDA, 1989
Οικιστικά αγροκτήματα	25	USDA, 1989
Βιομηχανικές περιοχές	72	USDA, 1989
Γήπεδα γκολφ	0	Dougherty et al., 2004
Οδοί (Χαλίκι/Ασφαλτος)	100	Dougherty et al., 2004
Λίμνες και Υγρότοποι (Δασικοί-Δενδρώδεις-Υγροβιότοποι-Θαμνώδεις)	0	Rose et al., 2017
Δάση και Δέντρα	1	Guthrie and Deniseger, 2001
Καλλιεργήσιμες εκτάσεις	3	Rose et al., 2017

Σύμφωνα με το χάρτη χρήσεων γης (*LU*) που παράχθηκε στο ArcGIS, δημιουργήθηκε ένας πίνακας που συγκέντρωνε για κάθε πολύγωνο διαφορετικής χρήσης γης, την έκτασή του και την αντίστοιχη % αδιαπερατότητα, σε κάθε υπολεκάνη. Οι αναλυτικοί υπολογισμοί της % συνολικής αδιαπερατότητας κάθε υπολεκάνης παρατίθενται στο Παράρτημα Α.

Ο Πίνακας 4-8 παρουσιάζει τις τιμές αναφοράς του εκτιμώμενου *CN* κάθε υπολεκάνης, για κανονικές (*CN_{II}*) και ξηρές (*CN_I*) συνθήκες εδαφικής υγρασίας, όπως προσδιορίστηκαν από την εξίσωση (5) και εξίσωση (6) αντίστοιχα, καθώς και της % ολικής αδιαπερατότητας κάθε υπολεκάνης, όπως υπολογίστηκε από την εξίσωση (8).

Πίνακας 4-8. Υπολογισμένες τιμές αναφοράς του *CN* και της % αδιαπερατότητας των υπολεκανών του ποταμού Humber.

Υπολεκάνη	Curve Number (<i>CN</i>)		% ολική Αδιαπερατότητα
	Σταθμισμένος <i>CN_{II}</i> (Κανονικές Συνθήκες)	<i>CN_I</i> (Ξηρές Συνθήκες)	
W1460	59	38	8
W790	80	63	10
W800	79	61	19
W900	81	64	16
W1030	91	81	73
W1020	85	70	42
W1180	89	77	73

Για τη μέθοδο αναπαράστασης της άμεσης απορροής Clark Unit Hydrograph, ο χρόνος συγκέντρωσης *T_c* δύναται να υπολογιστεί από διάφορες εμπειρικές εξισώσεις που

λαμβάνουν υπόψη τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής. Ο **Πίνακας 4-9** παραθέτει τους εμπειρικούς τύπους που εφαρμόστηκαν σε αυτή τη μελέτη, με καθέναν από τους οποίους να είναι περισσότερο κατάλληλος σε υπολεκάνες με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Συγκριτικά με τις εμπειρικές εξισώσεις που εφαρμόστηκαν στην υδρολογική λεκάνη της Αλμυρίδας, ο τύπος του Giandotti δε δοκιμάστηκε στη λεκάνη απορροής του ποταμού Humber, καθώς έχει χρησιμοποιηθεί από ερευνητές σε αρκετές μελέτες λεκανών απορροής της Μεσογείου, και όχι των Η.Π.Α. και του Καναδά, ενώ ο τύπος του Kirpich δημιούργησε διαφορές στο χρόνο εμφάνισης της προσομοιωμένης μέγιστης απορροής σε σχέση με την καταγεγραμμένη μέγιστη απορροή, οπότε απορρίφθηκε.

Πίνακας 4-9. Κατάλογος εμπειρικών εξισώσεων που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του χρόνου συγκέντρωσης T_c (h).

Συγγραφέας	Τύπος	Σημειώσεις	Αναφορές
Simas-Hawkins	$T_c = 0.0085 \frac{A^{0.594} \times \left(\frac{1000}{CN} - 10\right)^{0.313}}{L^{0.594} \times S^{0.15}}$	Δεδομένα από 168 λεκάνες στις Η.Π.Α. (0.001–14 km ²)	(Simas and Hawkins, 2002; Fang et al., 2005)
Johnstone-Cross	$T_c = 0.4623 \frac{L^{0.5}}{S^{0.25}}$	Δεδομένα από 19 αγροτικές λεκάνες στις Η.Π.Α. (A = 64.8–4206.1 km ²)	(Johnstone and Cross, 1949)
Williams	$T_c = \frac{0.605 \times L}{(100S)^{0.2} \times A^{0.1}}$	Συνίσταται ιδιαιτέρως σε αγροτικές λεκάνες (A < 137 km ²)	(Williams, 1922)
Carter	$T_c = 0.0977 \frac{L^{0.6}}{S^{0.3}}$	Δεδομένα από αστική λεκάνη στις Η.Π.Α. (A < 20.72 km ² , S < 0.005)	(Carter, 1961)

Σημειώσεις: Η εξίσωση των Simas-Hawkins είναι σε Αγγλικές μονάδες, όπου A (ft²) είναι η επιφάνεια της λεκάνης, L (ft) είναι το μήκος της κύριας μισγάγγειας, και S (ft/ft) είναι η κλίση της κύριας μισγάγγειας. Οι εξισώσεις των Johnstone-Cross, Williams και Carter είναι σε μονάδες S.I., όπου L (km) είναι το μήκος της κύριας μισγάγγειας, S (m/m) είναι η κλίση της κύριας μισγάγγειας, και A (km²) είναι η επιφάνεια της λεκάνης.

Θεωρώντας ότι όταν ο όρος $R/(T_c+R)$ είναι ίσος με 0.7 αντιστοιχεί σε 0% αστικοποιημένη περιοχή, καθώς και όταν ο όρος είναι ίσος με 0.1 αντιστοιχεί σε 100% αστική περιοχή, ο **Πίνακας 4-10** υποδεικνύει τις προκύπτουσες τιμές του όρου για κάθε υπολεκάνη.

Πίνακας 4-10. Ποσοστά αστικοποίησης υπολεκανών και προκύπτουσες τιμές του όρου $R/(T_c+R)$.

Υπολεκάνη	% (Αστικός ιστός και Δρόμοι)	$\frac{R}{T_c + R}$
W1460	10.5	0.637
W790	13.1	0.6214
W800	25.8	0.5452
W900	23.1	0.5614
W1030	97.7	0.1138
W1020	54.9	0.3706
W1180	99.5	0.103

Για τη μέθοδο υπολογισμού της βασικής απορροής Recession, η σταθερά εκθετικής ύφεσης τέθηκε ίση με 0.8 στην πλειοψηφία των υπολεκανών, συγκεκριμένα στις W1460, W790, W800, W900 και W1020, ενώ ίση με 0.3 στις υπολεκάνες W1030 και W1180, με την τελευταία υπολεκάνη να μην έχει σταθμό μέτρησης απορροής στην έξοδο της.

Για τη μέθοδο ροής ανοικτών αγωγών Muskingum, οι αγωγοί R1580, R1590, R1600 και R1610, από τις εξόδους των υπολεκανών W1460, W790, W800 και W900 αντίστοιχα, διόδευσαν το πλημμυρικό κύμα προς την έξοδο της υπολεκάνης W1020. Επιπλέον, οι αγωγοί R1620 και R590, από τις εξόδους των υπολεκανών W1030 και W1020 αντίστοιχα, διόδευσαν το νερό στην έξοδο της υπολεκάνης W1180, στην οποία ωστόσο δεν υπήρχε σταθμός μέτρησης της απορροής. Θεωρήθηκε ότι η διόδευση του απορρέοντος νερού μέσω εξ' ολοκλήρου αγροτικών εκτάσεων—οι οποίες διαθέτουν υψηλά επίπεδα διήθησης—μπορεί να οδηγήσει σε μέγιστη εξασθένιση του πλημμυρογραφήματος, που αντιστοιχεί σε Muskingum X ίση με 0. Σε πλήρως αστικές περιοχές θεωρήθηκε ίση στάθμιση μεταξύ εισροής και εκροής, και επομένως διάδοση του πλημμυρικού κύματος χωρίς εξασθένιση, αλλά ομοιόμορφα στο κανάλι του ρέματος, που αντιστοιχεί σε Muskingum X ίση με 0.5. Ο Πίνακας 4-11 παραθέτει το μήκος των αγωγών και τις κλίσεις τους, όπως μετρήθηκαν στο ArcGIS, καθώς και την προκύπτουσα παράμετρο Muskingum X ανά αγωγό, από τις συναντώμενες χρήσεις γης κατά τη ροή.

Πίνακας 4-11. Χαρακτηριστικά των ανοικτών αγωγών διόδευσης της ροής στην έξοδο των υπολεκανών W1020 και W1180.

Αγωγός	Είσοδος αγωγού από έξοδο υπολεκάνης	Μήκος (km)	Κλίση (m/m)	Muskingum X	Διόδευση προς την έξοδο υπολεκάνης
R1580	W1460	75.522179	0.001905	0.3	W1020
R1590	W790	51.146611	0.00185	0.3	W1020
R1600	W800	19.12083	0.001358	0.425	W1020
R1610	W900	24.819795	0.00226	0.25	W1020
R1620	W1030	7.358818	0.002319	0.45	W1180
R590	W1020	12.12955	0.003117	0.45	W1180

Το υδρογράφημα στην έξοδο της υπολεκάνης W1020 προέκυψε από τις υδρολογικές διεργασίες που έλαβαν χώρα λόγω της κατακρήμνισης στη συγκεκριμένη υπολεκάνη, καθώς και από το διοχετευόμενο νερό μέσω των αγωγών R1580, R1590, R1600 και R1610. Αντίστοιχα, το υδρογράφημα στην έξοδο της υπολεκάνης W1180, που δε διαθέτει μετρήσεις απορροής, προέκυψε από τις υδρολογικές διεργασίες λόγω της κατακρήμνισης στη συγκεκριμένη υπολεκάνη και από τη διόδευση του πλημμυρικού κύματος από τους αγωγούς R1620 και R590.

4.2.5 Δεδομένα υδρολογικού μοντέλου HBV-light για έξι βροχοπτώτικά συμβάντα

Για την προσομοίωση των έξι μελετώμενων βροχοπτώτικών γεγονότων, για τις έξι υπολεκάνες με μετρήσεις απορροής, θεωρήθηκε ένα υδρολογικό σύστημα που περιλάμβανε πέντε υπολεκάνες, με τις τέσσερις να εκβάλλουν σε μία πέμπτη, καθώς και ένα υδρολογικό σύστημα που περιλάμβανε μία μεμονωμένη υπολεκάνη. Ο Πίνακας 4-12 παρουσιάζει την περίοδο αρχικοποίησης του μοντέλου, η οποία διήρκεσε ένα έτος και θεωρείται ικανοποιητική, για κάθε ένα από τα 6 μελετώμενα βροχοπτώτικά συμβάντα, όπως και τη διάρκεια προσομοίωσης. Οι περίοδοι αρχικοποίησης ενός έτους εφαρμόστηκαν ακριβώς πριν από την προσομοίωση κάθε μεμονωμένου βροχοπτώτικού γεγονότος, από τα 6 συνολικά εξετασθέντα, με το υδρολογικό μοντέλο HBV-light. Πριν από την έναρξη προσομοίωσης κάθε γεγονότος, το μοντέλο αρχικοποιήθηκε για ένα έτος με δεδομένα βροχόπτωσης, θερμοκρασίας αέρα και εξάτμισης, για τον ορθό υπολογισμό των πρότερων υδρολογικών συνθηκών όπως είναι η εδαφική υγρασία, η συσσώρευση χιονιού και η ποσότητα νερού στην ανώτερη και κατώτερη ζώνη υπογείων υδάτων, και μετάβαση των διεργασιών αυτών στις σωστές τους τιμές. Τούτέστιν, πριν από την προσομοίωση κάθε γεγονότος, προηγήθηκε η αρχικοποίηση των υδρολογικών συνθηκών για ένα χρόνο, περιλαμβάνοντας για έκαστο γεγονός την αντίστοιχη προηγηθείσα χειμερινή περίοδο εντός του αντίστοιχου έτους αρχικοποίησης. Για κάθε περίοδο αρχικοποίησης έκαστου γεγονότος από τα 6, η συσσώρευση χιονιού αποδόθηκε βάσει των χιλιοστών κατακρήμνισης και των αντίστοιχων αρνητικών θερμοκρασιών αέρα, ενώ συγχρόνως έλαβαν χώρα και διεργασίες όπως είναι η τήξη του χιονιού, η εκ νέου κατάψυξη λιωμένου χιονιού μέσα στο στρώμα χιονιού, η αποθήκευση υγρασίας στο έδαφος και η αναπλήρωση των υπόγειων υδάτων. Επομένως, κάθε μεμονωμένο γεγονός προσομοιώθηκε με τις πρότερες υδρολογικές συνθήκες να έχουν αποδοθεί επαρκώς.

Πίνακας 4-12. Περίοδοι αρχικοποίησης συνθηκών του υδρολογικού μοντέλου HBV-light και προσομοίωσης για κάθε μελετώμενο γεγονός, ανά υπολεκάνη.

No	Έναρξη αρχικοποίησης μεταβλητών	Πέρασ αρχικοποίησης μεταβλητών	Έναρξη προσομοίωσης	Πέρασ προσομοίωσης
1	28 Μαΐου 2012 00:00	27 Μαΐου 2013 23:00	28 Μαΐου 2013 00:00	31 Μαΐου 2013 00:00
2	4 Ιουλίου 2012 00:00	3 Ιουλίου 2013 23:00	4 Ιουλίου 2013 00:00	11 Ιουλίου 2013 00:00
3	7 Απριλίου 2012 00:00	6 Απριλίου 2013 23:00	7 Απριλίου 2013 00:00	16 Απριλίου 2013 00:00
4	30 Απριλίου 2016 00:00	29 Απριλίου 2017 23:00	30 Απριλίου 2017 00:00	8 Μαΐου 2017 00:00
5	26 Ιουνίου 2009 00:00	25 Ιουνίου 2010 23:00	26 Ιουνίου 2010 00:00	1 Ιουλίου 2010 00:00
6	22 Ιουνίου 2016 00:00	21 Ιουνίου 2017 23:00	22 Ιουνίου 2017 00:00	26 Ιουνίου 2017 00:00

Τα δεδομένα εισόδου (βροχόπτωση, θερμοκρασία, δυνητική εξάτμιση) για τη μελέτη υδρολογικής απόκρισης της λεκάνης του ποταμού Humber ήταν σε ωριαίο χρονικό βήμα. Ο σχεδιασμός του μοντέλου HBV-light από το Πανεπιστήμιο της Ζυρίχης έχει γίνει για γεγονότα βροχόπτωσης με δεδομένα ημερήσιου βήματος. Από επικοινωνία με ερευνητικό και ειδικό τεχνολογικό προσωπικό του Πανεπιστημίου της Ζυρίχης, επιβεβαιώθηκε ότι το λογισμικό δύναται να εφαρμοστεί χρησιμοποιώντας υπο-ημερήσια δεδομένα, και ειδικότερα ωριαίου χρονικού βήματος, όπως και έγινε η εφαρμογή στη μελετώμενη υδρολογική λεκάνη. Κατά τη βαθμονόμηση του μοντέλου, έγινε σύγκριση της καταγεγραμμένης απορροής με την προσομοιωμένη απορροή. Η μονάδα μέτρησης που χρησιμοποιεί το μοντέλο για την απορροή είναι mm/h. Για τη μετατροπή των καταγεγραμμένων απορροών στην έξοδο των υπολεκανών W1460, W790, W800, W900, και W1030, από μονάδες m³/s σε mm/h, χρησιμοποιήθηκαν οι επιφάνειες των υπολεκανών όπως παρουσίασε ο [Πίνακας 4-2](#). Στην υπολεκάνη W1020 ελήφθη υπόψιν ότι διοχετεύονται και τα νερά των υπολεκανών W1460, W790, W800, και W900. Επομένως, η καταγεγραμμένη απορροή στην υπολεκάνη W1020 σε μονάδες mm/h προέκυψε από την επανακλιμάκωση της επιφάνειάς της, προσθέτοντας τις επιφάνειες των τεσσάρων προαναφερθεισών υπολεκανών, και λαμβάνοντας υπόψη τη σχετική συμβολή των εμβαδών για κάθε μία από τις υπολεκάνες. Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε με ωριαίο χρονικό βήμα. Σε κάθε υπολεκάνη ελήφθησαν τρεις κατηγορίες χρήσεων γης που αφορούσαν δάση/υγροβιότοπους, καλλιεργήσιμες εκτάσεις και αστικό ιστό, εκφρασμένες ως ποσοστά της επιφάνειας της υπολεκάνης για κάθε υψομετρική ζώνη. Οι έξι μελετώμενες υπολεκάνες χωρίστηκαν σε δύο έως τέσσερις υψομετρικές ζώνες. Αναλυτικά τα ποσοστά των κατηγοριών βλάστησης/χρήσεων γης ανά υψομετρική ζώνη, σε κάθε υπολεκάνη παρατίθενται στο [Παράρτημα Β](#). Ο [Πίνακας 4-13](#) παραθέτει τα ποσοστά των κατηγοριών χρήσεων γης ανά υπολεκάνη.

Πίνακας 4-13. Κατηγορίες βλάστησης/χρήσεων γης των έξι μελετώμενων υπολεκανών.

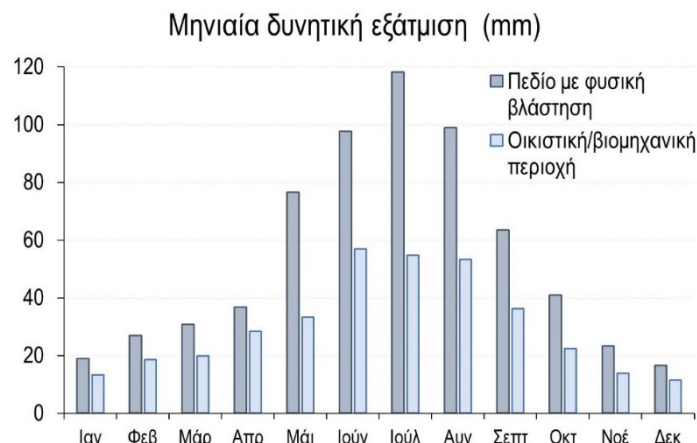
Υπολεκάνη	% Δάση / Υγροβιότοποι	% Καλλιεργήσιμες εκτάσεις	% Αστικός ιστός
W1460	49.8	39.7	10.5
W790	18.7	68.2	13.1
W800	21.4	52.8	25.8
W900	7.8	69.1	23.1
W1030	0.2	2.1	97.7
W1020	9.7	35.4	54.9

Η μέση περιοχική βροχόπτωση που υπολογίστηκε από τη στάθμιση της επιρροής των 16 διαθέσιμων βροχομετρικών σταθμών σε κάθε υπολεκάνη, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πολυγώνων Thiessen (Πίνακας 4-3), εφαρμόστηκε στο υψόμετρο του κεντροειδούς κάθε υπολεκάνης. Τα κεντροειδή των υπολεκανών W1460, W790, W800, W900, W1030, και W1020 βρίσκονται σε υψόμετρο 327 m, 269 m, 264 m, 251 m, 171 m, και 262 m αντίστοιχα. Χρησιμοποιήθηκαν επίσης δεδομένα θερμοκρασίας, με ωριαίο χρονικό βήμα, από το δίκτυο των 16 μετεωρολογικών σταθμών της υδρολογικής λεκάνης. Ελήφθη η μέση θερμοκρασία των κοντινότερων σταθμών στο κεντροειδές κάθε υπολεκάνης, ενώ εφαρμόστηκε επίσης στο υψόμετρο του κεντροειδούς. Ο Πίνακας 4-14 παραθέτει τους πλησιέστερους μετεωρολογικούς σταθμούς στο κεντροειδές κάθε υπολεκάνης, απ' τους οποίους αντλήθηκαν τα δεδομένα θερμοκρασίας για την εξαγωγή της μέσης τιμής της.

Πίνακας 4-14. Πλησιέστεροι μετεωρολογικοί σταθμοί στο κεντροειδές των υπολεκανών.

Μετεωρολογικός σταθμός	Επιρροή στο κεντροειδές των υπολεκανών					
	W1460	W790	W800	W900	W1030	W1020
HY002	✓	✓	-	-	-	-
HY012	-	-	-	✓	-	-
HY014	-	-	-	-	-	✓
HY030	✓	-	-	-	-	-
HY037	-	-	-	-	-	✓
HY038	-	✓	✓	-	-	-
HY039	-	-	✓	-	-	✓
HY041	-	-	-	✓	-	-
HY064	-	-	-	-	✓	-
HY069	-	-	✓	-	-	-
HY076	-	-	-	-	✓	-

Εξαιτίας των πολλαπλών υψομετρικών ζωνών σε κάθε υπολεκάνη, θεωρήθηκε για κάθε αύξηση των υψομέτρων από το κεντροειδές κατά 100 m, αύξηση της βροχόπτωσης (*PCALT*) κατά 10%, καθώς και πτώση της θερμοκρασίας του αέρα (*TCALT*) κατά 0.6°C, όπως προτάθηκε από τον Seibert (2005). Τα δεδομένα δυνητικής εξάτμισης αντλήθηκαν από μετρήσεις πεδίου που πραγματοποιήθηκαν από τους Delidjakova et al. (2014) σε ένα πεδίο με φυσική βλάστηση, καθώς και σε μια οικιστική/βιομηχανική περιοχή της ευρύτερης περιοχής του Τορόντο για την περίοδο 2010-2012, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-13. Τα δεδομένα αντλήθηκαν σε μηνιαίο χρονικό βήμα και μετατράπηκαν σε ωριαία δεδομένα. Όπως αναμενόταν, η δυνητική εξάτμιση έχει χαμηλότερες τιμές στην αστική περιοχή απ' ό,τι στην αγροτική.



Εικόνα 4-13. Δεδομένα εξάτμισης από μετρήσεις πεδίου κατά την περίοδο 2010-2012, σε μηνιαία κλίμακα (Delidjakova et al., 2014).

Έγινε η θεώρηση ότι τα δεδομένα δυνητικής εξάτμισης από το πεδίο φυσικής βλάστησης αντιπροσωπεύουν τις υπολεκάνες W1460, W790, W800, και W900, τα δεδομένα δυνητικής εξάτμισης από την οικιστική/βιομηχανική περιοχή είναι αντιπροσωπευτικά για την υπολεκάνη W1030, ενώ μια μέση τιμή των δεδομένων δυνητικής εξάτμισης από τα πεδία φυσικής βλάστησης και οικιστικής περιοχής αντιπροσωπεύουν την υπολεκάνη W1020.

4.2.6 Δεδομένα κλιματικών μοντέλων

Συλλέχθηκαν δεδομένα ημερήσιας βροχόπτωσης, για την περίοδο 1950-2100, από ένα σύνολο 24 κλιματικών μοντέλων, της βάσης δεδομένων CMIP5 (Taylor et al., 2012), για πλέγμα αποτελούμενο από 30 κελιά, που καλύπτει την υδρολογική λεκάνη του ποταμού Humber. Το πλέγμα των κλιματικών προβολών είναι υψηλής ανάλυσης, με κεντροειδές ανά 6.69 km x 9.26 km, ενώ τα δεδομένα είναι με καταβιβασμένη κλίμακα, στα οποία έχει διορθωθεί το μεροληπτικό σφάλμα με τη μέθοδο BCCAQn2 (Climate Data Canada, 2021). Η μέθοδος καταβιβασμού κλίμακας BCCAQn2 Quantile Delta Mapping αναπτύχθηκε από το Pacific Climate Impacts Consortium ώστε να διορθώνει το μεροληπτικό σφάλμα των κατανεμημένων ιδιοτήτων των προβαλλόμενων δεδομένων (μέσοι όροι, ποσοστημόρια, κ.ά.) για να ταιριάζουν περισσότερο με τις αντίστοιχες των ιστορικών δεδομένων, διατηρώντας τις προβαλλόμενες αλλαγές μεγάλης κλίμακας σε κάθε ποσοστημόριο (Maurer et al., 2010; Cannon et al., 2015). Τα δεδομένα ακολουθούν εκτιμήσεις από δύο σενάρια εξέλιξης της συγκέντρωσης, το RCP4.5 και το RCP8.5, που αφορούν ενδιάμεσες και υψηλές εκπομπές θερμοκηπικών αερίων, αντίστοιχα. Αυτά τα σενάρια

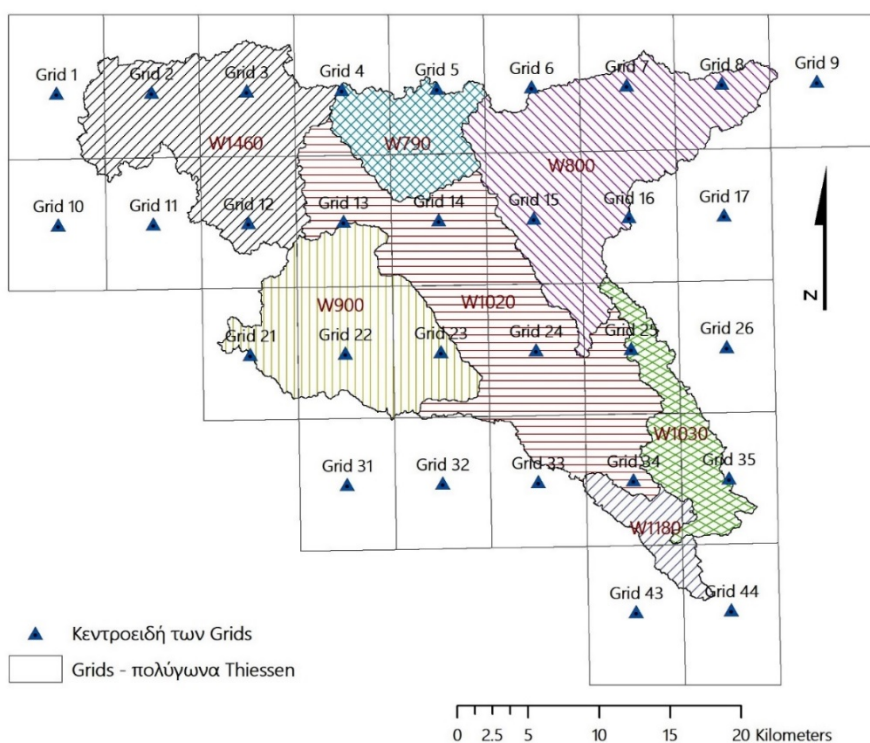
ανθρωπογενών εκπομπών έχουν αντίκτυπο στο κλίμα, θεωρώντας αύξηση της ακτινοβολίας κοντά στην επιφάνεια της γης, στο τέλος του 21^{ου} αιώνα, κατά 4.5 W/m² και 8.5 W/m², αντίστοιχα, σε σχέση με τα προ-βιομηχανικά επίπεδα (van Vuuren et al., 2011; IPCC, 2014). Ο Πίνακας 4-15 παρουσιάζει τη λίστα των 24 κλιματικών μοντέλων του προγράμματος CMIP5 που χρησιμοποιήθηκαν.

Πίνακας 4-15. Λίστα κλιματικών μοντέλων CMIP5 και ινστιτούτων κλιματικής μοντελοποίησης.

A/A	Κλιματικό μοντέλο	Κέντρο/Ινστιτούτο μοντελοποίησης
1	HadGEM2-AO	National Institute of Meteorological Research (NIMR) (South Korea)
2	HadGEM2-ES	UK Met Office Hadley Centre
3	MPI-ESM-MR	Max Planck Institute for Meteorology
4	MPI-ESM-LR	Max Planck Institute for Meteorology
5	MIROC-ESM-CHEM	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), Atmosphere and Ocean Research Institute (AORI) (The University of Tokyo), & National Institute for Environmental Studies (NIES)
6	MRI-CGCM3	Meteorological Research Institute (MRI) (Japan)
7	MIROC-ESM	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), Atmosphere and Ocean Research Institute (AORI) (The University of Tokyo), & National Institute for Environmental Studies (NIES)
8	CNRM-CM5	Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM), & Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique (CERFACS)
9	CSIRO-Mk3-6-0	Australian Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO) Marine and Atmospheric Research, & Queensland Climate Change Centre of Excellence (QCCCE)
10	MIROC5	Atmosphere and Ocean Research Institute (AORI) (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies (NIES), & Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)
11	GFDL-ESM2G	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL)
12	NorESM1-M	Norwegian Climate Centre
13	BNU-ESM	College of Global Change and Earth System Science (GCESS) Beijing
14	CCSM4	US National Center for Atmospheric Research (NCAR)
15	GFDL-ESM2M	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL)
16	IPSL-CM5A-LR	Institut Pierre Simon Laplace (IPSL)
17	GFDL-CM3	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL)
18	NorESM1-ME	Norwegian Climate Centre
19	FGOALS-g2	Institute of Atmospheric Physics (IAP) Chinese Academy of Sciences, & Tsinghua University (THU)
20	CanESM2	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (CCCma)
21	CESM1-CAM5	NSF/DOE National Center for Atmospheric Research (NCAR)
22	IPSL-CM5A-MR	Institut Pierre Simon Laplace (IPSL)
23	bcc-csm1-1-m	Beijing Climate Center (BCC) China Meteorological Administration
24	bcc-csm1-1	Beijing Climate Center (BCC) China Meteorological Administration

Η εξαγωγή της ημερήσιας βροχόπτωσης στις υπολεκάνες της υδρολογικής λεκάνης του ποταμού Humber, από τα δεδομένα των 24 κλιματικών μοντέλων του προγράμματος

CMIP5, έγινε με τη μέθοδο των πολυγώνων Thiessen, από τη στάθμιση των κεντροειδών του πλέγματος των 30 κελιών. Η Εικόνα 4-14 παρουσιάζει τα κελιά του πλέγματος CMIP5 και τα πολύγωνα Thiessen όπως παράχθηκαν χρησιμοποιώντας το ArcGIS από την επιρροή του πλέγματος, στη λεκάνη απορροής του ποταμού Humber. Ο Πίνακας 4-16 παραθέτει τη στάθμιση από την επιρροή του πλέγματος των 30 κελιών στις υπολεκάνες.



Εικόνα 4-14. Πολύγωνα Thiessen από την επιρροή των κεντροειδών των 30 κελιών του πλέγματος στις υπολεκάνες της υδρολογικής λεκάνης του ποταμού Humber.

Πίνακας 4-16. Στάθμιση επιρροής του πλέγματος των 30 κελιών στις υπολεκάνες.

Επιρροή από κεντροειδή κελιών	Στάθμιση επιρροής στις υπολεκάνες						
	W1460	W790	W800	W900	W1030	W1020	W1180
Grid 1	0.05	-	-	-	-	-	-
Grid 2	0.28	-	-	-	-	-	-
Grid 3	0.31	-	-	-	-	-	-
Grid 4	0.05	0.274	-	-	-	0.025	-
Grid 5	-	0.42	0.02	-	-	-	-
Grid 6	-	0.001	0.14	-	-	-	-
Grid 7	-	-	0.2	-	-	-	-
Grid 8	-	-	0.14	-	-	-	-
Grid 9	-	-	0.001	-	-	-	-
Grid 10	0.005	-	-	-	-	-	-
Grid 11	0.035	-	-	-	-	-	-
Grid 12	0.25	-	-	0.0249	-	-	-
Grid 13	0.02	0.06	-	0.17	-	0.13	-

Grid 14	-	0.245	0.009	0.01	-	0.185	-
Grid 15	-	-	0.26	-	-	0.05	-
Grid 16	-	-	0.16	-	0.001	-	-
Grid 17	-	-	0.01	-	-	-	-
Grid 21	-	-	-	0.165	-	-	-
Grid 22	-	-	-	0.38	-	-	-
Grid 23	-	-	-	0.25	-	0.11	-
Grid 24	-	-	0.03	-	-	0.23	-
Grid 25	-	-	0.03	-	0.3	0.105	-
Grid 26	-	-	-	-	0.03	-	-
Grid 31	-	-	-	0.0001	-	-	-
Grid 32	-	-	-	-	-	0.001	-
Grid 33	-	-	-	-	-	0.074	0.01
Grid 34	-	-	-	-	0.23	0.09	0.61
Grid 35	-	-	-	-	0.439	-	0.06
Grid 43	-	-	-	-	-	-	0.16
Grid 44	-	-	-	-	-	-	0.16

Η ημερήσια βροχόπτωση στις επτά υπολεκάνες του ποταμού Humber εξήχθη για κάθε ένα από τα 24 κλιματικά μοντέλα, και για τα δύο κλιματικά σενάρια θερμοκηπικών εκπομπών. Η ανάλυση των δεδομένων αφορούσε τέσσερις χρονικές περιόδους ίσης διάρκειας, ήτοι την περίοδο βάσης 1995-2014, καθώς και τις μελλοντικές περιόδους 2021-2040 (εγγύς μέλλον), 2041-2060 (μεσοπρόθεσμα), και 2081-2100 (μακροπρόθεσμα) (IPCC, 2021).

Ακολουθώντας, σε καθεμιά από τις επτά υπολεκάνες, για καθένα από τα 24 κλιματικά μοντέλα, για καθεμιά από τις τέσσερις εικοσαετίες με ~7300 ημερήσιες τιμές βροχόπτωσης έकाστη, εντοπίστηκε η μέγιστη ημερήσια βροχόπτωση, και εξήχθη η ημερήσια βροχόπτωση που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο και αφορά τα ισχυρότερα ακραία γεγονότα (Bao et al., 2017). Η ημερήσια βροχόπτωση που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας αποδίδει το ύψος βροχόπτωσης που είναι μεγαλύτερο από το 99.9% των ημερήσιων βροχοπτώσεων εικοσαετίας, για σύνολο ημερήσιων τιμών βροχής μεγαλύτερων από 1 mm (Malone-WMO, 2011). Στη συνέχεια, υπολογίστηκαν οι μέσες τιμές—από τα 24 κλιματικά μοντέλα—των μέγιστων ημερήσιων γεγονότων βροχόπτωσης, καθώς και των ημερήσιων γεγονότων βροχής που αντιστοιχούν στο 99.9 εκατοστημόριο, για κάθε εικοσαετία, σε κάθε υπολεκάνη. Οι εξαγόμενες τιμές ημερήσιας βροχόπτωσης (μέγιστης, και αντιστοιχούσας στο 99.9 εκατοστημόριο) για τις τέσσερις εικοσαετίες, για καθένα από τα 24 κλιματικά μοντέλα, για τα δύο σενάρια θερμοκηπικών εκπομπών, σε κάθε υπολεκάνη, καθώς και οι μέσες

τιμές τους, παρατίθενται στο [Παράρτημα Γ](#). Επιπλέον, υπολογίστηκε η ποσοστιαία διαφορά της μέσης τιμής της μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης, καθώς και της ημερήσιας βροχόπτωσης που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο κάθε μελλοντικής περιόδου συγκριτικά με τη περίοδο βάσης, για το σενάριο θερμοκηπικών εκπομπών RCP8.5 ([Πίνακας 4-17](#) και [Πίνακας 4-18](#)), και το σενάριο εκπομπών RCP4.5 ([Πίνακας 4-19](#) και [Πίνακας 4-20](#)).

Πίνακας 4-17. Ποσοστιαία αύξηση της μέσης τιμής της μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης σε κάθε μελλοντική περίοδο, σε σχέση με την περίοδο βάσης, για το σενάριο εκπομπών RCP8.5.

	%αύξηση της μέσης τιμής της μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης μελλοντικής εικοσαετίας, σε σχέση με την περίοδο 1995-2014						
	W1460	W790	W800	W900	W1030	W1020	W1180
2021-2040	8.5%	12.1%	8.6%	16.3%	9.9%	11.8%	8.1%
2041-2060	20.8%	27.3%	24.1%	29.6%	20.4%	25.2%	20.0%
2081-2100	24.1%	28.8%	28.5%	35.4%	29.2%	32.1%	27.5%

Πίνακας 4-18. Ποσοστιαία αύξηση της μέσης τιμής της ημερήσιας βροχόπτωσης που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο σε κάθε μελλοντική περίοδο, σε σχέση με την περίοδο βάσης, για το σενάριο εκπομπών RCP8.5.

	%αύξηση της μέσης τιμής της ημερήσιας βροχόπτωσης που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο μελλοντικής εικοσαετίας, σε σχέση με την περίοδο 1995-2014						
	W1460	W790	W800	W900	W1030	W1020	W1180
2021-2040	5.8%	4.2%	3.1%	5.3%	5.1%	3.7%	3.7%
2041-2060	7.2%	4.8%	4.7%	5.4%	6.8%	4.6%	7.0%
2081-2100	12.0%	9.6%	9.6%	13.4%	17.4%	12.8%	18.9%

Πίνακας 4-19. Ποσοστιαία αύξηση της μέσης τιμής της μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης σε κάθε μελλοντική περίοδο, σε σχέση με την περίοδο βάσης, για το σενάριο εκπομπών RCP4.5.

	%αύξηση της μέσης τιμής της μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης μελλοντικής εικοσαετίας, σε σχέση με την περίοδο 1995-2014						
	W1460	W790	W800	W900	W1030	W1020	W1180
2021-2040	11.7%	16.1%	15.8%	14.8%	12.0%	14.1%	12.1%
2041-2060	12.5%	14.3%	13.2%	14.6%	8.1%	12.2%	9.2%
2081-2100	12.9%	17.0%	17.9%	18.3%	12.4%	15.8%	14.4%

Πίνακας 4-20. Ποσοστιαία αύξηση της μέσης τιμής της ημερήσιας βροχόπτωσης που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο σε κάθε μελλοντική περίοδο, σε σχέση με την περίοδο βάσης, για το σενάριο εκπομπών RCP4.5.

	%αύξηση της μέσης τιμής της ημερήσιας βροχόπτωσης που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο μελλοντικής εικοσαετίας, σε σχέση με την περίοδο 1995-2014						
	W1460	W790	W800	W900	W1030	W1020	W1180
2021-2040	7.5%	6.7%	6.7%	10.4%	10.6%	8.7%	9.7%
2041-2060	8.4%	7.9%	6.4%	11.4%	9.8%	9.4%	8.5%
2081-2100	6.2%	4.9%	3.9%	7.9%	7.5%	6.7%	7.7%

Ακολουθώντας, έγινε κατανομή της μέσης τιμής ημερήσιας βροχόπτωσης για την περίοδο βάσης, από τη μέγιστη βροχόπτωση και από τη βροχόπτωση που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο της εικοσαετίας βάσης, σε ωριαίο βήμα, με την παραδοχή ότι η πλειοψηφία της βροχής (80%) πέφτει σε 2 h μες στην ημέρα, για κάθε υπολεκάνη, και κάθε σενάριο θερμοκηπικών εκπομπών. Η θεώρηση βασίστηκε στα ιστορικά δεδομένα βροχόπτωσης της περιόδου 2010-2017 και τα έξι μεμονωμένα ιστορικά μελετώμενα γεγονότα της §4.2.3 που ομαδοποιήθηκαν σε ζεύγη για την προσομοίωσή τους, για τα οποία διαπιστώθηκε ότι σε όλες τις υπολεκάνες η πλειονότητα της βροχόπτωσης σημειωνόταν σε διάρκεια 2 h ή 3 h ή 4 h, με επικρατέστερες τις 2 h στην πλειοψηφία των υπολεκανών ανά τα γεγονότα. Ακραίες βροχοπτώσεις δύνανται να σημειωθούν και σε διάρκεια 0.5 h ή 1 h. Επομένως, για τα μελλοντικά βροχοπτωτικά γεγονότα από τα κλιματικά μοντέλα, κρίθηκε ότι η θεώρηση της πλειοψηφίας της βροχής να σημειώνεται σε 2 h είναι ρεαλιστική. Η δημιουργία των κατανομών για τις εικοσαετίες 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100, της μέσης τιμής της μέγιστης βροχόπτωσης και της μέσης τιμής της βροχόπτωσης που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο κάθε μελλοντικής εικοσαετίας σε ωριαίο βήμα, βασίστηκε στις κατασκευασμένες ωριαίες κατανομές βροχόπτωσης για την περίοδο βάσης, οι οποίες προσαυξήθηκαν βάσει των ποσοστιαίων αυξήσεων των μέσων τιμών ημερήσιων βροχοπτώσεων κάθε μελλοντικής εικοσαετίας σε σχέση με την περίοδο 1995-2014, για κάθε υπολεκάνη, και κάθε σενάριο θερμοκηπικών εκπομπών.

Οι κατανομές βροχόπτωσης (συνολικά δεκαέξι) από τα δεδομένα κλιματικών σεναρίων, σε ωριαίο βήμα, εισήχθησαν στο υδρολογικό μοντέλο HEC-HMS. Για τις υδρολογικές προσομοιώσεις και την εξαγωγή των υδρογραφημάτων στην έξοδο των έξι υπολεκανών από το μοντέλο, χρησιμοποιήθηκαν οι βαθμονομημένες παράμετροι των επικυρωμένων υδρογραφημάτων, σε κάθε υπολεκάνη, του ζεύγους ιστορικών γεγονότων υψηλής έντασης (28-30 Μαΐου 2013 και 4-10 Ιουλίου 2013). Η επίδραση της απορροής αιχμής από τα δεκαέξι εξεταζόμενα βροχοπτωτικά γεγονότα στις κατάντη πλημμυρικές επιπτώσεις εξετάστηκε με δύο υδραυλικά μοντέλα.

4.2.7 Γεωμετρική σχεδίαση στο υδραυλικό μοντέλο 2D HEC-RAS–Ανάλυση δεδομένων

Για την 2D υδραυλική προσομοίωση της κατάντη περιοχής του ποταμού Humber, τα χαρακτηριστικά της πλημμυρικής πεδιάδας αποδόθηκαν από Ψηφιακό Μοντέλο

Εδάφους (Digital Terrain Model – DTM) υψηλής ανάλυσης 0.5 m x 0.5 m, γεωαναφερμένο στο Παγκόσμιο Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς WGS'84 με την Παγκόσμια Εγκάρσια Μερκατορική Απεικόνιση της Ζώνης 17, το οποίο μέσω του ArcGIS εξήχθη στο μοντέλο 2D HEC-RAS.

Η δρομολόγηση του πλημμυρικού κύματος προσομοιώθηκε με μια 2D επιφάνεια ροής, που σχεδιάστηκε ως πολύγωνο εντός των ορίων του οποίου θα πραγματοποιηθούν οι υδραυλικοί υπολογισμοί. Σχεδιάστηκαν επίσης γραμμές διαχωρισμού (break lines) εντός της 2D επιφάνειας ροής, σε θέσεις όπως κατά μήκος της κοίτης του ρέματος, σε θέσεις βύθισης των υψομέτρων του εδάφους, σε θέσεις οχθών, και σε θέσεις που επηρεάζουν την κατεύθυνση ροής, όπως είναι οι άξονες δρόμων. Με βάση την τοπογραφία, συνολικά ψηφιοποιήθηκαν 25 γραμμές διαχωρισμού, οι οποίες, κατά τη δημιουργία του 2D υπολογιστικού πλέγματος, θα ενισχυθούν με πεπερασμένα στοιχεία κατά το μήκος τους, αποτρέποντας την ανακατεύθυνση ροής του ρέματος (Brunner and CEIWR-HEC, 2020b).

Η προσομοίωση του κάτω τμήματος του ρέματος της Αλμυρίδας έγινε με την έκδοση του λογισμικού HEC-RAS 5.0.3, στην οποία δεν υπήρχε η δυνατότητα σχεδιασμού διατομής γέφυρας εντός 2D υπολογιστικού πλέγματος. Για το λόγο αυτό, εξετάστηκε η υδροδυναμική προσομοίωση έπειτα από βροχοπτώσεις με 1D μοντέλο, και σύγκριση των αποτελεσμάτων με συζευγμένο 1D/2D μοντέλο, στην οποία η γέφυρα αποδόθηκε σε 1D. Από την έκδοση 6.0 του HEC-RAS και μεταγενέστερες, υπήρχε η δυνατότητα απόδοσης των γεφυρών εντός 2D υπολογιστικού πλέγματος. Στην περίπτωση της κατάντη περιοχής του ποταμού Humber χρησιμοποιήθηκε η τότε πιο επικαιροποιημένη έκδοση HEC-RAS 6.1, στην οποία ενσωματώθηκαν οι γέφυρες εντός του 2D υπολογιστικού πλέγματος. Επομένως, έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων από τα υδραυλικά μοντέλα 2D και 1D.

Σχεδιάστηκαν λοιπόν οι άξονες οκτώ υφιστάμενων γεφυρών εγκάρσια στη ροή του ποταμού Humber, στις θέσεις: Eglinton Avenue West (#1), Scarlett Road (#2), Lambton Canadian Pacific Railway Bridge (#3), Dundas Street West (#4), Old Mill Road (#5), Old Mill Subway Station Bridge (#6), Bloor Street Humber River Bridge (#7), και The Queensway (#8). Οι άξονες των γεφυρών, κατά τη δημιουργία του 2D υπολογιστικού πλέγματος, θα ενισχυθούν επίσης με πεπερασμένα στοιχεία κατά το μήκος τους. Οι άξονες των γεφυρών και η άνω παρειά του καταστρώματός τους σχεδιάστηκε βάσει της τοπογραφίας. Το πλάτος και πάχος της ανωδομής, καθώς και ο αριθμός των

μεσοβάθρων, το πάχος τους, και η μεταξύ τους απόσταση βασίστηκε σε δορυφορικές εικόνες. Ο Πίνακας 4-21 παρουσιάζει τα στοιχεία του γεωμετρικού σχεδιασμού των γεφυρών.

Πίνακας 4-21. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των οκτώ γεφυρών.

Γέφυρα	Απόσταση άκρων γέφυρας από ανάντη & κατάντη διατομή (m)	Πλάτος ανωδομής (m)	Πάχος ανωδομής (m)	Αριθμός μεσοβάθρων	Πάχος μεσοβάθρων (m)	Απόσταση μεταξύ των μεσοβάθρων (m)
#1	4	32	2.5	4	1.5	36
#2	5	20	1.5	2	1.5	27
#3	5	10	3	5	1.5	25
#4	5.25	21	2.5	9	1.5	23
#5	4.5	9	2	2	3 ^a	28
#6	5	10	2.5	4	1.5	70
#7	5	20	3	5	3 ^b	46
#8	5	30	2	5	1.5	46

^a Η κεφαλή των μεσοβάθρων είναι μεταβλητού πάχους 3~28 m, για 1 m ύψος

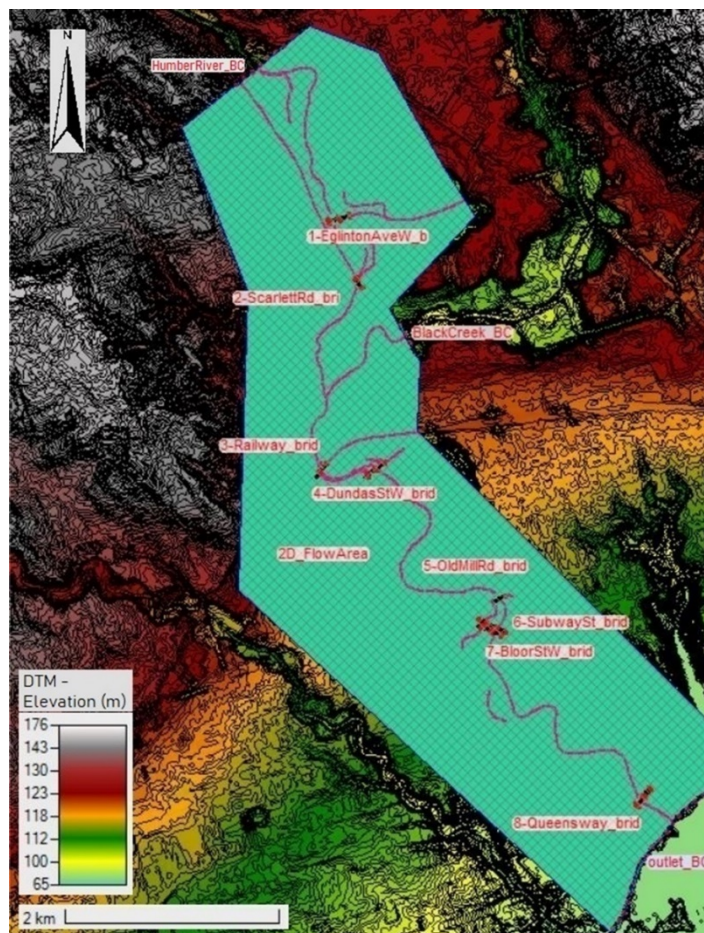
^b Η κεφαλή των μεσοβάθρων είναι μεταβλητού πάχους 3~46 m, για 4 m ύψος

Ο συντελεστής αντίστασης για τα μεσόβαθρα ορίστηκε ίσος με 1.2, ο συντελεστής απορροής για ροή υπό πίεση τέθηκε ίσος με 0.4, ο συντελεστής απορροής για πλήρως βυθισμένη ροή υπό πίεση τέθηκε ίσος προς 0.8, και ο συντελεστής υδατοφράκτη για ροή επάνω από την ανωδομή των γεφυρών ορίστηκε ίσος με 1.66. Το μέγιστο επιτρεπόμενο ποσοστό καταβύθισης κατά τους υπολογισμούς ροής υδατοφράκτη επάνω από την ανωδομή των γεφυρών τέθηκε ίσο προς 98%, ενώ σε περίπτωση υπέρβασης του ορίου, οι υδραυλικοί υπολογισμοί των γεφυρών γίνονται με την εξίσωση της ενέργειας αντί για τη ροή υπό πίεση και υδατοφράκτη. Η μέγιστη ανύψωση του πλημμυρικού κύματος επάνω από τις γέφυρες ορίστηκε ίση προς 10 m. Το λογισμικό δημιούργησε καμπύλες ταξινόμησης για τον προσδιορισμό όλων των πιθανών συνδυασμών ροής και βάθους στην ανάντη όψη των γεφυρών. Οι καμπύλες ταξινόμησης βάθους-ροής, στην ανάντη όψη κάθε γέφυρας, προσδιορίστηκαν θέτοντας τον αριθμό των σημείων της καμπύλης ελεύθερης ροής ίσο με 100, καθώς και τον αριθμό των καμπυλών καταβύθισης ίσο προς 60, με έως 60 σημεία να ορίζουν κάθε καμπύλη (Brunner and CEIWR-HEC, 2020b).

Ο συντελεστής τραχύτητας Manning n θεωρήθηκε ομοιόμορφος στην 2D υπολογιστική επιφάνεια και ίσος με 0.04, αντιπροσωπεύοντας καθαρές κοίτες ποταμών, χωρίς βαθείς λάκκους, με κάποιες πέτρες και αγριόχορτα, καθώς και πλημμυρικές πεδιάδες με κοντό γρασίδι (Chow, 1959). Δημιουργήθηκαν τα κελιά του πλέγματος για τους υπολογισμούς της 2D ροής, συμπεριλαμβανομένων όλων των γραμμών διαχωρισμού, και των αξόνων

των γεφυρών, που ενισχύθηκαν σε όλο το μήκος τους. Η απόσταση των κέντρων των κελιών ορίστηκε στα 20 m, επομένως δημιουργήθηκαν συνολικά 44849 πεπερασμένα στοιχεία (Brunner and CEIWR-HEC, 2020b). Τέθηκαν επίσης οι παράμετροι που αφορούν όρια ανεκτικότητας των κελιών του 2D υπολογιστικού πλέγματος, ίσες με τα προκαθορισμένα όρια από το λογισμικό, όπως ακριβώς τέθηκαν και στην περίπτωση της 1D/2D προσομοίωσης για το κάτω μέρος τμήμα του ρέματος της Αλμυρίδας. Ακολούθησε ο υπολογισμός των υδραυλικών πινάκων της 2D επιφάνειας ροής.

Εισήχθησαν επίσης οι οριακές συνθήκες μη μόνιμης ροής. Ανάντη ψηφιοποιήθηκαν δύο γραμμές οριακών συνθηκών (HumberRiver και BlackCreek στην [Εικόνα 4-15](#)), κατά μήκος των οποίων τέθηκαν τα δύο πλημμυρογραφήματα εξόδου των υπολεκανών W1020 και W1030, όπως προέκυψαν από το HEC-HMS, για 48 h, με χρονικό βήμα 1 h. Η κλίση της γραμμής ενέργειας για την κατανομή της ροής κατά μήκος και των δύο γραμμών των οριακών συνθηκών τέθηκε ίση με 0.005 m/m. Στο κάτω άκρο, ψηφιοποιήθηκε η γραμμή οριακής συνθήκης (outlet στην [Εικόνα 4-15](#)), κατά μήκος της οποίας εφαρμόστηκε το κανονικό βάθος, για την προσομοίωση της ροής εκτός της 2D επιφάνειας ροής. Η τιμή για το ρυθμό απωλειών λόγω τριβής στην έξοδο του ποταμού, βάσει της τοπογραφίας, τέθηκε ίση με 0.00015 m/m (Brunner and CEIWR-HEC, 2020b). Στις υδραυλικές προσομοιώσεις των κατάντη περιοχών τόσο του ρέματος Αλμυρίδας όσο και του ποταμού Humber, τέθηκε η κατάντη οριακή συνθήκη του κανονικού (ή αλλιώς ομοιόμορφου) βάθους, που χρησιμοποιείται στην εξίσωση Manning, για τους υπολογισμούς μη μόνιμης ροής. Οι υπόλοιπες επιλογές του λογισμικού ήταν να δοθεί είτε υδρογράφημα, είτε σταθμηγράφημα. Στοιχεία σχετικά δεν υπήρχαν και για τις δύο μελέτες περίπτωσης. Επιπλέον, δεν υπήρχε η επιλογή απόδοσης της οριακής συνθήκης του κρίσιμου βάθους από το λογισμικό. Επομένως, χρησιμοποιήθηκε η συνθήκη του κανονικού βάθους, η οποία προσδιορίζεται από το ρυθμό απωλειών λόγω τριβής, και χρησιμοποιείται στην εξίσωση Manning. Στην [Εικόνα 4-15](#) παρουσιάζονται σε κάτοψη τα όρια της 2D επιφάνειας ροής, με τις γραμμές διαχωρισμού, τις οκτώ γέφυρες, και τις γραμμές οριακών συνθηκών.



Εικόνα 4-15. Όρια της 2D επιφάνειας ροής, συμπεριλαμβανομένων των 2D πεπερασμένων στοιχείων, των γραμμών διαχωρισμού, των αξόνων των οκτώ γεφυρών, και των γραμμών των οριακών συνθηκών, βάσει του DTM υψηλής ανάλυσης 0.5 m x 0.5 m.

Όσον αφορά την 2D υδραυλική ανάλυση μη μόνιμης ροής, για όλα τα προκύπτοντα πλημμυρογραφήματα από τα εξεταζόμενα βροχοπτωτικά γεγονότα κλιματικής αλλαγής, εισήχθησαν οι επιλογές υπολογισμών και τα όρια ανεκτικότητας για την προσομοίωση 2D ροής. Συγκεκριμένα, ο άρρητος συντελεστής στάθμισης θ , που αντιπροσωπεύει τη στάθμιση των μερικών παραγώγων στο χρόνο, ορίστηκε ίσος με 1.0, συντελώντας σε μια σταθερότερη λύση. Ομοίως, ο συντελεστής θ κατά την περίοδο προθέρμανσης ορίστηκε επίσης ίσος με 1.0. Η ανεκτικότητα υπολογισμών της στάθμης της επιφάνειας του νερού σε κάθε 2D κελί, για τις εφαρμοζόμενες επαναλήψεις, ορίστηκε ίση με 0.02 m, επομένως το μοντέλο επαναλαμβάνεται έως ότου το σφάλμα της στάθμης νερού φτάσει στο προκαθορισμένο επίπεδο ανοχής. Επιπλέον, καθορίστηκε ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων για την επίλυση των εξισώσεων μη μόνιμης ροής, ίσος με 20, έτσι ώστε το μοντέλο να συγκλίνει σε μια σταθερή λύση, δίνοντας ένα μικρό έως μικρής σημασίας αριθμητικό σφάλμα σε σύγκριση με την καθορισμένη ανεκτικότητα στη στάθμη νερού για όλο το 2D υπολογιστικό πλέγμα. Ορισμένες τιμές ανεκτικότητας αυξήθηκαν

ελαφρώς σε σχέση με τις προεπιλεγμένες του μοντέλου, λόγω του ταχέως μεταβαλλόμενου πλημμυρικού κύματος από τα εξεταζόμενα βροχοπτωτικά γεγονότα των κλιματικών μοντέλων, προκαλώντας μεγάλες διακυμάνσεις της ταχύτητας στις θέσεις που εμφανίζονται εμπόδια στη ροή. Έτσι, ένα κατάλληλο υπολογιστικό χρονικό βήμα που εξασφαλίζει έναν ικανοποιητικό αριθμό Courant, οι ψηφιοποιημένες γραμμές διαχωρισμού κατά μήκος υψομετρικών διαφοροποιήσεων, και οι κατάλληλες ανεκτικότητες και ο αριθμός επαναλήψεων εντός των συνιστώμενων ορίων, ήταν σημαντικά για την παραγωγή σταθερών και με ακρίβεια αποτελεσμάτων. Χρησιμοποιήθηκαν οι 2D εξισώσεις πλήρους ορμής ρηχών υδάτων (SWE) με μια Eulerian προσέγγιση για την επίλυση της συμμεταφοράς, οι οποίες είναι πιο συντηρητικές στην ορμή, καθώς παρείχαν μεγαλύτερη ακρίβεια από τις 2D εξισώσεις διάχυσης κύματος για την ανάλυση αιφνίδιων πλημμυρών, στις οποίες οι ταχύτητες αλλάζουν χωρικά και χρονικά σημαντικά (Brunner and CEIWR-HEC, 2020a).

Ενεργοποιήθηκε επίσης το μοντέλο τυρβώδους ροής, με μια συντηρητική διατύπωση, η οποία επιτελεί μικρή έως μηδενική απώλεια ορμής. Το μοντέλο αντιπροσωπεύεται από τρεις συντελεστές τυρβώδους ροής: το συντελεστή διαμήκους τύρβης (D_L), το συντελεστή εγκάρσιας τύρβης (D_T), και το συντελεστή Smagorinsky. Οι δύο πρώτοι παράγοντες αντιπροσωπεύουν τη συμβολή του κινηματικού ιξώδους λόγω της διασποράς τύρβης και ορμής στη διαμήκη και εγκάρσια διεύθυνση, αντίστοιχα. Στο εξεταζόμενο τμήμα του ποταμού, η τραχύτητα της επιφάνειας του εδάφους είναι ήπια έως ήπιου μαιανδρισμού, με ορισμένα εμπόδια φυσικά (όχθες), και ανθρωπογενή (γέφυρες). Επομένως, για τους συντελεστές, οι τιμές που τέθηκαν ήταν 0.3 για το D_L , και 0.1 για το D_T . Ο συντελεστής Smagorinsky απεικονίζει την τυρβώδη τάση λόγω των δυνάμεων διάτμησης του νερού, και τέθηκε ίσος με 0.05 (Brunner and CEIWR-HEC 2020a,b; Brunner 2020). Η συνολική διάρκεια των υδροδυναμικών υπολογισμών της 2D προσομοίωσης μη μόνιμης ροής για τα εξεταζόμενα βροχοπτωτικά γεγονότα ορίστηκε στις 48 h, με μεταβαλλόμενο υπολογιστικό χρονικό βήμα.

Το βασικό χρονικό βήμα υπολογισμών τέθηκε ίσο με 1 s, ωστόσο, για να διασφαλιστεί ότι ο αριθμός Courant είναι μικρότερος ή ίσος με 1.0, εφαρμόστηκε ένα μεταβαλλόμενο χρονικό βήμα ενίσχυσης της σταθερότητας του μοντέλου και της αριθμητικής ακρίβειας. Η ελάχιστη τιμή του αριθμού Courant θα πρέπει να είναι μικρότερη από το ήμισυ της μέγιστης τιμής του, ώστε το μοντέλο να παραμένει σταθερό. Επομένως, το εύρος του

αριθμού Courant τέθηκε από 0.45 έως 1.0. Εφόσον ο αριθμός Courant υπερβεί την τιμή 1.0, τότε το υπολογιστικό χρονικό βήμα μειώνεται στο ήμισυ. Απ' την άλλη, εάν ο αριθμός Courant είναι μικρότερος από 0.45, τότε το υπολογιστικό χρονικό βήμα διπλασιάζεται. Επιπλέον, το βασικό χρονικό βήμα υπολογισμών ορίστηκε ότι μπορεί να διπλασιαστεί έως 3 φορές, που αντιστοιχεί σε μέγιστο χρονικό βήμα ίσο με 8 s. Απ' την άλλη, το βασικό χρονικό βήμα τέθηκε ότι μπορεί να μειωθεί στο ήμισυ έως 3 φορές, που αντιστοιχεί σε ελάχιστο χρονικό βήμα ίσο με 0.125 s (Brunner and CEIWR-HEC 2020a,b). Εκτελέστηκε ο προ-επεξεργαστής γεωμετρίας, ο προσομοιωτής μη μόνιμης ροής, και ο μετα-επεξεργαστής. Το χρονικό βήμα παραγωγής αποτελεσμάτων, που αφορά συγχρόνως και τα εξαγόμενα υδρογραφήματα και χάρτες, ορίστηκε στα 4 s.

4.2.8 Δεδομένα γεωμετρίας στο ArcGIS–Σύνδεση και ανάλυση με το υδραυλικό μοντέλο 1D HEC-RAS

Στο λογισμικό ArcGIS, εισήχθη το DTM υψηλής ανάλυσης 0.5 m x 0.5 m, το οποίο συγκροτήθηκε με το Παγκόσμιο Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς WGS'84, για την Παγκόσμια Εγκάρσια Μερκατορική Απεικόνιση (UTM) της Ζώνης 17. Το DTM μετατράπηκε σε μοντέλο τριγωνικού ακανόνιστου δικτύου (TIN), ώστε μέσω του HEC-GeoRAS να ψηφιοποιηθεί η γεωμετρία. Τα στοιχεία που ψηφιοποιήθηκαν ήταν (α) το κάταντες τμήμα της κεντρικής γραμμής του ποταμού Humber, μήκους 11679.3 m, και της κεντρικής γραμμής του ρέματος Black Creek, μήκους 1227.7 m, (β) οι γραμμές για τις όχθες του ποταμού και του ρέματος, (γ) οι γραμμές των διαδρομών ροής επάνω από τις όχθες και κατά μήκος των κύριων καναλιών, καθώς και (δ) 104 διατομές, κατά κύριο λόγο κάθετες στην κεντρική γραμμή του ποταμού και του ρέματος (Cameron and Ackerman, 2012). Οι διατομές έχουν πλάτος που κατά το δυνατόν καλύπτει την επιφάνεια της πλημμυρικής πεδιάδας. Η πλημμυρική πεδιάδα δεν δύναται να αποδοθεί πλήρως από το λογισμικό 1D HEC-RAS, με το οποίο δύναται να χρησιμοποιηθούν έως 500 σημεία με δεδομένα θέσης-υψομέτρου για την περιγραφή της κάθε διατομής (Brunner, 2020). Το πλάτος των διατομών για το τμήμα του ποταμού Humber πριν από τη συμβολή με το Black Creek, έχει εύρος από 400 m έως 670 m, για το τμήμα του ποταμού Humber μετά τη συμβολή με το Black Creek έχει εύρος από 320 m έως 695 m, ενώ για το τμήμα του ρέματος Black Creek κυμαίνεται από 380 m έως 490 m. Ακολούθως, αποδόθηκαν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά (χιλιομετρικές θέσεις, συντεταγμένες, μήκη) στην κεντρική γραμμή του ποταμού Humber και του ρέματος Black Creek, καθώς

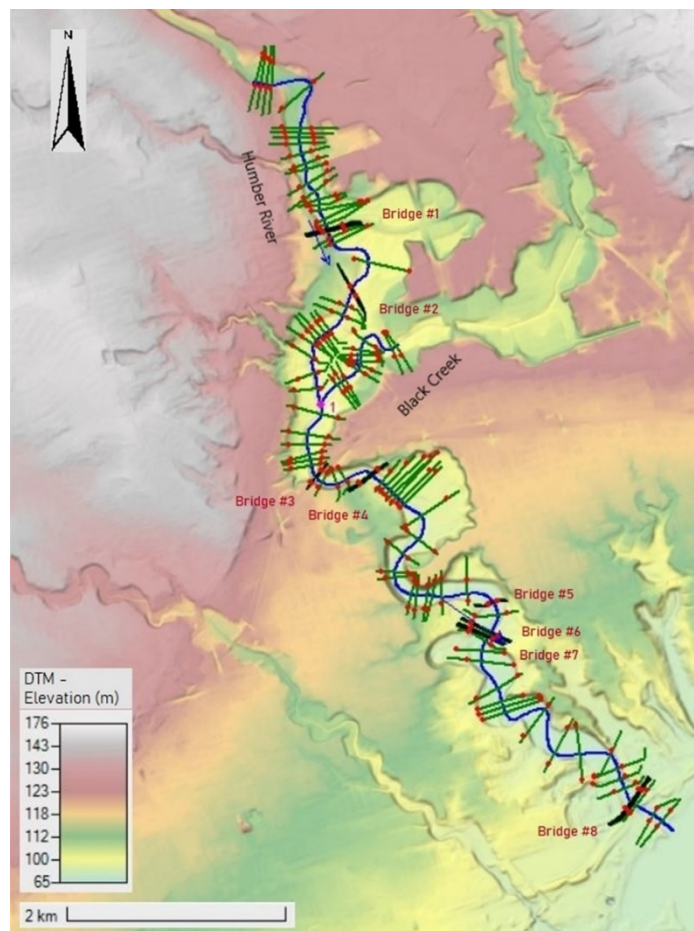
και στις διατομές, και κατόπιν έγινε εξαγωγή των δεδομένων γεωμετρίας στο HEC-RAS (Cameron and Ackerman, 2012), για την 1D υδραυλική προσομοίωση της περιοχής, λόγω των εξεταζόμενων γεγονότων κλιματικής αλλαγής.

Στο HEC-RAS, σχεδιάστηκαν οι άξονες των οκτώ υφιστάμενων γεφυρών εγκάρσια στη ροή του ποταμού Humber, σύμφωνα με την 2D προσομοίωση. Η μόνη διαφοροποίηση ήταν οι αποστάσεις των άκρων της ανωδομής από την ανάντη και κατάντη σχεδιασμένη διατομή, συγκριτικά με το 2D μοντέλο. Ειδικότερα, στο 1D μοντέλο, η γεωμετρία της άνω και κάτω όψης της γέφυρας προκύπτει από παρεμβολή, βάσει της ανάντη και κατάντη διατομής. Επομένως, κρίθηκε σκόπιμο οι αποστάσεις των άκρων της γέφυρας από την προηγούμενη και επόμενη διατομή να είναι μικρές, και συγκεκριμένα ίσες με 0.1 m είτε 0.2 m, ώστε η γεωμετρία του εδάφους στη γέφυρα να είναι αντιπροσωπευτικότερη. Αντίθετα, στο 2D μοντέλο, η γεωμετρία του εδάφους στον άξονα και στα άκρα της γέφυρας προκύπτει απευθείας από το DTM.

Στο 1D μοντέλο, ορίστηκε επίσης η θέση της συμβολής του ποταμού Humber και του ρέματος Black Creek, βάσει των αποστάσεων από τις προηγούμενες διατομές στο ποτάμι και το ρέμα. Για τους υδραυλικούς υπολογισμούς, ορίστηκε η στάθμη του νερού να είναι ίδια στις δύο ανάντη διατομές (Brunner and CEIWR-HEC, 2020b).

Για μη μόνιμη ροή όπως η μελετώμενη, ορίστηκαν εμπειρικοί συντελεστές συστολής και διαστολής στις θέσεις των διατομών. Οι συντελεστές ήταν ίσοι με 0.1 και 0.3, αντίστοιχα, για τις 88 από τις 104 διατομές. Οι υπόλοιπες 16 διατομές με διαφορετικές τιμές των συντελεστών συστολής και διαστολής ήταν αυτές που προηγούνταν και έπονταν των οκτώ γεφυρών. Τυπικές τιμές των συντελεστών συστολής και διαστολής ίσες με 0.3 και 0.5 αντίστοιχα, τέθηκαν στις διατομές πριν και μετά από τις γέφυρες #1, #2, #3, #4, #5, και #8, καθώς και στη διατομή πριν από τη γέφυρα #6, και στη διατομή μετά τη γέφυρα #7, (συνολικά 14 διατομές). Στη διατομή μετά τη γέφυρα #6 και στη διατομή πριν από τη γέφυρα #7, ανάμεσα στις οποίες δεν παρεμβάλλεται κάποια ενδιάμεση διατομή, τέθηκαν εμπειρικοί συντελεστές συστολής και διαστολής ίσοι προς 0.45 και 0.65 αντίστοιχα, που αντιστοιχούν σε μια ενδιάμεση θεώρηση τυπικών διατομών γεφυρών και απότομων μεταβάσεων ροής, λόγω της σφοδρότητας των εξεταζόμενων βροχοπτωτικών γεγονότων (Brunner and CEIWR-HEC, 2020b; Brunner, 2020). Επίσης, ο συντελεστής τραχύτητας Manning n , ορίστηκε σύμφωνα με την 2D προσομοίωση, ομοιόμορφος σε όλες τις διατομές, και ίσος με 0.04 (Chow, 1959). Στην [Εικόνα 4-16](#)

παρουσιάζονται σε κάτοψη η κοίτη του ποταμού Humber που συμβάλλει με την κοίτη του ρέματος Black Creek, οι θέσεις των οχθών, οι διατομές και οι οκτώ γέφυρες.



Εικόνα 4-16. Κοίτη ποταμού Humber και ρέματος Black Creek, όχθες, διατομές & γέφυρες, βάσει του DTM υψηλής ανάλυσης 0.5 m x 0.5 m.

Εισήχθησαν επίσης ως οριακές συνθήκες μη μόνιμης ροής στις δύο ανάντη διατομές και στην κατάντη διατομή, οι ίδιες με αυτές της 2D προσομοίωσης (Brunner and CEIWR-HEC, 2020b). Για την 1D υδραυλική ανάλυση μη μόνιμης ροής, όλων των πλημμυρογραφήμάτων που προέκυψαν από τα μελετώμενα βροχοπτωτικά συμβάντα μέσω των κλιματικών δεδομένων, ορίστηκαν οι επιλογές υπολογισμών και τα όρια ανεκτικότητας για την προσομοίωση 1D ροής. Συγκεκριμένα, η ανεκτικότητα στους υπολογισμούς της στάθμης της επιφάνειας του νερού σε κάθε διατομή και γέφυρα, συγκριτικά με την προηγούμενη δοκιμή του επιλυτή, ορίστηκε ίση με 0.02 m. Ο αριθμός επαναλήψεων επίλυσης των εξισώσεων μη μόνιμης ροής ορίστηκε μικρότερος ή ίσος των 20. Τέθηκαν επίσης 7200 χρονικά βήματα προθέρμανσης του μοντέλου υπό σταθερές εισροές, ώστε να εξομαλυνθεί το προφίλ του ποταμού και του ρέματος προτού αναπτυχθούν τα πλημμυρογραφήματα. Ο συντελεστής εκθετικής φθοράς κατά την

καταβύθιση γεφυρών στη ροή υδατοφράκτη ορίστηκε ίσος με 3. Κατά την προ-επεξεργασία της γεωμετρίας του υδραυλικού συστήματος, χρησιμοποιήθηκαν οι εσωτερικές οριακές συνθήκες των υπολογισμένων καμπυλών ταξινόμησης βάθους-ροής στις θέσεις γεφυρών. Οι υπολογισμοί της 1D μη μόνιμης ροής έγιναν με τον αλγόριθμο των πεπερασμένων όγκων, που παρείχε σωστή διαχείριση στα ταχέως αναπτυσσόμενα πλημμυρογραφήματα των εξεταζόμενων γεγονότων, καθώς και διατήρηση της συνέχειας και της ορμής στη θέση της συμβολή ποταμού και ρέματος. Το καθεστώς της 1D ροής ορίστηκε μικτό, για το οποίο τέθηκε η κατώφλια τιμή του αριθμού Froude προκειμένου να εξαλείφονται οι επιταχύνσεις, ίση με 0.8, που είναι η προκαθορισμένη από το HEC-RAS, καθώς και ο εκθέτης του μειωτικού συντελεστή του αριθμού Froude, ίσος με 4, που είναι επίσης η προκαθορισμένη τιμή. Επιπλέον, η μέθοδος που επιλέχθηκε για τον υπολογισμό του ρυθμού απωλειών λόγω τριβής σε διατομές και γέφυρες, για τη διατήρηση της ορμής, ήταν η μέση τιμή των ρυθμών απωλειών (Brunner and CEIWR-HEC, 2020b).

Η συνολική διάρκεια των 1D υδραυλικών υπολογισμών μη μόνιμης ροής για τα μελετώμενα βροχοπτωτικά γεγονότα τέθηκε ίση με 48 h, με μεταβαλλόμενο χρονικό βήμα υπολογισμών. Το βασικό υπολογιστικό χρονικό βήμα ορίστηκε ίσο με 10 s, ωστόσο εκτελέστηκε ένα μεταβαλλόμενο χρονικό βήμα για τη διασφάλιση ενός αριθμού Courant μικρότερου ή ίσου με 1.0, που θα ενίσχυε τη σταθερότητα και την αριθμητική ακρίβεια του μοντέλου. Το εύρος του αριθμού Courant ορίστηκε από 0.45 έως 1.0, με το υπολογιστικό βήμα να μειώνεται στο ήμισυ εάν ο αριθμός Courant υπερβεί την τιμή 1.0, είτε να διπλασιάζεται εφόσον ο αριθμός Courant είναι μικρότερος από 0.45 (Brunner and CEIWR-HEC 2020a,b). Εκτελέστηκαν ο προ-επεξεργαστής γεωμετρίας για την επιτάχυνση των υπολογισμών μη μόνιμης ροής, ο προσομοιωτής μη μόνιμης ροής, και ο μετα-επεξεργαστής για την εξαγωγή αποτελεσμάτων. Τα συνολικά αποτελέσματα όπως και η χαρτογράφηση των αποτελεσμάτων ορίστηκαν να εξάγονται ανά 10 s.

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.1 Αποτελέσματα υδρολογικής λεκάνης ρέματος Αλμυρίδας

5.1.1 Βαθμονόμηση υδρολογικού μοντέλου HEC-HMS και ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων

Για την επιτυχή προσομοίωση του αιφνίδιου πλημμυρικού γεγονότος στις 17/10/2006, βαθμονομήθηκαν οι παράμετροι που αφορούν την αδιαπερατότητα (%), τον CN , το χρόνο συγκέντρωσης T_c και το συντελεστή αποθήκευσης R , χρησιμοποιώντας τις τιθέμενες τιμές αρχικής απορροής ανά επιφάνεια ($m^3/s/km^2$), της σταθεράς ύφεσης και της αναλογίας έως τη βασική απορροή αιχμής. Πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου για να προσδιοριστεί ποιες από τις βαθμονομούμενες παραμέτρους αλλάζουν τον χρόνο εμφάνισης της μέγιστης απορροής, καθώς και το μέγεθος της απορροής αιχμής. Ακολουθήθηκε η προσέγγιση αλλαγής μιας παραμέτρου τη φορά, καθεμία για συγκεκριμένο εύρος, όπως ορίστηκε στην §4.1.5. Αρχικά, εξετάστηκε το ποσοστό αδιαπερατότητας, ακολουθούμενο από το συντελεστή αποθήκευσης, τον CN και το χρόνο συγκέντρωσης, αντίστοιχα. Βρέθηκε ότι η αύξηση του ποσοστού αδιαπερατότητας οδηγεί σε αύξηση του μεγέθους της μέγιστης απορροής, χωρίς την αλλαγή του χρόνου εμφάνισης της απορροής αιχμής. Από την άλλη, η αύξηση του συντελεστή αποθήκευσης προκαλεί μείωση της μέγιστης απορροής, με μια ταυτόχρονη μετατόπιση του χρόνου εμφάνισης της απορροής αιχμής προς τα εμπρός. Η αύξηση του CN αυξάνει επίσης το μέγεθος της απορροής αιχμής, χωρίς αλλαγή στον προσομοιωμένο χρόνο εμφάνισης της μέγιστης απορροής. Τέλος, ο χρόνος συγκέντρωσης αποτελεί την πιο ευαίσθητη παράμετρο, προκαλώντας τις μεγαλύτερες χρονικές μετατοπίσεις της απορροής αιχμής και διακυμάνσεις στο μέγεθος της μέγιστης απορροής. Ο μικρότερος χρόνος συγκέντρωσης έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερη μέγιστη απορροή. Η βαθμονόμηση των προαναφερθέντων παραμέτρων επιτεύχθηκε με 42 δοκιμές του μοντέλου που είχαν ως αποτέλεσμα διαφορετικά βάθη στο κάτω σημείο ελέγχου. Η μελετώμενη λεκάνη δε διαθέτει μετρητή παροχής και επομένως δεν υπάρχουν δεδομένα απορροής στην έξοδο. Επιπρόσθετα, κατά τη διάρκεια ισχυρών καταιγίδων που προκαλούν πλημμύρες, συνήθως δεν καταγράφονται δεδομένα απορροής ακόμη και σε

λεκάνες με μετρητές, λόγω της καταστροφής του εξοπλισμού μετρήσεων ροής. Ως εκ τούτου, το υδρολογικό μοντέλο βαθμονομήθηκε με έμμεσα στοιχεία πεδίου μετά την πλημμύρα. Η ώρα διέλευσης του πλημμυρικού κύματος σημειώθηκε το μεσημέρι, όπως προέκυψε από συζήτηση με τους ντόπιους. Τα προσομοιωμένα υδρογραφήματα εισήχθησαν στο υδραυλικό μοντέλο 1D HEC-RAS και τα προκύπτοντα πλημμυρικά κύματα επικυρώθηκαν από τη μέτρηση του μέγιστου πλημμυρικού βάθους μετά την πλημμύρα στη διατομή ελέγχου. Το βάθος μετρήθηκε ίσο με 2 m (Tsanis et al., 2013), με μια αβεβαιότητα στη μέτρηση. Η θεώρηση της αβεβαιότητας στο ίχνος της μέτρησης στη διατομή ελέγχου είναι ποιοτική, βασιζόμενη στο ότι η μέτρηση έγινε μετά από ένα μικρό χρονικό διάστημα από τη διέλευση του πλημμυρικού κύματος, και πιθανώς αλλοιώθηκε σημαντικά η κοίτη του ρέματος από διάβρωση είτε εναπόθεση κατά τόπους από λάσπη, χαλίκια, κορμούς δέντρων και άλλα φερτά υλικά. Λόγω αυτών των παραγόντων, και χωρίς να υπάρχουν στοιχεία για τον ποσοτικό προσδιορισμό της αβεβαιότητας, για τις υδραυλικές δοκιμές έγινε η παραδοχή αβεβαιότητας σε ένα εύρος τιμών από τη μέτρηση. Το υδρόγραμμα που επαλήθευσε την ώρα της παροχής αιχμής καθώς και το μέγιστο πλημμυρικό βάθος στο σημείο ελέγχου είναι το σωστό. Ο Πίνακας 5-1 παρουσιάζει τα αναλυτικά αποτελέσματα των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν.

Πίνακας 5-1. Βαθμονόμηση μοντέλου με ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων, ανάλυση μεγέθους μέγιστης απορροής, και επαλήθευση μοντέλου.

A/A	Αδιαπερατότητα (%)	CN	Χρόνος συγκέντρωσης T_c (h)	$\frac{R}{T_c + R}$	Συντελεστής αποθήκευσης R (h)	Μέγιστη απορροή (m ³ /s)	Ώρα μέγιστης απορροής	Βάθος στο κάτω μέρος σημείο (m)
1	16.1	56.7	2.55	0.3	1.1	101.4	12:00	2.21
2	16.8	56.7	2.55	0.3	1.1	102.2	12:00	2.22
3	17.5	56.7	2.55	0.3	1.1	103.1	12:00	2.22
4	18	56.7	2.55	0.3	1.1	103.6	12:00	2.22
5	18.7	56.7	2.55	0.3	1.1	104.5	12:00	2.22
6	19.4	56.7	2.55	0.3	1.1	105.3	12:00	2.23
7	19.9	56.7	2.55	0.3	1.1	105.9	12:00	2.23
8	20.6	56.7	2.55	0.3	1.1	106.7	12:00	2.23
9	21.4	56.7	2.55	0.3	1.1	107.6	12:00	2.23
10	21.8	56.7	2.55	0.3	1.1	108.1	12:00	2.23
11	22.6	56.7	2.55	0.3	1.1	109	12:00	2.24
12	23.3	56.7	2.55	0.3	1.1	109.8	12:00	2.24
13	23.8	56.7	2.55	0.3	1.1	110.4	12:00	2.24
14	24.5	56.7	2.55	0.3	1.1	111.2	12:00	2.24
15	25.2	56.7	2.55	0.3	1.1	112	12:00	2.25
16	25.7	56.7	2.55	0.3	1.1	112.6	12:00	2.25
17	26.4	56.7	2.55	0.3	1.1	113.4	12:00	2.25
18	27.1	56.7	2.55	0.3	1.1	114.3	12:00	2.25
19	27.6	56.7	2.55	0.3	1.1	114.8	12:00	2.26
20	28.3	56.7	2.55	0.3	1.1	115.7	12:00	2.26
21	29.1	56.7	2.55	0.3	1.1	116.5	12:00	2.26
22	22.6	56.7	2.55	0.2	0.6	122	11:45	2.28
23	22.6	56.7	2.55	0.25	0.85	115.6	12:00	2.26
24	22.6	56.7	2.55	0.35	1.4	101.6	12:15	2.21

25	22.6	65.2	2.55	0.3	1.1	131.9	12:00	2.31
26	22.6	48.2	2.55	0.3	1.1	86.1	12:00	2.15
27	22.6	56.7	3.3	0.2	0.8	106	12:15	2.23
28	22.6	56.7	3.3	0.25	1.1	99.9	12:30	2.21
29	22.6	56.7	3.3	0.3	1.4	93.4	12:30	2.19
30	22.6	56.7	3.3	0.35	1.8	86.9	12:45	2.16
31	22.6	56.7	1.8	0.2	0.45	145.2	11:30	2.35
32	22.6	56.7	1.8	0.25	0.6	139.2	11:30	2.33
33	22.6	56.7	1.8	0.3	0.8	131.8	11:30	2.31
34	22.6	56.7	1.8	0.35	1	123.8	11:30	2.28
35	22.6	56.7	2.1	0.2	0.5	135.7	11:30	2.32
36	22.6	56.7	2.1	0.25	0.7	128.7	11:45	2.3
37	22.6	56.7	2.1	0.3	0.9	122.5	11:45	2.28
38	22.6	56.7	2.1	0.35	1.1	114.9	11:45	2.26
39	22.6	56.7	2.3	0.2	0.6	127.7	11:45	2.3
40	22.6	56.7	2.3	0.25	0.8	121.1	11:45	2.27
41	22.6	56.7	2.3	0.3	1	114	12:00	2.25
42	22.6	56.7	2.3	0.35	1.2	107.3	12:00	2.23

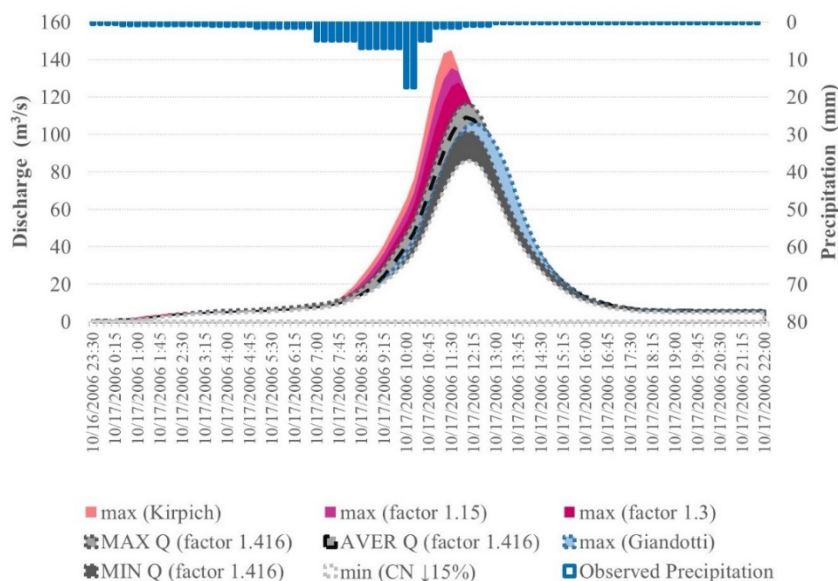
Μη έχοντας δεδομένα από μετρήσεις απορροής στην έξοδο της υδρολογικής λεκάνης, δεν ήταν δυνατόν να χρησιμοποιηθούν στατιστικοί δείκτες όπως ο Nash-Sutcliffe για τη βαθμονόμηση του μοντέλου. Αντίθετα, έγινε συλλογή των πιο σημαντικών εκτελέσεων του μοντέλου (42) προκειμένου να προσεγγιστούν καλύτερα και ταυτόχρονα τα δύο προαναφερθέντα κριτήρια βαθμονόμησης και επικύρωσης. Με τη μέθοδο που ακολουθήθηκε, προσεγγίστηκε σημαντικά και με επάρκεια το εύρος αβεβαιότητας του προκύπτοντος υδρογραφήματος. Η χρήση μεθόδων όπως οι δοκιμές Monte Carlo θα ήταν κατάλληλη εάν υπήρχαν επαρκή δεδομένα πεδίου, κάτι που δεν συμβαίνει στη συγκεκριμένη περιοχή μελέτης.

Ο Πίνακας 5-1, με τους έντονους χαρακτήρες, δείχνει τις παραμέτρους που βαθμονομούνται σε κάθε δοκιμή, ακολουθώντας τη μέθοδο αλλαγής μίας παραμέτρου τη φορά. Η θεώρηση της αβεβαιότητας στον *CN* είναι ποιοτική, και όχι ποσοτική, βασιζόμενη στο ότι οι χάρτες κάλυψης που χρησιμοποιήθηκαν είχαν παραχθεί το 2000, ενώ το μελετώμενο βροχοπτώτικό συμβάν συνέβη τον Οκτώβριο του 2006. Επομένως, αναμένονται πιθανές αλλαγές στις χρήσεις γης. Λόγω των αναμενόμενων αλλαγών στις χρήσεις γης, και χωρίς να υπάρχουν στοιχεία για τον ποσοτικό προσδιορισμό της αβεβαιότητας, για τις υδρολογικές δοκιμές έγινε η παραδοχή αβεβαιότητας σε ένα εύρος τιμών από την τιμή αναφοράς του *CN* της λεκάνης.

Ο εμπειρικός τύπος του Giandotti που εφαρμόστηκε στην περιοχή της Αλμυρίδας στο πλαίσιο των δοκιμών, ο οποίος απέδωσε χρόνο συρροής αρκετά μεγαλύτερο από τον αντίστοιχο του τύπου του Kirpich, είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη εμπειρική εξίσωση από ερευνητές σε λεκάνες της Μεσογείου. Ο τύπος του Kirpich, απ' την άλλη, πρωτο-εφαρμόστηκε σε μικρής έκτασης αγροτικές λεκάνες, όπως η μελετώμενη. Στη

μελετώμενη λεκάνη, ο τύπος του Kirpich απέδωσε πολύ μεγαλύτερη παροχή αιχμής από τον τύπο του Giandotti ($145.2 \text{ m}^3/\text{s}$ έναντι $106 \text{ m}^3/\text{s}$), και συγχρόνως η αιχμή του υδρογραφήματος σημειώθηκε μισή ώρα νωρίτερα από την πραγματική ώρα διέλευσης του πλημμυρικού κύματος. Λόγω του ότι και οι δύο εξισώσεις απαντώνται σε πολλές εφαρμογές στη Μεσόγειο, και ότι πολλοί ερευνητές εφαρμόζουν συντελεστές προσαρμογής στον τύπο του Kirpich προκειμένου να προσεγγίσουν ορθότερα το χρόνο συρροής των λεκανών που ερευνούν, επιλέχθηκε και στην παρούσα διατριβή να δοκιμαστούν διάφοροι συντελεστές προσαρμογής στον τύπο του Kirpich, προκειμένου, πρώτον να περιοριστεί η διαφορά των αποτελεσμάτων από τους τύπους των Giandotti και Kirpich, και κυρίως να επικυρωθεί η ώρα διέλευσης της αιχμής του πλημμυρικού κύματος. Συντελεστής προσαρμογής στον τύπο του Kirpich κατά 1.42, επικυρώνει ότι η αιχμή του υδρογραφήματος σημειώθηκε το μεσημέρι.

Οι 42 δοκιμές βαθμονόμησης του υδρολογικού μοντέλου με μεταβαλλόμενες παραμέτρους παρήγαγαν ίσο αριθμό υδρογραφημάτων, με την ώρα της μέγιστης απορροής να προσομοιώνεται μεταξύ 11:30 και 12:45 της 17^{ης} Οκτωβρίου, ήτοι σε συμφωνία με τις μαρτυρίες κατοίκων που ανέφεραν ότι η ώρα αιχμής σημειώθηκε το μεσημέρι. Τα υδρογραφήματα χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου στο υδραυλικό μοντέλο, με το τελευταίο να προσομοιώνει ένα μέγιστο πλημμυρικό βάθος σε διατομή ελέγχου μετά το πέρας της πλημμύρας, μεταξύ 2.15 m και 2.35 m. Στη διατομή ελέγχου, το μέγιστο πλημμυρικό βάθος μετρήθηκε μεταπλημμυρικά ίσο προς 2 m, με μια ποιοτική αβεβαιότητα στη μέτρηση. Ο καλύτερος συνδυασμός των τεσσάρων εξετασθέντων παραμέτρων που παρείχαν την καλύτερη αντιστοίχιση στο μετρηθέν και προσομοιωμένο πλημμυρικό βάθος, σύμφωνα με τον αναφερόμενο χρόνο διέλευσης του πλημμυρικού κύματος αιχμής, ήταν το ποσοστό αδιαπερατότητας ίσο με 22.6%, ο CN ίσος με 56.7, ο χρόνος συγκέντρωσης T_c ίσος με 2.55 h, και ο συντελεστής αποθήκευσης R ίσος με 1.1 h. Η συνεπαγόμενη μέγιστη απορροή προσομοιώθηκε ίση προς $109 \text{ m}^3/\text{s}$ στις 12:00 της 17^{ης} Οκτωβρίου 2006, οδηγώντας σε ένα προσομοιωμένο μέσο πλημμυρικό βάθος στο κάταντες σημείο ελέγχου ίσο με 2.24 m. Στην [Εικόνα 5-1](#), εκτός από την κατανομή της βροχόπτωσης του ισχυρού καταιγιδοφόρου γεγονότος, απεικονίζονται επίσης τα προσομοιωμένα υδρογραφήματα τα οποία αναπαριστούν την αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων βάσει των σχετικών παραμέτρων.



Εικόνα 5-1. Καταγεγραμμένη βροχόπτωση και όρια αβεβαιότητας της προσομοιωμένης απορροής, του αιφνίδιου πλημμυρικού γεγονότος στην Αλμυρίδα το 2006.

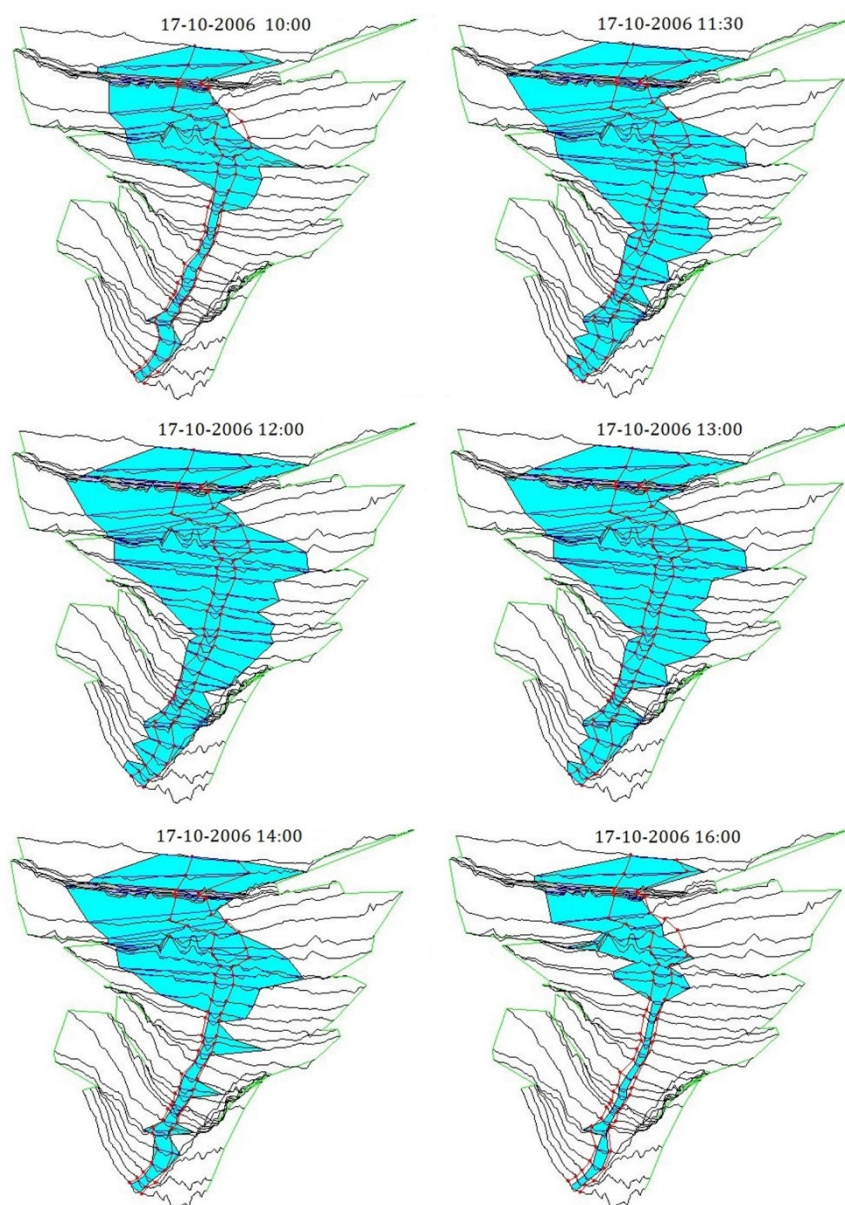
5.1.2 Αποτελέσματα υδρολογικού μοντέλου HEC-HMS

Από τα αποτελέσματα του υδρολογικού μοντέλου HEC-HMS που παρείχαν την καλύτερη αντιστοίχιση μεταξύ μετρηθέντος και προσομοιωμένου βάθους στην κατάντη διατομή ελέγχου, η μέγιστη απορροή των $109 \text{ m}^3/\text{s}$ πραγματοποιήθηκε στις 17 Οκτωβρίου 2006 στις 12:00, δηλαδή 1 h και 30 min έως 1 h και 45 min μετά την εμφάνιση της μέγιστης βροχόπτωσης των 17.5 mm, που έλαβε χώρα τόσο στις 10:15 όσο και στις 10:30 της ίδιας ημέρας (συνολικά 35 mm σε δύο 15άλεπτα). Το συνολικό ύψος βροχόπτωσης, από τις 16 Οκτωβρίου στις 23:30 έως τις 18 Οκτωβρίου στις 22:00, ήταν 196.2 mm, εκ των οποίων περίπου το 50% διηθήθηκε (απώλειες ίσες προς 97.27 mm), ενώ τα 98.93 mm ήταν περίσσεια κατακρήμνιση. Από τα χιλιοστά της περίσσειας βροχής, τα 96.8 mm απέρρευσαν επιφανειακά, ενώ τα 1.62 mm απέρρευσαν υπόγεια (βασική απορροή). Επομένως, τα συνολικά χιλιοστά κατακρημνισμένου νερού που απέρρευσαν έως την έξοδο ήταν 98.42 mm. Στις 10:30 της 17^{ης} Οκτωβρίου σημειώθηκε το μέγιστο ύψος που περίσσεψε, και ήταν ίσο με 11.14 mm. Την ίδια ημέρα, στις 10:15, διηθήθηκαν τα περισσότερα χιλιοστά, ίσα με 7.23 mm. Η βασική απορροή σημείωσε εκθετική μείωση κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, από $0.6 \text{ m}^3/\text{s}$ σε $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$.

5.1.3 Αποτελέσματα υδραυλικού μοντέλου 1D HEC-RAS

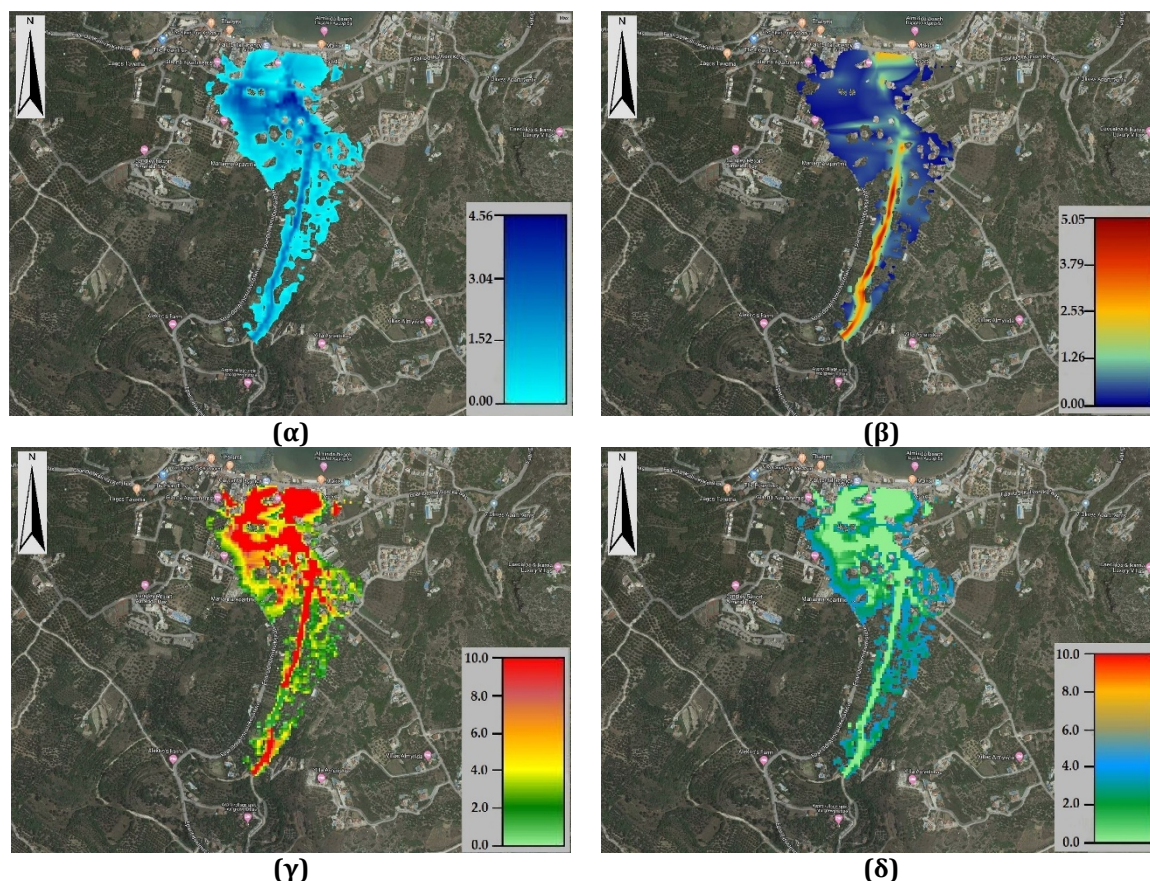
Από τους 1D υδραυλικούς υπολογισμούς σε κάθε θέση διατομής του κάτω τμήματος ρέματος της Αλμυρίδας, με χρήση ενός Ψηφιακού Μοντέλου Υψομετρίας (DEM) υψηλής

ανάλυσης 5 m x 5 m, η ταχύτητα στο κανάλι παρουσίασε διακύμανση μεταξύ 0.32 m/s και 4.1 m/s, λόγω της διαφοροποίησης των υψομέτρων στην κοίτη του καναλιού στις θέσεις διατομών, καθώς και του μεταβλητού πλάτους του καναλιού. Σε στενώσεις προσομοιώθηκαν υψηλές ταχύτητες, ενώ σε αυξημένα πλάτη του καναλιού οι ταχύτητες ήταν μειωμένες. Επιπλέον, οι ταχύτητες του πλημμυρικού κύματος ήταν μειωμένες για περίπου 140 m πριν από τη γέφυρα, της οποίας η ανάντη όψη υπερχείλισε έως 0.27 m, για 2 h (από 11:40 έως 13:40), ενώ αυξήθηκαν λίγο μετά τη γέφυρα έως την εκβολή του ρέματος. Η γέφυρα λειτούργησε ως εμπόδιο και ανέκοψε την ορμή των υδάτων, ενώ δημιουργήθηκε κίνηση των υδάτων προς τα πίσω λόγω στένωσης κατά την επαφή του νερού με την κάτω παρειά της (από 10:50 έως 11:40, και από 13:40 έως 14:30). Στο σημείο ελέγχου, το μέγιστο βάθος νερού προσομοιώθηκε στα 2.24 m, με εύρος αβεβαιότητας της μέγιστης τιμής από 2.15 m έως 2.35 m, που ήταν σε συμφωνία με τη μέτρηση πεδίου μετά την πλημμύρα (2m), λαμβάνοντας υπόψιν και την ποιοτική αβεβαιότητα στη μέτρηση. Από τα ανάντη έως πριν από τη γέφυρα, η γραμμή ενέργειας ήταν σαφώς υψηλότερα από τη μέγιστη πλημμυρική στάθμη, ενώ σχεδόν συνέπιπταν ακριβώς πριν από τη γέφυρα, καθώς και μετά για ορισμένα μέτρα. Επομένως, η συνολική ενέργεια του συστήματος επηρεάστηκε περισσότερο από τις ταχύτητες του κύματος στα ανάντη όπου ήταν αυξημένες, παρά κοντά στη γέφυρα που ήταν μειωμένες. Από τις τιμές του αριθμού Froude στο κανάλι διαπιστώθηκε μετάβαση της ροής από υποκρίσιμη σε υπερκρίσιμη και αντιστρόφως. Στα κατάντη, η πλημμυρισμένη επιφάνεια ήταν αυξημένη, ενώ η μέγιστη πλημμυρισμένη επιφάνεια εμφανίστηκε από τις 11:50 έως τις 12:50, επιβεβαιώνοντας τα αποτελέσματα αιχμής από το HEC-HMS. Η μέγιστη πλημμυρική έκταση του γεγονότος του 2006 προσομοιώθηκε στα 94955 m². Μέσα στην κοίτη του ρέματος, στις θέσεις των διατομών, τα πλημμυρικά βάθη κυμάνθηκαν από 0.75 m έως 4.27 m. Στην [Εικόνα 5-2](#) παρουσιάζεται μια τρισδιάστατη απεικόνιση του πλημμυρικού κύματος έπειτα από 2, 3.5, 4, 5, 6 και 8 h από την αρχή της προσομοίωσης, στην οποία φαίνονται επίσης οι διατομές και η γέφυρα λίγα μέτρα πριν την εκβολή του ρέματος στο Κρητικό πέλαγος. Η κατεύθυνση του πλημμυρικού κύματος είναι προς το Βορρά.



Εικόνα 5-2. Τρισδιάστατη άποψη του πλημμυρικού κύματος στις (α) 10:00, (β) 11:30, (γ) 12:00, (δ) 13:00, (ε) 14:00, και (στ) 16:00 της 17^{ης} Οκτωβρίου 2006, με το 1D HEC-RAS, χρησιμοποιώντας το DEM υψηλής ανάλυσης 5 m x 5 m.

Στην [Εικόνα 5-3α](#) απεικονίζεται η προσομοιωμένη μέγιστη πλημμυρική έκταση λόγω της απορροής αιχμής, καθώς και τα μέγιστα πλημμυρικά βάθη. Το πλημμυρικό βάθος έφτασε έως και 4.56 m εντός της κοίτης του ρέματος σε απόσταση περίπου 7 m πριν από τη γέφυρα, ενώ η γέφυρα πλημμύρισε επίσης στην ανάντη όψη της κατά περίπου 0.27 m. Υψηλές τιμές πλημμυρικού βάθους εντοπίστηκαν επίσης ανάντη της γέφυρας στην πλημμυρική επιφάνεια εκτός της δυτικής όχθης του καναλιού. Στην [Εικόνα 5-3β](#) παρουσιάζονται οι προσομοιωμένες μέγιστες ταχύτητες του πλημμυρικού κύματος, οι οποίες προσομοιώθηκαν να φτάνουν τα 5.05 m/s τοπικά στα μισά περίπου του συνολικού κάταντες τμήματος του ρέματος.

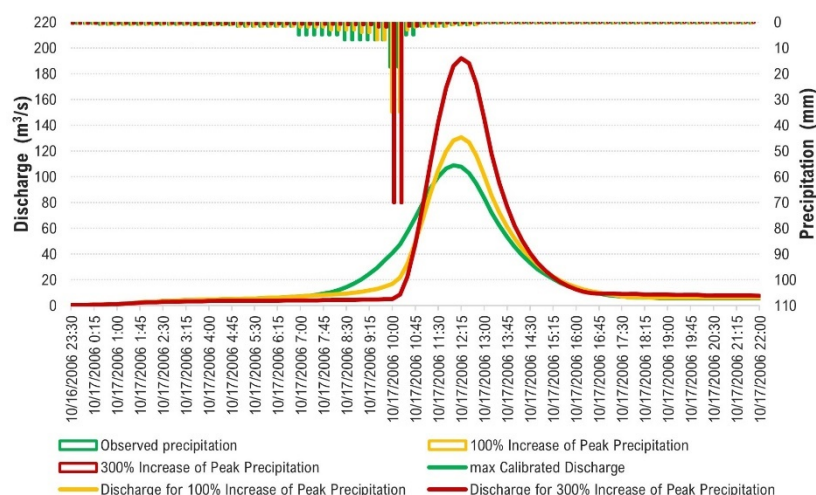


Εικόνα 5-3. (α) Έκταση πλημμύρας και μέγιστα πλημμυρικά βάθη, (β) μέγιστες ταχύτητες πλημμυρικού κύματος, (γ) διάρκεια πλημμύρας από την έναρξη της προσομοίωσης, (δ) χρόνος άφιξης πλημμυρικού κύματος στις πλημμυρικές επιφάνειες, με το 1D HEC-RAS, χρησιμοποιώντας το DEM υψηλής ανάλυσης 5 m × 5 m.

Στην [Εικόνα 5-3γ](#) παρουσιάζεται η διάρκεια κατά την οποία παρέμειναν διαβρεγμένες οι πλημμυρικές επιφάνειες από την έναρξη της 1D υδραυλικής προσομοίωσης. Ορισμένες επιφάνειες παρέμειναν πλημμυρισμένες καθ' όλη τη διάρκεια των 10 h της υδραυλικής προσομοίωσης. Λίγες επιφάνειες πλημμύρισαν από 8 έως 4 h. Ωστόσο, υπήρχαν ορισμένες περιοχές που πλημμύρισαν μόνο για 2 h. Στην [Εικόνα 5-3δ](#) απεικονίζεται ο χρόνος άφιξης του πλημμυρικού κύματος στις πλημμυρικές περιοχές. Στις επιφάνειες που παρέμειναν πλημμυρισμένες καθ' όλη τη διάρκεια των 10 h της υδραυλικής προσομοίωσης, ο χρόνος άφιξης ήταν άμεσος. Ωστόσο, το πλημμυρικό κύμα έφτασε μεταγενέστερα σε άλλες περιοχές της πλημμυρικής έκτασης. Συγκεκριμένα, ορισμένες περιοχές πλημμύρισαν έως και 4.13 h έπειτα από την έναρξη της υδραυλικής προσομοίωσης. Ωστόσο, η χαρτογράφηση στην [Εικόνα 5-3γ](#) και [Εικόνα 5-3δ](#) δεν δύναται να είναι απολύτως ακριβής, καθώς η προσομοιωμένη περιοχή δε σχεδιάστηκε λεπτομερώς μέσω πλέγματος κελιών, αλλά μόνο μέσω διατομών.

5.1.4 Υποθετικά σενάρια κλιματικής αλλαγής για το συνολικό ύψος υετού του καταγεγραμμένου γεγονότος

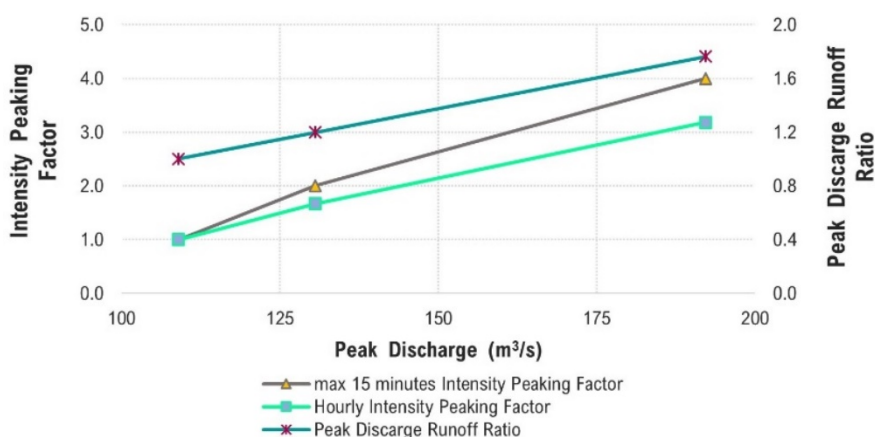
Το καταγεγραμμένο βροχοπτώτικό γεγονός συνολικού ύψους 196.2 mm σημειώθηκε από τις 16 Οκτωβρίου 2006 στις 23:30 έως τις 18 Οκτωβρίου 2006 στις 22:00. Τα δεδομένα βροχής καταγράφηκαν ανά 15 min, από τα οποία διαπιστώθηκε μέγιστη βροχόπτωση 17.5 mm τόσο στις 10:15 όσο και στις 10:30 της 17^{ης} Οκτωβρίου, το αποτέλεσμα των οποίων ήταν μια μέση μέγιστη απορροή των 109 m³/s. Με βάση το καταγεγραμμένο γεγονός, εξετάστηκαν δύο υποθετικά σενάρια κλιματικής αλλαγής, με ίδια αθροιστική βροχόπτωση, η οποία κατανεμήθηκε διαφορετικά στο χρόνο. Τα δύο σενάρια αφορούσαν αύξηση της έντασης της βροχόπτωσης κατά 100% και 300%, με το τελευταίο να είναι αρκετά ακραίο, αλλά όχι απίθανο. Οι προκύπτουσες μέγιστες βροχοπτώσεις στο 15άλεπτο για τα αυξητικά σενάρια ήταν 35 mm και 70 mm, τόσο στις 10:15 όσο και στις 10:30 της 17^{ης} Οκτωβρίου 2006. Οι μέγιστες απορροές προσομοιώθηκαν στα 130.6 m³/s και 192.2 m³/s αντίστοιχα, σημειώνοντας αύξηση κατά 19.8% και 76.3% αντίστοιχα, σε σύγκριση με την απορροή αιχμής του βασικού σεναρίου. Τα προσομοιωμένα υδρογραφήματα φαίνονται στην [Εικόνα 5-4](#). Η ώρα εμφάνισης της μέγιστης απορροής ήταν στις 12:15 για τα αυξητικά σενάρια.



Εικόνα 5-4. Κατανομές βροχόπτωσης και προσομοιωμένα υδρογραφήματα λόγω των υποθετικών σεναρίων κλιματικής αλλαγής που αφορούν αύξηση της μέγιστης βροχόπτωσης κατά 100% και 300%.

Εξετάστηκε επίσης ο συντελεστής της έντασης της βροχόπτωσης κατά την αιχμή, είτε με βήμα 15 λεπτών (mm/15min), είτε ωριαίο (mm/h), με την ωριαία ένταση της βροχόπτωσης να λαμβάνεται μεταξύ 10:15 και 11:15 της 17^{ης} Οκτωβρίου 2006, η οποία για το βασικό σενάριο (καταγεγραμμένη βροχόπτωση) ήταν ίση με 45 mm/h. Ως προς

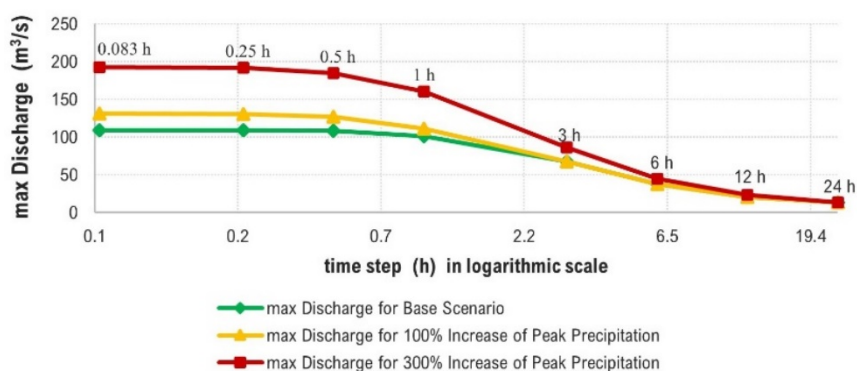
τα εξεταζόμενα σενάρια κλιματικής αλλαγής, αύξησης της έντασης της βροχόπτωσης κατά 100% και 300%, η ένταση της βροχόπτωσης έφτασε τα 75 mm/h και 143 mm/h, αντίστοιχα. Ο συντελεστής της έντασης της βροχόπτωσης κατά την αιχμή ορίστηκε ως ο λόγος της έντασης της βροχόπτωσης ενός εξεταζόμενου σεναρίου κλιματικής αλλαγής προς την ένταση της βροχόπτωσης κατά το βασικό σενάριο. Ο λόγος της απορροής κατά την αιχμή ορίστηκε ως η μέγιστη απορροή ενός εξεταζόμενου σεναρίου κλιματικής αλλαγής προς τη μέγιστη απορροή κατά το βασικό σενάριο. Η [Εικόνα 5-5](#) υποδεικνύει ότι υπάρχει μια σαφής ανοδική τάση του συντελεστή της έντασης της βροχόπτωσης κατά την αιχμή με την αύξηση της μέγιστης απορροής. Επίσης, ο λόγος της απορροής αιχμής ακολουθεί γραμμική τάση.



Εικόνα 5-5. Συντελεστής έντασης της βροχόπτωσης κατά την αιχμή και λόγος της απορροής κατά την αιχμή, όπως προκύπτουν από αύξηση της έντασης της βροχόπτωσης κατά 100% και 300%.

Διαφορετικές χρονικές κατανομές της καταγεγραμμένης βροχόπτωσης, συνολικού ύψους 196.2 mm, δύνανται να οδηγήσουν σε μεταβολές της προσομοιωμένης μέγιστης απορροής. Ως εκ τούτου, εξετάστηκαν σενάρια αναδιανομής των 15άλεπτων καταγραφών βροχής σε δεδομένα 5 λεπτών, 30 λεπτών, 1h, 3h, 6h, 12h και 24h. Αυτά τα σενάρια ελήφθησαν υπόψη για το βασικό καταγεγραμμένο γεγονός, καθώς και για αύξηση της μέγιστης βροχόπτωσης κατά 100% και 300%. Η υδρολογική προσομοίωση με χρονικό βήμα δεδομένων κατακρήμνισης μεγαλύτερο από 1h προκάλεσε σημαντικές αλλαγές στη μέγιστη απορροή, όπως φαίνεται στην [Εικόνα 5-6](#), όπου ο χρόνος στον άξονα x- παρουσιάζεται σε λογαριθμική κλίμακα. Συγκεκριμένα, για το βασικό σενάριο, η προσομοιωμένη μέγιστη απορροή για χρονικό βήμα 5 min και 30 min ήταν 109.1 m³/s και 108.3 m³/s αντίστοιχα, δηλαδή περίπου όμοια με την τιμή του χρονικού βήματος των 15 min (109 m³/s). Ωστόσο, η μέγιστη απορροή μειώθηκε για χρονικά βήματα 1h, 3h, 6h,

12h, και 24h στις τιμές των $100.9 \text{ m}^3/\text{s}$, $68 \text{ m}^3/\text{s}$, $37.4 \text{ m}^3/\text{s}$, $20.9 \text{ m}^3/\text{s}$, και $13.3 \text{ m}^3/\text{s}$ αντίστοιχα, σημειώνοντας μείωση της τάξης του 7.4%, 37.6%, 65.7%, 80.8%, και 87.8% αντίστοιχα, σε σχέση με τη μέγιστη απορροή με 15άλεπτο χρονικό βήμα. Για το σενάριο αύξησης της μέγιστης βροχόπτωσης κατά 100%, η προσομοιωμένη μέγιστη απορροή για χρονικό βήμα 5 min ήταν $130.9 \text{ m}^3/\text{s}$, δηλαδή περίπου ίδια με την αντίστοιχη του χρονικού βήματος των 15 min ($130.6 \text{ m}^3/\text{s}$). Απ' την άλλη, σημειώθηκε μείωση της μέγιστης απορροής για χρονικά βήματα 30 min, 1h, 3h, 6h, 12h, και 24h στις τιμές των $127.1 \text{ m}^3/\text{s}$, $111.5 \text{ m}^3/\text{s}$, $68 \text{ m}^3/\text{s}$, $37.4 \text{ m}^3/\text{s}$, $20.9 \text{ m}^3/\text{s}$, και $13.3 \text{ m}^3/\text{s}$ αντιστοίχως, σημειώνοντας μείωση της τάξης του 2.7%, 14.6%, 47.9%, 71.4%, 84%, και 89.8% αντίστοιχα, σε σχέση με τη μέγιστη απορροή με 15άλεπτο χρονικό βήμα. Ομοίως, για το σενάριο αύξησης της μέγιστης βροχόπτωσης κατά 300%, η προσομοιωμένη μέγιστη απορροή για χρονικό βήμα 5 min ήταν $192.7 \text{ m}^3/\text{s}$, δηλαδή περίπου ίδια με την αντίστοιχη του χρονικού βήματος των 15 min ($192.2 \text{ m}^3/\text{s}$). Όμως, η μέγιστη απορροή μειώθηκε για χρονικά βήματα 30 min, 1h, 3h, 6h, 12h, και 24h στις τιμές των $184.8 \text{ m}^3/\text{s}$, $160.8 \text{ m}^3/\text{s}$, $86.2 \text{ m}^3/\text{s}$, $44.9 \text{ m}^3/\text{s}$, $23.7 \text{ m}^3/\text{s}$, και $13.3 \text{ m}^3/\text{s}$ αντίστοιχα, με τη μείωση να είναι της τάξης του 3.9%, 16.3%, 55.2%, 76.6%, 87.7%, και 93.1% αντιστοίχως, σε σχέση με την απορροή αιχμής με 15άλεπτο χρονικό βήμα. Συνιστάται η ένταση της βροχής να είναι μικρότερη από 1h, προκειμένου τα υδρογραφήματα του υδρολογικού μοντέλου, και οι μέγιστες τιμές τους, να είναι ανεξάρτητα από το χρονικό βήμα.



Εικόνα 5-6. Προσομοιωμένες απορροές αιχμής λόγω διαφορετικής χρονικής ανακατανομής δεδομένων βροχόπτωσης, για το καταγεγραμμένο γεγονός (βασικό σενάριο), καθώς και αύξηση της μέγιστης βροχόπτωσης κατά 100% και 300%.

Από την 1D υδραυλική προσομοίωση του κάταντες ρέματος της Αλμυρίδας, χρησιμοποιώντας ως οριακή συνθήκη εισόδου τα υδρογραφήματα από το βασικό σενάριο (καταγεγραμμένο γεγονός) και τα εξεταζόμενα υποθετικά σενάρια κλιματικής αλλαγής (από [Εικόνα 5-4](#)), προσδιορίστηκαν το μέγιστο πλημμυρικό βάθος και η έκταση

της πλημμύρας, βάσει του DEM υψηλής ανάλυσης 5 m × 5 m. Ο Πίνακας 5-2 παρουσιάζει τα αποτελέσματα, καθώς και την % διαφορά αυτών από τις αντίστοιχες τιμές του βασικού σεναρίου. Τόσο το μέγιστο πλημμυρικό βάθος, όσο και η μέγιστη πλημμυρική έκταση παρουσιάζουν ανοδική τάση καθώς αυξάνεται η μέγιστη απορροή. Ταυτόχρονα, διαπιστώνεται μεγαλύτερη % διαφορά στην πλημμυρική έκταση απ' ό,τι στο μέγιστο βάθος για τα εξεταζόμενα σενάρια κλιματικής αλλαγής. Ιδιαίτερα για το σενάριο αύξησης της έντασης της βροχόπτωσης κατά 300%, με σχεδόν διπλάσια απορροή αιχμής σε σχέση με του καταγεγραμμένου γεγονότος, διαπιστώνεται εξαιρετικά ισχνή αύξηση του μέγιστου πλημμυρικού βάθους.

Πίνακας 5-2. Μέγιστο πλημμυρικό βάθος (m) και έκταση πλημμύρας (m²), όπως προέκυψαν για την καταγεγραμμένη βροχόπτωση (βασικό σενάριο), καθώς και αύξηση της μέγιστης βροχόπτωσης κατά 100% και 300%, με το 1D HEC-RAS.

Σενάριο βροχόπτωσης (P=196.2 mm)	Μέγιστη απορροή (m ³ /s)	Μέγιστο πλημμυρικό βάθος (m)	%διαφορά μέγιστου βάθους από βασικό σενάριο	Μέγιστη πλημμυρική έκταση (m ²)	%διαφορά πλημμυρικής έκτασης από βασικό σενάριο
Καταγεγραμμένη βροχόπτωση	109	4.56	-	94955	-
100% αύξηση της μέγιστης βροχόπτωσης	130.6	4.62	1.3%	101339	6.7%
300% αύξηση της μέγιστης βροχόπτωσης	192.2	4.77	4.6%	113977	20%

Για τα εξεταζόμενα υποθετικά σενάρια κλιματικής αλλαγής, προσομοιώθηκε επίσης η μέση διάρκεια πλημμύρας, δηλαδή η μέση τιμή της χρονικής διάρκειας κατά την οποία παρέμειναν διαβρεγμένες όλες οι επιφάνειες από την έναρξη έως το πέρας της προσομοίωσης, καθώς και ο μέγιστος χρόνος άφιξης του πλημμυρικού κύματος στην πιο απομακρυσμένη περιοχή που πλημμύρισε από την έναρξη της προσομοίωσης. Ο Πίνακας 5-3 παρουσιάζει συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα, καθώς και την % διαφορά αυτών από τις αντίστοιχες τιμές του βασικού σεναρίου (καταγεγραμμένο γεγονός). Η μέση διάρκεια πλημμύρας μειώθηκε στα εξεταζόμενα αυξητικά σενάρια, σε σχέση με το βασικό σενάριο. Οι περιοχές που πλημμύρισαν και για τις 10 h της προσομοίωσης στο βασικό σενάριο, πλημμύρισαν επίσης καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης και στα αυξητικά σενάρια της έντασης της βροχόπτωσης. Ωστόσο, για τα αυξητικά σενάρια, η ανακατανομή του μειωμένου υπολειπόμενου υετού οδήγησε σε μικρότερη διάρκεια πλημμύρας σε πιο απομακρυσμένες περιοχές—από την κοίτη του ρέματος—στις οποίες η διάχυση του πλημμυρικού κύματος συνέβη περισσότερο αστραπιαία. Για το λόγο αυτό, η μέση διάρκεια πλημμύρας προσομοιώθηκε μειωμένη στα σενάρια κλιματικής αλλαγής.

Επιπλέον, στα αυξητικά σενάρια, ο μέγιστος χρόνος άφιξης του πλημμυρικού κύματος στην πιο απομακρυσμένη περιοχή ήταν λίγο μεγαλύτερος από του βασικού σεναρίου.

Πίνακας 5-3. Μέση διάρκεια πλημμύρας (h) και μέγιστος χρόνος άφιξης πλημμυρικού κύματος (h), όπως προέκυψαν για την καταγεγραμμένη βροχόπτωση (βασικό σενάριο), καθώς και αύξηση της μέγιστης βροχόπτωσης κατά 100% και 300%, με το 1D HEC-RAS.

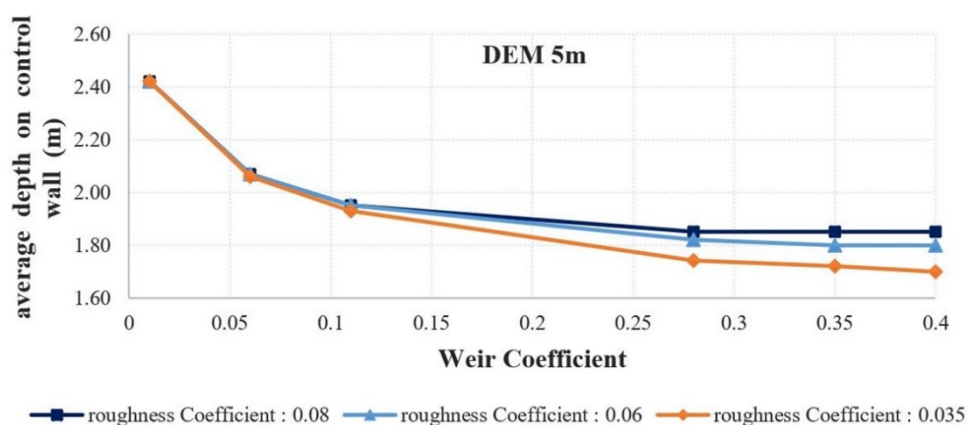
Σενάριο βροχόπτωσης (P=196.2 mm)	Μέση διάρκεια πλημμύρας (h)	%διαφορά μέσης διάρκειας πλημμύρας από βασικό σενάριο	Μέγιστος χρόνος άφιξης κύματος (h)	%διαφορά μέγιστου χρόνου άφιξης κύματος από βασικό σενάριο
Καταγεγραμμένη βροχόπτωση	5.45	-	4.13	-
100% αύξηση της μέγιστης βροχόπτωσης	5.16	-5.4%	4.37	5.6%
300% αύξηση της μέγιστης βροχόπτωσης	4.76	-12.7%	4.37	5.6%

5.1.5 Ανάλυση ευαισθησίας τιμών του συντελεστή τραχύτητας Manning στο ενιαίο υδραυλικό μοντέλο 1D/2D HEC-RAS

Για το κανάλι του ρέματος, ο συντελεστής τραχύτητας του Manning n_c ελήφθη ίσος με 0.04, που αφορά τη μέγιστη τιμή του, και αντιστοιχεί σε καθαρό, ευθύ κανάλι, χωρίς ρωγμές ή βαθείς λάκκους, αλλά με κάποιες πέτρες και αγριόχορτα. Για τις πλημμυρικές επιφάνειες, ο συντελεστής Manning n_f βαθμονομήθηκε. Οι εξετασθείσες τιμές ήταν: (i) 0.08 για καθαρή γη με κορμούς δέντρων και έντονη ανάπτυξη βλαστών, (ii) 0.06 για λίγους θάμνους και δέντρα κατά τη διάρκεια του χειμώνα, και (iii) 0.035 για βοσκότοπους με γρασίδι χαμηλού ύψους (Chow, 1959). Οι υψηλότερες τιμές του συντελεστή Manning μειώνουν τις ταχύτητες ροής, ενώ μικρότερες τιμές της παραμέτρου τριβής παράγουν υψηλότερες ταχύτητες (Chow, 1959). Το συζευγμένο 1D/2D υδραυλικό μοντέλο απέδωσε καλύτερα με συντελεστή τραχύτητας Manning n_f ίσο με 0.08 για τις πλημμυρικές πεδιάδες. Τα αποτελέσματα των δοκιμών βαθμονόμησης, για την καλύτερη προσέγγιση του πλημμυρικού ίχνους στη διατομή ελέγχου μετά την πλημμύρα, φαίνονται στην [Εικόνα 5-7](#) και στην [Εικόνα 5-8](#), με χρήση της τοπογραφίας του DEM των 5 m και του DEM των 2 m, αντίστοιχα. Με το DEM των 5 m, δεν είναι ουσιώδεις οι διαφοροποιήσεις στα πλημμυρικά βάθη για το σύνολο των δοκιμών του συντελεστή Manning στις πλημμυρικές πεδιάδες. Με τη λεπτομερέστερη τοπογραφία του DEM των 2 m, είναι σημαντικές οι διαφορές στα προσομοιωμένα μέγιστα πλημμυρικά βάθη που προκύπτουν για συντελεστή Manning n_f ίσο προς 0.035, σε σχέση με τις άλλες δύο εξετασθείσες τιμές (0.08 και 0.06).

5.1.6 Ανάλυση ευαισθησίας τιμών του συντελεστή υδατοφράκτη στο ενιαίο υδραυλικό μοντέλο 1D/2D HEC-RAS

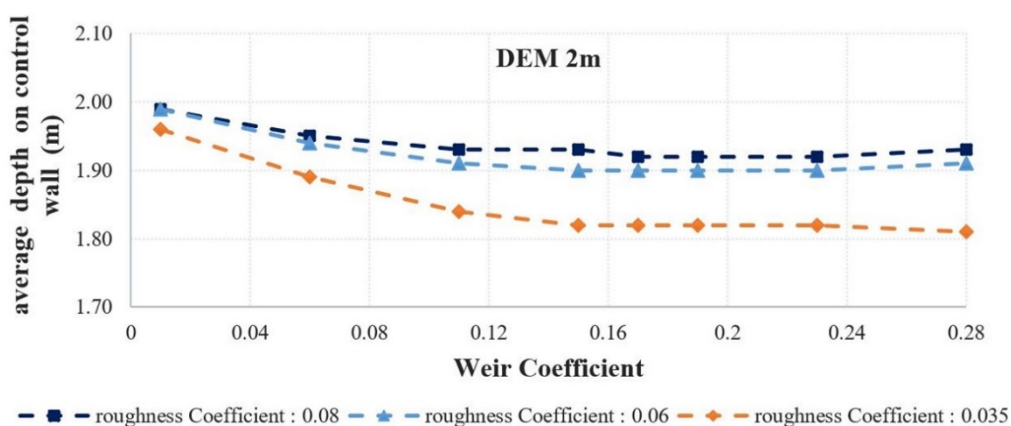
Ο συντελεστής υδατοφράκτη των πλευρικών δομών σύνδεσης της 1D ροής με τις 2D επιφάνειες ροής κατά μήκος κι άνωθεν των οχθών του ρέματος βαθμονομήθηκε επίσης, ώστε να προσεγγιστεί καλύτερα το μετρούμενο πλημμυρικό βάθος στη διατομή ελέγχου μετά την πλημμύρα. Χρησιμοποιώντας την τοπογραφία του DEM σε χωρική ανάλυση 5 m, οι εξεταζόμενες τιμές του συντελεστή υδατοφράκτη ήταν 0.01, 0.06, 0.11, 0.28, 0.35 και 0.40. Η τιμή 0.55 εξετάστηκε επίσης, προκαλώντας μεγάλες αστάθειες στις ταχύτητες που αναπτύχθηκαν στις πλημμυρικές πεδιάδες, οπότε απορρίφθηκε. Για μικρότερες τιμές του συντελεστή υδατοφράκτη, το μέγιστο πλημμυρικό βάθος προσομοιώθηκε μεγαλύτερο. Το κατώτερο όριο του συντελεστή υδατοφράκτη είναι 0.11 (Brunner and CEIWR-HEC, 2016a), επομένως, η τιμή 0.01 δεν μπορεί να εφαρμοστεί. Η τιμή 0.06 ωστόσο δοκιμάστηκε, καθώς η προηγούμενη έκδοση του HEC-RAS (Goodell, 2013) πρότεινε αυτή την τιμή ως κατώτερο όριο του συντελεστή υδατοφράκτη. Μολαταύτα, με την επικαιροποιημένη χρησιμοποιούμενη έκδοση 5.0.3 του υδραυλικού μοντέλου, το συζευγμένο 1D/2D μοντέλο απέδωσε καλύτερα με συντελεστή υδατοφράκτη των πλευρικών δομών ίσο προς 0.11. Το προκύπτον προσομοιωμένο βάθος στη διατομή ελέγχου ήταν ίσο με 1.95 m. Τα αποτελέσματα των δοκιμών βαθμονόμησης φαίνονται στην [Εικόνα 5-7](#).



Εικόνα 5-7. Προσομοιωμένο βάθος στη διατομή ελέγχου για μεταβαλλόμενο συντελεστή υδατοφράκτη στις πλευρικές δομές και συντελεστή τραχύτητας Manning n_f στις επιφάνειες ροής, με το συζευγμένο υδραυλικό μοντέλο 1D/2D HEC-RAS, και υψηλής ανάλυσης DEM 5 m × 5 m.

Χρησιμοποιώντας την τοπογραφία του DEM σε χωρική ανάλυση 2 m, για τη βέλτιστη προσέγγιση του μετρούμενου βάθους στη διατομή ελέγχου, εξετάστηκαν τιμές του συντελεστή υδατοφράκτη ίσες με 0.01, 0.06, 0.11, 0.15, 0.17, 0.19, 0.23 και 0.28. Τα

αποτελέσματα των δοκιμών βαθμονόμησης, με χρονικό βήμα των υδραυλικών υπολογισμών ίσο με 2 sec, φαίνονται στην [Εικόνα 5-8](#). Ειδικά για συντελεστές υδατοφράκτη ίσους με 0.01, 0.06 και 0.11, η ανάλυση πραγματοποιήθηκε για διάφορα χρονικά βήματα υδραυλικών υπολογισμών, όπως 10 sec, 5 sec, 2 sec, και 1 sec, και για συντελεστή Manning στις πλευρικές πεδιάδες ίσο με 0.08 και 0.06. Όσον αφορά αυτές τις δοκιμές, τα προκύπτοντα βάθη στη διατομή ελέγχου ήταν τα ίδια ανεξάρτητα από τη διακύμανση του χρονικού βήματος υπολογισμού. Το 1D/2D μοντέλο απέδωσε καλύτερα, επικυρώνοντας τη μέτρηση πεδίου μετά την πλημμύρα, με συντελεστή υδατοφράκτη ίσο με 0.11. Το προκύπτον προσομοιωμένο βάθος στη διατομή ελέγχου ήταν ίσο με 1.93 m.



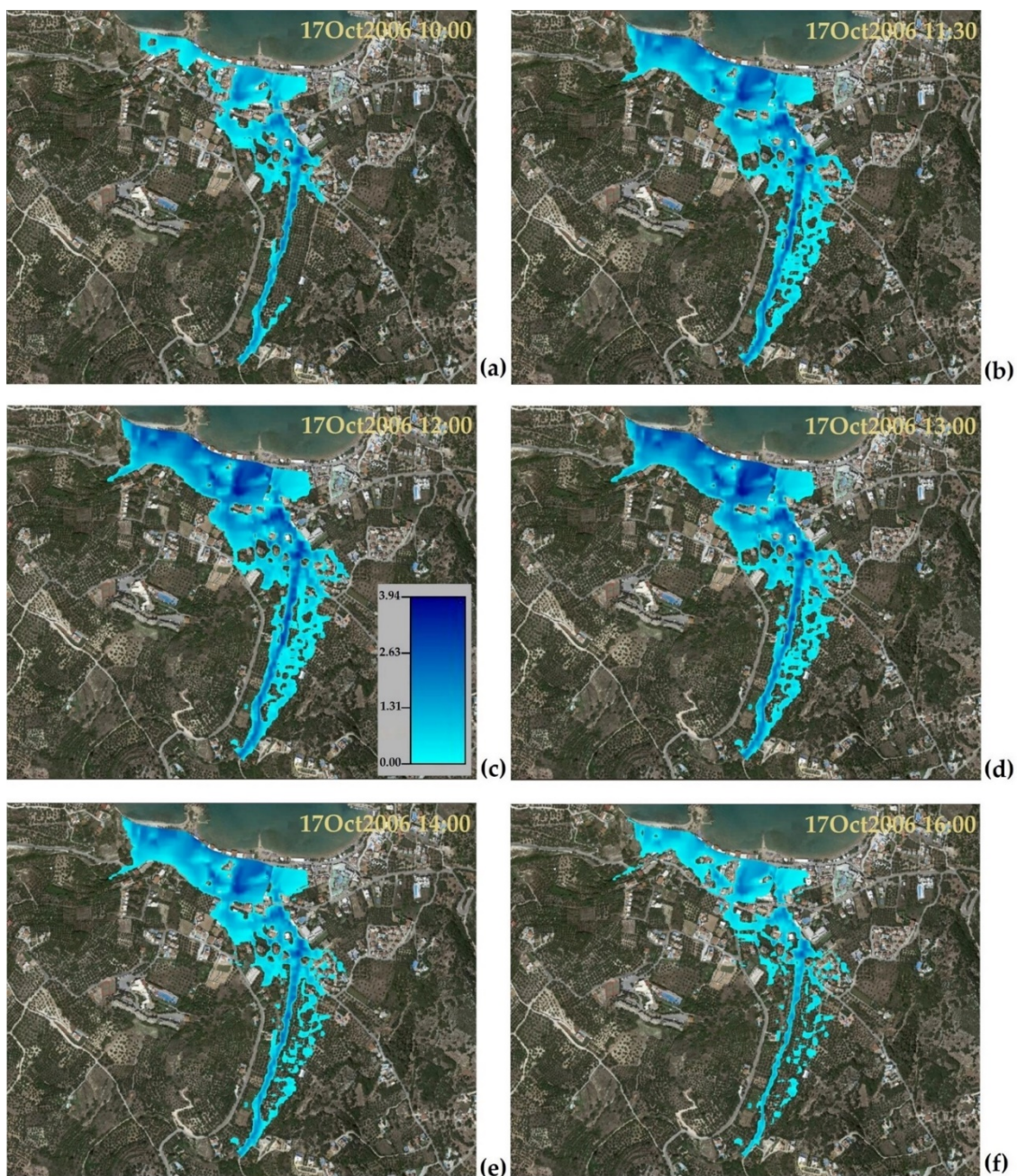
Εικόνα 5-8. Προσομοιωμένο βάθος στη διατομή ελέγχου για μεταβαλλόμενο συντελεστή υδατοφράκτη στις πλευρικές δομές και συντελεστή τραχύτητας Manning n_f στις επιφάνειες ροής, με το συζευγμένο υδραυλικό μοντέλο 1D/2D HEC-RAS, και υψηλής ανάλυσης DEM 2 m × 2 m.

Για τα διάφορα χρονικά βήματα υδραυλικών υπολογισμών (10 sec, 5 sec, 2 sec, και 1 sec) της 1D/2D προσομοίωσης, στις δοκιμές με συντελεστή υδατοφράκτη ίσο με 0.11, η χωρική κατανομή των ταχυτήτων ήταν πανομοιότυπη, έπειτα από σταθερές επιλύσεις των εξισώσεων μη μόνιμης ροής. Στο 2D υπολογιστικό πλέγμα, οι ταχύτητες ήταν γενικά μικρές και το κριτήριο Courant ικανοποιήθηκε σε όλα τα σημεία του πλέγματος. Στο 1D ρέμα, όπου εμφανίστηκαν οι μέγιστες ταχύτητες του κύματος, για να ικανοποιηθεί το κριτήριο Courant, συνίσταται το υπολογιστικό βήμα να είναι μικρότερο ή ίσο με 2 sec.

5.1.7 Αποτελέσματα ενιαίου υδραυλικού μοντέλου 1D/2D HEC-RAS

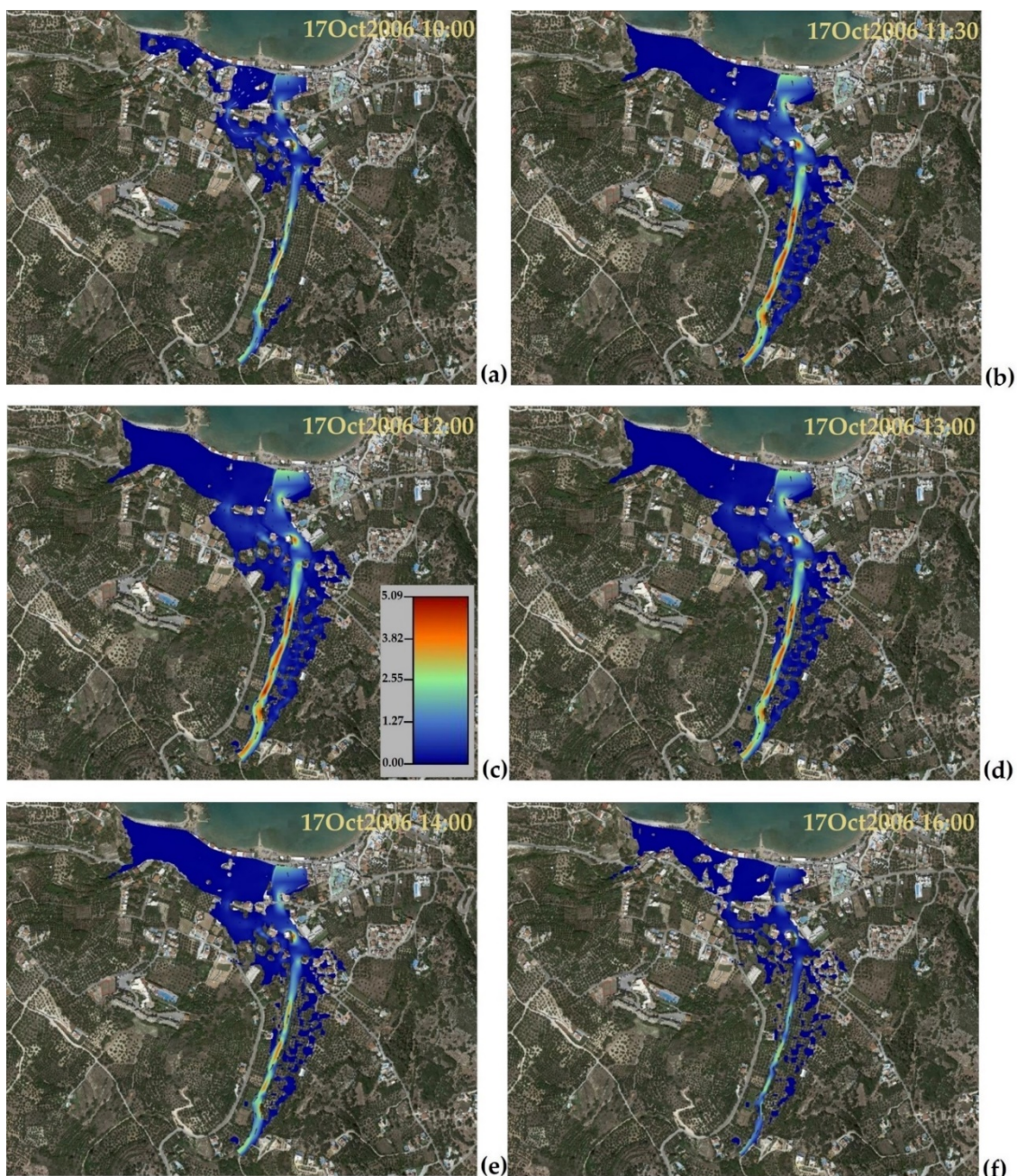
Χρησιμοποιώντας το υψηλής ανάλυσης DEM 5 m × 5 m, η [Εικόνα 5-9](#) παρουσιάζει τα προσομοιωμένα πλημμυρικά βάθη στις πεδιάδες ροής λόγω της διάδοσης του πλημμυρικού κύματος στα κατάντη του ρέματος της Αλμυρίδας έπειτα από 2 h, 3.5 h, 4 h, 5 h, 6 h, και 8 h από την αρχή της προσομοίωσης, ενώ η [Εικόνα 5-10](#) δείχνει τη

διακύμανση των προσομοιωμένων ταχυτήτων του πλημμυρικού κύματος, στους ίδιους χρόνους διασποράς, με το ενιαίο 1D/2D υδραυλικό μοντέλο. Η μέγιστη πλημμυρισμένη επιφάνεια των 108767 m² σημειώθηκε μεταξύ των 12:00 και 13:00 της 17^{ης} Οκτωβρίου 2006. Σε σύγκριση με την έκταση της πλημμύρας που παράχθηκε από το 1D μοντέλο, η μέγιστη πλημμυρική έκταση από το 1D/2D μοντέλο ήταν κατά 14.55% υψηλότερη, με την κύρια αύξηση του όγκου πλημμύρας να σημειώνεται στο βορειοδυτικό τμήμα πριν την εκβολή του ρέματος στο Κρητικό πέλαγος. Το μέγιστο πλημμυρικό βάθος έφτασε τα 3.94 m, στην αριστερή πλημμυρική πεδιάδα, περίπου 100 m πριν την ακτογραμμή, και ήταν μικρότερο από αυτό που προσομοιώθηκε με το 1D μοντέλο, το οποίο έφτασε τα 4.56 m εντός της κοίτης του ρέματος. Στην ανάντη όψη της γέφυρας, η στάθμη του νερού έφτασε ως το υψόμετρο της κάτω παρειάς του καταστρώματος. Στη διατομή ελέγχου του πλημμυρικού βάθους, το συζευγμένο 1D/2D υδραυλικό μοντέλο επαλήθευσε τη μέτρηση πεδίου των 2 m μετά την πλημμύρα, προσομοιώνοντας το πλημμυρικό βάθος στα 1.95 m.



Εικόνα 5-9. Προσομοιωμένα πλημμυρικά βάθη (m) στις **(α)** 10:00, **(β)** 11:30, **(γ)** 12:00, **(δ)** 13:00, **(ε)** 14:00, και **(στ)** 16:00 της 17ης Οκτωβρίου 2006, με το συζευγμένο μοντέλο 1D/2D HEC-RAS, σε υψηλής ανάλυσης DEM 5 m × 5 m.

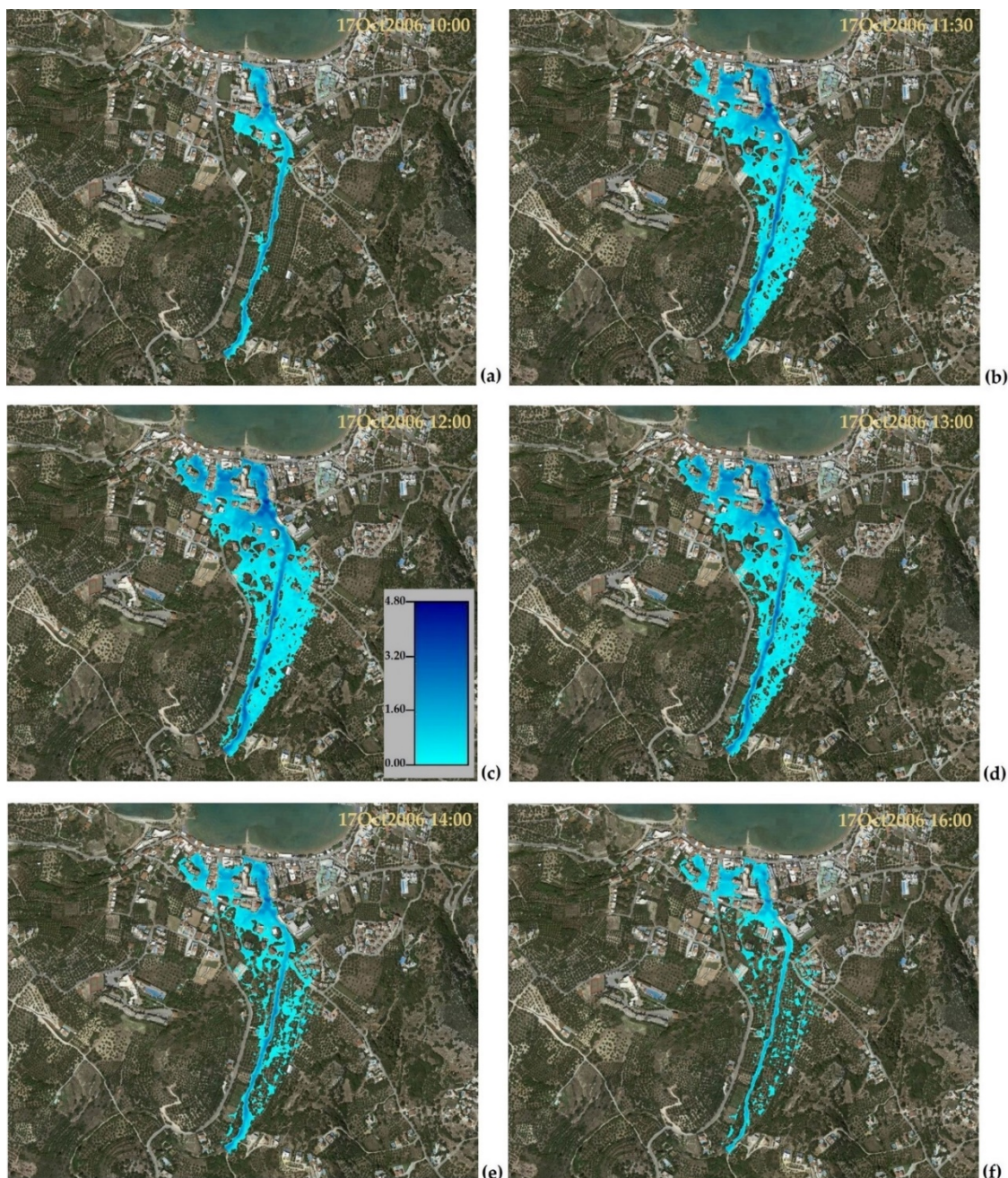
Οι μέγιστες ταχύτητες πλημμυρικού κύματος έφτασαν έως και 5.09 m/s εντός του 1D καναλιού ροής, περίπου στα μισά της απόστασης του συνολικού κάταντες μήκους του μελετώμενου ρέματος. Στις 2D επιφάνειες ροής, οι μέγιστες ταχύτητες ήταν γενικά πολύ χαμηλές, της τάξης των 0.1 έως 0.5 m/sec.



Εικόνα 5-10. Προσομοιωμένες ταχύτητες (m/s) του πλημμυρικού κύματος στις **(α)** 10:00, **(β)** 11:30, **(γ)** 12:00, **(δ)** 13:00, **(ε)** 14:00, και **(στ)** 16:00 της 17^{ης} Οκτωβρίου 2006, με το συζευγμένο μοντέλο 1D/2D HEC-RAS, σε υψηλής ανάλυσης DEM 5 m × 5 m.

Χρησιμοποιώντας το υψηλής ανάλυσης DEM 2 m × 2 m, η [Εικόνα 5-11](#) παρουσιάζει την προσομοιωμένη εξάπλωση του πλημμυρικού βάθους στις επιφάνειες ροής, στα κατάντη του ρέματος της Αλμυρίδας, σε χρόνους μετά την έναρξη της μοντελοποίησης, ενώ η [Εικόνα 5-12](#) αναπαριστά τη διάχυση των ταχυτήτων του πλημμυρικού κύματος στους αντίστοιχους χρόνους, με το συζευγμένο 1D/2D υδραυλικό μοντέλο. Η μέγιστη έκταση της πλημμυρισμένης επιφάνειας προσομοιώθηκε μεταξύ 12:00 και 13:00 της 17^{ης} Οκτωβρίου, όπως συνέβη και με χρήση του DEM χωρικής ανάλυσης 5 m, αλλά ήταν

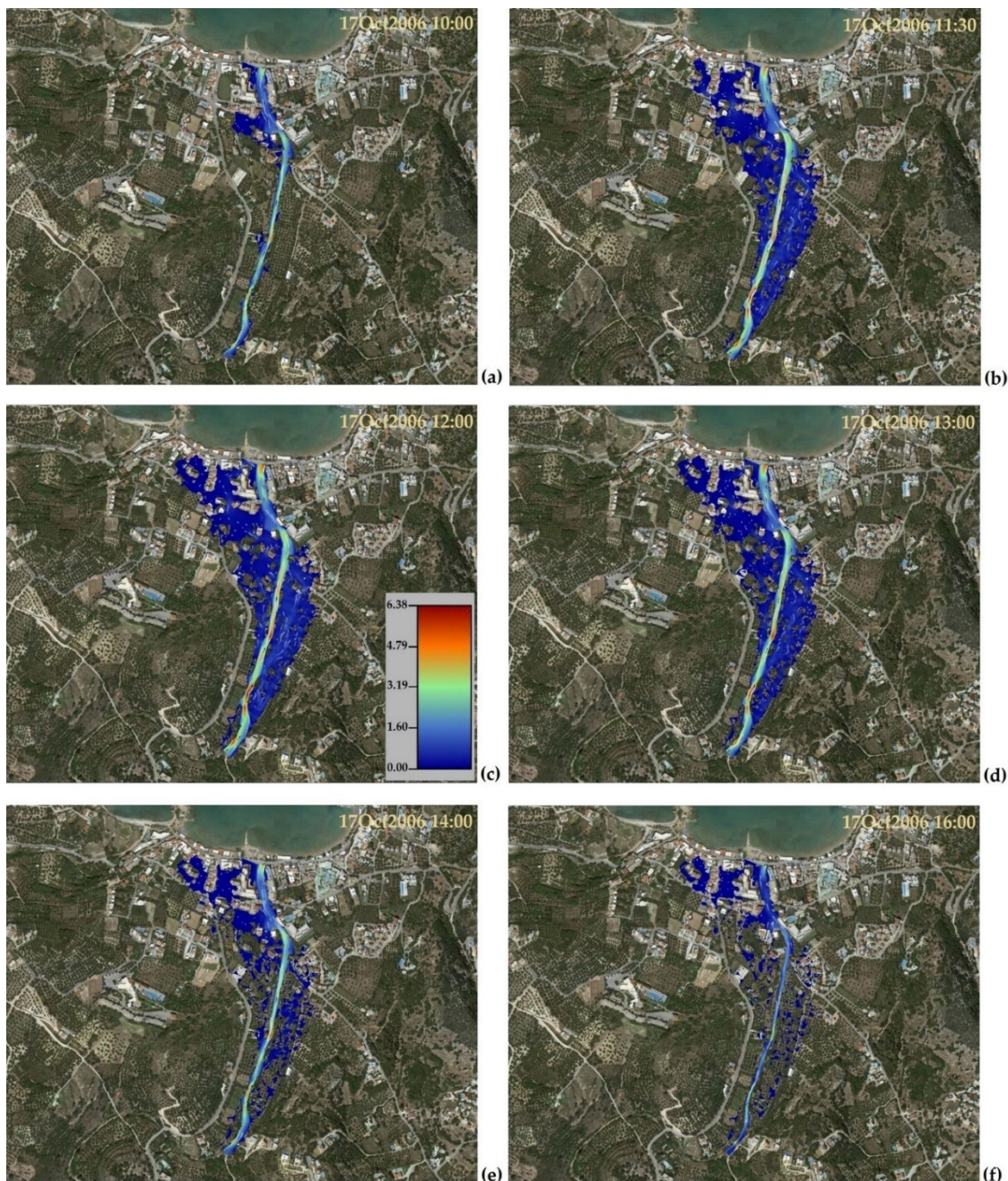
αρκετά μικρότερη, κατά 33.25%. Η κύρια μείωση της πλημμυρισμένης επιφάνειας σημειώθηκε στο βορειοδυτικά πριν την εκβολή του ρέματος, ενώ μικρή αύξηση προσομοιώθηκε στα νοτιοανατολικά.



Εικόνα 5-11. Προσομοιωμένα πλημμυρικά βάθη (m) στις **(α)** 10:00, **(β)** 11:30, **(γ)** 12:00, **(δ)** 13:00, **(ε)** 14:00, και **(στ)** 16:00 της 17^{ης} Οκτωβρίου 2006, με το συζευγμένο μοντέλο 1D/2D HEC-RAS, σε υψηλής ανάλυσης DEM 2 m × 2 m.

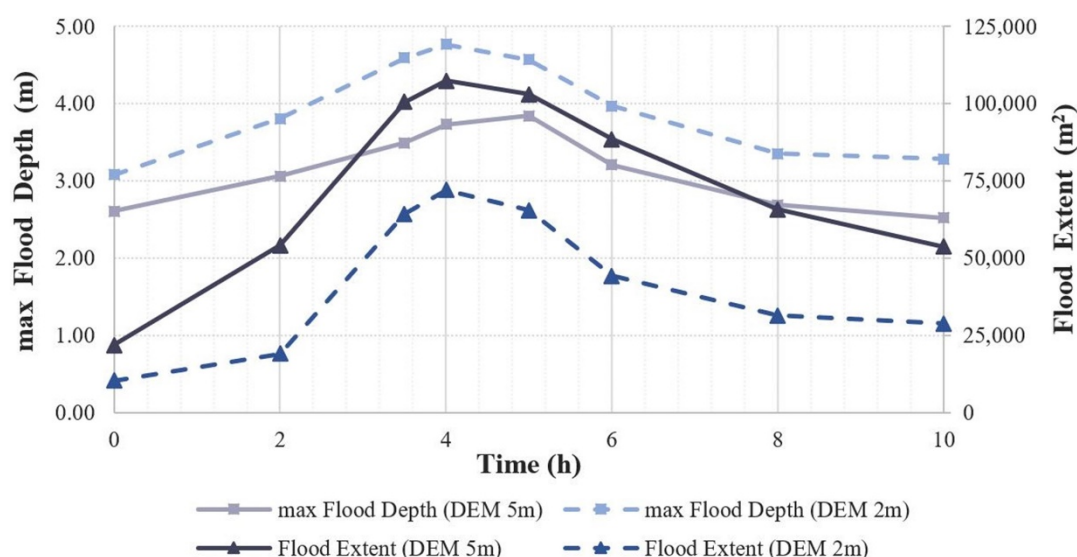
Το μέγιστο πλημμυρικό βάθος έφτασε τα 4.80 m, το οποίο ήταν αυξημένο κατά 21.8% σε σχέση με το αντίστοιχο από χρήση του DEM χωρικής ανάλυσης 5 m. Το συζευγμένο 1D/2D μοντέλο επαλήθευσε επίσης τη μέτρηση του πλημμυρικού βάθους των 2 m στη διατομή ελέγχου μετά την πλημμύρα, προσομοιώνοντάς το να κυμαίνεται από 1.79 έως

2.07 m, και μέση τιμή τα 1.93 m. Η υψηλότερη τιμή ταχυτήτων του πλημμυρικού κύματος έφτασε τα 6.38 m/s στο 1D κανάλι, ενώ στις πλημμυρικές πεδιάδες οι προσομοιωμένες ταχύτητες ήταν αρκετά χαμηλές. Υψηλή τιμή ταχύτητας ίση με 5.44 m/s προσομοιώθηκε στην κοίτη του καναλιού της τελευταίας διατομής κοντά στην εκβολή του ρέματος, λόγω της ανύψωσης των υψομέτρων της κοίτης συγκριτικά με την προηγούμενη διατομή.



Εικόνα 5-12. Προσομοιωμένες ταχύτητες (m/s) στις **(α)** 10:00, **(β)** 11:30, **(γ)** 12:00, **(δ)** 13:00, **(ε)** 14:00, και **(στ)** 16:00 της 17^{ης} Οκτωβρίου 2006, με το συζευγμένο μοντέλο 1D/2D HEC-RAS, σε υψηλής ανάλυσης DEM 2 m × 2 m.

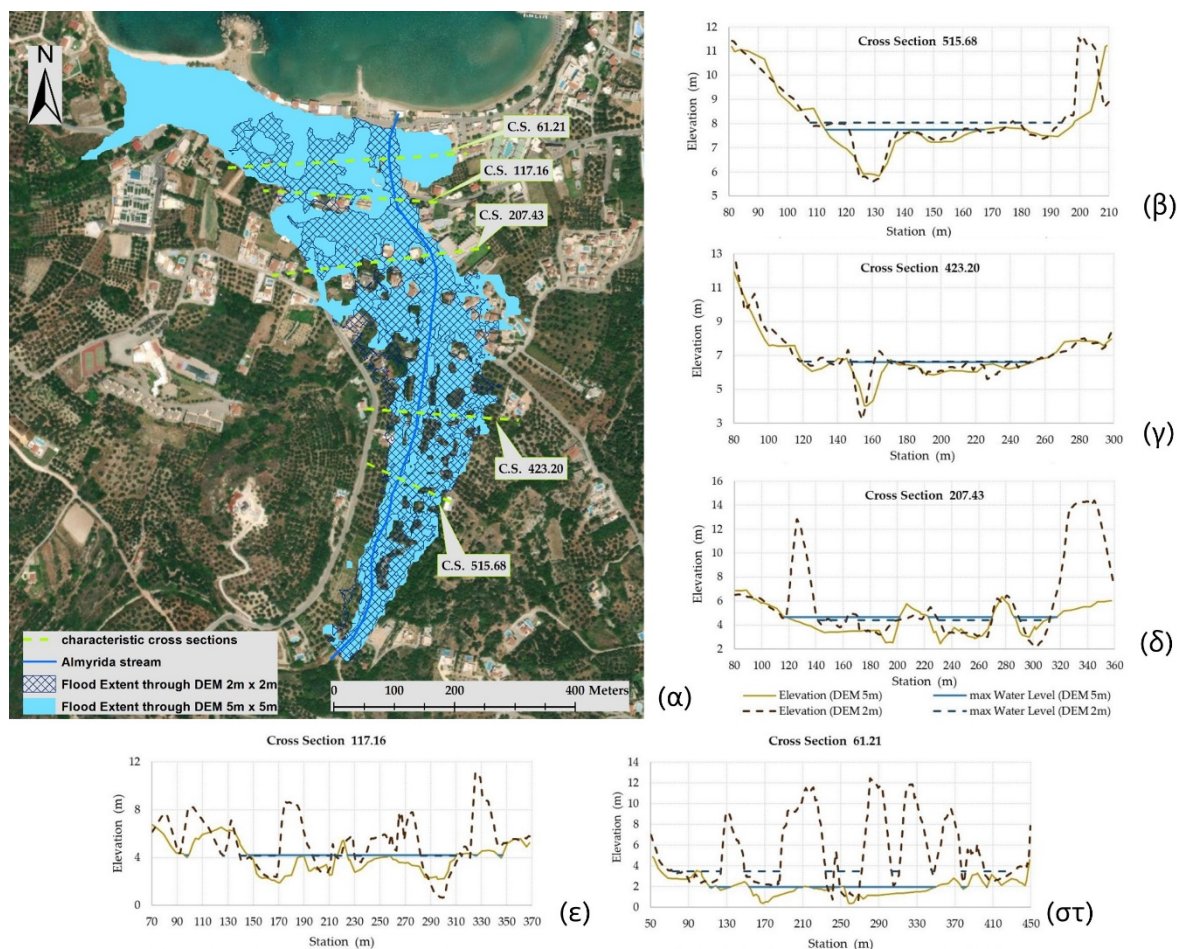
Στην [Εικόνα 5-13](#) παρουσιάζεται το μέγιστο πλημμυρικό βάθος, καθώς και η έκταση της πλημμύρας μετά από 0, 2, 3.5, 4, 5, 6, 8, και 10 h από την έναρξη της προσομοίωσης, και για τα δύο DEM υψηλής ανάλυσης (5 και 2 m), με συνολική διάρκεια υπολογισμών τις 10 h. Η προσομοιωμένη πλημμυρισμένη επιφάνεια υπολογίστηκε μέσω εργαλείων του ArcGIS. Το μέγιστο πλημμυρικό βάθος ήταν μεγαλύτερο με χρήση του DEM χωρικής ανάλυσης 2 m σε σχέση με το DEM 5 m \times 5 m, σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης, κατά ένα εύρος από 18% έως 31.5%, με μια μέση αύξηση κατά 24.9%. Αντιθέτως, η πλημμυρισμένη επιφάνεια ήταν σημαντικά μεγαλύτερη καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης με την τοπογραφία του DEM χωρικής ανάλυσης 5 m, σε σύγκριση με το DEM 2 m \times 2 m. Η αύξηση κυμάνθηκε από 32.95% έως 64.9%, με μια μέση αύξηση κατά 46.35%.



Εικόνα 5-13. Διακυμάνσεις μέγιστου πλημμυρικού βάθους (m) και έκτασης της πλημμύρας (m²) κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης με το συζευγμένο μοντέλο 1D/2D HEC-RAS, για τα δύο DEM υψηλής ανάλυσης (5 και 2 m).

Η έκταση των πλημμυρισμένων επιφανειών της περιοχής μελέτης, μέσω και των δύο DEM, φαίνεται στην [Εικόνα 5-14α](#). Επίσης, στην [Εικόνα 5-14β](#), [Εικόνα 5-14γ](#) και [Εικόνα 5-14δ](#) παρουσιάζονται χαρακτηριστικές διατομές της κοίτης του κύριου καναλιού σε απόσταση 515.68 m, 423.20 m, και 207.43 m πριν από την εκβολή του ρέματος, όπως εξάγονται από τα δύο DEM, για σύγκριση. Η μέγιστη στάθμη του νερού αναπαρίσταται με μπλε χρώμα. Ο άξονας x- μιας διατομής υποδεικνύει τους σταθμούς στους οποίους εξήχθησαν τα υψόμετρα εδάφους από το HEC-GeoRAS, ενώ ο άξονας y- απεικονίζει τα υψόμετρα του εδάφους. Οι διατομές μέσω του DEM 2 m \times 2 m είναι πιο λεπτομερείς, καθώς περισσότερες θέσεις σταθμών αντιπροσωπεύουν το έδαφος. Στις περισσότερες

διατομές του DEM λεπτομερέστερης ανάλυσης, η κοίτη του καναλιού βρίσκεται πιο χαμηλά απ' ό,τι στο DEM 5 m × 5 m. Και για τα δύο DEM, η στάθμη του νερού είναι περίπου στο ίδιο υψόμετρο στις προαναφερθείσες διατομές, ή ελαφρώς υψηλότερα στις περισσότερες από τις υπόλοιπες διατομές που εξάγονται από το DEM 2 m × 2 m. Αυτό, μαζί με τη βαθύτερη κοίτη του καναλιού, εξηγεί γιατί το μέγιστο πλημμυρικό βάθος, αλλά και τα πλημμυρικά βάθη στο κανάλι γενικώς, είναι υψηλότερα με χρήση του DEM 2 m. Κατά κύριο λόγο, οι διατομές από το DEM χωρικής ανάλυσης 5 m είναι πιο πεπλατυσμένες. Όσες βρίσκονται πολύ κοντά στην έξοδο είναι εξομαλυσμένες, κυρίως εξωτερικά της αριστερής όχθης, εξηγώντας γιατί η πλημμύρα έχει επεκταθεί σημαντικά στην αριστερή πλημμυρική πεδιάδα. Αντιθέτως, οι διατομές από το DEM 2 m, λίγα μέτρα πριν από την έξοδο, απεικονίζουν υψηλότερα υψόμετρα λόγω των χωροθετημένων υψηλών αστικών κτιρίων, τα οποία εμποδίζουν την επέκταση του νερού. Για την καλύτερη απεικόνιση των διαφοροποιήσεων χρησιμοποιώντας το DEM των 5m και των 2m, προστέθηκαν ακόμη δύο διατομές, στα 117.16 m και 61.21 m πριν από την εκβολή του ρέματος ([Εικόνα 5-14ε](#) και [Εικόνα 5-14στ](#) αντίστοιχα). Η τοπογραφική πληροφορία λεπτομερέστερης ανάλυσης απεικονίζει την κοίτη του καναλιού βαθύτερα, και τις όχθες υψηλότερα. Επιπλέον, το DEM των 2 m αποτελείται από περισσότερους λόφους, αναχώματα και κτίρια, τα οποία στο 2D υπολογιστικό πλέγμα λειτουργούν ως εμπόδια στη ροή, περιορίζοντας την περαιτέρω επέκταση της πλημμύρας. Οι διαφοροποιήσεις στο έδαφος με χρήση των 2 DEMs είναι ιδιαίτερα εμφανείς στις διατομές που προστέθηκαν. Επομένως, χρησιμοποιώντας το DEM λεπτομερέστερης ανάλυσης, εκτός της κοίτης του ρέματος η πλημμυρισμένη επιφάνεια είναι μικρότερη απ' ό,τι χρησιμοποιώντας το DEM 5 m x 5 m.



Εικόνα 5-14. (α) Έκταση πλημμύρας του κάταντες τμήματος του ρέματος της Αλμυρίδας όπως προκύπτει από DEM 2 m × 2 m (σκούρο μπλε) και DEM 5 m × 5 m (ανοιχτό μπλε). Χαρακτηριστικές διατομές και στάθμη νερού: **(β)** 515.68 m πριν την εκβολή, **(γ)** 423.20 m πριν την εκβολή, **(δ)** 207.43 m πριν την εκβολή, **(ε)** 117.16 m πριν την εκβολή, **(στ)** 61.21 m πριν την εκβολή, και από τα δύο DEM μέσω του συζευγμένου μοντέλου 1D/2D HEC-RAS.

5.1.8 Ιστορικές βροχοπτώσεις και μελλοντικές προβλέψεις μέσω δεδομένων κλιματικών μοντέλων

Η ανάλυση ιστορικών δεδομένων ημερήσιας και μέγιστης 3ωρης βροχόπτωσης για την περίοδο 1970–2098 (Jacob et al., 2014)–μέσα από ένα πλέγμα ανάλυσης 12.5 km × 12.5 km–του κλιματικού μοντέλου EC-EARTH_RCP8.5 από το Σουηδικό Μετεωρολογικό και Υδρολογικό Ινστιτούτο Rossby Center Regional Atmospheric Model (SMHI-RCA4), που αφορούσαν το σταθμό στις Καλύβες που απέχει περίπου 16 km από την περιοχή ενδιαφέροντος, έδειξε ότι αρκετά γεγονότα ισχυρών βροχοπτώσεων έχουν ήδη πλήξει την ευρύτερη αγροτική περιοχή της Αλμυρίδας. Ο Πίνακας 5-4 παρουσιάζει τα πιο αξιοσημείωτα γεγονότα βροχόπτωσης, και αφορούν το ημερήσιο ύψος υετού, το μέγιστο ύψος υετού 3 ωρών, καθώς και το λόγο των δεδομένων βροχής 3 ωρών προς το 1/8 της ημερήσιας βροχής–εξαιτίας των οκτώ 3ωρων χρονικών παραθύρων μες στην ημέρα–.

Πραγματοποιήθηκε σύγκριση μεταξύ ημερήσιων και 3ωρων ιστορικών δεδομένων προκειμένου να γίνει προβολή των δεδομένων στο μέλλον. Στα ευρήματα της έρευνας, όπως ήδη σημειώθηκε, είναι ότι για αιφνίδιες πλημμύρες που παράγονται από ακραία ύψη βροχόπτωσης, το προσομοιωμένο χρονικό βήμα βροχόπτωσης θα πρέπει να είναι μικρότερο από 1 h, ώστε να έχουμε ακριβή υδρογραφήματα ανεξάρτητα του χρονικού διαστήματος δεδομένων. Ωστόσο, για τα συγκεκριμένα δεδομένα κλιματικού μοντέλου, το διαθέσιμο ελάχιστο χρονικό βήμα ήταν ίσο με 3 h. Είναι εμφανές ότι τα ιστορικά δεδομένα των 3 h παράγουν αυξημένες αιχμές βροχής κατά ένα συντελεστή 1.5 έως 2.5 επί του αντίστοιχου ύψους που προκύπτει από την ομοιόμορφη κατανομή της ημερήσιας βροχής ανά 3 h μες στην ημέρα.

Πίνακας 5-4. Ιστορικά ημερήσια γεγονότα βροχής (mm), μέγιστη βροχή 3 ωρών (mm), και λόγος δεδομένων βροχής 3 ωρών προς τα ημερήσια δεδομένα διαιρεμένα με 8 τρίωρα ημερησίως, μέσω του κλιματικού μοντέλου EC-EARTH_RCP8.5_r12i1p1_SMHI_RCA4.

Ιστορική ημερομηνία κλιματικού μοντέλου	Ημερήσια Βροχόπτωση (mm)	Μέγιστη 3ωρη Βροχόπτωση (mm)	Λόγος: 3ωρη/(Ημερήσια/8)
20/2/1972	212.75	38.91	1.46
6/11/1973	107.12	19.67	1.47
21/3/1985	100.73	31.50	2.50
13/2/1993	98.54	30.28	2.46

Άλλα κλιματικά δεδομένα με ημερήσιο χρονικό βήμα για την περίοδο 1981–2098 του περιοχικού κλιματικού μοντέλου (RCM) του Climate Service Center REMO (CSC-REMO), με την επίδραση του Μοντέλου Συστήματος Γης του Ινστιτούτου Max Planck, χαμηλής ανάλυσης, επανανάλυσης 1 (MPI-ESM-LR-r1) από το παγκόσμιο κλιματικό μοντέλο (GCM) και τα σενάρια εξέλιξης της συγκέντρωσης RCP4.5 και RCP8.5 (Jacob et al., 2014), έδειξαν ότι οι σταθμοί στις Καλύβες και στο Βάμο που βρίσκονται πολύ κοντά στη λεκάνη του ρέματος της Αλμυρίδας, αναμένονται να παράγουν σφοδρά γεγονότα βροχόπτωσης στο μέλλον.

Ο Πίνακας 5-5 παρουσιάζει την κατηγοριοποίηση του αριθμού ημερών που το ύψος βροχόπτωσης προβλέπεται να είναι μεγαλύτερο από 150 mm, 200 mm, 250 mm, και 300 mm, καθώς και του αριθμού ημερών που αναμένεται να μη βρέξει καθόλου, για την περίοδο 1981-2098. Κατά το RCP4.5, στις Καλύβες προβλέπεται ημερήσια κατακρήμνιση έως και 345 mm, ενώ στο Βάμο το ημερήσιο ύψος βροχόπτωσης αναμένεται να φτάσει τα 329 mm. Απ' την άλλη, κατά το RCP8.5 προβάλλονται περισσότερες ξηρές ημέρες στο μέλλον, ωστόσο αναμένονται και ισχυρά βροχοπτώτικα

γεγονότα. Συγκεκριμένα, προβλέπονται 277 mm ημερήσιας βροχόπτωσης στις Καλύβες, καθώς και 301 mm ημερησίως στο Βάμο.

Πίνακας 5-5. Ανάλυση βροχερών ημερών περιόδου 1981-2098 γειτονικών σταθμών της περιοχής ενδιαφέροντος, μέσω προβολών από το κλιματικό μοντέλο MPI-ESM-LR_r1i1p1_CSC_REMO, για RCP4.5 και RCP8.5.

Περίοδος 1981-2098	RCP4.5		RCP8.5	
	Σταθμός Καλυβών	Σταθμός Βάμου	Σταθμός Καλυβών	Σταθμός Βάμου
Αριθμός ημερών με βροχόπτωση >300 mm	1	2	0	1
Αριθμός ημερών με βροχόπτωση >250 mm	1	4	1	3
Αριθμός ημερών με βροχόπτωση >200 mm	5	10	2	14
Αριθμός ημερών με βροχόπτωση >150 mm	11	38	9	31
Αριθμός άνυδρων ημερών	37496	36628	37747	36967

Για το προβαλλόμενο βροχοπτώτικο γεγονός στις Καλύβες, των 345 mm, κατά το σενάριο RCP4.5, μελετήθηκαν τρεις διαφορετικές υποθετικές κατανομές, με χρονικό βήμα 15 λεπτών. Στη μία κατανομή, η μέγιστη 15λεπτη βροχόπτωση ήταν ίση με 17.5 mm, η οποία θεωρήθηκε να πέφτει εξίσου σε δύο 15λεπτα, κατ' αντιστοιχία της κατανομής του καταγεγραμμένου γεγονότος του 2006, αποτελώντας το σενάριο βασικής αιχμής. Από τις άλλες δύο υποθετικές κατανομές, στη μία η αιχμή ήταν ομαλοποιημένη, με μέγιστη 15λεπτη βροχόπτωση τα 10 mm και ωριαία ένταση της βροχόπτωσης τα 40 mm, ενώ στην άλλη, η αιχμή ήταν εντατικοποιημένη, με μέγιστη 15λεπτη βροχόπτωση τα 52.5 mm, η οποία έπεσε εξίσου σε δύο 15λεπτα. Ο Πίνακας 5-6 παρουσιάζει τόσο τη μέγιστη 15λεπτη βροχόπτωση, όσο και την ένταση της βροχόπτωσης στην ώρα, καθώς και τις μέγιστες απορροές κάθε υποθετικής βροχής συνολικού ύψους 345 mm, όπως προέκυψε από το υδρολογικό μοντέλο. Η μέγιστη απορροή του σεναρίου βασικής αιχμής, με βάση τις βαθμονομημένες παραμέτρους του υδρολογικού μοντέλου, προέκυψε ίση με 211.6 m³/s. Αντίστοιχα, για το σενάριο ομαλοποιημένης αιχμής, η μέγιστη απορροή μειώθηκε κατά 17.3% σε σχέση με το βασικό σενάριο, ενώ για το σενάριο εντατικοποιημένης αιχμής, η μέγιστη απορροή προσομοιώθηκε αυξημένη κατά 31.9% συγκριτικά με το βασικό σενάριο.

Ο Πίνακας 5-6 παρουσιάζει επιπρόσθετα το μέγιστο πλημμυρικό βάθος με χρήση του συζευγμένου υδραυλικού μοντέλου 1D/2D HEC-RAS, για τα δύο DEM υψηλής ανάλυσης (5 και 2 m). Με βάση το DEM σε χωρική ανάλυση 5 m, το μέγιστο πλημμυρικό βάθος για το σενάριο βασικής αιχμής προσομοιώθηκε ίσο με 5.45 m. Για το σενάριο ομαλοποιημένης αιχμής, μειώθηκε μόλις κατά 5.9% σε σχέση με το βασικό σενάριο, ενώ

για την εντατικοποιημένη αιχμή έχει επίσης μικρή αύξηση, συγκριτικά με το βασικό σενάριο, μόλις κατά 5.1%. Αντίθετα, με τη χρήση DEM υψηλής ανάλυσης 2 m × 2 m, το μέγιστο πλημμυρικό βάθος προσομοιώθηκε ίσο με 6.02 m για το σενάριο βασικής αιχμής. Για το σενάριο ομαλοποιημένης αιχμής, μειώθηκε μόλις κατά 6.6% σε σχέση με το βασικό σενάριο, ενώ για την εντατικοποίηση της έντασης της βροχόπτωσης αυξήθηκε σημαντικά, συγκριτικά με το βασικό σενάριο, κατά 45.8%.

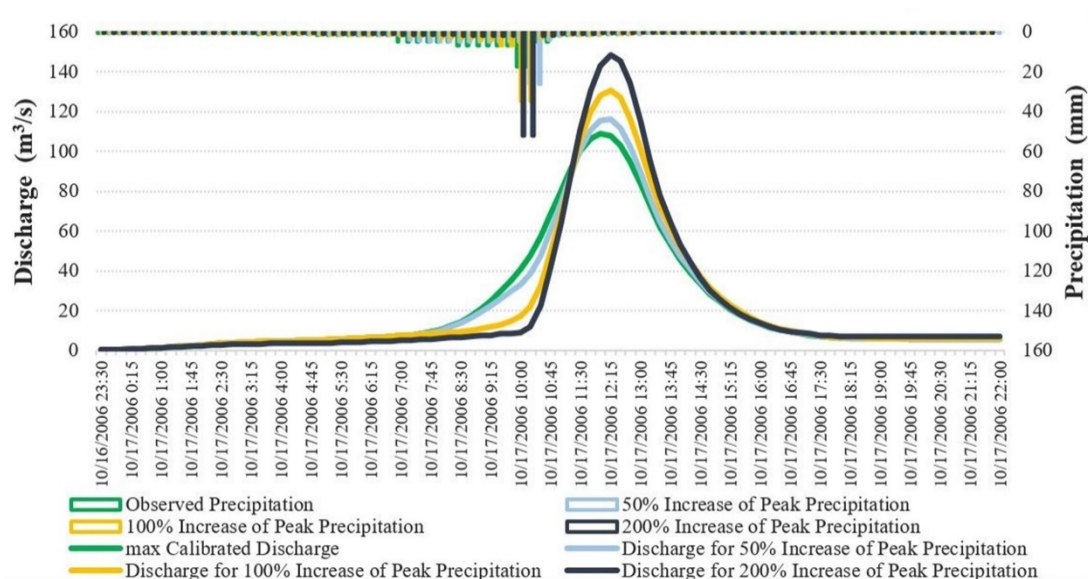
Πίνακας 5-6. Μέγιστο ύψος 15λεπτης βροχόπτωσης (mm), ωριαία ένταση βροχής (mm/h) και μέγιστη απορροή (m^3/s), αλλά και προκύπτουν μέγιστο πλημμυρικό βάθος (m) με το συζευγμένο μοντέλο 1D/2D HEC-RAS, χρησιμοποιώντας DEM υψηλής ανάλυσης (5 και 2 m), λόγω διαφορετικών κατανομών βροχόπτωσης αιχμής, και για συνολικό ύψος υετού ίσο με 345 mm.

P = 345 mm	Μέγιστο ύψος 15λεπτης βροχής (mm)	Ένταση βροχόπτωσης (mm/h)	Μέγιστη απορροή (m^3/s)	Μέγιστο πλημμυρικό βάθος [DEM 5 m] (m)	Μέγιστο πλημμυρικό βάθος [DEM 2 m] (m)
Ομαλοποιημένη αιχμή	10	$(10 \times 4) = 40$	175	5.13	5.62
Βασική αιχμή	17.5	$(17.5 \times 2) + (10 \times 2) = 55$	211.6	5.45	6.02
Εντατικοποιημένη αιχμή	52.5	$(52.5 \times 2) + (10 \times 2) = 125$	279	5.73	8.78

5.1.9 Υποθετικά σενάρια αύξησης της έντασης της βροχής για την ίδια αθροιστική βροχόπτωση με του καταγεγραμμένου γεγονότος

Από τις ημερήσιες προβολές στους σταθμούς στις Καλύβες και στο Βάμο, βάσει του κλιματικού μοντέλου MPI-ESM-LR_r1i1p1_CSC_REMO, αναμένονται ισχυρότερα γεγονότα βροχόπτωσης από το ύψος υετού των 196.2 mm, του καταγεγραμμένου γεγονότος από τις 16 Οκτωβρίου 2006 στις 23:30 έως τις 18 Οκτωβρίου 2006 στις 22:00. Βάσει αυτού, εξετάστηκαν υποθετικά σενάρια αύξησης της βροχόπτωσης αιχμής και ανακατανομής της υπόλοιπης βροχής στο χρόνο—για το ίδιο ύψος βροχόπτωσης με αυτό του καταγεγραμμένου γεγονότος—προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση της έντασης της βροχόπτωσης στο μέγιστο πλημμυρικό βάθος και στη συνολική έκταση της πλημμύρας. Ειδικότερα, η καταγεγραμμένη μέγιστη βροχόπτωση των 17.5 mm, η οποία σημειώθηκε στις 10:15 και στις 10:30 της 17^{ης} Οκτωβρίου, με αποτέλεσμα μια μέση μέγιστη απορροή των $109 \text{ m}^3/\text{s}$ στις 12:00 το μεσημέρι (βασικό σενάριο), αυξήθηκε κατά 50%, 100%, και 200%, φθάνοντας τα 26.25 mm, 35 mm, και 52.5 mm αντίστοιχα, εξίσου σε δύο 15λεπτα της 17^{ης} Οκτωβρίου 2006. Οι αντίστοιχες μέγιστες απορροές προσομοιώθηκαν στα $115.9 \text{ m}^3/\text{s}$, $130.6 \text{ m}^3/\text{s}$, και $148.2 \text{ m}^3/\text{s}$, στις 12:15, σημειώνοντας

αύξηση κατά 6.3%, 19.8% και 36%, σε σύγκριση με το βασικό σενάριο. Τα προσομοιωμένα υδρογραφήματα φαίνονται στην [Εικόνα 5-15](#).



Εικόνα 5-15. Κατανομές βροχόπτωσης και προσομοιωμένα υδρογραφήματα λόγω υποθετικών σεναρίων αύξησης της μέγιστης βροχόπτωσης κατά 50%, 100%, και 200%.

Με βάση τα DEM υψηλής ανάλυσης (5 m και 2 m), καθώς και τα υδρογραφήματα από την αύξηση της μέγιστης βροχόπτωσης–για το ίδιο ύψος νετού με αυτό του καταγεγραμμένου γεγονότος–προσομοιώθηκαν το μέγιστο πλημμυρικό βάθος και η έκταση της πλημμύρας του κάταντες τμήματος της μικρής έκτασης λεκάνης, με το συζευγμένο υδραυλικό μοντέλο 1D/2D HEC-RAS. Ο [Πίνακας 5-7](#) παρουσιάζει τα αποτελέσματα. Με το DEM χωρικής ανάλυσης 5 m, η απορροή αιχμής των $109 \text{ m}^3/\text{s}$ του βασικού σεναρίου οδήγησε σε μέγιστο πλημμυρικό βάθος ίσο με 3.94 m, και συνολική έκταση πλημμυρικής επιφάνειας ίση με 108767 m^2 . Η αύξηση της μέγιστης απορροής, λόγω αύξησης της βροχόπτωσης αιχμής, οδήγησε σε αύξηση του μέγιστου πλημμυρικού βάθους και της μέγιστης πλημμυρικής έκτασης. Συγκεκριμένα, η αύξηση της μέγιστης βροχόπτωσης κατά 50% οδήγησε σε μικρή μόλις αύξηση του μέγιστου πλημμυρικού βάθους και της μέγιστης πλημμυρισμένης επιφάνειας, κατά 2.3% και 1.8% αντίστοιχα, σε σύγκριση με το βασικό σενάριο. Ο διπλασιασμός της βροχόπτωσης αιχμής (αύξηση κατά 100%) προκάλεσε αύξηση του μέγιστου πλημμυρικού βάθους καθώς και της μέγιστης έκτασης της πλημμύρας κατά 7.9% και 7.5% αντίστοιχα, ενώ ο τριπλασιασμός της μέγιστης βροχόπτωσης (αύξηση κατά 200%) οδήγησε σε σημαντική αύξηση του μέγιστου πλημμυρικού βάθους και της συνολικά πλημμυρισμένης επιφάνειας κατά 16.2% και 14.2% αντίστοιχα, συγκριτικά με το βασικό σενάριο.

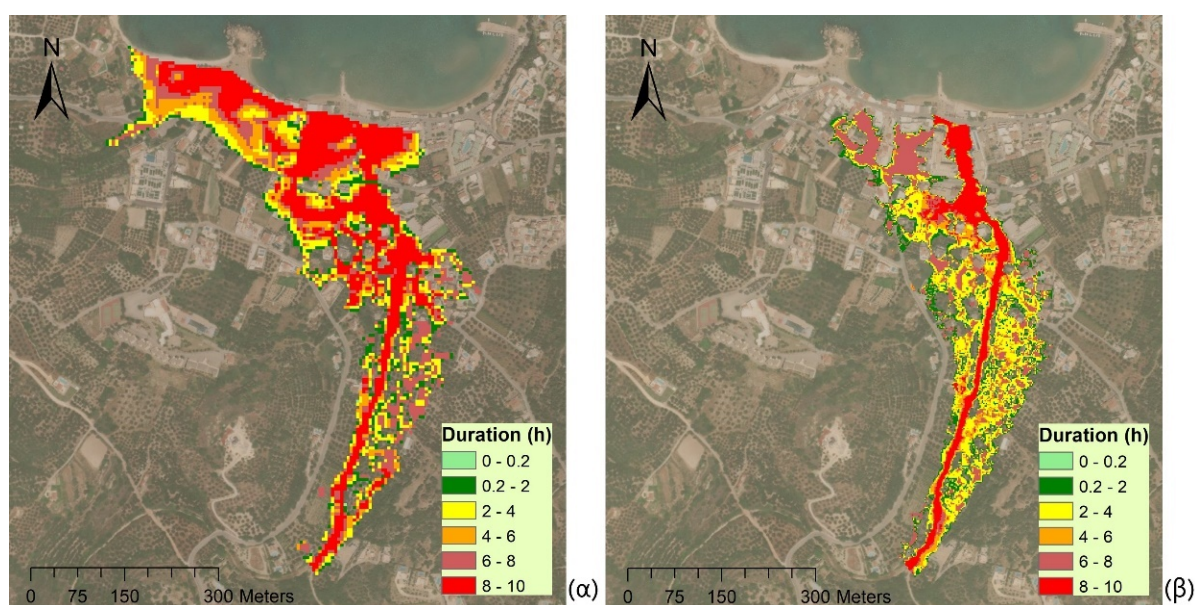
Απ' την άλλη, με χρήση του DEM χωρικής ανάλυσης 2 m, η προσομοιωμένη μέγιστη απορροή των 109 m³/s λόγω της καταγεγραμμένης βροχόπτωσης (βασικό σενάριο) οδήγησε σε μέγιστο πλημμυρικό βάθος ίσο με 4.80 m, και σε μέγιστη έκταση πλημμυρισμένης επιφάνειας ίση σε 72606 m². Η αύξηση της μέγιστης βροχόπτωσης κατά 50% προκάλεσε μικρή μόλις αύξηση του μέγιστου πλημμυρικού βάθους και της μέγιστης πλημμυρισμένης επιφάνειας, κατά 1.9% και 3.5% αντίστοιχα, σε σύγκριση με το βασικό σενάριο. Η αύξηση της βροχόπτωσης αιχμής κατά 100% οδήγησε σε αύξηση του μέγιστου πλημμυρικού βάθους και της συνολικά πλημμυρισμένης επιφάνειας κατά 5.6% και 10.2% αντίστοιχα. Ακόμα μεγαλύτερη αύξηση της βροχόπτωσης αιχμής, κατά 200%, παρήγαγε αυξημένο μέγιστο πλημμυρικό βάθος και μέγιστη έκταση της πλημμύρας κατά 9.8% και 18% αντίστοιχα, συγκρίνοντάς τα με το βασικό σενάριο.

Πίνακας 5-7. Μέγιστο πλημμυρικό βάθος (m) και έκταση της πλημμύρας (m²), όπως προέκυψαν από την καταγεγραμμένη βροχόπτωση και την αύξηση της βροχόπτωσης αιχμής κατά 50%, 100%, και 200%, με το συζευγμένο μοντέλο 1D/2D HEC-RAS, και τα δύο DEM υψηλής ανάλυσης (5 m και 2 m).

Σενάριο βροχόπτωσης (P = 196.2 mm)	Μέγιστη απορροή (m ³ /s)	DEM 5 m × 5 m		DEM 2 m × 2 m	
		Μέγιστο πλημμυρικό βάθος (m)	Μέγιστη πλημμυρική έκταση (m ²)	Μέγιστο πλημμυρικό βάθος (m)	Μέγιστη πλημμυρική έκταση (m ²)
Καταγεγραμμένη βροχόπτωση	109	3.94	108767	4.80	72606
50% αύξηση της βροχόπτωσης αιχμής	115.9	4.03	110686	4.89	75142
100% αύξηση της βροχόπτωσης αιχμής	130.6	4.25	116913	5.07	80003
200% αύξηση της βροχόπτωσης αιχμής	148.2	4.58	124160	5.27	85708

Για τα εξεταζόμενα υποθετικά σενάρια αύξησης της βροχόπτωσης αιχμής για το ίδιο ύψος υετού, προσομοιώθηκε επίσης η μέση διάρκεια πλημμύρας από την έναρξη έως το πέρας της προσομοίωσης, και ο μέγιστος χρόνος άφιξης του πλημμυρικού κύματος στην πιο απομακρυσμένη πλημμυρική επιφάνεια από την αρχή της προσομοίωσης, με βάση τα DEM υψηλής ανάλυσης (5 m και 2 m). Ο Πίνακας 5-8 παρουσιάζει τα αποτελέσματα, καθώς και την % διαφορά αυτών από τις αντίστοιχες τιμές του βασικού σεναρίου (καταγεγραμμένη βροχόπτωση). Η μέση διάρκεια πλημμύρας μειώθηκε στα εξεταζόμενα αυξητικά σενάρια, σε σχέση με το βασικό σενάριο, και με τα δύο DEM. Με χρήση του DEM χωρικής ανάλυσης 2 m, η μέση διάρκεια πλημμύρας ήταν μικρότερη κατά ~1 h σε όλα τα σενάρια, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα σενάρια του DEM χωρικής ανάλυσης 5 m. Η μέγιστη πλημμυρική έκταση ήταν σημαντικά μικρότερη με το DEM των 2 m, βάσει της λεπτομερέστερης αναπαράστασης της τοπογραφίας, και ταυτόχρονα οι επιφάνειες που

παρέμειναν διαβρεγμένες καθ' όλη την προσομοίωση ήταν μικρότερες, συγκριτικά με το DEM των 5 m. Επιπλέον, με το DEM των 2 m, σε επιφάνειες των πλημμυρικών πεδιάδων στις οποίες απαντώνται λεπτομερέστερα λόφοι και δρόμοι—που αποτελούν εμπόδια στη ροή—η διάρκεια της πλημμύρας είναι μικρότερη. Για το λόγο αυτό, η μέση διάρκεια πλημμύρας προσομοιώθηκε μειωμένη χρησιμοποιώντας το DEM των 2 m σε σχέση με το DEM των 5 m. Στην [Εικόνα 5-16α](#) και στην [Εικόνα 5-16β](#) παρουσιάζεται η διάρκεια κατά την οποία παρέμειναν διαβρεγμένες οι πλημμυρικές επιφάνειες από την έναρξη έως το πέρας της προσομοίωσης με το συζευγμένο 1D/2D μοντέλο, για το καταγεγραμμένο γεγονός του 2006, με το DEM των 5 m και το DEM των 2 m, αντίστοιχα.



Εικόνα 5-16. Διάρκεια πλημμύρας του καταγεγραμμένου βροχοπτώσιου γεγονότος από την έναρξη της προσομοίωσης **(α)** με το DEM των 5 m, και **(β)** με το DEM των 2 m.

Ο μέγιστος χρόνος άφιξης του πλημμυρικού κύματος στην πιο απομακρυσμένη περιοχή αυξήθηκε σε όλα τα εξεταζόμενα αυξητικά σενάρια, συγκριτικά με το βασικό σενάριο, και με τα δύο DEM. Με χρήση του DEM χωρικής ανάλυσης 5 m, ο μέγιστος χρόνος άφιξης του κύματος ήταν λίγο μεγαλύτερος στα σενάρια αύξησης της βροχόπτωσης αιχμής κατά 50% και 100%, σε σχέση με το βασικό σενάριο, ενώ ήταν πιο μεγάλος για το σενάριο αύξησης της μέγιστης βροχόπτωσης κατά 200%. Απ' την άλλη, χρησιμοποιώντας το DEM χωρικής ανάλυσης 2 m, ο μέγιστος χρόνος άφιξης του κύματος ήταν μεγαλύτερος στα σενάρια αύξησης της βροχόπτωσης αιχμής κατά 50% και 100%, σε σχέση με το βασικό σενάριο, ενώ ήταν σημαντικά μεγαλύτερος για το σενάριο αύξησης της μέγιστης βροχόπτωσης κατά 200%.

Πίνακας 5-8. Μέση διάρκεια πλημμύρας (h) και μέγιστος χρόνος άφιξης πλημμυρικού κύματος (h), όπως προέκυψαν για την καταγεγραμμένη βροχόπτωση (βασικό σενάριο), καθώς και αύξηση της μέγιστης βροχόπτωσης κατά 50%, 100%, και 200%, με το συζευγμένο μοντέλο 1D/2D HEC-RAS, και τα δύο DEM υψηλής ανάλυσης (5 m και 2 m).

Σενάριο βροχόπτωσης (P=196.2 mm)	DEM 5m x 5m				DEM 2m x 2m			
	Μέση διάρκεια πλημμύρας (h)	%διαφορά μέσης διάρκειας πλημμύρας από βασικό σενάριο	Μέγιστος χρόνος άφιξης κύματος (h)	%διαφορά μέγιστου χρόνου άφιξης κύματος από βασικό σενάριο	Μέση διάρκεια πλημμύρας (h)	%διαφορά μέσης διάρκειας πλημμύρας από βασικό σενάριο	Μέγιστος χρόνος άφιξης κύματος (h)	%διαφορά μέγιστου χρόνου άφιξης κύματος από βασικό σενάριο
Καταγεγραμμένη βροχόπτωση	6.40	-	4.57	-	5.09	-	4.53	-
50% αύξηση της μέγιστης βροχόπτωσης	6.15	-3.9%	4.60	0.7%	4.88	-4.1%	4.9	8.1%
100% αύξηση της μέγιστης βροχόπτωσης	5.74	-10.4%	4.67	2.2%	4.60	-9.5%	4.9	8.1%
200% αύξηση της μέγιστης βροχόπτωσης	5.38	-16.0%	4.93	8.0%	4.44	-12.7%	6.73	48.5%

5.2 Αποτελέσματα υδρολογικής λεκάνης ποταμού Humber

5.2.1 Βαθμονόμηση υδρολογικών μοντέλων HEC-HMS και HBV-light, και αποτελέσματα

Για το υδρολογικό μοντέλο HEC-HMS, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας που περιλάμβανε οκτώ παραμέτρους, αλλάζοντας μία παράμετρο κάθε φορά. Κάθε νέα δοκιμή παραμέτρων εφαρμόστηκε έπειτα από σύγκριση των προσομοιωμένων και καταγεγραμμένων μέγιστων ωριαίων απορροών, ως προς το μέγεθός τους και το χρόνο εμφάνισής τους. Στη διαδικασία βαθμονόμησης των παραμέτρων των έξι μελετώμενων βροχοπτώσιων γεγονότων που εξετάστηκαν σε ζεύγη, βρέθηκε ότι συγκεκριμένες εμπειρικές εξισώσεις ήταν περισσότερο κατάλληλες για τον υπολογισμό του χρόνου συγκέντρωσης (T_c) ανά υπολεκάνη, καθώς ο T_c ήταν πολύ ευαίσθητη παράμετρος, που παρήγαγε μεγάλες χρονικές μετατοπίσεις και διακυμάνσεις στη μέγιστη προσομοιωμένη απορροή. Συγκεκριμένα, η εξίσωση των Simas-Hawkins ταίριαζε καλύτερα στις αγροτικές υπολεκάνες (W1460, W790), η εξίσωση των Johnstone-Cross ήταν περισσότερο κατάλληλη στην αγροτική υπολεκάνη με αρκετές αστικοποιημένες περιοχές (W800), καθώς και στην ημιαγροτική/ημιαστική υπολεκάνη (W1020), ο εμπειρικός τύπος του Williams εφαρμόστηκε καλύτερα στην αγροτική υπολεκάνη με ορισμένη αστική ανάπτυξη στην έξοδο της (W900), και η εξίσωση του Carter ήταν περισσότερο κατάλληλη για πλήρως αστικές υπολεκάνες (W1030 και στην υπολεκάνη

χωρίς μετρητή απορροής W1180). Επιπλέον, η αύξηση του T_c παρήγαγε μικρότερη απορροή αιχμής. Η αύξηση του συντελεστή αποθήκευσης R προκάλεσε χρονική μετατόπιση στην απορροή αιχμής προς τα εμπρός, και σημαντική μείωση στο μέγεθος της αιχμής. Η μείωση του αριθμού καμπύλης (CN) καθώς και της % αδιαπερατότητας μείωσε επίσης την απορροή αιχμής. Η παράμετρος Muskingum K —που εκφράζει το χρόνο διάδοσης του πλημμυρικού κύματος κατά μήκος του καναλιού—προκάλεσε μόλις μικρές μεταβολές στην απορροή αιχμής.

Για το υδρολογικό μοντέλο HBV-light, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας δεκαπέντε παραμέτρων, αλλάζοντας μία παράμετρο κάθε φορά, ώστε να διερευνηθεί η απόκριση του μοντέλου. Κατά τη διαδικασία βαθμονόμησης, παρατηρήθηκε ότι ο συντελεστής διόρθωσης της χιονόπτωσης ($SFCF$) ήταν μια ευαίσθητη παράμετρος στις αγροτικές υπολεκάνες, δημιουργώντας μεγαλύτερες διακυμάνσεις στη μέγιστη προσομοιωμένη απορροή. Ειδικότερα, οι προσομοιωμένες απορροές αιχμής στις αγροτικές υπολεκάνες (W1460, W790) ανταποκρίθηκαν καλύτερα με χαμηλότερες τιμές του $SFCF$, επομένως ο συντελεστής βαθμονομήθηκε στην τιμή 0.7. Οι μέγιστες απορροές στις αγροτικές υπολεκάνες με αρκετές αστικοποιημένες περιοχές (W800, W900) προσεγγίστηκαν ικανοποιητικότερα με ελαφρώς αυξημένη τιμή του $SFCF$, ίση με 0.9, επομένως ελήφθη μόλις μια μικρή διόρθωση στη χιονόπτωση. Οι αιχμές της απορροής στην αστική και ημιαστική υπολεκάνη (W1030 και W1020 αντίστοιχα) ανταποκρίθηκαν καλά με συντελεστή ίσο με 1, επομένως δεν χρειάστηκε διόρθωση στη χιονόπτωση. Επιπλέον, το κατώφλι θερμοκρασίας του αέρα (TT) κάτω από το οποίο η κατακρήμνιση προσομοιώθηκε ως χιόνι αντί για βροχή, ταίριαξε καλύτερα στους $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ για τις αγροτικές υπολεκάνες, καθώς και τις αγροτικές υπολεκάνες με κάποια αστική ανάπτυξη, ενώ για την αστική και ημιαστική υπολεκάνη, το TT ορίστηκε στους $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Επίσης, ο $CFMAX$ είναι ένας συντελεστής που συνδέει τη θερμοκρασία με το χρονικό βήμα για τον υπολογισμό της τήξης του χιονιού. Από το εγχειρίδιο του μοντέλου, δίδεται σε μονάδες ($\text{mm/d }^{\circ}\text{C}$), δηλαδή με ημερήσιο βήμα, ενώ κείται σε εύρος τιμών από 1.5 έως $4\text{ mm/d }^{\circ}\text{C}$. Στην παρούσα διατριβή, τα δεδομένα που εισήχθησαν στο μοντέλο ήταν με ωριαίο βήμα. Για το λόγο αυτό, ο συντελεστής $CFMAX$ προσαρμόστηκε σε ωριαίο βήμα ($\text{mm/h }^{\circ}\text{C}$), με όρια τιμών από 0.0625 έως $0.167\text{ mm/h }^{\circ}\text{C}$, όπως προέκυψαν από τα συνήθη όρια τιμών σε ημερήσιο βήμα, με ομοιόμορφη θεώρηση της τήξης του χιονιού κάθε ώρα μες στην ημέρα. Η παράμετρος $CFMAX$, αντιπροσώπευσης της τήξης του χιονιού, βαθμονομήθηκε κοντά στο ανώτερο όριό της για όλες τις υπολεκάνες, και συγκεκριμένα ίση προς 0.15

mm/h °C, που ημερησίως αντιστοιχεί σε 3.6 mm/d °C. Επιπλέον, δεν ελήφθη καμία εποχιακή μεταβλητότητα στο συντελεστή υπολογισμού της τήξης του χιονιού, επομένως η παράμετρος *SP* ήταν ίση με 1.

Οι τρεις παράμετροι της ρουτίνας εδαφικής υγρασίας κατανεμήθηκαν ανά κατηγορία βλάστησης/χρήσεων γης. Η μέγιστη περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό (*FC*) ελήφθη μεγαλύτερη στις αγροτικές περιοχές (δάση, καλλιέργειες) απ' ό,τι στις αστικές περιοχές, και η αύξησή της μείωνε σημαντικά το μέγεθος της απορροής αιχμής. Από την άλλη, η κατώφλια τιμή για τη μετάβαση της πραγματικής εξάτμισης σε δυνητική εξάτμιση (*LP*) θεωρήθηκε μικρή στις ζώνες με φυσική βλάστηση, όπου η πραγματική εξάτμιση ήταν υψηλή. Αντίθετα, στις αστικές περιοχές η τιμή του *LP* θεωρήθηκε υψηλότερη λόγω των χαμηλότερων επιπέδων πραγματικής εξάτμισης. Επιπλέον, η αύξηση της παραμέτρου *BETA*, που ρυθμίζει τη σχετική συμβολή της βροχής ή του λιωμένου χιονιού στην απορροή, αύξησε την απορροή. Οι υπόλοιπες δώδεκα παράμετροι που αφορούσαν τις ρουτίνες χιονιού, απόκρισης, και δρομολόγησης θεωρήθηκαν ότι εφαρμόζονται ομοιόμορφα σε όλες τις ζώνες χρήσεων γης κάθε υπολεκάνης. Επιπλέον, οι παράμετροι της ρουτίνας απόκρισης δεν έδειξαν κάποια τάση μεταξύ των υπολεκανών, αλλά και μεταξύ των διαφορετικών βροχοπτώσιων γεγονότων. Για την παράμετρο της ρουτίνας δρομολόγησης *MAXBAS*, που μετασχηματίζει την απορροή και καθορίζει το χρόνο δρομολόγησης, μεγαλύτερες τιμές παρήγαγαν ουσιώδη χρονική μετατόπιση στην απορροή αιχμής προς τα εμπρός, μαζί με μείωση της απορροής. Αντίθετα, μικρότερες τιμές της *MAXBAS* μετατόπισαν την αιχμή του υδρογραφήματος προς τα πίσω χρονικά, και αύξησαν τη μέγιστη απορροή.

Ο Πίνακας 5-9 και ο Πίνακας 5-10 παρουσιάζουν τις βαθμονομημένες παραμέτρους και τους προκύπτοντες δείκτες Nash–Sutcliffe (NSE) ανά υπολεκάνη, από τα υδρολογικά μοντέλα HEC-HMS και HBV-light αντίστοιχα, για το ζεύγος γεγονότων στις 28–30 Μαΐου 2013 και 4–10 Ιουλίου 2013 που είχαν υψηλή ένταση βροχόπτωσης.

Πίνακας 5-9. Επαλήθευση του υδρολογικού μοντέλου HEC-HMS μέσω της βαθμονόμησης παραμέτρων για το ζεύγος γεγονότων στις 28-30 Μαΐου 2013 και 4-10 Ιουλίου 2013.

Υπολεκάνη	T_c (h)	$\frac{R}{T_c + R}$	R (h)	CN (I)	% Αδιαπερα- τότητα	Αρχική απορροή ανά επιφάνεια (m ³ /s/km ²)	Σταθερά ύφεσης	Αναλογία έως τη βασική απορροή αιχμής	28-30 Μαΐου 2013, NSE	4-10 Ιουλίου 2013, NSE
W1460	14.07	0.65	26.13	38	11	0.005	0.8	0.475	0.604	0.919
W790	8.67	0.65	16.09	63	12	0.0035	0.8	0.1	0.569	0.858
W800	14.15	0.5	14.15	61	14	0.003	0.8	0.3	0.624	0.858
W900	11.77	0.525	13.01	70	42	0.001	0.8	0.1	0.774	0.781

W1030	4.03	0.125	0.58	73	66	0.012	0.3	0.1	0.843	0.765
W1020	18.04	0.35	9.72	63	38	0.01	0.8	0.025	0.713	0.897

Σημειώσεις: T_c (h) είναι ο χρόνος συγκέντρωσης ώστε το κατακρημνισμένο νερό από το πιο απομακρυσμένο σημείο της λεκάνης να φτάσει στην έξοδο αυτής, R (h) είναι ο συντελεστής βραχύβιας αποθήκευσης της περίσσειας βροχόπτωσης στην υδρολογική λεκάνη έως την απορροή της στην έξοδο, $CN(I)$ είναι μια παράμετρος που ενσωματώνει την επίδραση του τύπου εδάφους, των χρήσεων γης, και ξηρών συνθηκών εδαφικής υγρασίας (I) των προηγούμενων 5 ημερών, η αρχική απορροή ανά επιφάνεια ($m^3/s/km^2$) είναι η βασική απορροή στην αρχή της προσομοίωσης, η σταθερά ύφεσης είναι ο λόγος της βασικής απορροής σε μια συγκεκριμένη στιγμή προς τη βασική απορροή της προηγούμενης ημέρας, και η αναλογία έως τη βασική απορροή αιχμής είναι μια κατώφλια παράμετρος που επαναφέρει τη βασική απορροή στην αρχική της τιμή.

Ο Πίνακας 5-9 παραθέτει τα αποτελέσματα βαθμονόμησης και επαλήθευσης του υδρολογικού μοντέλου HEC-HMS για το ζεύγος γεγονότων με υψηλή ένταση βροχόπτωσης. Οι βαθμονομημένες τιμές της αναλογίας $R/(T_c+R)$, συγκριτικά με τις τιμές αναφοράς που παρουσιάζει ο Πίνακας 4-10, ήταν αυξημένες στις υπολεκάνες W1460, W790, και W1030, κατά 2%, 4.6%, και 9.8% αντίστοιχα, ενώ ήταν μειωμένες κατά 8.3%, 6.5%, και 5.6% στις υπολεκάνες W800, W900, και W1020. Για τον CN , η επιλεγμένη τιμή μετά τη βαθμονόμηση αυξήθηκε κατά 10% στην υπολεκάνη W900, ενώ μειώθηκε κατά 10% στις υπολεκάνες W1030 και W1020, μετά από σύγκριση με τις τιμές αναφοράς. Στις υπόλοιπες υπολεκάνες, οι τιμές αναφοράς του CN για ξηρές συνθήκες εδαφικής υγρασίας ήταν αυτές που ταίριαζαν καλύτερα για την επαλήθευση των καταγεγραμμένων υδρογραφημάτων. Η βαθμονομημένη % αδιαπερατότητα στις υπολεκάνες W1030 και W1020 είχε τη μικρότερη διαφοροποίηση συγκριτικά με τις τιμές αναφοράς, και συγκεκριμένα μειώθηκε κατά 9.5%. Στις υπόλοιπες υπολεκάνες, η διαφοροποίηση από τις τιμές αναφοράς ήταν σημαντική για να επαληθευτεί ικανοποιητικότερα το μοντέλο. Ενδεικτικά, στην υπολεκάνη W900, η βαθμονομημένη % αδιαπερατότητα ίση με 42% ήταν αρκετά αυξημένη σε σχέση με την τιμή αναφοράς (16%), γεγονός που εξηγείται καθώς η υπολεκάνη δέχθηκε μεγάλη ποσότητα βροχόπτωσης με πολύ υψηλή ένταση (25.2 mm/h), η οποία προκάλεσε το γρήγορο κορεσμό του εδάφους, και ως εκ τούτου αύξηση της % αδιαπερατότητας.

Η αποτελεσματικότητα του δείκτη συνέπειας Nash-Sutcliffe από το μοντέλο HEC-HMS κυμαινόταν από ικανοποιητική έως πολύ καλή για τις υπολεκάνες του γεγονότος στις 28–30 Μαΐου 2013, ενώ για το έντονο βροχοπτώτικό συμβάν στις 4–10 Ιουλίου 2013, ήταν πολύ καλή για όλες τις υπολεκάνες με μετρητές απορροής.

Πίνακας 5-10. Βέλτιστες τιμές παραμέτρων μέσω της βαθμονόμησης και επαλήθευσης του υδρολογικού μοντέλου HBV-light για το ζεύγος γεγονότων στις 28–30 Μαΐου 2013 και 4–10 Ιουλίου 2013.

	W1460	W790	W800	W900	W1030	W1020
--	-------	------	------	------	-------	-------

<i>TT</i> (°C)		-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	0	0
<i>CFMAX</i> (mm/h °C)		0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
<i>SP</i>		1	1	1	1	1	1
<i>SFCF</i>		0.7	0.7	0.9	0.9	1	1
<i>CFR</i>		0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
<i>CWH</i>		0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Δάση και Υγροβιότοποι	<i>FC</i> (mm)	495	495	495	120	120	115
	<i>LP</i>	0.1	0.1	0.1	0.75	0.75	0.775
	<i>BETA</i>	2.75	2.95	3.55	1.25	1	2.15
Καλλιεργήσιμες εκτάσεις	<i>FC</i> (mm)	490	490	490	100	80	95
	<i>LP</i>	0.105	0.105	0.105	0.775	0.8	0.8
	<i>BETA</i>	3.15	3.75	3.95	1.35	1.05	2.25
Αστικός ιστός	<i>FC</i> (mm)	90	85	65	55	40	50
	<i>LP</i>	0.4	0.85	0.2	0.9	1	0.825
	<i>BETA</i>	3.45	3.95	4.75	2.5	2	2.275
	<i>PERC</i> (mm/h)	0.3	0.325	0.215	0.25	0.05	0.2
	<i>UZL</i> (mm)	9.5	5.5	1.45	1.75	2	12.5
	<i>K0</i> (1/h)	0.3	0.135	0.1	0.1	0.3	0.25
	<i>K1</i> (1/h)	0.01	0.0145	0.001	0.0015	0.165	0.001
	<i>K2</i> (1/h)	0.004	0.0035	0.015	0.045	0.04	0.0015
	<i>MAXBAS</i> (h)	22	16	15	15	5	16
28-30 Μαΐου 2013, NSE		0.8378	0.8673	0.6331	0.8334	0.8320	0.7096
4-10 Ιουλίου 2013, NSE		0.8101	0.7893	0.7580	0.8157	0.9014	0.9086

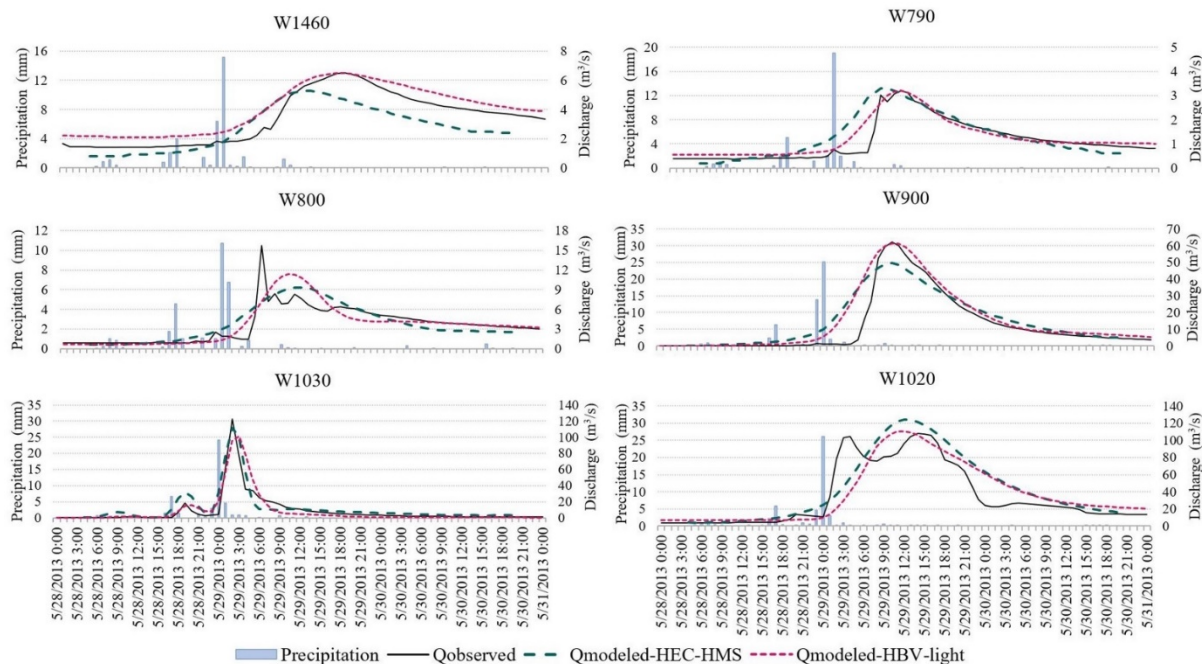
Σημειώσεις: *TT* (°C) είναι το κατώφλι θερμοκρασίας αέρα πάνω από το οποίο η κατακρήμνιση θεωρείται ότι δεν είναι χιόνι αλλά βροχή, *CFMAX* (mm/h °C) είναι ένας συντελεστής που συνδέει τη θερμοκρασία με το χρονικό βήμα για τον υπολογισμό της τήξης του χιονιού, *SP* είναι η εποχιακή μεταβλητότητα του άνωθεν συντελεστή, *SFCF* είναι ο συντελεστής διόρθωσης της χιονόπτωσης που αντισταθμίζει τα σφάλματα από την εκτίμηση της χιονόπτωσης από το μοντέλο και από την εξάτμιση νερού από το συσσωρευμένο χιόνι, *CFR* είναι ο συντελεστής εκ νέου κατάψυξης του νερού μέσα στο στρώμα χιονιού σε περίπτωση πτώσης της θερμοκρασίας κάτω από το κατώφλι, *CWH* είναι ο συντελεστής κατακράτησης νερού από το λιωμένο χιόνι και τη βροχή στο στρώμα χιονιού, *FC* (mm) είναι η μέγιστη περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό, *LP* είναι μια τιμή κατωφλίου κατά την οποία η πραγματική εξάτμιση μεταβαίνει σε δυνητική εξάτμιση, *BETA* είναι μια παράμετρος που ρυθμίζει τη σχετική συμβολή της βροχής ή του λιωμένου χιονιού στην απορροή, *PERC* (mm/h) είναι ο μέγιστος ρυθμός διήθησης από την ανώτερη προς την κατώτερη ζώνη των υπόγειων υδάτων, *UZL* (mm) είναι μια κατώτατη τιμή ποσότητας των υπόγειων υδάτων, *K0* είναι ο συντελεστής ύφεσης για την ανώτερη ζώνη υπόγειων υδάτων, *K1* είναι ο συντελεστής ύφεσης για την ενδιάμεση ζώνη υπόγειων υδάτων, *K2* είναι ο συντελεστής ύφεσης για την κατώτερη ζώνη υπόγειων υδάτων, και *MAXBAS* (h) είναι μια παράμετρος μετασχηματισμού της απορροής που καθορίζει το χρόνο δρομολόγησης με μια τριγωνική συνάρτηση στάθμισης.

Ο Πίνακας 5-10 παρουσιάζει τα αποτελέσματα βαθμονόμησης και επαλήθευσης του υδρολογικού μοντέλου HBV-light για το ζεύγος γεγονότων υψηλής έντασης βροχόπτωσης. Η τιμή της παραμέτρου *FC* ήταν μεγαλύτερη στις αγροτικές υπολεκάνες και σημαντικά μικρότερη στην αστική και ημιαστική υπολεκάνη. Για τις αγροτικές υπολεκάνες με αρκετές αστικοποιημένες περιοχές (W800 και W900) παρατηρήθηκαν διαφορές στις βαθμονομημένες παραμέτρους της ρουτίνας εδαφικής υγρασίας. Συγκεκριμένα, η W800 προσεγγίστηκε καλύτερα για υψηλές τιμές των παραμέτρων *FC* και *BETA*, ενώ οι τιμές του *LP* βαθμονομήθηκαν πιο κοντά στο κατώτερο όριο. Αντίθετα, το προσομοιωμένο υδρογράφημα της W900 ταίριαξε καλύτερα για χαμηλότερες τιμές

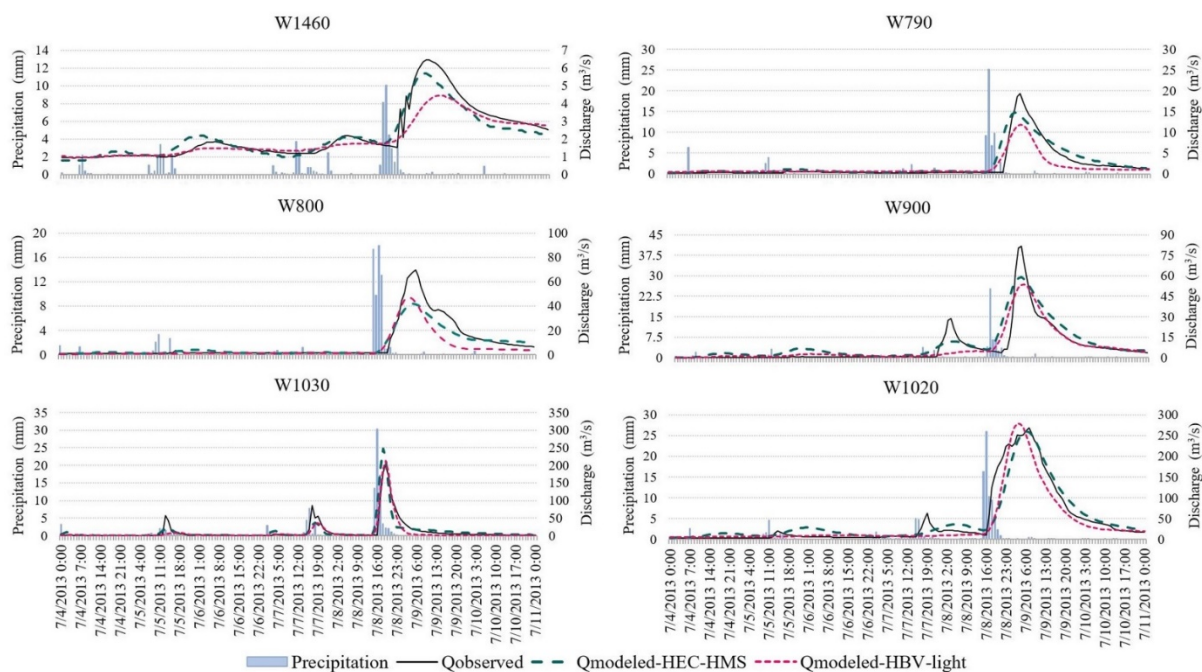
των παραμέτρων *FC* και *BETA* και υψηλότερες τιμές του *LP*, πιο κοντά στο υψηλότερο δυνητικά όριο. Η παράμετρος *BETA* είχε επίσης μεγαλύτερη τιμή στην ημιαστική υπολεκάνη συγκριτικά με την αστική, ειδικά στις δασικές και καλλιεργήσιμες εκτάσεις, ενώ στις αστικές περιοχές η παράμετρος έλαβε παρόμοιες τιμές και στις δύο υπολεκάνες. Ο μέγιστος ρυθμός διήθησης *PERC* ήταν μεγαλύτερος στις κυρίαρχα αγροτικές υπολεκάνες και μικρότερος στις αστικοποιημένες, στην ημιαστική και αστική, όπως αναμενόταν. Η κατώτατη τιμή της ποσότητας υπόγειων υδάτων *UZL* που ευθύνεται για την απορροή ήταν μεγαλύτερη στις αγροτικές παρά στις αστικοποιημένες υπολεκάνες, ωστόσο, στην ημιαστική και αστική υπολεκάνη δεν ακολούθησε παρόμοια τάση. Σε όλες τις υπολεκάνες, ο συντελεστής ύφεσης *K0* ήταν μεγαλύτερος από τους *K1* και *K2*, υποδεικνύοντας ότι η ύφεση ήταν πιο σημαντική στην ανώτερη ζώνη υπόγειων υδάτων παρά στην ενδιάμεση και κατώτερη. Ο συντελεστής ύφεσης *K1* ήταν υψηλότερος από τον *K2* στις υπολεκάνες *W1460*, *W790* και *W1030*, μικρότερος στις *W800* και *W900*, ενώ ήταν παρόμοιος στην *W1020*.

Ο συντελεστής συνέπειας Nash–Sutcliffe (NSE) από το μοντέλο HBV-light ήταν πολύ καλός για τις υπολεκάνες του γεγονότος στις 28–30 Μαΐου 2013, εκτός από την υπολεκάνη *W800* στην οποία ήταν ικανοποιητικός, και την *W1020* όπου ήταν καλός. Για το γεγονός στις 4–10 Ιουλίου 2013, ο δείκτης NSE ήταν πολύ καλός για όλες τις υπολεκάνες.

Η [Εικόνα 5-17](#) και [Εικόνα 5-18](#), στην έξοδο των έξι υπολεκανών με μετρητές απορροής, παρουσιάζουν την κατανομή της βροχόπτωσης, καθώς και τα καταγεγραμμένα και προσομοιωμένα υδρογραφήματα όπως προέκυψαν και από τα δύο υδρολογικά μοντέλα, για τα γεγονότα στις 28-30 Μαΐου 2013 και 4–10 Ιουλίου 2013, αντίστοιχα.



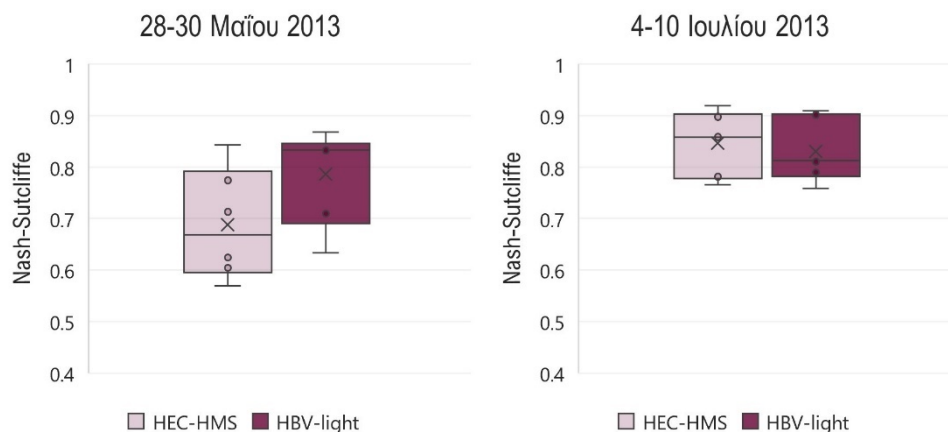
Εικόνα 5-17. Βροχόπτωση, καθώς και καταγεγραμμένη και προσομοιωμένη απορροή του γεγονότος στις 28–30 Μαΐου 2013, στην έξοδο των έξι υπολεκάνών με μετρητές απορροής.



Εικόνα 5-18. Βροχόπτωση, καθώς και καταγεγραμμένη και προσομοιωμένη απορροή του γεγονότος στις 4-10 Ιουλίου 2013, στην έξοδο των έξι υπολεκάνών με μετρητές απορροής.

Στην [Εικόνα 5-19](#) παρουσιάζονται τα θηκογράμματα (boxplots) από το δείκτη συνέπειας Nash-Sutcliffe (NSE) για τις έξι υπολεκάνες, όπως προέκυψαν από τα δύο υδρολογικά μοντέλα, για τα γεγονότα υψηλής έντασης βροχόπτωσης στις 28-30 Μαΐου 2013 και στις 4-10 Ιουλίου 2013. Για το γεγονός με μικρότερο ύψος βροχής (28-30 Μαΐου 2013), το HBV-light απέδωσε καλύτερο δείκτη NSE σε σχέση με το HEC-HMS. Απ' την άλλη, το

γεγονός με το μεγαλύτερο συνολικά ύψος βροχής και την υψηλότερη ένταση βροχής (4-10 Ιουλίου 2013) παρήγαγε πολύ καλούς δείκτες συνέπειας NSE και με τα δύο υδρολογικά μοντέλα, αλλά λίγο καλύτερους με το HEC-HMS.



Εικόνα 5-19. Θηκογράμματα από το δείκτη Nash-Sutcliffe για τις έξι υπολεκάνες, από τα δύο υδρολογικά μοντέλα, για τα γεγονότα στις 28-30 Μαΐου 2013 και στις 4-10 Ιουλίου 2013.

Ο **Πίνακας 5-11** παρουσιάζει τη βαθμονόμηση της παραμέτρου Muskingum K (h), του υδρολογικού μοντέλου HEC-HMS, για τα κανάλια R1580, R1590, R1600, και R1610, για το υψηλής έντασης βροχοπτώτικό γεγονός στις 4-10 Ιουλίου 2013, καθώς και την προκύπτουσα μέγιστη απορροή στην έξοδο της υπολεκάνης W1020, χρησιμοποιώντας ως κριτήριο επαλήθευσης το δείκτη Nash-Sutcliffe. Ο αριθμός των δευτερευόντων ρεμάτων ανά κανάλι δεν προκάλεσε διακριτές αλλαγές στο υδρογράφημα εξόδου. Για τα κανάλια R1580, R1590 και R1610 ελήφθησαν τρία δευτερεύοντα ρέματα, ενώ ένα θεωρήθηκε για το κανάλι R1600. Οι βαθμονομημένες τιμές της παραμέτρου Muskingum K για τα κανάλια R1580, R1590, R1600, και R1610 προέκυψαν έπειτα από 13 δοκιμές, ίσες με 4.5 h, 3 h, 1.1 h και 2 h, αντίστοιχα, αποδίδοντας έναν συντελεστή NSE στην έξοδο της υπολεκάνης W1020 ίσο με 0.897.

Πίνακας 5-11. Επαλήθευση του υδρολογικού μοντέλου HEC-HMS στην έξοδο της υπολεκάνης W1020 μέσω βαθμονόμησης της παραμέτρου Muskingum K (h) για τα κανάλια R1580, R1590, R1600, και R1610, για το γεγονός στις 4-10 Ιουλίου 2013.

A/A	Κανάλι R1580			Κανάλι R1590			Κανάλι R1600			Κανάλι R1610			Έξοδος υπολεκάνης W1020		Δt: Χρόνος προσομοιωμένης Qmax - Χρόνος καταγεγραμμένης Qmax (h)	NSE
	K (h)	max Εισροή (m³/s)	max Εκροή (m³/s)	K (h)	max Εισροή (m³/s)	max Εκροή (m³/s)	K (h)	max Εισροή (m³/s)	max Εκροή (m³/s)	K (h)	max Εισροή (m³/s)	max Εκροή (m³/s)	Προσομοιωμένη Qmax	Καταγεγραμμένη Qmax		
i	5		5.6	5		13.8	1.1		41.9	6		54.3	255.2		0	0.860
ii	4		5.6	5		13.8	1.1		41.9	6		54.3	255.5		0	0.861
iii	3		5.7	5		13.8	1.1		41.9	6		54.3	255.7		0	0.861
iv	2.2	5.7	5.7	5	14.8	13.8	1.1	42	41.9	6	59	54.3	255.8	268.2	0	0.862
v	5		5.6	4		14.1	1.1		41.9	6		54.3	255.1		0	0.863
vi	5		5.6	3		14.4	1.1		41.9	6		54.3	254.6		0	0.866
vii	5		5.6	2.2		14.5	1.1		41.9	6		54.3	254.1		0	0.869
viii	5		5.6	5		13.8	1		42	6		54.3	255.1		0	0.861

ix	5	5.6	5	13.8	1.1	41.9	5	55.5	258.3	0	0.867
x	5	5.6	5	13.8	1.1	41.9	4	56.6	260	0	0.875
xi	5	5.6	5	13.8	1.1	41.9	3	57.6	260.1	0	0.883
xii	5	5.6	5	13.8	1.1	41.9	2	58.3	259.5	-1	0.893
xiii	4.5	5.6	3	14.4	1.1	41.9	2	58.3	259.8	-1	0.897

Ο Πίνακας 5-12 και ο Πίνακας 5-13 υποδεικνύουν τις βαθμονομημένες τιμές των παραμέτρων που επαλήθευσαν καλύτερα τα καταγεγραμμένα υδρογραφήματα στην έξοδο των έξι υπολεκάνων με μετρητές απορροής, καθώς και τους προκύπτοντες δείκτες Nash–Sutcliffe, ανά υδρολογικό μοντέλο, για το ζεύγος γεγονότων στις 7–15 Απριλίου 2013 και 30 Απριλίου–7 Μαΐου 2017 που είχαν δύο υδρολογικές αιχμές.

Πίνακας 5-12. Επαλήθευση του υδρολογικού μοντέλου HEC-HMS μέσω της βαθμονόμησης παραμέτρων για το ζεύγος γεγονότων στις 7–15 Απριλίου 2013 και 30 Απριλίου–7 Μαΐου 2017.

Υπολεκάνη	T_c (h)	$\frac{R}{T_c + R}$	R (h)	CN (I)	% Αδιαπερα- τότητα	Αρχική απορροή ανά επιφάνεια (m ³ /s/km ²)	Σταθερά ύφεσης	Αναλογία έως τη βασική απορροή αιχμής	7-15 Απριλίου 2013, NSE	30 Απριλίου- 7 Μαΐου 2017, NSE
W1460	14.07	0.7	32.83	38	24	0.012	0.8	0.475	0.647	0.858
W790	8.67	0.65	16.09	63	22	0.0035	0.8	0.1	0.696	0.924
W800	14.15	0.5	14.15	61	27	0.003	0.8	0.3	0.682	0.818
W900	11.77	0.525	13.01	64	55	0.003	0.8	0.1	0.646	0.935
W1030	4.03	0.175	0.85	65	36.5	0.002	0.3	0.275	0.611	0.516
W1020	18.04	0.375	10.83	70	38	0.01	0.8	0.025	0.767	0.714

Ο Πίνακας 5-12 παραθέτει τα αποτελέσματα βαθμονόμησης και επαλήθευσης του υδρολογικού μοντέλου HEC-HMS για το ζεύγος γεγονότων με δύο υδρολογικές αιχμές. Οι βαθμονομημένες τιμές της αναλογίας $R/(T_c+R)$, συγκριτικά με τις τιμές αναφοράς που παραθέτει ο Πίνακας 4-10, αυξήθηκαν κατά 9.9%, 4.6%, 53.8%, και 1.2% στις υπολεκάνες W1460, W790, W1030, και W1020 αντίστοιχα, ενώ μειώθηκαν κατά 8.3% και 6.5% στις υπολεκάνες W800 και W900 αντίστοιχα. Η βαθμονόμηση του CN έδειξε ότι οι τιμές αναφοράς των ξηρών συνθηκών πρότερης εδαφικής υγρασίας ταίριαζαν καλά στις περισσότερες υπολεκάνες. Εξαίρεση αποτέλεσε η βαθμονομημένη τιμή στην αστική υπολεκάνη W1030, η οποία μειώθηκε κατά 19.8% σε σχέση με την τιμή αναφοράς. Για τη βαθμονομημένη % αδιαπερατότητα, σε σχέση με τις τιμές αναφοράς, στην υπολεκάνη W1020 σημειώθηκε μικρή μείωση κατά 9.5%, στην υπολεκάνη W1030 σημειώθηκε σημαντική μείωση κατά 50%, ενώ στις υπόλοιπες υπολεκάνες υπήρξε μεγάλη αύξηση. Αυτή η αύξηση ήταν βασική για την επαλήθευση του μοντέλου, και εξηγείται καθώς τα μελετώμενα γεγονότα είχαν δύο υδρολογικές αιχμές, ως εκ τούτου μέχρι να εκδηλωθεί η δεύτερη μέγιστη ένταση της βροχόπτωσης το έδαφος ήταν ήδη αρκετά κορεσμένο και επομένως διηθήθηκε λιγότερο νερό, με αποτέλεσμα, μια υψηλότερη % αδιαπερατότητα από τις τιμές αναφοράς.

Ο συντελεστής Nash–Sutcliffe από το μοντέλο HEC-HMS ήταν ικανοποιητικός για τις υπολεκάνες W1460, W900 και W1030 του βροχοπτώτικού γεγονότος στις 7–15 Απριλίου 2013, καλός για τις W790 και W800, και πολύ καλός για την W1020. Για το γεγονός στις 30 Απριλίου–7 Μαΐου 2017, ο δείκτης ήταν ικανοποιητικός για την υπολεκάνη W1030, καλός για την W1020, ενώ ήταν πολύ καλός για τις υπόλοιπες υπολεκάνες με μετρητές απορροής.

Πίνακας 5-13. Βέλτιστες τιμές παραμέτρων μέσω της βαθμονόμησης και επαλήθευσης του υδρολογικού μοντέλου HBV-light για το ζεύγος γεγονότων στις 7-15 Απριλίου 2013 και 30 Απριλίου-7 Μαΐου 2017.

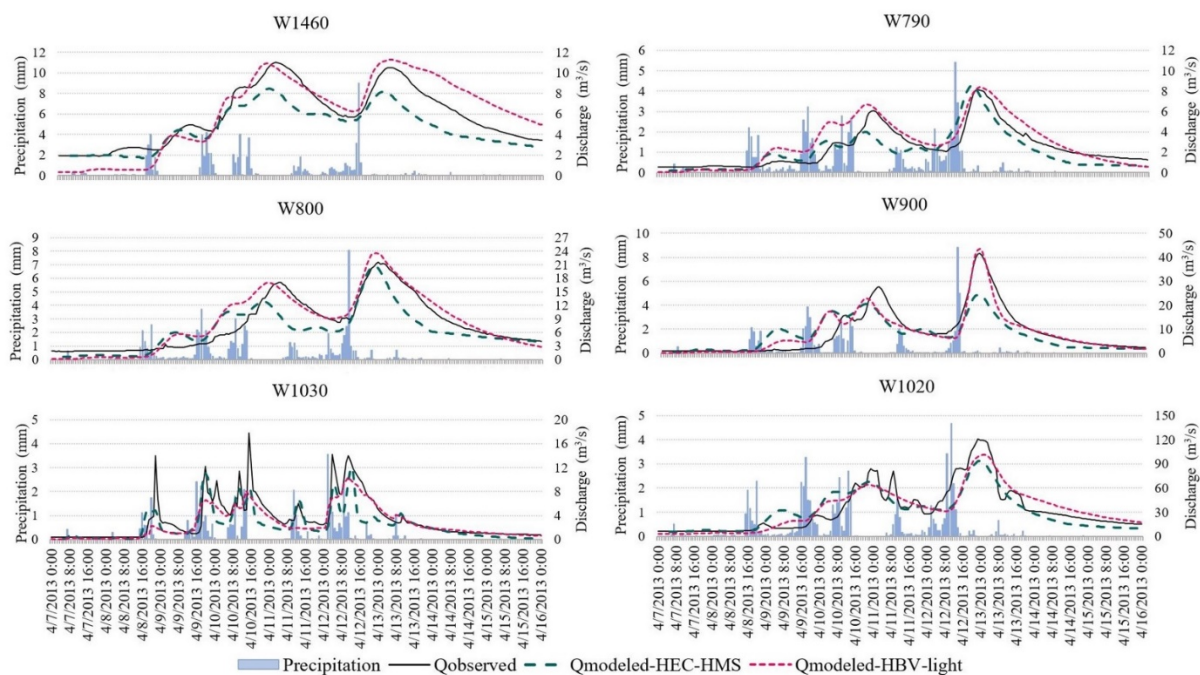
		W1460	W790	W800	W900	W1030	W1020
	<i>TT</i> (°C)	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	0	0
	<i>CFMAX</i> (mm/h °C)	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
	<i>SP</i>	1	1	1	1	1	1
	<i>SFCF</i>	0.7	0.7	0.9	0.9	1	1
	<i>CFR</i>	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
	<i>CWH</i>	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Δάση και Υγροβιότοποι	<i>FC</i> (mm)	495	495	495	120	120	100
	<i>LP</i>	0.1	0.1	0.1	0.4	0.45	0.7
	<i>BETA</i>	1	1	1.05	3.65	1	3.5
Καλλιεργήσιμες εκτάσεις	<i>FC</i> (mm)	490	485	420	75	100	60
	<i>LP</i>	0.105	0.225	0.3	0.45	0.5	0.75
	<i>BETA</i>	2.75	1.15	2.05	3.75	1.05	3.95
Αστικός ιστός	<i>FC</i> (mm)	90	70	95	50	90	40
	<i>LP</i>	0.4	0.8	0.45	0.7	1	0.775
	<i>BETA</i>	3.45	4.45	4.15	4	1.205	4.05
	<i>PERC</i> (mm/h)	1.2	1.25	1	0.55	0.1	0.6
	<i>UZI</i> (mm)	3	2	2	1.15	1.5	4
	<i>K0</i> (1/h)	0.07	0.1	0.1	0.125	0.05	0.015
	<i>K1</i> (1/h)	0.001	0.02	0.02	0.001	0.0185	0.095
	<i>K2</i> (1/h)	0.0155	0.04	0.0315	0.035	0.025	0.0025
	<i>MAXBAS</i> (h)	11	12	17	14	1	12
	7-15 Απριλίου 2013, NSE	0.6855	0.7049	0.8619	0.8646	0.7151	0.8318
	30 Απριλίου-7 Μαΐου 2017, NSE	0.9024	0.7025	0.7848	0.9212	0.6011	0.9018

Ο Πίνακας 5-13 παρουσιάζει τα αποτελέσματα βαθμονόμησης και επαλήθευσης του υδρολογικού μοντέλου HBV-light για το ζεύγος γεγονότων με δύο υδρολογικές αιχμές. Η τιμή της παραμέτρου *FC* ήταν μεγαλύτερη στις αγροτικές υπολεκάνες και αρκετά μικρότερη στην αστική και ημιαστική υπολεκάνη, όπως συνέβη και στα γεγονότα υψηλής έντασης της βροχόπτωσης. Διαφορές παρατηρήθηκαν στις βαθμονομημένες παραμέτρους της ρουτίνας εδαφικής υγρασίας για τις αγροτικές υπολεκάνες με αρκετές αστικοποιημένες περιοχές. Συγκεκριμένα, η τιμή της παραμέτρου *FC* ήταν σημαντικά μεγαλύτερη στην W800 απ' ό,τι στην W900. Επιπλέον, η τιμή της *LP* ήταν μικρότερη στην W800 σε σχέση με την W900, αλλά και υψηλότερη από τις αντίστοιχες βαθμονομημένες τιμές των γεγονότων υψηλής έντασης βροχόπτωσης. Αντίθετα, οι υψηλότερες τιμές της *LP* στην W900 ήταν χαμηλότερες από τις αντίστοιχες των γεγονότων υψηλής έντασης

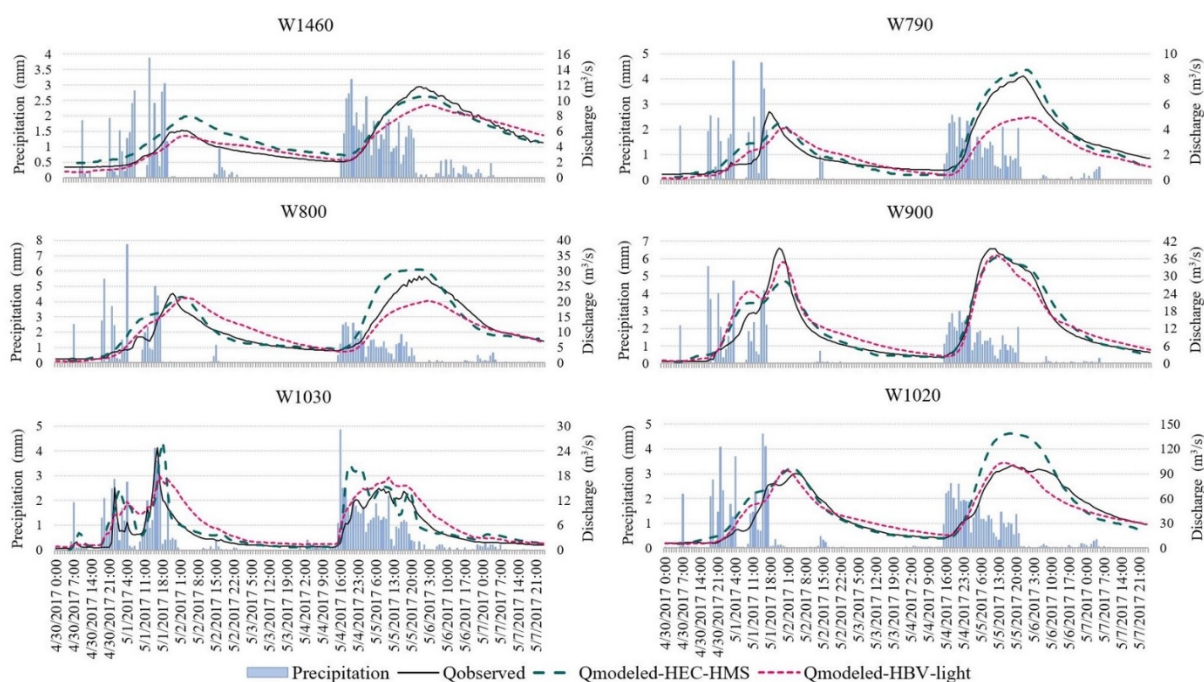
βροχόπτωσης. Επιπλέον, οι τιμές της παραμέτρου *BETA* ήταν σημαντικά υψηλότερες στην W900 για τις δασικές και καλλιεργήσιμες εκτάσεις, αλλά όχι στον αστικό ιστό όπου οι βαθμονομημένες τιμές ήταν παρόμοιες και στις δύο υπολεκάνες. Οι τιμές της παραμέτρου *BETA* ήταν ιδιαίτερα υψηλότερες στην ημιαστική απ' ό,τι στην αστική υπολεκάνη. Ο μέγιστος ρυθμός διήθησης *PERC* βαθμονομήθηκε μεγαλύτερος στις κυρίαρχα αγροτικές υπολεκάνες και μικρότερος στην ημιαστική και αστική. Ωστόσο, οι W800 και W900, παρότι είχαν και οι δύο παρόμοιες αστικοποιημένες περιοχές, απέδωσαν καλά με διαφορετικό μέγιστο ρυθμό διήθησης. Η κατώτατη βαθμονομημένη τιμή της ποσότητας υπόγειων υδάτων *UZL* δεν έδειξε κάποια ιδιαίτερη τάση στις υπολεκάνες, ωστόσο ήταν σχετικά μικρή. Σε όλες τις υπολεκάνες, ο συντελεστής ύφεσης *K0* βαθμονομήθηκε υψηλότερος από τον *K2*. Επίσης, ο συντελεστής ύφεσης *K2* ήταν υψηλότερος από τον *K1* σε όλες τις υπολεκάνες, εκτός από την ημιαστική. Στην ημιαστική υπολεκάνη (W1020), ο συντελεστής *K1* ταίριαξε καλύτερα μεγαλύτερος και από τον *K0*.

Ο συντελεστής Nash–Sutcliffe από το μοντέλο HBV-light ήταν καλός για τις υπολεκάνες W1460, W790 και W1030 του γεγονότος στις 7–15 Απριλίου 2013, ενώ για τις W800, W900 και W1020 ήταν πολύ καλός. Για το γεγονός στις 30 Απριλίου–7 Μαΐου 2017, ο δείκτης NSE ήταν πολύ καλός για όλες τις υπολεκάνες, εκτός από τις W790 και W1030 όπου ήταν καλός και ικανοποιητικός αντίστοιχα.

Στην [Εικόνα 5-20](#) και [Εικόνα 5-21](#) παρουσιάζονται η κατανομή της βροχόπτωσης στην έξοδο των υπολεκάνων με μετρητές απορροής, καθώς και τα καταγεγραμμένα και προσομοιωμένα υδρογραφήματα και από τα δύο υδρολογικά μοντέλα, για τα γεγονότα στις 7–15 Απριλίου 2013 και 30 Απριλίου–7 Μαΐου 2017, αντίστοιχα. Το γεγονός δύο υδρολογικών αιχμών στις 7–15 Απριλίου 2013, με μικρότερη βροχόπτωση απ' το ζεύγος του, εμφάνισε μέγιστη ένταση βροχής κατά τη δεύτερη υδρολογική αιχμή, ενώ το γεγονός στις 30 Απριλίου–7 Μαΐου 2017, με μεγαλύτερη βροχόπτωση, εμφάνισε μέγιστη ένταση στην πρώτη υδρολογική αιχμή. Ως αποτέλεσμα, οι υδρολογικές αιχμές των δύο γεγονότων διέφεραν, και η πρόταση συνόλου βαθμονομημένων παραμέτρων για να ικανοποιήσει και τα δύο γεγονότα, προσομοίωσε υδρογραφήματα ως μια ενδιάμεση λύση έναντι των χαμηλών και υψηλών αιχμών.



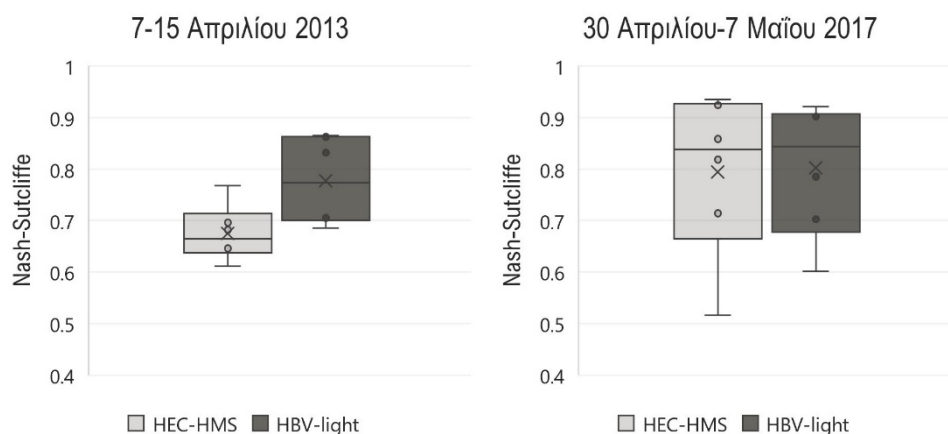
Εικόνα 5-20. Βροχόπτωση, καθώς και καταγεγραμμένη και προσομοιωμένη απορροή του γεγονότος στις 7-15 Απριλίου 2013, στην έξοδο των έξι υπολεκανών με μετρητές απορροής.



Εικόνα 5-21. Βροχόπτωση, καθώς και καταγεγραμμένη και προσομοιωμένη απορροή του γεγονότος στις 30 Απριλίου–7 Μαΐου 2017, στην έξοδο των έξι υπολεκανών με μετρητές απορροής.

Στην [Εικόνα 5-22](#) παρουσιάζονται τα θηκογράμματα από το δείκτη συνέπειας Nash-Sutcliffe για τις έξι υπολεκάνες, όπως προέκυψαν από τα δύο υδρολογικά μοντέλα, για τα βροχοπτώτικα γεγονότα δύο υδρολογικών αιχμών στις 7-15 Απριλίου 2013 και στις 30 Απριλίου-7 Μαΐου 2017. Για το γεγονός με μικρότερο ύψος βροχής (7-15 Απριλίου

2013), το HBV-light απέδωσε εμφανώς καλύτερο δείκτη NSE σε σχέση με το HEC-HMS. Το γεγονός με το μεγαλύτερο ύψος υετού (30 Απριλίου-7 Μαΐου 2017) παρήγαγε ισχνά καλύτερο δείκτη συνέπειας NSE με το HBV-light συγκριτικά με το HEC-HMS.



Εικόνα 5-22. Θηκογράμματα από το δείκτη Nash-Sutcliffe για τις έξι υπολεκάνες, από τα δύο υδρολογικά μοντέλα, για τα γεγονότα στις 7-15 Απριλίου 2013 και στις 30 Απριλίου-7 Μαΐου 2017.

Τα δύο γεγονότα στις 26-30 Ιουνίου 2010 και στις 22-25 Ιουνίου 2017 παρουσίασαν υγρές συνθήκες πρότερης υγρασίας (Σ.Π.Υ.) εδάφους στην υπολεκάνη W1460, κανονικές Σ.Π.Υ. στις W790, W800 και W900, και ξηρές Σ.Π.Υ. στην αστική (W1030) και ημιαστική (W1020) υπολεκάνη. Ο Πίνακας 5-14 και ο Πίνακας 5-15 παρουσιάζουν τους βέλτιστους δείκτες Nash-Sutcliffe ανά υδρολογικό μοντέλο, όπως προέκυψαν από τις βαθμονομημένες τιμές των παραμέτρων στην έξοδο των υπό μελέτη υπολεκάνων, επαληθεύοντας τα καταγεγραμμένα υδρογραφήματα για το ζεύγος γεγονότων που είχαν πολλαπλές Σ.Π.Υ. εδάφους.

Πίνακας 5-14. Επαλήθευση του υδρολογικού μοντέλου HEC-HMS μέσω της βαθμονόμησης παραμέτρων για το ζεύγος γεγονότων στις 26-30 Ιουνίου 2010 και 22-25 Ιουνίου 2017.

Υπολεκάνη	T_c (h)	$\frac{R}{T_c + R}$	R (h)	CN (III) ή CN (II) ή CN (I)	% Αδιαπερα- τότητα	Αρχική απορροή ανά επιφάνεια ($m^3/s/km^2$)	Σταθερά ύφεσης	Αναλογία έως τη βασική απορροή αιχμής	26-30 Ιουνίου 2010, NSE	22-25 Ιουνίου 2017, NSE
W1460	9.26	0.65	17.20	70	6.5	0.0125	0.8	0.35	0.810	0.897
W790	8.08	0.575	10.94	68	12	0.001	0.8	0.275	0.570	0.613
W800	14.15	0.575	19.14	71	16	0.005	0.8	0.275	0.722	0.869
W900	11.77	0.525	13.01	77	16	0.0005	0.8	0.1	0.795	0.768
W1030	2.82	0.15	0.50	61	51	0.0005	0.3	0.2	0.734	0.404
W1020	18.04	0.425	13.34	66.5	33.5	0.0275	0.8	0.15	0.481	0.461

Ο Πίνακας 5-14 παρουσιάζει τα αποτελέσματα βαθμονόμησης και επαλήθευσης του υδρολογικού μοντέλου HEC-HMS για το ζεύγος γεγονότων με πολλαπλές Σ.Π.Υ. εδάφους. Οι βαθμονομημένες τιμές της αναλογίας $R/(T_c+R)$, συγκριτικά με τις τιμές αναφοράς που παραθέτει ο Πίνακας 4-10, αυξήθηκαν κατά 2%, 5.5%, 31.8%, και 14.7% στις

υπολεκάνες W1460, W800, W1030, και W1020, αντίστοιχα. Αντίθετα, στις υπολεκάνες W790 και W900, η αναλογία μειώθηκε κατά 7.5% και 6.5%. Ειδικά για την υπολεκάνη W1030, στην εξίσωση του Carter που υπολογίζει το T_c , εφαρμόστηκε ένας συντελεστής προσαρμογής ίσος με 0.7, ώστε ο χρόνος εμφάνισης της μέγιστης προσομοιωμένης απορροής να είναι πιο κοντά στον καταγεγραμμένο. Οι βαθμονομημένες τιμές του CN ήταν μειωμένες σε όλες τις υπολεκάνες σε σχέση με τις τιμές αναφοράς. Συγκεκριμένα, η μείωση ήταν περίπου 9.1% στην υπολεκάνη W1460, με τιμή αναφοράς για υγρές Σ.Π.Υ. εδάφους ίση με 77, περίπου 15%, 10.1% και 4.9% στις υπολεκάνες W790, W800 και W900 αντίστοιχα, με κανονικές Σ.Π.Υ., ενώ 24.7% και 5% στις υπολεκάνες W1030 και W1020 αντίστοιχα, με ξηρές Σ.Π.Υ. εδάφους. Για την % αδιαπερατότητα, η τιμή αναφοράς της υπολεκάνης W900 ταίριαζε καλά για την επαλήθευση του καταγεγραμμένου υδρογραφήματος. Απ' την άλλη, η βαθμονομημένη τιμή στην υπολεκάνη W790 αυξήθηκε κατά 20% συγκριτικά με την τιμή αναφοράς. Αντίθετα, οι βαθμονομημένες τιμές στις υπολεκάνες W1460, W800, W1030, και W1020, μειώθηκαν κατά 18.8%, 15.8%, 30.1%, και 20.2%, αντίστοιχα, σε σχέση με τις τιμές αναφοράς.

Με το μοντέλο HEC-HMS, για το γεγονός στις 26–30 Ιουνίου 2010, η απόδοση του συντελεστή Nash–Sutcliffe ήταν πολύ καλή για τις υπολεκάνες W1460 και W900, ικανοποιητική για την W790, καλή για τις W800 και W1030, ενώ ήταν σχεδόν ικανοποιητική για την υπολεκάνη W1020. Για το γεγονός στις 22–25 Ιουνίου 2017, ο συντελεστής NSE ήταν πολύ καλός για τις υπολεκάνες W1460, W800, και W900, ικανοποιητικός για την W790, και σχεδόν ικανοποιητικός για τις υπολεκάνες W1030 και W1020.

Πίνακας 5-15. Βέλτιστες τιμές παραμέτρων μέσω της βαθμονόμησης και επαλήθευσης του υδρολογικού μοντέλου HBV-light για το ζεύγος γεγονότων στις 26-30 Ιουνίου 2010 και 22-25 Ιουνίου 2017.

		W1460	W790	W800	W900	W1030	W1020
	<i>TT</i> (°C)	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	0	0
	<i>CFMAX</i> (mm/h °C)	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
	<i>SP</i>	1	1	1	1	1	1
	<i>SFCF</i>	0.7	0.7	0.9	0.9	1	1
	<i>CFR</i>	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
	<i>CWH</i>	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Δάση και Υγροβιότοποι	<i>FC</i> (mm)	425	495	495	175	120	110
	<i>LP</i>	0.1	0.1	0.1	0.1	0.75	0.6
	<i>BETA</i>	3.95	1.55	1.65	2.25	1	1.05
Καλλιεργήσιμες εκτάσεις	<i>FC</i> (mm)	390	490	490	150	80	100
	<i>LP</i>	0.105	0.105	0.105	0.115	0.8	0.75
	<i>BETA</i>	4.05	3.45	2.95	2.45	1.05	1.45
Αστικός Ιστός	<i>FC</i> (mm)	90	85	90	125	40	85
	<i>LP</i>	0.4	0.95	0.8	0.65	1	0.95

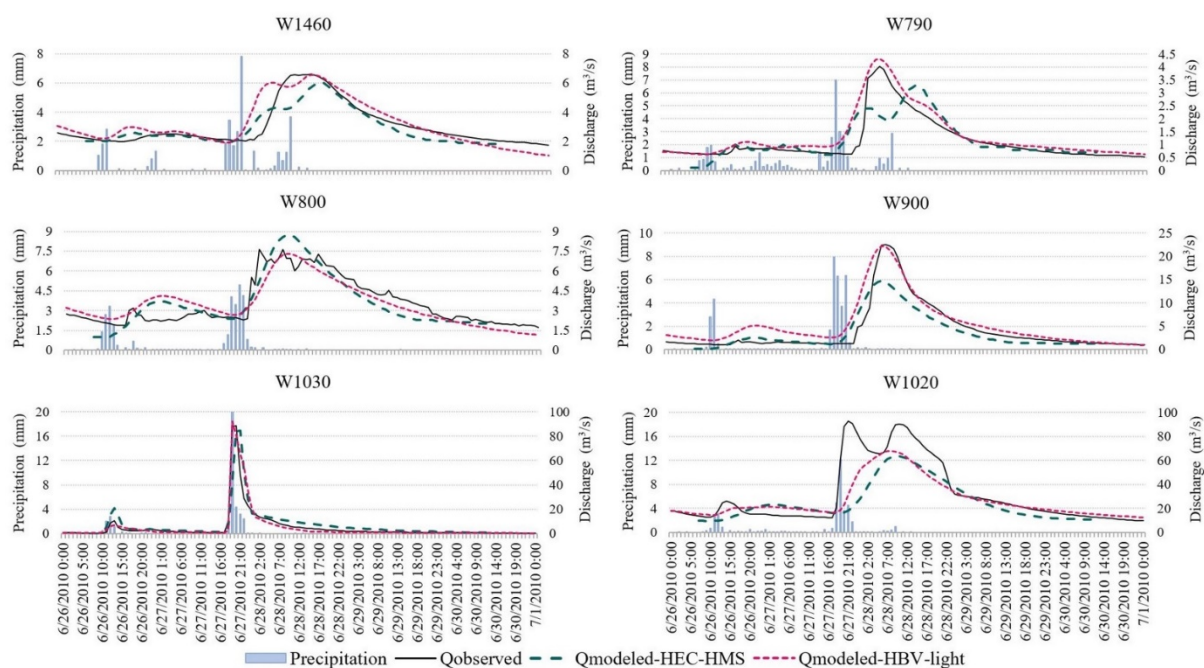
<i>BETA</i>	4.15	4.75	3.45	2.55	1.15	1.55
<i>PERC (mm/h)</i>	1.25	0.115	0.6	0.4	0.15	0.4
<i>UZL (mm)</i>	7.5	2.5	4.5	4	6.5	5
<i>K0 (1/h)</i>	0.05	0.6	0.04	0.04	0.255	0.0015
<i>K1 (1/h)</i>	0.02	0.095	0.06	0.075	0.115	0.0325
<i>K2 (1/h)</i>	0.0325	0.0135	0.03	0.04	0.025	0.0075
<i>MAXBAS (h)</i>	9	16	17	16	1	6
26-30 Ιουνίου 2010, NSE	0.7472	0.8022	0.7749	0.8268	0.9244	0.7021
22-25 Ιουνίου 2017, NSE	0.9453	0.4021	0.9045	0.7615	0.6536	0.7027

Ο Πίνακας 5-15 παραθέτει τα αποτελέσματα βαθμονόμησης και επαλήθευσης του υδρολογικού μοντέλου HBV-light για το ζεύγος γεγονότων με πολλαπλές Σ.Π.Υ. εδάφους. Η τιμή της παραμέτρου *FC* ακολούθησε την ίδια τάση με τα γεγονότα υψηλής έντασης βροχόπτωσης και διπλής υδρολογικής αιχμής. Μικρές διαφορές σε σχέση με τα άλλα δύο ζεύγη γεγονότων παρατηρήθηκαν στις βαθμονομημένες παραμέτρους της ρουτίνας εδαφικής υγρασίας, στις υπολεκάνες W800 και W900 που είναι αγροτικές με αρκετές αστικοποιημένες περιοχές. Και εδώ, η τιμή της παραμέτρου *FC* ήταν σαφώς μεγαλύτερη στην W800 απ' ό,τι στην W900. Η τιμή της *LP* ήταν παρόμοια και στις δύο υπολεκάνες, εκτός από τον αστικό ιστό όπου η *LP* ήταν ελαφρώς μεγαλύτερη στην W800. Οι τιμές της παραμέτρου *BETA* ήταν υψηλότερες στις καλλιεργήσιμες εκτάσεις και στις αστικές ζώνες της W800, όχι όμως και στις δασικές περιοχές στις οποίες η τιμή ήταν μεγαλύτερη στην W900. Οι τιμές της παραμέτρου *BETA* ήταν μεγαλύτερες στην ημιαστική υπολεκάνη απ' ό,τι στην αστική, κυρίως σε καλλιεργήσιμες και αστικές περιοχές, ενώ στις δασικές περιοχές η τιμή της *BETA* ήταν ίδια και στις δύο υπολεκάνες. Ο μέγιστος ρυθμός διήθησης *PERC* βαθμονομήθηκε μεγαλύτερος στις κυρίαρχα αγροτικές υπολεκάνες και μικρότερος στην αστική και ημιαστική, με εξαίρεση την αγροτική υπολεκάνη W790 όπου ήταν ιδιαίτερα μικρός. Στην ίδια υπολεκάνη, ιδιαίτερα μικρή ήταν και η κατώτατη βαθμονομημένη τιμή της ποσότητας υπόγειων υδάτων *UZL*. Στις υπολεκάνες W1460 και W1030 η τιμή της *UZL* βαθμονομήθηκε μεγαλύτερη, ενώ ήταν μικρότερη στην ημιαστική καθώς και στις αγροτικές υπολεκάνες με αρκετές αστικοποιημένες περιοχές. Ο συντελεστής ύφεσης *K0* βαθμονομήθηκε σημαντικά υψηλότερος από τους *K1* και *K2* στην υπολεκάνη W790, και αρκετά υψηλότερος από τους *K1* και *K2* στην υπολεκάνη W1030, με την απορροή να εμφανίζει μεγαλύτερη ύφεση στην ανώτερη ζώνη υπογείων υδάτων. Από την άλλη, ο *K0* ήταν ιδιαίτερα μικρός στην W1020. Στις υπόλοιπες υπολεκάνες, οι συντελεστές *K0*, *K1* και *K2* ήταν περίπου της ίδιας τάξης μεγέθους.

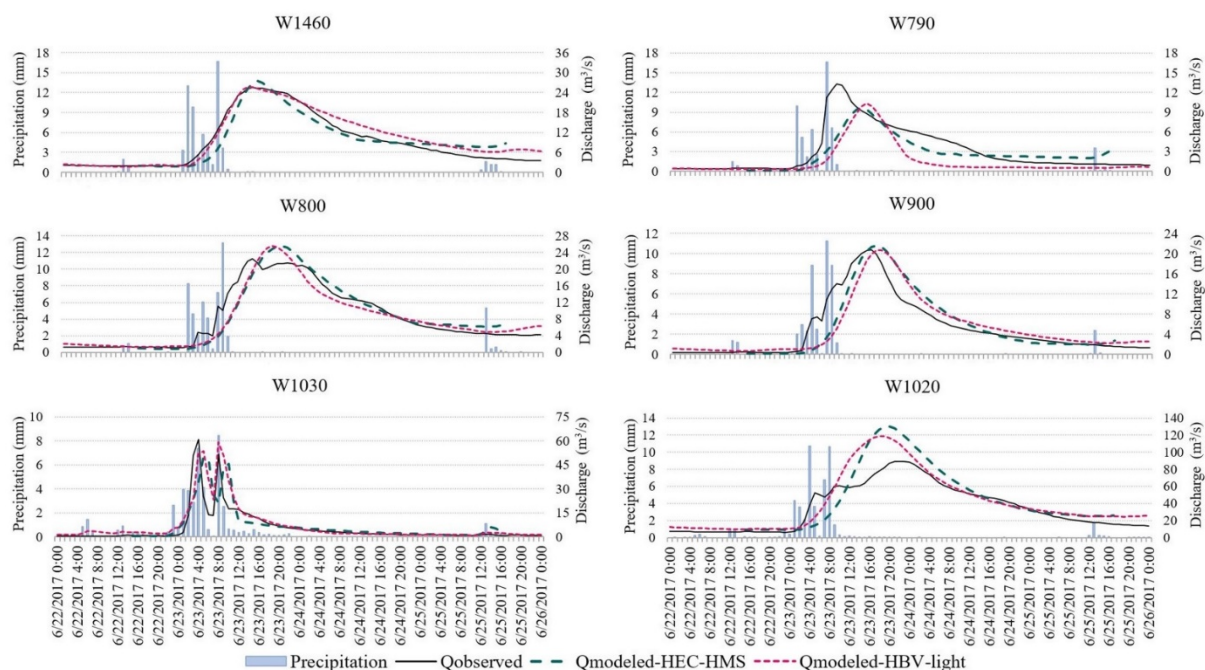
Ο συντελεστής Nash–Sutcliffe από το μοντέλο HBV-light ήταν καλός για τις υπολεκάνες W1460 και W1020 του γεγονότος στις 26–30 Ιουνίου 2010, ενώ για τις υπόλοιπες

υπολεκάνες ήταν πολύ καλός. Για το βροχοπτώτικό γεγονός στις 22–25 Ιουνίου 2017, ο δείκτης NSE ήταν πολύ καλός για τις υπολεκάνες W1460, W800 και W900, σχεδόν ικανοποιητικός για την W790, και καλός για τις υπολεκάνες W1030 και W1020.

Η [Εικόνα 5-23](#) και η [Εικόνα 5-24](#) παρουσιάζουν τη χρονική κατανομή του νετού, καθώς και τα καταγεγραμμένα και προσομοιωμένα υδρογραφήματα στην έξοδο των υπολεκανών με μετρητές απορροής, και από τα δύο υδρολογικά μοντέλα, για τα γεγονότα στις 26-30 Ιουνίου 2010 και 22-25 Ιουνίου 2017, αντίστοιχα.

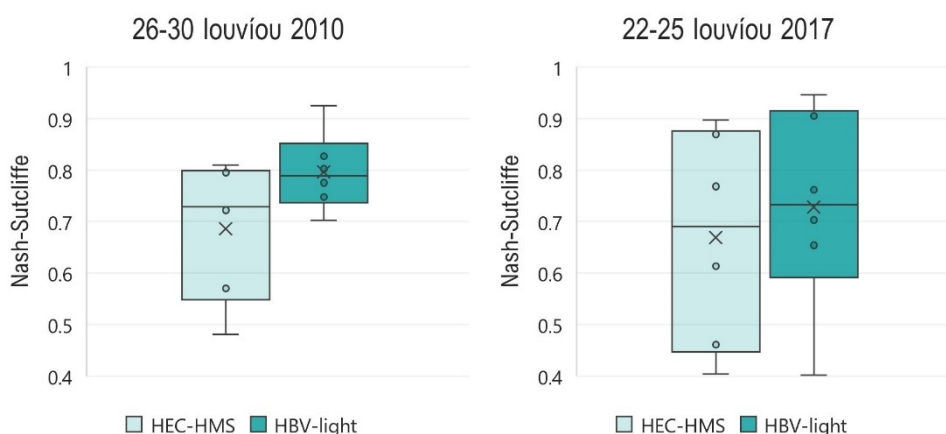


Εικόνα 5-23. Βροχόπτωση, καθώς και καταγεγραμμένη και προσομοιωμένη απορροή του γεγονότος στις 26-30 Ιουνίου 2010, στην έξοδο των έξι υπολεκανών με μετρητές απορροής.



Εικόνα 5-24. Βροχόπτωση, καθώς και καταγεγραμμένη και προσομοιωμένη απορροή του γεγονότος στις 22-25 Ιουνίου 2017, στην έξοδο των έξι υπολεκάνων με μετρητές απορροής.

Στην [Εικόνα 5-25](#) παρουσιάζονται τα θηκογράμματα από το δείκτη συνέπειας Nash-Sutcliffe για τις έξι υπολεκάνες, όπως προέκυψαν από τα δύο υδρολογικά μοντέλα, για τα γεγονότα πολλαπλών συνθηκών πρότερης εδαφικής υγρασίας στις 26-30 Ιουνίου 2010 και στις 22-25 Ιουνίου 2017. Για το γεγονός με μικρότερο ύψος βροχής (26-30 Ιουνίου 2010), το HBV-light απέδωσε εμφανώς καλύτερο δείκτη NSE σε σχέση με το HEC-HMS. Το γεγονός με το μεγαλύτερο ύψος βροχής (22-25 Ιουνίου 2017) παρήγαγε ικανοποιητικούς δείκτες συνέπειας NSE και με τα δύο υδρολογικά μοντέλα.



Εικόνα 5-25. Θηκογράμματα από το δείκτη Nash-Sutcliffe για τις έξι υπολεκάνες, από τα δύο υδρολογικά μοντέλα, για τα γεγονότα στις 26-30 Ιουνίου 2010 και στις 22-25 Ιουνίου 2017.

Ο Πίνακας 5-16 και ο Πίνακας 5-17 παρουσιάζουν τους δείκτες σφάλματος συνολικού όγκου βροχής για κάθε υπολεκάνη για όλα τα εξεταζόμενα γεγονότα, όπως προκύπτουν από τις προσομοιώσεις με τα δύο υδρολογικά μοντέλα.

Πίνακας 5-16. Σφάλμα συνολικού όγκου βροχής ανά υπολεκάνη για τα εξεταζόμενα γεγονότα, με χρήση του υδρολογικού μοντέλου HEC-HMS.

Γεγονός	Σφάλμα συνολικού όγκου (%)					
	W1460	W790	W800	W900	W1030	W1020
28-30 Μαΐου 2013	-19.63	11.23	3.93	21.21	30.85	20.70
4-10 Ιουλίου 2013	-3.15	20.25	-14.27	31.69	5.00	5.45
7-15 Απριλίου 2013	-21.24	-13.85	-16.64	-11.94	-27.56	-7.22
30 Απριλίου-7 Μαΐου 2017	12.61	5.56	11.29	4.14	24.27	14.07
26-30 Ιουνίου 2010	-7.88	-0.51	-3.78	-19.85	30.50	-25.01
22-25 Ιουνίου 2017	-3.21	-17.91	0.55	-0.24	12.34	15.70

Πίνακας 5-17. Σφάλμα συνολικού όγκου βροχής ανά υπολεκάνη για τα εξεταζόμενα γεγονότα, με χρήση του υδρολογικού μοντέλου HBV-light.

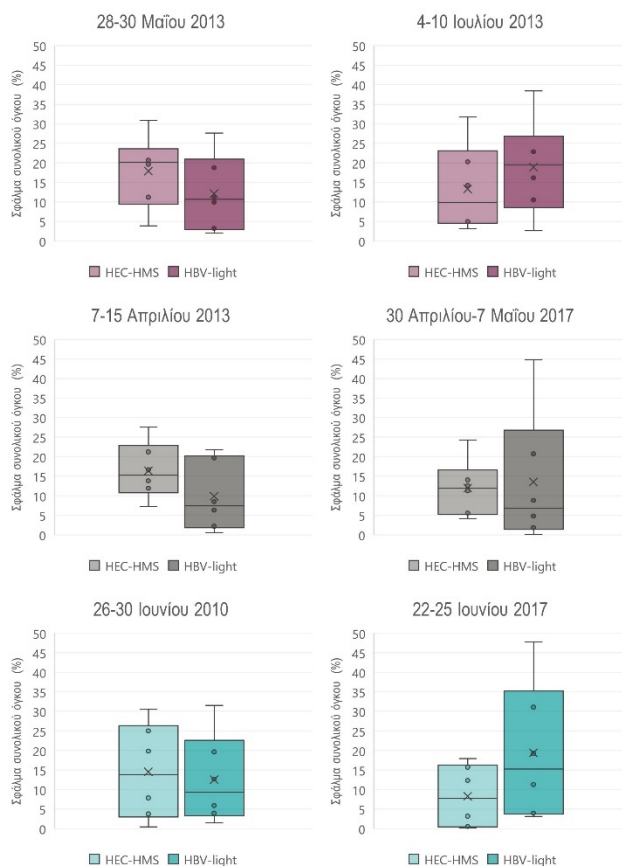
Γεγονός	Σφάλμα συνολικού όγκου (%)					
	W1460	W790	W800	W900	W1030	W1020
28-30 Μαΐου 2013	18.77	11.34	3.22	27.59	-2.09	9.96
4-10 Ιουλίου 2013	-10.55	-22.85	-38.36	-2.69	-22.90	-16.17
7-15 Απριλίου 2013	6.33	21.75	8.52	-0.58	-19.68	2.18
30 Απριλίου-7 Μαΐου 2017	-4.82	-20.75	-1.86	8.83	44.75	-0.14
26-30 Ιουνίου 2010	5.93	19.63	-1.50	31.50	-3.95	-12.66
22-25 Ιουνίου 2017	11.29	-47.73	-3.19	3.98	31.07	19.24

Ο Πίνακας 5-16 αφορά το δείκτη σφάλματος συνολικού όγκου (%) από την προσομοίωση με το υδρολογικό μοντέλο HEC-HMS, ο οποίος παρουσίασε χαμηλές τιμές για την πλειοψηφία των εξεταζόμενων γεγονότων ανά υπολεκάνη, που κυμαίνονταν από -27.56% έως 31.69%. Το μέσο σφάλμα συνολικού όγκου, κατ' απόλυτο τιμή, όλων των υπολεκανών ανά ζεύγος γεγονότων, για τα γεγονότα υψηλής έντασης ήταν ίσο με 15.6%, για τα γεγονότα διπλής υδρολογικής αιχμής ήταν ίσο με 14.2%, ενώ για τα γεγονότα πολλαπλών Σ.Π.Υ. εδάφους ήταν ίσο με 11.5%. Ανά υπολεκάνη, το μέσο απόλυτο σφάλμα συνολικού όγκου όλων των γεγονότων βροχόπτωσης ήταν ίσο με 11.3% για την W1460, 11.6% για την W790, 8.4% για την W800, 14.8% για την W900, 21.8% για την W1030, και 14.7% για την W1020.

Ο Πίνακας 5-17 από την άλλη, αφορά το δείκτη σφάλματος συνολικού όγκου (%) από την υδρολογική προσομοίωση με το μοντέλο HBV-light. Οι τιμές του κυμαίνονταν μεταξύ -47.73% και 44.75%. Το μέσο σφάλμα συνολικού όγκου, κατ' απόλυτο τιμή, όλων των υπολεκανών ανά ζεύγος γεγονότων, ήταν ίσο με 15.5% για τα γεγονότα υψηλής έντασης βροχής, ίσο με 11.7% για τα γεγονότα διπλής υδρολογικής αιχμής, ενώ ίσο με 16% για τα γεγονότα πολλαπλών Σ.Π.Υ. εδάφους. Συνεπώς, σε επίπεδο ταξινόμησης ανά ζεύγος

γεγονότων, και τα δύο μοντέλα απέδωσαν πολύ καλά. Ανά υπολεκάνη, το μέσο απόλυτο σφάλμα συνολικού όγκου όλων των γεγονότων βροχόπτωσης ήταν ίσο με 9.6% για την W1460, 24% για την W790, 9.4% για την W800, 12.5% για την W900, 20.7% για την W1030, και 10.1% για την W1020. Επομένως, σε επίπεδο υπολεκανών, πέραν των W790 και W800, στις υπόλοιπες τέσσερις υπολεκάνες το μοντέλο HBV-light απέδωσε λίγο καλύτερα απ' ό,τι το μοντέλο HEC-HMS, με το τελευταίο να αποδίδει επίσης καλά.

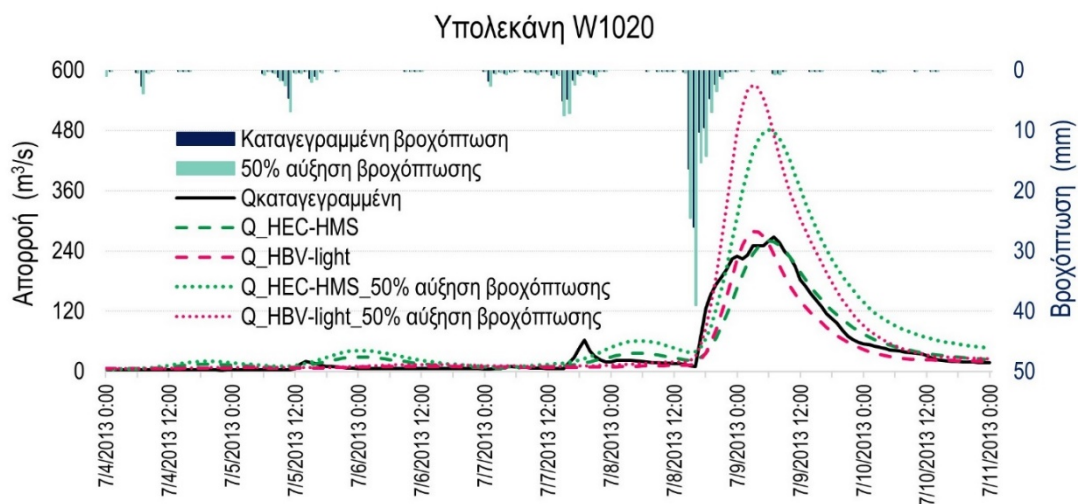
Στην **Εικόνα 5-26** παρουσιάζονται τα θηκογράμματα από το δείκτη σφάλματος συνολικού όγκου (%) για τις έξι υπολεκάνες, όπως προέκυψαν από την προσομοίωση με τα δύο υδρολογικά μοντέλα, για τα έξι μεμονωμένα γεγονότα βροχόπτωσης. Για τα γεγονότα με μικρότερο ύψος βροχής (28-30 Μαΐου 2013, 7-15 Απριλίου 2013, και 26-30 Ιουνίου 2010) σε σύγκριση με τα ζεύγη τους, το HBV-light απέδωσε μικρότερο δείκτη σφάλματος συνολικού όγκου (%) σε σχέση με το HEC-HMS. Τα γεγονότα με μεγαλύτερο ύψος βροχής (4-10 Ιουλίου 2013, 30 Απριλίου-7 Μαΐου 2017, και 22-25 Ιουνίου 2017) σε σύγκριση με τα ζεύγη τους, παρήγαγαν μικρότερο δείκτη σφάλματος συνολικού όγκου βροχής (%) με το HEC-HMS σε σχέση με το HBV-light.



Εικόνα 5-26. Θηκογράμματα από το δείκτη σφάλματος συνολικού όγκου (%) για τις έξι υπολεκάνες, από τα δύο υδρολογικά μοντέλα, για τα έξι μεμονωμένα γεγονότα βροχόπτωσης.

5.2.2 Υποθετικό σενάριο αύξησης της βροχόπτωσης του γεγονότος με το μεγαλύτερο συνολικά ύψος υετού

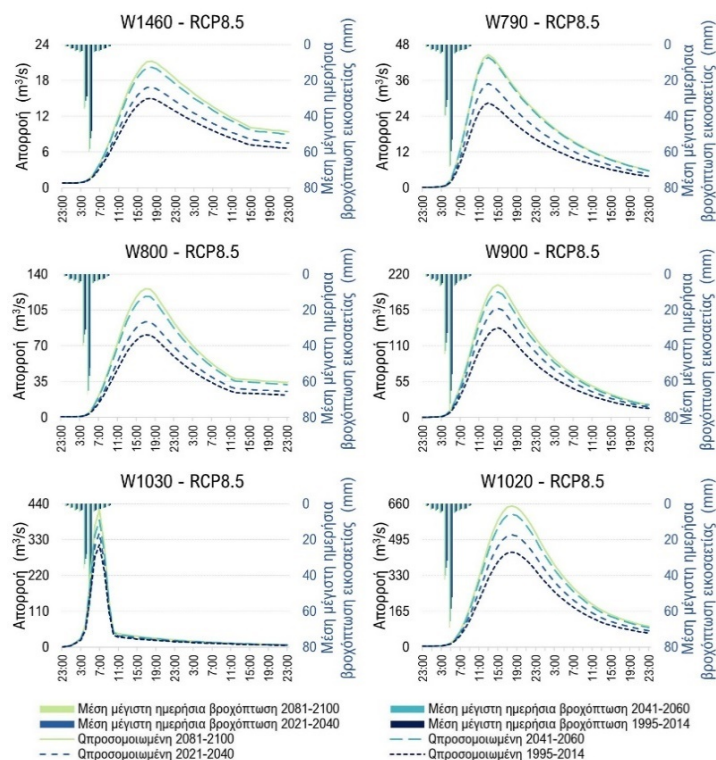
Εξετάστηκε ένα υποθετικό βροχοπτώτικό γεγονός, που βασίστηκε στο γεγονός υψηλής έντασης στις 4-10 Ιουλίου 2013, αυξάνοντας την αθροιστική καταγεγραμμένη βροχόπτωση του γεγονότος κατά 50%, λόγω της αναμενόμενης εντατικοποίησης των ισχυρών βροχοπτώσεων στον ανατολικό Καναδά στο μέλλον. Για το υποθετικό σενάριο χρησιμοποιήθηκαν οι βαθμονομημένες τιμές των παραμέτρων των δύο υδρολογικών μοντέλων που αντιστοιχούν σε γεγονότα υψηλής έντασης βροχής, για να διερευνηθεί η πιθανή αύξηση της μέγιστης προσομοιωμένης απορροής στην έξοδο της υπολεκάνης W1020, στην οποία καταλήγουν και τα νερά των υπολεκανών W1460, W790, W800, και W900. Η υποθετική αθροιστική βροχόπτωση ήταν 95.1 mm για την W1460, 123 mm για την W790, 122.4 mm για την W800, 115.8 mm για την W900, και 160.1 mm για την W1020, με αντίστοιχες τιμές της μέγιστης έντασης της βροχόπτωσης ίσες με 15 mm/h, 37.8 mm/h, 26.9 mm/h, 37.8 mm/h, και 39 mm/h. Η μέγιστη απορροή, για το υποθετικό σενάριο, στην έξοδο της υπολεκάνης W1020 προσομοιώθηκε στα 481 m³/s με το υδρολογικό μοντέλο HEC-HMS, και στα 571 m³/s με το μοντέλο HBV-light, προκαλώντας αύξηση κατά 85% και 105% αντίστοιχα, συγκριτικά με την προσομοιωμένη απορροή αιχμής του γεγονότος στις 4-10 Ιουλίου 2013 από τα δύο υδρολογικά μοντέλα. Τα προσομοιωμένα υδρογραφήματα φαίνονται στην [Εικόνα 5-27](#). Τα αποτελέσματα και από τα δύο μοντέλα υποδεικνύουν έναν δυνητικά υψηλό κίνδυνο για τις κατοικίες στην έξοδο της ημιαστικής υπολεκάνης W1020, γεγονός που επιβάλλει την ανάγκη περαιτέρω διερεύνησης με δεδομένα κλιματικών σεναρίων.



Εικόνα 5-27. Βροχόπτωση και προσομοιωμένα υδρογραφήματα με τα δύο υδρολογικά μοντέλα στην έξοδο της υπολεκάνης W1020 λόγω του γεγονότος στις 4-10/7/2013, καθώς και υποθετικού σεναρίου αύξησης της αθροιστικής βροχόπτωσης κατά 50%.

5.2.3 Αποτελέσματα υδρολογικού μοντέλου HEC-HMS για τα εξεταζόμενα γεγονότα των κλιματικών μοντέλων

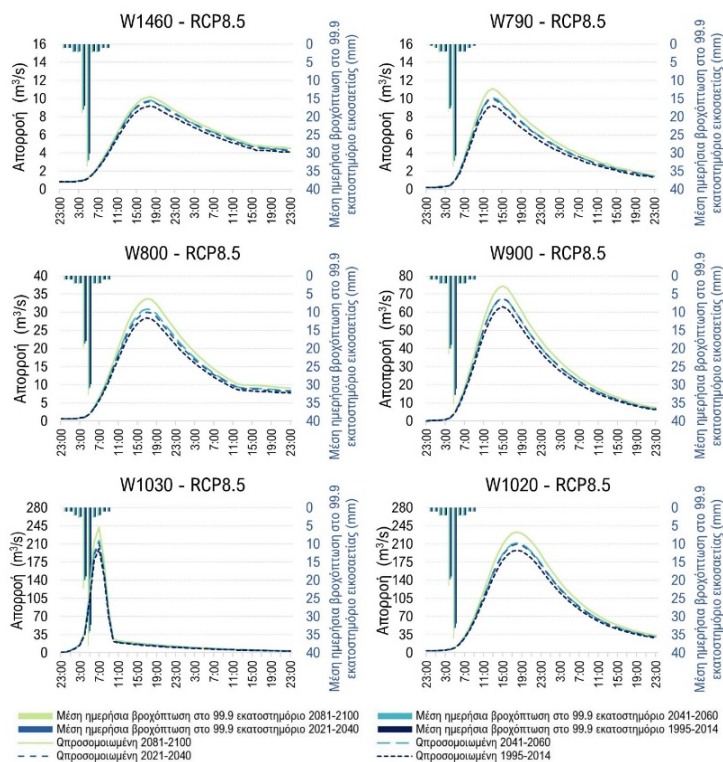
Η προσομοίωση με το υδρολογικό μοντέλο HEC-HMS, για το σενάριο θερμοκηπικών εκπομπών RCP8.5, της μέσης τιμής της μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης εικοσαετίας–από 24 κλιματικά μοντέλα–σε καθεμιά από τις έξι υπολεκάνες, παρήγαγε απορροή αιχμής για την περίοδο βάσης 1995-2014, ίση με 15 m³/s για την υπολεκάνη W1460, 28.4 m³/s για την W790, 80.7 m³/s για την W800, 137.5 m³/s για την W900, 314.5 m³/s για την W1030, και 437.1 m³/s για την υπολεκάνη W1020. Για το εγγύς μέλλον (2021-2040), παράχθηκε μέγιστη απορροή ίση με 16.9 m³/s για την υπολεκάνη W1460, 34.9 m³/s για την W790, 93.6 m³/s για την W800, 167.4 m³/s για την W900, 350.9 m³/s για την W1030, και 516.7 m³/s για την υπολεκάνη W1020. Για τη μεσοπρόθεσμη περίοδο 2041-2060, η απορροή αιχμής προσομοιώθηκε στα 20.2 m³/s για την υπολεκάνη W1460, 43.7 m³/s για την W790, 118.4 m³/s για την W800, 192.5 m³/s για την W900, 389.8 m³/s για την W1030, και 612 m³/s για την υπολεκάνη W1020. Μακροπρόθεσμα (2081-2100), το υδρολογικό μοντέλο παρήγαγε μέγιστη απορροή ίση με 21.2 m³/s για την υπολεκάνη W1460, 44.6 m³/s για την W790, 125.8 m³/s για την W800, 203.5 m³/s για την W900, 422.8 m³/s για την W1030, και 650.3 m³/s για την υπολεκάνη W1020. Τα αποτελέσματα των υδρολογικών προσομοιώσεων για τα γεγονότα που αφορούν τις μέσες τιμές μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης εικοσαετίας από 24 κλιματικά μοντέλα, για το σενάριο RCP8.5 και για τέσσερις εικοσαετίες, στην έξοδο των έξι υπολεκανών, παρουσιάζονται στην [Εικόνα 5-28](#).



Εικόνα 5-28. Κατανομές για τις μέσες τιμές μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης—από 24 κλιματικά μοντέλα—για τις εικοσαετίες 2081-2100, 2041-2060, 2021-2040, και 1995-2014, για το σενάριο RCP8.5, και προσομοιωμένα υδρογραφήματα, στην έξοδο των έξι υπολεκανών.

Η προσομοίωση της μέσης τιμής της ημερήσιας βροχόπτωσης εικοσαετίας που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο—από 24 κλιματικά μοντέλα—στις έξι υπολεκάνες με το υδρολογικό μοντέλο HEC-HMS, για το σενάριο RCP8.5, παρήγαγε μέγιστη απορροή για την περίοδο αναφοράς 1995-2014, ίση με $9.2 \text{ m}^3/\text{s}$ για την υπολεκάνη W1460, $9.2 \text{ m}^3/\text{s}$ για την W790, $28.4 \text{ m}^3/\text{s}$ για την W800, $63 \text{ m}^3/\text{s}$ για την W900, $200.9 \text{ m}^3/\text{s}$ για την W1030, και $198 \text{ m}^3/\text{s}$ για την υπολεκάνη W1020. Βραχυπρόθεσμα (2021-2040), το μοντέλο παρήγαγε απορροή αιχμής ίση με $9.7 \text{ m}^3/\text{s}$ για την υπολεκάνη W1460, $10 \text{ m}^3/\text{s}$ για την W790, $30 \text{ m}^3/\text{s}$ για την W800, $67.5 \text{ m}^3/\text{s}$ για την W900, $212.8 \text{ m}^3/\text{s}$ για την W1030, και $209.6 \text{ m}^3/\text{s}$ για την υπολεκάνη W1020. Μεσοπρόθεσμα (2041-2060), η μέγιστη απορροή προσομοιώθηκε στα $9.8 \text{ m}^3/\text{s}$ για την υπολεκάνη W1460, $10.1 \text{ m}^3/\text{s}$ για την W790, $30.9 \text{ m}^3/\text{s}$ για την W800, $67.6 \text{ m}^3/\text{s}$ για την W900, $216.8 \text{ m}^3/\text{s}$ για την W1030, και $211.8 \text{ m}^3/\text{s}$ για την υπολεκάνη W1020. Για τη μακροπρόθεσμη περίοδο 2081-2100, παράχθηκε απορροή αιχμής ίση με $10.2 \text{ m}^3/\text{s}$ για την υπολεκάνη W1460, $11.1 \text{ m}^3/\text{s}$ για την W790, $33.7 \text{ m}^3/\text{s}$ για την W800, $74.5 \text{ m}^3/\text{s}$ για την W900, $242 \text{ m}^3/\text{s}$ για την W1030, και $232.8 \text{ m}^3/\text{s}$ για την υπολεκάνη W1020. Οι κατανομές βροχής και τα προσομοιωμένα υδρογραφήματα για τα γεγονότα που αφορούν τις μέσες τιμές ημερήσιας βροχόπτωσης

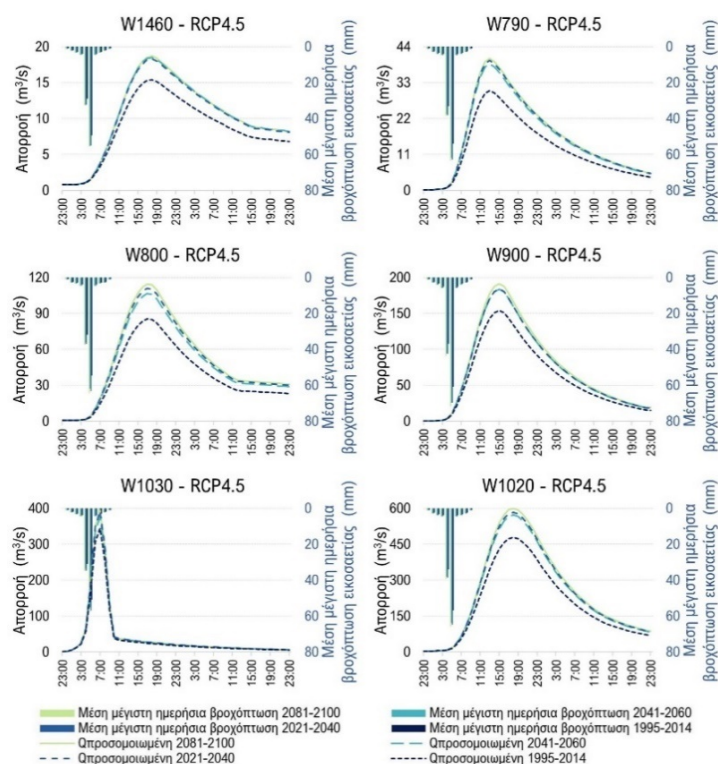
που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας από 24 κλιματικά μοντέλα, για το σενάριο RCP8.5 και για τέσσερις εικοσαετίες, στην έξοδο των έξι υπολεκανών, φαίνονται στην [Εικόνα 5-29](#).



Εικόνα 5-29. Κατανομές για τις μέσες τιμές–από 24 κλιματικά μοντέλα–ημερήσιας βροχόπτωσης που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο για τις εικοσαετίες 2081-2100, 2041-2060, 2021-2040, και 1995-2014, για το σενάριο RCP8.5, και προσομοιωμένα υδρογραφήματα, στην έξοδο των έξι υπολεκανών.

Για το σενάριο εκπομπών θερμοκηπικών αερίων RCP4.5, η υδρολογική προσομοίωση με το μοντέλο HEC-HMS, της μέσης τιμής της μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης εικοσαετίας–από 24 κλιματικά μοντέλα–σε καθεμιά από τις έξι υπολεκάνες, παρήγαγε απορροή αιχμής για την εικοσαετία βάσης 1995-2014, ίση με 15.4 m³/s για την υπολεκάνη W1460, 30.5 m³/s για την W790, 85.3 m³/s για την W800, 153.9 m³/s για την W900, 344 m³/s για την W1030, και 477.9 m³/s για την υπολεκάνη W1020. Για το εγγύς μέλλον (2021-2040), παράχθηκε μέγιστη απορροή ίση με 18.3 m³/s για την υπολεκάνη W1460, 39.8 m³/s για την W790, 110.8 m³/s για την W800, 184 m³/s για την W900, 392.1 m³/s για την W1030, και 582.9 m³/s για την υπολεκάνη W1020. Παρόμοιες απορροές αιχμής προσομοιώθηκαν για τη μεσοπρόθεσμη περίοδο 2041-2060, στα 18.5 m³/s για την υπολεκάνη W1460, 38.7 m³/s για την W790, 106.5 m³/s για την W800, 183.6 m³/s για την W900, 376.4 m³/s για την W1030, και 572.1 m³/s για την υπολεκάνη W1020. Μακροπρόθεσμα (2081-2100), το υδρολογικό μοντέλο παρήγαγε μέγιστη

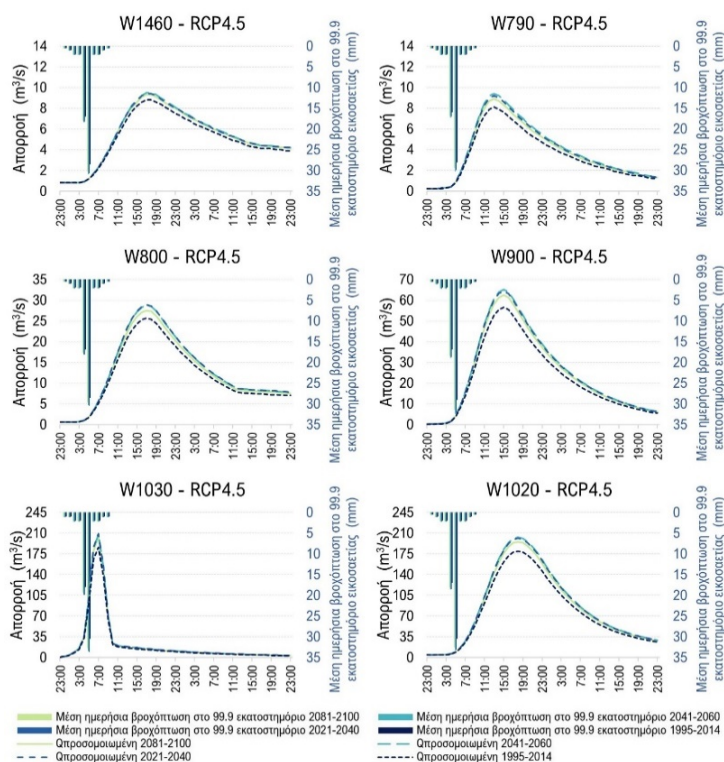
απορροή ίση με $18.7 \text{ m}^3/\text{s}$ για την υπολεκάνη W1460, $40.4 \text{ m}^3/\text{s}$ για την W790, $114.4 \text{ m}^3/\text{s}$ για την W800, $191.2 \text{ m}^3/\text{s}$ για την W900, $393.7 \text{ m}^3/\text{s}$ για την W1030, και $599.2 \text{ m}^3/\text{s}$ για την υπολεκάνη W1020. Τα αποτελέσματα των υδρολογικών προσομοιώσεων για τις μέσες τιμές 24 κλιματικών μοντέλων της μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης εικοσαετίας με ωριαία κατανομή, για το σενάριο RCP4.5 και για τέσσερις εικοσαετίες, στην έξοδο των έξι υπολεκανών, παρουσιάζονται στην **Εικόνα 5-30**.



Εικόνα 5-30. Κατανομές για τις μέσες τιμές μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης–από 24 κλιματικά μοντέλα–για τις εικοσαετίες 2081-2100, 2041-2060, 2021-2040, και 1995-2014, για το σενάριο RCP4.5, και προσομοιωμένα υδρογραφήματα, στην έξοδο των έξι υπολεκανών.

Για το σενάριο RCP4.5, η υδρολογική προσομοίωση της μέσης τιμής 24 κλιματικών μοντέλων της ημερήσιας βροχόπτωσης εικοσαετίας που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο, στις έξι υπολεκάνες με το μοντέλο HEC-HMS, παρήγαγε μέγιστη απορροή για την εικοσαετία αναφοράς 1995-2014, ίση με $8.8 \text{ m}^3/\text{s}$ για την υπολεκάνη W1460, $8.1 \text{ m}^3/\text{s}$ για την W790, $25.7 \text{ m}^3/\text{s}$ για την W800, $56.5 \text{ m}^3/\text{s}$ για την W900, $186.2 \text{ m}^3/\text{s}$ για την W1030, και $179.4 \text{ m}^3/\text{s}$ για την υπολεκάνη W1020. Βραχυπρόθεσμα (2021-2040), το μοντέλο παρήγαγε απορροή αιχμής ίση με $9.4 \text{ m}^3/\text{s}$ για την υπολεκάνη W1460, $9.2 \text{ m}^3/\text{s}$ για την W790, $28.9 \text{ m}^3/\text{s}$ για την W800, $64.4 \text{ m}^3/\text{s}$ για την W900, $209.3 \text{ m}^3/\text{s}$ για την W1030, και $201.4 \text{ m}^3/\text{s}$ για την υπολεκάνη W1020. Μεσοπρόθεσμα (2041-2060), η μέγιστη απορροή προσομοιώθηκε σε παρόμοια επίπεδα με τη βραχυπρόθεσμη περίοδο,

συγκεκριμένα στα $9.5 \text{ m}^3/\text{s}$ για την υπολεκάνη W1460, $9.4 \text{ m}^3/\text{s}$ για την W790, $28.8 \text{ m}^3/\text{s}$ για την W800, $65.2 \text{ m}^3/\text{s}$ για την W900, $207.6 \text{ m}^3/\text{s}$ για την W1030, και $203.1 \text{ m}^3/\text{s}$ για την υπολεκάνη W1020. Για τη μακροπρόθεσμη περίοδο 2081-2100, παράχθηκε απορροή αιχμής ίση με $9.3 \text{ m}^3/\text{s}$ για την υπολεκάνη W1460, $8.9 \text{ m}^3/\text{s}$ για την W790, $27.5 \text{ m}^3/\text{s}$ για την W800, $62.5 \text{ m}^3/\text{s}$ για την W900, $202.5 \text{ m}^3/\text{s}$ για την W1030, και $195.5 \text{ m}^3/\text{s}$ για την υπολεκάνη W1020. Οι κατανομές βροχόπτωσης σε ωριαίο βήμα, καθώς και τα προσομοιωμένα υδρογραφήματα για τα γεγονότα που αφορούν τις μέσες τιμές ημερήσιας βροχής που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας από 24 κλιματικά μοντέλα, για το σενάριο RCP4.5 και για τέσσερις εικοσαετίες, στην έξοδο των έξι υπολεκανών, φαίνονται στην [Εικόνα 5-31](#).



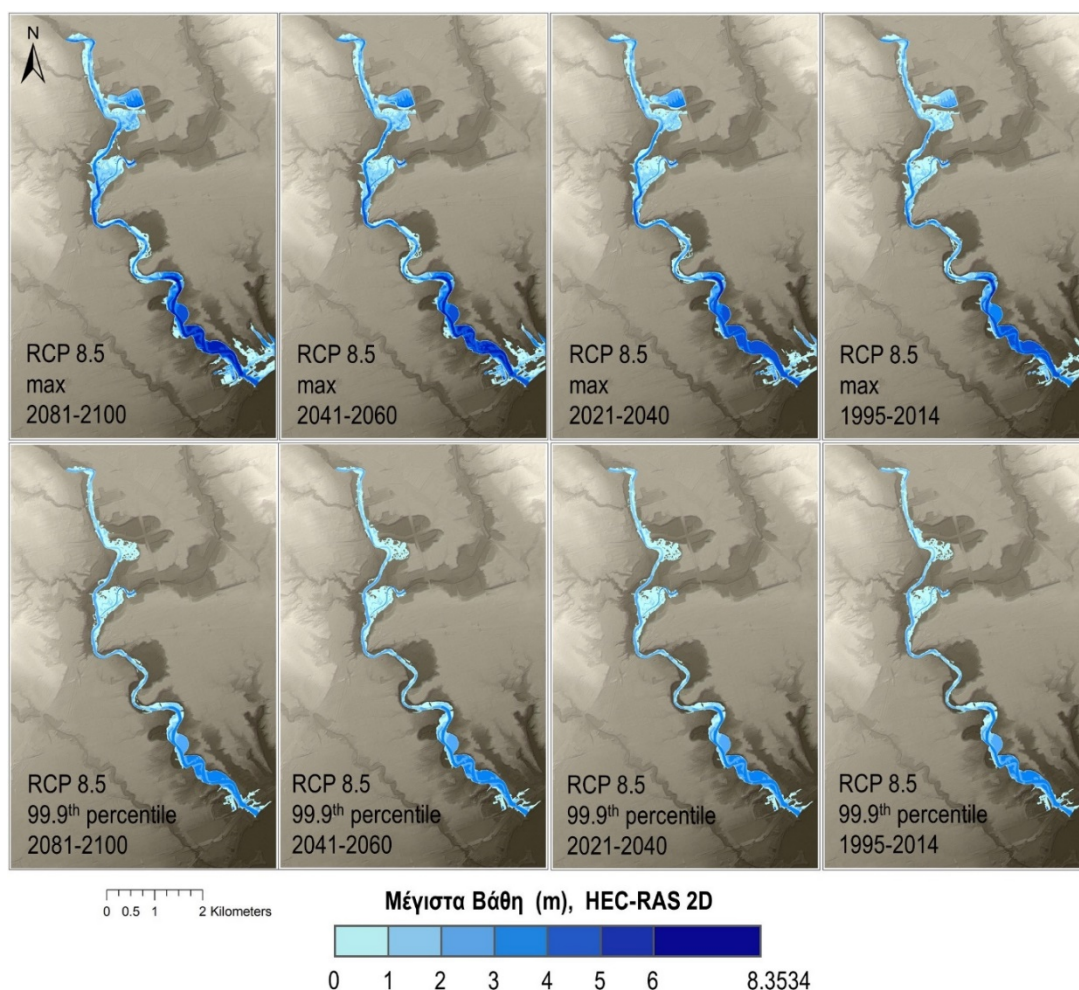
Εικόνα 5-31. Κατανομές για τις μέσες τιμές–από 24 κλιματικά μοντέλα–ημερήσιας βροχόπτωσης που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο για τις εικοσαετίες 2081-2100, 2041-2060, 2021-2040, και 1995-2014, για το σενάριο RCP4.5, και προσομοιωμένα υδρογραφήματα, στην έξοδο των έξι υπολεκανών.

5.2.4 Αποτελέσματα υδραυλικού μοντέλου 2D HEC-RAS για το σενάριο RCP8.5

Χρησιμοποιώντας το DTM υψηλής ανάλυσης $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$, για το σενάριο θερμοκηπικών εκπομπών RCP8.5, παράχθηκαν λεπτομερείς χάρτες πλημμύρας στο κάτω τμήμα του ποταμού Humber που εκβάλλει στη λίμνη Οντάριο, διασχίζοντας την πόλη του Τορόντο, με το υδραυλικό μοντέλο 2D HEC-RAS. Οι χάρτες αφορούν τα προσομοιωμένα μέγιστα πλημμυρικά βάθη στις πλημμυρισμένες επιφάνειες ([Εικόνα 5-32](#)), τις μέγιστες

ταχύτητες του πλημμυρικού κύματος ([Εικόνα 5-35](#)), και τους χρόνους άφιξης των μέγιστων πλημμυρικών βαθών στις πλημμυρικές πεδιάδες ([Εικόνα 5-36](#)), λόγω των γεγονότων που αφορούν τη μέση τιμή της μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης εικοσαετίας–από 24 κλιματικά μοντέλα–και της ημερήσιας βροχόπτωσης που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας, για τις εικοσαετίες 2081-2100, 2041-2060, 2021-2040, και 1995-2014. Επιπρόσθετα, για τις εξεταζόμενες βροχοπτώσεις και το σενάριο RCP8.5, αναπαρίσταται η μέγιστη στάθμη του νερού στα ανάντη και κατάντη των θέσεων των γεφυρών #1, #2, #3, και #4 στην [Εικόνα 5-33](#), καθώς και των γεφυρών #5, #6, #7, και #8 στην [Εικόνα 5-34](#).

Όπως φαίνεται στην [Εικόνα 5-32](#), υπήρχαν διαφοροποιήσεις στη μέγιστη πλημμυρισμένη επιφάνεια για τη μέση τιμή των γεγονότων μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης εικοσαετίας, από 2.43 km² για την περίοδο βάσης (1995-2014), έως 2.91 km² για τη μακροπρόθεσμη περίοδο (2081-2100), ενώ παράχθηκε εξάπλωση της πλημμυρικής έκτασης σημαντικά εκτός κοίτης κατά το τελευταίο km του ποταμού πριν την εκβολή του. Για τη μέση τιμή των ημερήσιων βροχοπτώσεων που αντιστοιχούν στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας, οι μέγιστες πλημμυρισμένες επιφάνειες δε διέφεραν σημαντικά κατά τις εικοσαετίες, με την έκταση να κυμαίνεται από 1.71 km² για την περίοδο 1995-2014, έως 1.82 km² για την περίοδο 2081-2100. Για το σενάριο RCP8.5 και τη μέση τιμή μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης εικοσαετίας από τα 24 κλιματικά μοντέλα, με το 2D μοντέλο προσομοιώθηκε μέγιστο πλημμυρικό βάθος ίσο με 7.64 m κατά την περίοδο βάσης 1995-2014, 7.9 m στο εγγύς μέλλον 2021-2040, 8.21 m μεσοπρόθεσμα (2041-2060), και 8.35 m κατά την περίοδο 2081-2100. Για το σενάριο RCP8.5 και τη μέση τιμή ημερήσιας βροχόπτωσης που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας, με το 2D υδραυλικό μοντέλο προσομοιώθηκαν παρόμοια μέγιστα πλημμυρικά βάθη κατά τις περιόδους 1995-2014, 2021-2040, και 2041-2060, ίσα με 6.4 m, 6.47 m, και 6.49 m αντίστοιχα, ενώ μακροπρόθεσμα (2081-2100) το μέγιστο πλημμυρικό βάθος προσομοιώθηκε στα 6.63 m. Για όλα τα εξεταζόμενα γεγονότα κλιματικής αλλαγής, προσομοιώθηκαν σημαντικά βάθη εντός της ποτάμιας κοίτης κατά τα τελευταία 4 km πριν την εκβολή του ποταμού στη λίμνη Οντάριο. Σε αυτό το μήκος παράχθηκαν βάθη μεγαλύτερα από 4.5 m από τη μέση τιμή των γεγονότων μέγιστης ημερήσιας βροχής εικοσαετίας, και μεγαλύτερα από 3 m από τη μέση τιμών των γεγονότων ημερήσιας βροχής που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας.



Εικόνα 5-32. Μέγιστα πλημμυρικά βάθη βάσει των υδρογραφημάτων που προέκυψαν από τις μέσες τιμές βροχόπτωσης—από 24 κλιματικά μοντέλα—των μέγιστων ημερήσιων γεγονότων και των ημερήσιων γεγονότων που αντιστοιχούν στο 99.9 εκατοστημόριο για τις εικοσαετίες 2081-2100, 2041-2060, 2021-2040, και 1995-2014, για το σενάριο RCP8.5, με το 2D HEC-RAS.

Όπως φαίνεται στην [Εικόνα 5-33](#), στη γέφυρα #1 (Eglinton Avenue West), η προσομοίωση των γεγονότων κλιματικής αλλαγής με το 2D υδραυλικό μοντέλο για το σενάριο RCP8.5, παρήγαγε μέγιστες στάθμες νερού χαμηλότερα από το κατάστρωμα της γέφυρας, τόσο στα ανάντη όσο και στα κατάντη. Για τη μέση τιμή μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης εικοσαετίας από τα 24 κλιματικά μοντέλα παράχθηκε αύξηση της μέγιστης στάθμης νερού κατά τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 συγκριτικά με την περίοδο βάσης (1995-2014), κατά 0.17 m, 0.36 m, και 0.43 m αντίστοιχα στην ανάντη όψη της γέφυρας #1, ενώ στην κατάντη όψη προσομοιώθηκαν αυξήσεις κατά 0.14 m, 0.28 m, και 0.34 m αντίστοιχα. Για τη μέση τιμή—24 κλιματικών μοντέλων—της ημερήσιας βροχής που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας, προσομοιώθηκαν μικρές αυξήσεις της μέγιστης στάθμης νερού για τις 3 μελλοντικές

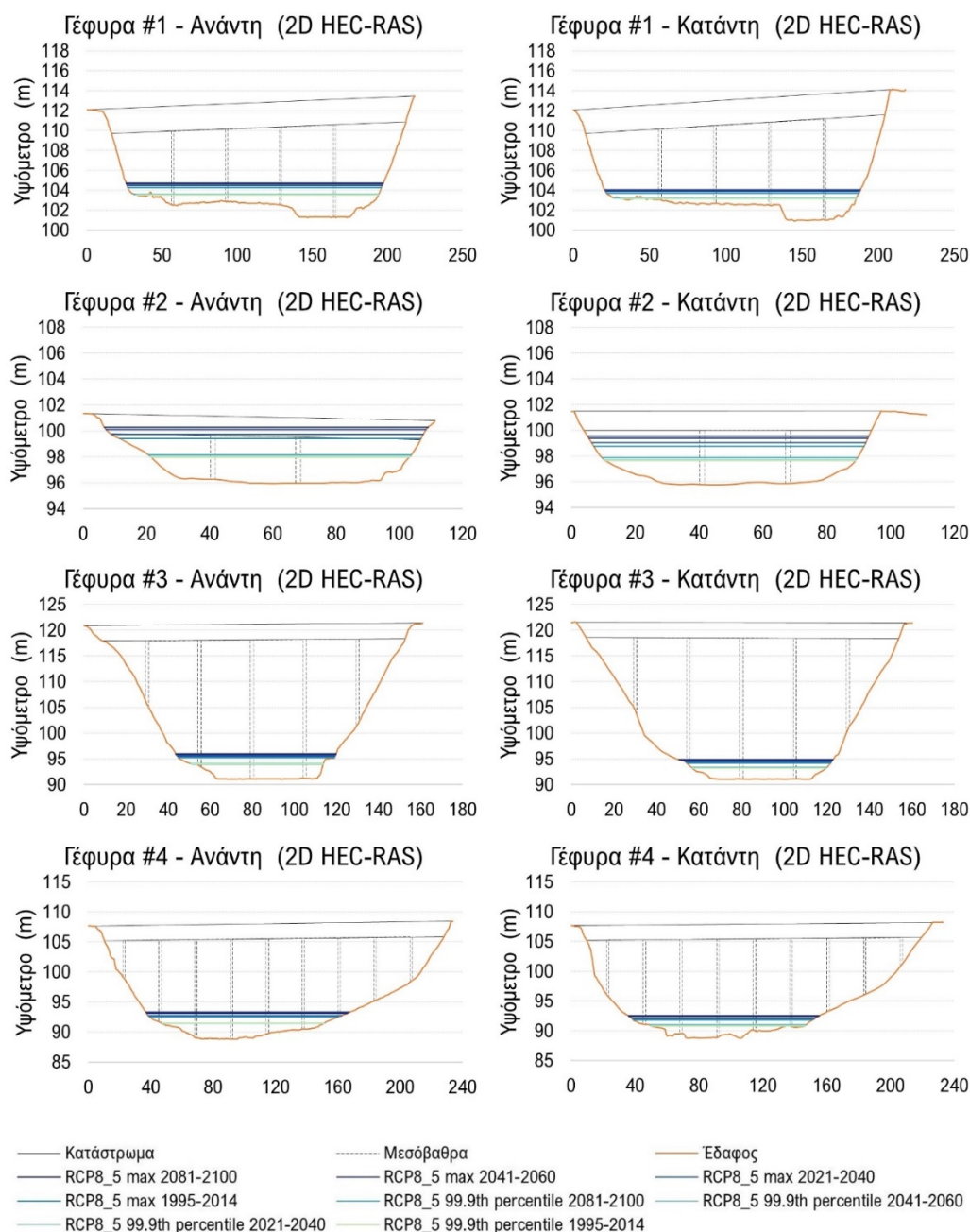
εικοσαετίες σε σύγκριση με την περίοδο βάσης, από 0.04 m έως 0.12 m στα ανάντη της γέφυρας #1, και από 0.04 m έως 0.11 m στα κατάντη.

Στα ανάντη της γέφυρας #2 (Scarlett Road), για το σενάριο RCP8.5 και τη μέση τιμή μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης εικοσαετίας 24 κλιματικών μοντέλων, με το 2D υδραυλικό μοντέλο προσομοιώθηκε αύξηση της μέγιστης στάθμης νερού κατά 0.32 m, 0.69 m, και 0.87 m, κατά τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 αντίστοιχα, σε σύγκριση με την εικοσαετία βάσης (1995-2014). Ειδικότερα, κατά τη μεσοπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη περίοδο, η μέγιστη στάθμη νερού ξεπέρασε την κάτω παρειά της ανωδομής της γέφυρας. Στα κατάντη της γέφυρας #2 προσομοιώθηκαν αυξήσεις στη μέγιστη στάθμη νερού για τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 σε σχέση με την εικοσαετία αναφοράς, κατά 0.28 m, 0.6 m, και 0.76 m αντίστοιχα, ωστόσο δεν ξεπέρασαν το υψόμετρο της κάτω παρειάς της ανωδομής. Για το σενάριο RCP8.5 και τη μέση τιμή ημερήσιας βροχής–24 κλιματικών μοντέλων–που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας, με το 2D υδραυλικό μοντέλο προσομοιώθηκαν αυξήσεις της μέγιστης στάθμης νερού για τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 συγκριτικά με την περίοδο 1995-2014, κατά 0.07 m, 0.08 m, και 0.21 m αντίστοιχα στα ανάντη της γέφυρας #2, ενώ στα κατάντη παράχθηκαν αυξήσεις κατά 0.07 m, 0.08 m, και 0.2 m αντίστοιχα.

Στη γέφυρα #3 (Lambton Canadian Pacific Railway Bridge), από την υδραυλική προσομοίωση των εξεταζόμενων γεγονότων με το 2D μοντέλο για το σενάριο RCP8.5, παράχθηκαν μέγιστες στάθμες νερού χαμηλότερα από το κατάστρωμα της γέφυρας, τόσο στα ανάντη όσο και στα κατάντη. Για τη μέση τιμή μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης εικοσαετίας από τα 24 κλιματικά μοντέλα, προσομοιώθηκε αύξηση της μέγιστης στάθμης νερού για τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 συγκριτικά με την περίοδο βάσης, κατά 0.23 m, 0.56 m, και 0.72 m αντίστοιχα στην ανάντη όψη της γέφυρας #3, ενώ στην κατάντη όψη παράχθηκαν αυξήσεις κατά 0.26 m, 0.53 m, και 0.66 m αντίστοιχα. Για τη μέση τιμή–από 24 κλιματικά μοντέλα–ημερήσιας βροχόπτωσης που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας, προσομοιώθηκαν μικρές μειώσεις της μέγιστης στάθμης νερού στα ανάντη της γέφυρας #3 σε σύγκριση με την περίοδο 1995-2014, κατά 0.02 m, και 0.06 m, για τις εικοσαετίες 2021-2040, και 2041-2060, ενώ παράχθηκε μικρή αύξηση κατά 0.09 m κατά την περίοδο 2081-2100. Στα

κατάντη παράχθηκαν μικρές αυξήσεις, κατά 0.05 m, 0.06 m, και 0.15 m, για τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 αντίστοιχα, σε σχέση με την εικοσαετία βάσης.

Για τη γέφυρα #4 (Dundas Street West), η προσομοίωση των γεγονότων κλιματικής αλλαγής με το 2D υδραυλικό μοντέλο για το σενάριο RCP8.5, παρήγαγε μέγιστες στάθμες νερού χαμηλότερα από την ανωδομή της γέφυρας, τόσο στην ανάντη όσο και στην κατάντη όψη της γέφυρας. Για τη μέση τιμή μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης εικοσαετίας από τα 24 κλιματικά μοντέλα, παράχθηκε αύξηση της μέγιστης στάθμης νερού κατά τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 σε σύγκριση με την εικοσαετία βάσης (1995-2014), κατά 0.27 m, 0.62 m, και 0.81 m αντίστοιχα στα ανάντη της γέφυρας #4, ενώ στα κατάντη προσομοιώθηκαν αυξήσεις κατά 0.26 m, 0.59 m, και 0.75 m αντίστοιχα. Για τη μέση τιμή ημερήσιας βροχής–24 κλιματικών μοντέλων–που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας, προσομοιώθηκαν μικρές μειώσεις στη μέγιστη στάθμη νερού στα ανάντη της γέφυρας #4 σε σχέση με την περίοδο βάσης, κατά μόλις 0.03 m, και 0.04 m, για τις περιόδους 2021-2040, και 2041-2060, ενώ παράχθηκε μικρή αύξηση κατά 0.05 m για την περίοδο 2081-2100. Στα κατάντη παράχθηκαν μικρές αυξήσεις, κατά 0.04 m, 0.05 m, και 0.16 m, για τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 αντίστοιχα, σε σχέση με την περίοδο αναφοράς.



Εικόνα 5-33. Μέγιστη στάθμη νερού βάσει των υδρογραφημάτων που προέκυψαν από τις μέσες τιμές βροχόπτωσης—από 24 κλιματικά μοντέλα—των μέγιστων ημερήσιων γεγονότων και των ημερήσιων γεγονότων που αντιστοιχούν στο 99.9 εκατοστημόριο για τις εικοσαετίες 2081-2100, 2041-2060, 2021-2040, και 1995-2014, για το σενάριο RCP8.5, στα ανάντη και κατάντη των θέσεων των γεφυρών #1, #2, #3, και #4, με το 2D HEC-RAS.

Όπως φαίνεται στην [Εικόνα 5-34](#), για το σενάριο RCP8.5 και τη μέση τιμή μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης εικοσαετίας από τα 24 κλιματικά μοντέλα, στα ανάντη της γέφυρας #5 (Old Mill Road), με το 2D υδραυλικό μοντέλο, προσομοιώθηκε αύξηση στη μέγιστη στάθμη νερού κατά 0.32 m για την περίοδο 2021-2040, και μεγάλη αύξηση κατά 0.71 m, και 0.89 m, για τις περιόδους 2041-2060, και 2081-2100, συγκριτικά με την περίοδο βάσης. Επιπλέον, κατά τη μακροπρόθεσμη περίοδο, η μέγιστη στάθμη νερού

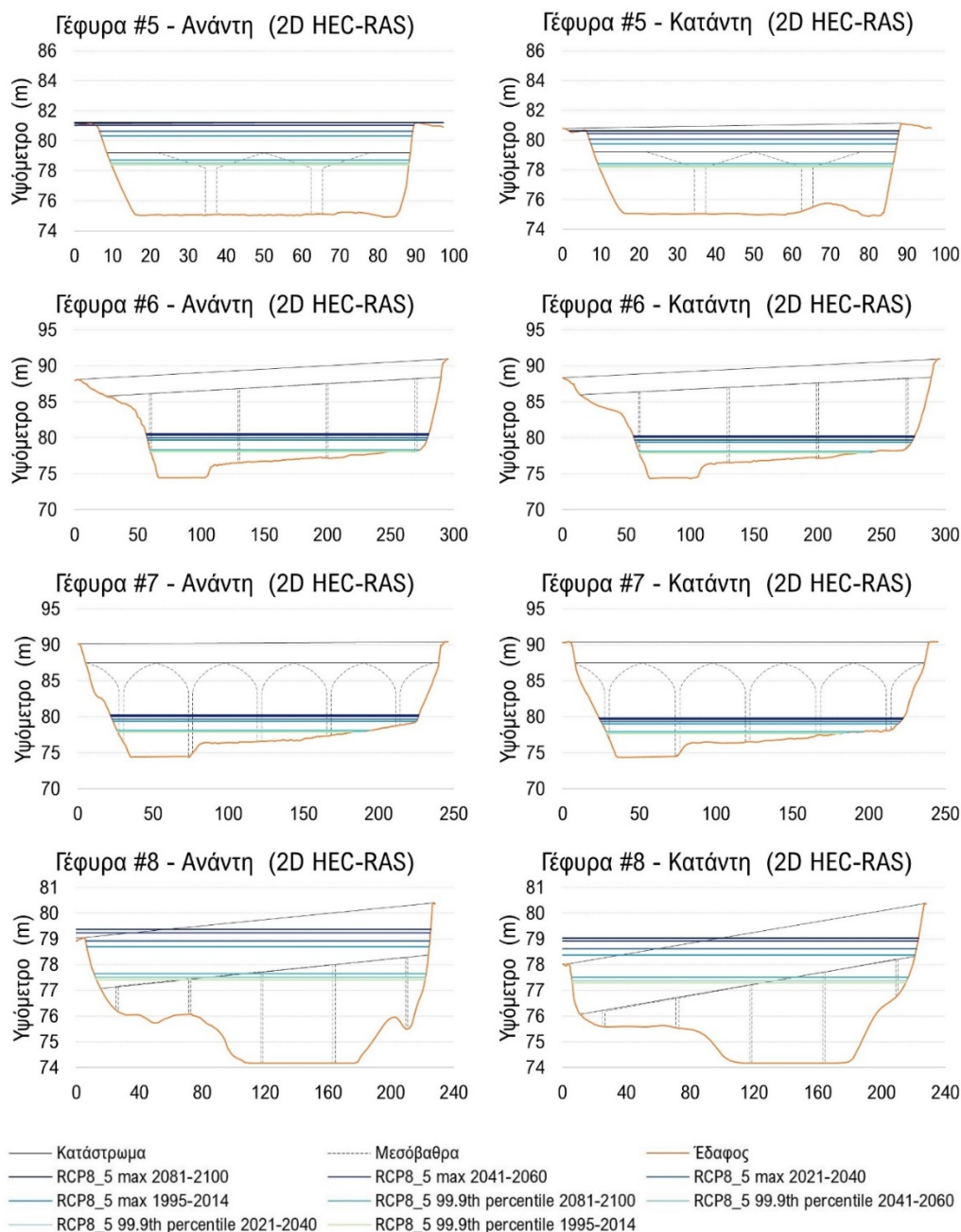
ξεπέρασε την άνω παρειά του καταστρώματος της γέφυρας κατά 0.06 m, ενώ και για τις 4 εικοσαετίες ξεπέρασε την κάτω παρειά της ανωδομής. Στα κατάντη της γέφυρας #5 προσομοιώθηκαν αυξήσεις στη μέγιστη στάθμη νερού για τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100, κατά 0.32 m, 0.69 m, και 0.87 m αντίστοιχα, σε σχέση με την περίοδο 1995-2014. Συγχρόνως, και για τις 4 εικοσαετίες, η μέγιστη στάθμη νερού ξεπέρασε την κάτω παρειά της ανωδομής. Για το σενάριο RCP8.5 και τη μέση τιμή–24 κλιματικών μοντέλων–ημερήσιας βροχής που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας, με το 2D μοντέλο παράχθηκαν αυξήσεις της μέγιστης στάθμης νερού για τις εικοσαετίες 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 σε σύγκριση με την περίοδο 1995-2014, κατά 0.08 m, 0.1 m, και 0.32 m αντίστοιχα στα ανάντη της γέφυρας #5, ενώ στα κατάντη προσομοιώθηκαν αυξήσεις κατά 0.08 m, 0.1 m, και 0.24 m αντίστοιχα.

Για τη γέφυρα #6 (Old Mill Subway Station Bridge), η προσομοίωση των γεγονότων κλιματικής αλλαγής με το 2D υδραυλικό μοντέλο για το σενάριο RCP8.5, παρήγαγε μέγιστες στάθμες νερού χαμηλότερα από το κατάστρωμα της γέφυρας, τόσο στην ανάντη όσο και στην κατάντη όψη της γέφυρας. Για τη μέση τιμή μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης εικοσαετίας από τα 24 κλιματικά μοντέλα, παράχθηκε αύξηση της μέγιστης στάθμης νερού για τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 συγκριτικά με την περίοδο βάσης, κατά 0.33 m, 0.7 m, και 0.88 m αντίστοιχα στα ανάντη της γέφυρας #6, ενώ στα κατάντη παράχθηκαν αυξήσεις κατά 0.31 m, 0.68 m, και 0.85 m αντίστοιχα. Για τη μέση τιμή–από 24 κλιματικά μοντέλα–ημερήσιας βροχής που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας, προσομοιώθηκαν αυξήσεις της μέγιστης στάθμης νερού για τις εικοσαετίες 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 σε σύγκριση με την περίοδο 1995-2014, κατά 0.09 m, 0.1 m, και 0.25 m αντίστοιχα στα ανάντη της γέφυρας #6, ενώ στην κατάντη όψη παράχθηκαν αυξήσεις κατά 0.08 m, 0.1 m, και 0.24 m αντίστοιχα.

Στη γέφυρα #7 (Bloor Street Humber River Bridge), από την υδραυλική προσομοίωση των εξεταζόμενων γεγονότων με το 2D μοντέλο για το σενάριο RCP8.5, η μέγιστη στάθμη νερού ήταν χαμηλότερα από την ανωδομή της γέφυρας, τόσο στα ανάντη όσο και στα κατάντη. Για τη μέση τιμή–24 κλιματικών μοντέλων–της μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης εικοσαετίας παράχθηκε αύξηση της μέγιστης στάθμης νερού κατά τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 σε σύγκριση με την εικοσαετία βάσης, κατά 0.31 m, 0.67 m, και 0.85 m αντίστοιχα στην ανάντη όψη της γέφυρας #7, ενώ στην

κατάντη όψη προσομοιώθηκαν αυξήσεις κατά 0.29 m, 0.64 m, και 0.8 m αντίστοιχα. Για τη μέση τιμή ημερήσιας βροχής–24 κλιματικών μοντέλων–που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας, η προσομοίωση παρήγαγε αυξήσεις στη μέγιστη στάθμη νερού για τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 σε σχέση με την περίοδο βάσης, κατά 0.08 m, 0.1 m, και 0.25 m αντίστοιχα στα ανάντη της γέφυρας #7, ενώ στα κατάντη παράχθηκαν αυξήσεις κατά 0.08 m, 0.09 m, και 0.24 m αντίστοιχα.

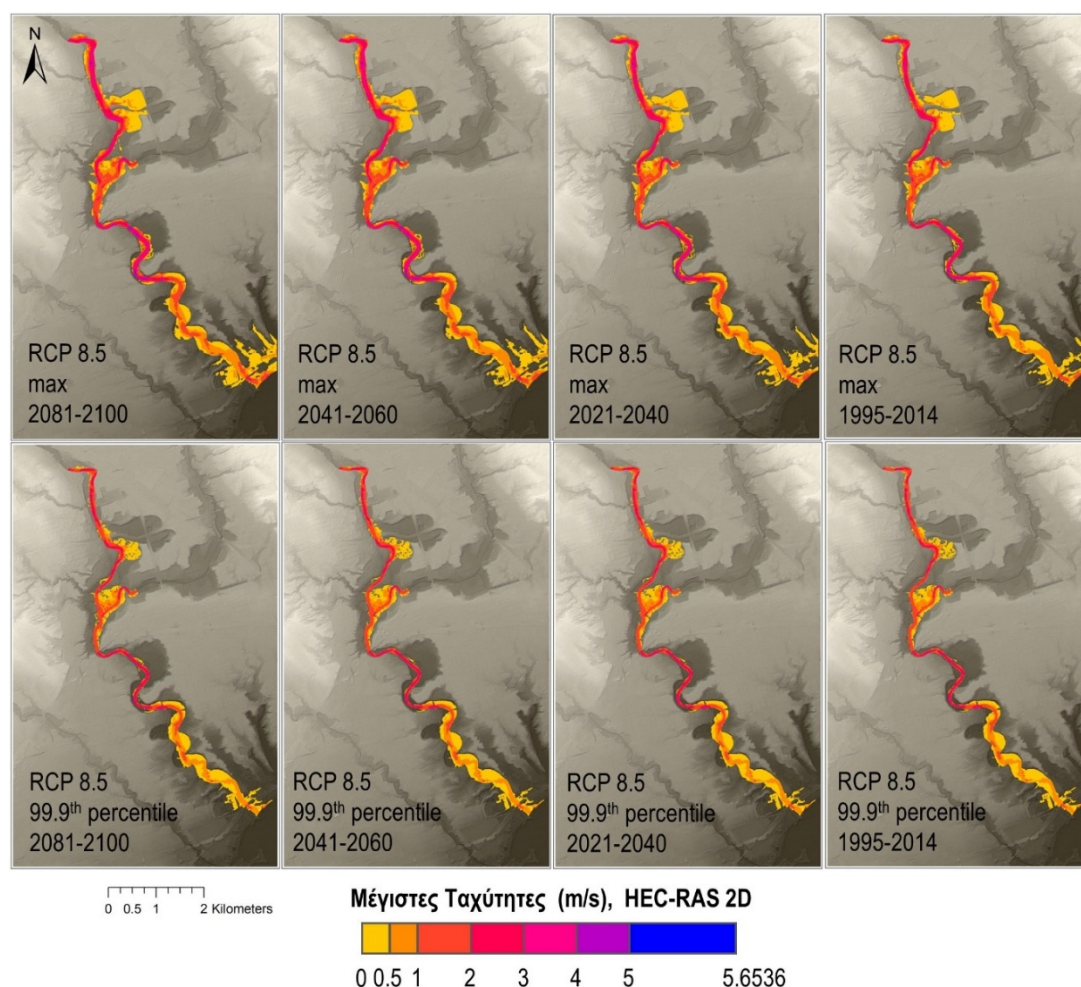
Στα ανάντη της γέφυρας #8 (The Queensway), για το σενάριο RCP8.5 και τη μέση τιμή μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης εικοσαετίας 24 κλιματικών μοντέλων, με το 2D υδραυλικό μοντέλο προσομοιώθηκε αύξηση της μέγιστης στάθμης νερού κατά 0.23 m, 0.54 m, και 0.68 m, κατά τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 αντίστοιχα, σε σύγκριση με την περίοδο 1995-2014. Επιπλέον, κατά τη μεσοπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη περίοδο, η μέγιστη στάθμη νερού ξεπέρασε την άνω παρειά του καταστρώματος της γέφυρας έως και 0.18 m και 0.32 m αντίστοιχα, για ορισμένο μήκος της γέφυρας προς τα ανατολικά, ενώ κατά τις περιόδους 1995-2014 και 2021-2040, η μέγιστη στάθμη νερού ξεπέρασε την κάτω παρειά της ανωδομής. Στην κατάντη όψη της γέφυρας παράχθηκαν αυξήσεις στη μέγιστη στάθμη νερού για τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 σε σχέση με την περίοδο βάσης, κατά 0.24 m, 0.53 m, και 0.66 m αντίστοιχα. Ταυτόχρονα, η μέγιστη στάθμη πλημμύρας ξεπέρασε σημαντικά την άνω παρειά του καταστρώματος στα ανατολικά για ορισμένο μήκος, και στις 4 εικοσαετίες, έως και 0.35 m για την περίοδο βάσης, έως και 0.59 m για την περίοδο 2021-2040, έως και 0.88 m για την περίοδο 2041-2060, καθώς και έως και 1.01 m για την περίοδο 2081-2100. Για το σενάριο RCP8.5 και τη μέση τιμή ημερήσιας βροχόπτωσης–24 κλιματικών μοντέλων–που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας, με το 2D μοντέλο προσομοιώθηκαν αυξήσεις της μέγιστης στάθμης νερού για τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 συγκριτικά με την περίοδο 1995-2014, κατά 0.08 m, 0.1 m, και 0.24 m αντίστοιχα στα ανάντη της γέφυρας #8, ενώ στα κατάντη παράχθηκαν αυξήσεις κατά 0.08 m, 0.09 m, και 0.23 m αντίστοιχα. Για τις 4 εικοσαετίες, τόσο στα ανάντη όσο και στα κατάντη, η μέγιστη στάθμη νερού ξεπέρασε την κάτω παρειά της ανωδομής στα ανατολικά για ορισμένο μήκος, και ιδίως στα κατάντη για τουλάχιστον το ήμισυ του μήκους της γέφυρας.



Εικόνα 5-34. Μέγιστη στάθμη νερού βάσει των υδρογραφημάτων που προέκυψαν από τις μέσες τιμές βροχόπτωσης—από 24 κλιματικά μοντέλα—των μέγιστων ημερήσιων γεγονότων και των ημερήσιων γεγονότων που αντιστοιχούν στο 99.9 εκατοστημόριο για τις εικοσαετίες 2081-2100, 2041-2060, 2021-2040, και 1995-2014, για το σενάριο RCP8.5, στα ανάντη και κατάντη των θέσεων των γεφυρών #5, #6, #7, και #8, με το 2D HEC-RAS.

Όπως φαίνεται στην [Εικόνα 5-35](#), για το σενάριο RCP8.5 και τη μέση τιμή μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης εικοσαετίας από τα 24 κλιματικά μοντέλα, με το 2D υδραυλικό μοντέλο προσομοιώθηκε μέγιστη ταχύτητα του πλημμυρικού κύματος ίση με 5.38 m/s κατά την περίοδο βάσης 1995-2014, 5.48 m/s στο εγγύς μέλλον (2021-2040), 5.57 m/s μεσοπρόθεσμα (2041-2060), και 5.65 m/s κατά την περίοδο 2081-2100. Για το σενάριο RCP8.5 και τη μέση τιμή—24 κλιματικών μοντέλων—της ημερήσιας βροχόπτωσης που

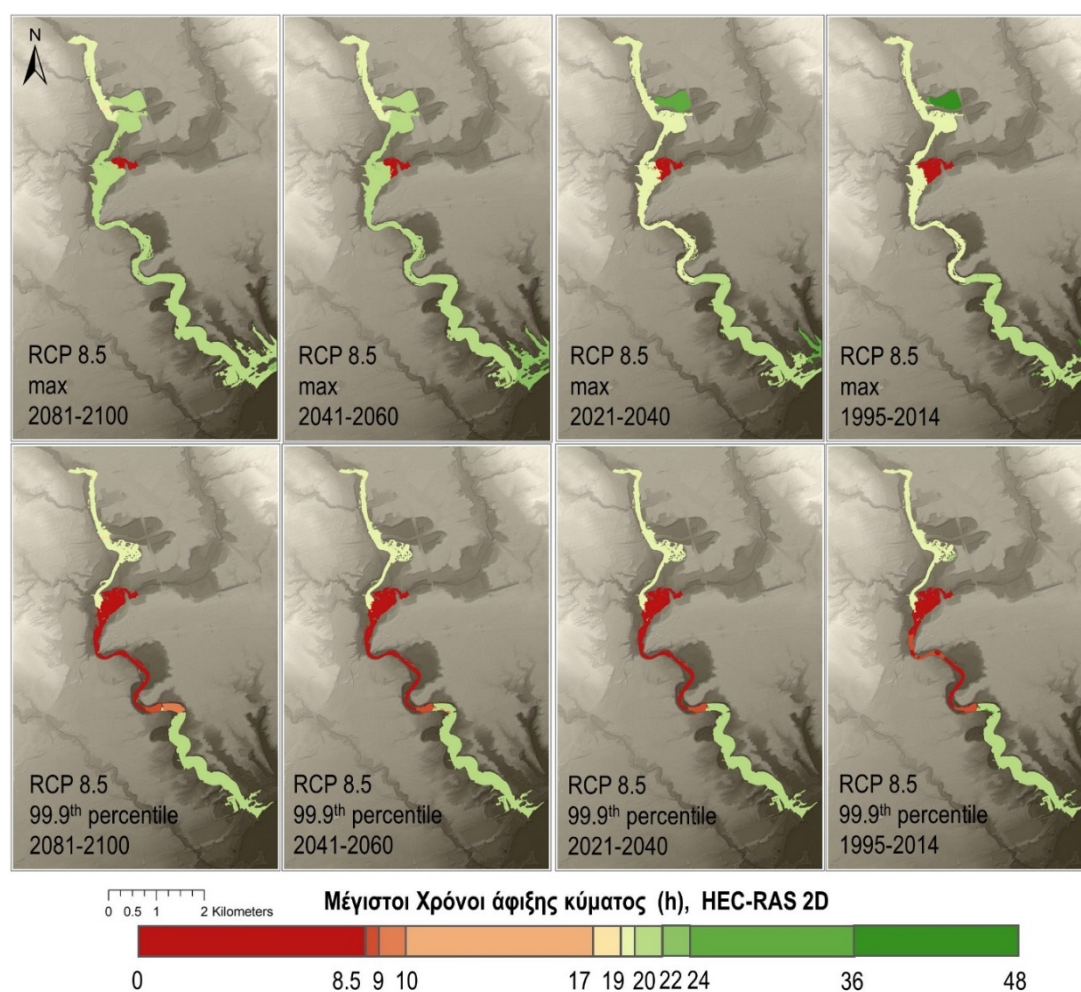
αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας, με το 2D μοντέλο προσομοιώθηκαν παρόμοιες μέγιστες ταχύτητες του πλημμυρικού κύματος κατά τις περιόδους 1995-2014, 2021-2040, και 2041-2060, ίσες με 4.73 m/s, 4.83 m/s, και 4.86 m/s αντίστοιχα, ενώ μακροπρόθεσμα (2081-2100) η μέγιστη ταχύτητα του κύματος πλημμύρας προσομοιώθηκε στα 5.05 m/s. Για όλα τα εξεταζόμενα γεγονότα παράχθηκαν σημαντικές ταχύτητες του πλημμυρικού κύματος εντός της κοίτης του ποταμού για τα πρώτα 7.7 km του τμήματος του ποταμού Humber, όπως και στην κοίτη του τμήματος εξόδου του Black Creek.



Εικόνα 5-35. Μέγιστες ταχύτητες πλημμυρικού κύματος βάσει των υδρογραφημάτων που προέκυψαν από τις μέσες τιμές βροχόπτωσης—από 24 κλιματικά μοντέλα—των μέγιστων ημερήσιων γεγονότων & των ημερήσιων γεγονότων που αντιστοιχούν στο 99.9 εκατοστημόριο για τις εικοσαετίες 2081-2100, 2041-2060, 2021-2040, και 1995-2014, για το σενάριο RCP8.5, με το 2D HEC-RAS.

Στην [Εικόνα 5-36](#) φαίνονται οι χρόνοι άφιξης του μέγιστου πλημμυρικού βάθους στις πλημμυρικές πεδιάδες με το 2D υδραυλικό μοντέλο για το σενάριο RCP8.5. Για τη μέση τιμή μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης εικοσαετίας από τα 24 κλιματικά μοντέλα, για τις 4 εξεταζόμενες εικοσαετίες, εντός της κοίτης του ποταμού Humber ο χρόνος άφιξης

των μέγιστων πλημμυρικών βαθών συνέβη περίπου σε 18-20 h, ενώ στην έξοδο του Black Creek τα μέγιστα πλημμυρικά βάθη έλαβαν χώρα μόλις σε 8 h για τα πρώτα μέτρα, και για τα επόμενα σε 19-20 h. Για τη μέση τιμή–24 κλιματικών μοντέλων–της ημερήσιας βροχής που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας, για τις 4 εξεταζόμενες εικοσαετίες, εντός της κοίτης του ποταμού Humber ο χρόνος άφιξης των μέγιστων πλημμυρικών βαθών συνέβη περίπου σε 19-20 h για τα πρώτα 4 km, σε 8 h για τα επόμενα 3.5 km περίπου, σε 8.5-10 h για τα επόμενα 0.5-1 km, ενώ σε 21 h για τα τελευταία 3.2-3.7 km. Επίσης, στην έξοδο του Black Creek ο χρόνος άφιξης των μέγιστων πλημμυρικών βαθών συνέβη σε μόλις 8 h σε όλο το εξεταζόμενο μήκος του ρέματος.



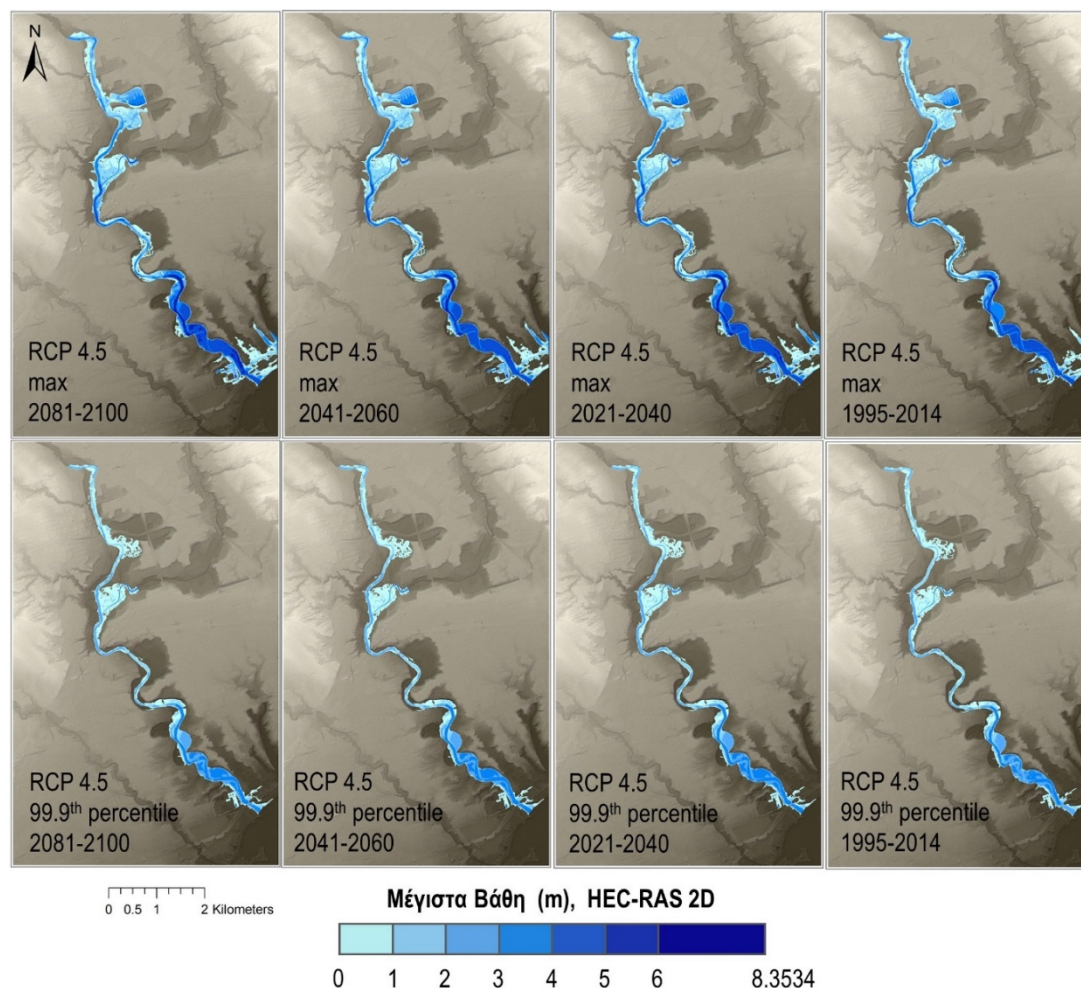
Εικόνα 5-36. Χρόνος άφιξης μέγιστων πλημμυρικών βαθών βάσει των υδρογραφημάτων που προέκυψαν από τις μέσες τιμές βροχόπτωσης–από 24 κλιματικά μοντέλα–των μέγιστων ημερήσιων γεγονότων & των ημερήσιων γεγονότων που αντιστοιχούν στο 99.9 εκατοστημόριο για τις εικοσαετίες 2081-2100, 2041-2060, 2021-2040, και 1995-2014, για το σενάριο RCP8.5, με το 2D HEC-RAS.

5.2.5 Αποτελέσματα υδραυλικού μοντέλου 2D HEC-RAS για το σενάριο RCP4.5

Λεπτομερείς χάρτες πλημμύρας στο κάτω τμήμα του ποταμού Humber παράχθηκαν επίσης για το σενάριο θερμοκηπικών εκπομπών RCP4.5 με το υδραυλικό μοντέλο 2D HEC-RAS. Αναλυτικά, οι χάρτες αφορούν τα προσομοιωμένα μέγιστα πλημμυρικά βάθη στις πλημμυρισμένες επιφάνειες (Εικόνα 5-37), τις μέγιστες ταχύτητες του πλημμυρικού κύματος (Εικόνα 5-40), και τους χρόνους άφιξης των μέγιστων πλημμυρικών βαθών στις πλημμυρικές πεδιάδες (Εικόνα 5-41), λόγω των γεγονότων που αφορούν τη μέση τιμή της μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης εικοσαετίας–από 24 κλιματικά μοντέλα–και της ημερήσιας βροχόπτωσης που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας, για τις εικοσαετίες 2081-2100, 2041-2060, 2021-2040, και 1995-2014. Συγχρόνως, για τα εξεταζόμενα βροχοπτώτικα γεγονότα και το σενάριο RCP4.5, απεικονίζεται η μέγιστη στάθμη του νερού στα ανάντη και κατάντη των θέσεων των γεφυρών #1, #2, #3, και #4 στην Εικόνα 5-38, καθώς και των γεφυρών #5, #6, #7, και #8 στην Εικόνα 5-39.

Στην Εικόνα 5-37 φαίνονται μικρές διαφοροποιήσεις στη μέγιστη πλημμυρισμένη επιφάνεια για τη μέση τιμή των γεγονότων μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης εικοσαετίας, από 2.53 km² για την εικοσαετία αναφοράς (1995-2014), έως 2.78 km² μακροπρόθεσμα (2081-2100), ενώ όπως για το σενάριο RCP8.5, έτσι και για το RCP4.5, η έκταση της πλημμύρας εξαπλώθηκε σημαντικά έξω από την κοίτη του ποταμού στο τελευταίο km πριν την εκβολή στη λίμνη Οντάριο. Για τη μέση τιμή των ημερήσιων βροχοπτώσεων που αντιστοιχούν στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας, οι μέγιστες πλημμυρισμένες εκτάσεις δε διέφεραν σημαντικά ανά τις εικοσαετίες, με την επιφάνεια να κυμαίνεται από 1.65 km² για την περίοδο 1995-2014, έως 1.71 km² για την εικοσαετία 2081-2100. Η προσομοίωση με το 2D μοντέλο για το σενάριο RCP4.5 και τη μέση τιμή μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης εικοσαετίας από τα 24 κλιματικά μοντέλα, παρήγαγε μέγιστο πλημμυρικό βάθος ίσο με 7.78 m κατά την περίοδο βάσης 1995-2014, 8.1 m στο εγγύς μέλλον 2021-2040, 8.06 m μεσοπρόθεσμα (2041-2060), και 8.16 m μακροπρόθεσμα (2081-2100). Για το σενάριο RCP4.5 και τη μέση τιμή ημερήσιας βροχής που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας, με το 2D υδραυλικό μοντέλο προσομοιώθηκε μέγιστο πλημμυρικό βάθος ίσο με 6.27 m για την περίοδο βάσης 1995-2014, και παρόμοια μέγιστα πλημμυρικά βάθη κατά τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100, ίσα με 6.42 m, 6.43 m, και 6.38 m αντίστοιχα. Για τα γεγονότα κλιματικής αλλαγής που εξετάστηκαν παράχθηκαν σημαντικά βάθη μέσα στην κοίτη του

ποταμού κατά τα τελευταία 4 km πριν την εκβολή. Για το μήκος αυτό προσομοιώθηκαν βάθη μεγαλύτερα από 4 m για τη μέση τιμή των γεγονότων μέγιστης ημερήσιας βροχής εικοσαετίας, και μεγαλύτερα από 3 m για τη μέση τιμή των γεγονότων ημερήσιας βροχής που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας.



Εικόνα 5-37. Μέγιστα πλημμυρικά βάθη βάσει των υδρογραφημάτων που προέκυψαν από τις μέσες τιμές βροχόπτωσης—από 24 κλιματικά μοντέλα—των μέγιστων ημερήσιων γεγονότων και των ημερήσιων γεγονότων που αντιστοιχούν στο 99.9 εκατοστημόριο για τις εικοσαετίες 2081-2100, 2041-2060, 2021-2040, και 1995-2014, για το σενάριο RCP4.5, με το 2D HEC-RAS.

Όπως φαίνεται στην [Εικόνα 5-38](#), στη γέφυρα #1 (Eglinton Avenue West), από την προσομοίωση των εξεταζόμενων γεγονότων με το 2D υδραυλικό μοντέλο για το σενάριο RCP4.5, οι μέγιστες στάθμες νερού έφτασαν χαμηλότερα από την ανωδομή της γέφυρας, τόσο στα ανάντη όσο και στα κατάντη. Για τη μέση τιμή μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης εικοσαετίας από τα 24 κλιματικά μοντέλα παράχθηκε αύξηση της μέγιστης στάθμης νερού κατά τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 συγκριτικά με την περίοδο βάσης (1995-2014), κατά 0.21 m, 0.19 m, και 0.26 m αντίστοιχα στην ανάντη όψη της γέφυρας #1, ενώ στην κατάντη όψη προσομοιώθηκαν

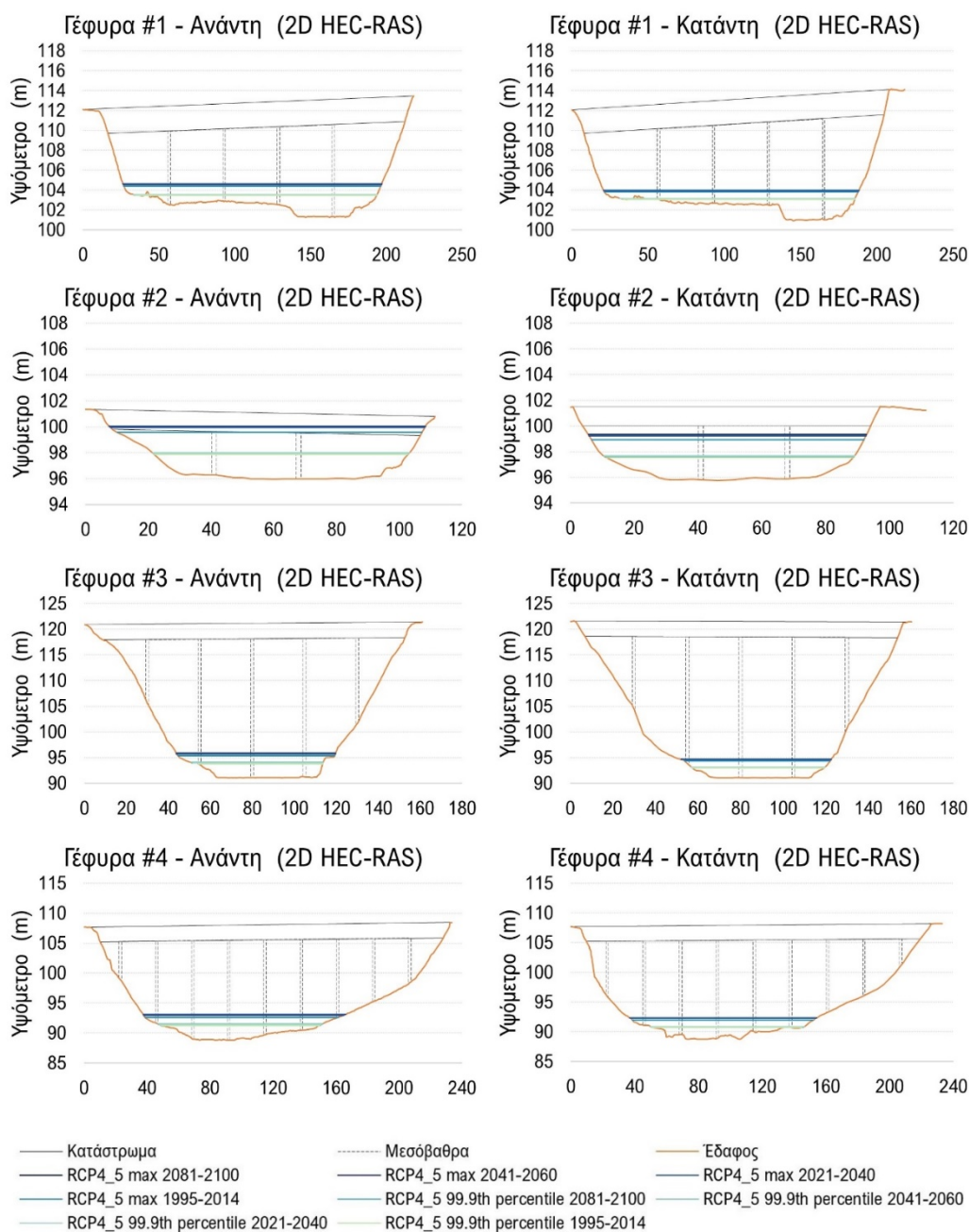
αυξήσεις κατά 0.17 m, 0.15 m, και 0.19 m αντίστοιχα. Για τη μέση τιμή–24 κλιματικών μοντέλων–της ημερήσιας βροχής που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας, προσομοιώθηκαν μικρές αυξήσεις της μέγιστης στάθμης νερού για τις 3 μελλοντικές εικοσαετίες σε σύγκριση με την περίοδο 1995-2014, από 0.06 m έως 0.09 m στα ανάντη της γέφυρας #1, και από 0.07 m έως 0.09 m στα κατάντη.

Στα ανάντη της γέφυρας #2 (Scarlett Road), για το σενάριο RCP4.5 και τη μέση τιμή μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης εικοσαετίας 24 κλιματικών μοντέλων, με το 2D υδραυλικό μοντέλο προσομοιώθηκε αύξηση της μέγιστης στάθμης νερού κατά 0.39 m, 0.35 m, και 0.47 m, για τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 αντίστοιχα, σε σύγκριση με την εικοσαετία βάσης (1995-2014). Επιπλέον, κατά τις 3 μελλοντικές εικοσαετίες, η μέγιστη στάθμη νερού ξεπέρασε την κάτω παρειά της ανωδομής της γέφυρας, ενώ κατά την περίοδο βάσης, η μέγιστη στάθμη νερού ξεπέρασε την κάτω παρειά της ανωδομής για ορισμένο μήκος στα δυτικά. Στα κατάντη της γέφυρας #2 παράχθηκαν αυξήσεις στη μέγιστη στάθμη νερού για τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 σε σχέση με την εικοσαετία αναφοράς, κατά 0.34 m, 0.31 m, και 0.39 m αντίστοιχα, ωστόσο δεν ξεπέρασαν την κάτω παρειά της ανωδομής. Για το σενάριο RCP4.5 και τη μέση τιμή ημερήσιας βροχής–24 κλιματικών μοντέλων–που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας, με το 2D υδραυλικό μοντέλο προσομοιώθηκαν μικρές αυξήσεις της μέγιστης στάθμης νερού για τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 συγκριτικά με την περίοδο 1995-2014, κατά 0.13 m, 0.14 m, και 0.1 m αντίστοιχα, τόσο στα ανάντη όσο και στα κατάντη της γέφυρας #2.

Για τη γέφυρα #3 (Lambton Canadian Pacific Railway Bridge), η προσομοίωση των γεγονότων κλιματικής αλλαγής με το 2D υδραυλικό μοντέλο για το σενάριο RCP4.5, παρήγαγε μέγιστες στάθμες νερού χαμηλότερα από το κατάστρωμα της γέφυρας, τόσο στην ανάντη όσο και στην κατάντη όψη της γέφυρας. Για τη μέση τιμή μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης εικοσαετίας από τα 24 κλιματικά μοντέλα, προσομοιώθηκε αύξηση της μέγιστης στάθμης νερού για τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 συγκριτικά με την περίοδο βάσης (1995-2014), κατά 0.37 m, 0.34 m, και 0.5 m αντίστοιχα στα ανάντη της γέφυρας #3, ενώ στα κατάντη παράχθηκαν αυξήσεις κατά 0.3 m, 0.27 m, και 0.34 m αντίστοιχα. Για τη μέση τιμή–από 24 κλιματικά μοντέλα–ημερήσιας βροχής που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας, προσομοιώθηκαν αυξήσεις της μέγιστης στάθμης νερού κατά τις εικοσαετίες 2021-

2040, 2041-2060, και 2081-2100 σε σύγκριση με την περίοδο 1995-2014, κατά 0.21 m, 0.34 m, και 0.23 m αντίστοιχα στα ανάντη της γέφυρας #3, ενώ στην κατάντη όψη παράχθηκαν αυξήσεις κατά 0.18 m, 0.17 m, και 0.14 m αντίστοιχα.

Στη γέφυρα #4 (Dundas Street West), από την υδραυλική προσομοίωση των εξεταζόμενων γεγονότων με το 2D μοντέλο για το σενάριο RCP4.5, οι μέγιστες στάθμες νερού ήταν χαμηλότερα από την ανωδομή της γέφυρας τόσο στα ανάντη όσο και στα κατάντη. Για τη μέση τιμή–24 κλιματικών μοντέλων–της μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης εικοσαετίας, παράχθηκε αύξηση της μέγιστης στάθμης νερού για τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 σε σύγκριση με την εικοσαετία βάσης, κατά 0.37 m, 0.33 m, και 0.47 m αντίστοιχα στην ανάντη όψη της γέφυρας #4, ενώ στην κατάντη όψη προσομοιώθηκαν αυξήσεις κατά 0.34 m, 0.3 m, και 0.39 m αντίστοιχα. Για τη μέση τιμή ημερήσιας βροχής–24 κλιματικών μοντέλων–που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας, προσομοιώθηκαν αυξήσεις στη μέγιστη στάθμη νερού κατά τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 σε σχέση με την περίοδο βάσης, κατά 0.17 m, 0.28 m, και 0.2 m αντίστοιχα στα ανάντη της γέφυρας #4, ενώ στα κατάντη παράχθηκαν μικρές αυξήσεις κατά 0.13 m, 0.14 m, και 0.1 m αντίστοιχα.



Εικόνα 5-38. Μέγιστη στάθμη νερού βάσει των υδρογραφημάτων που προέκυψαν από τις μέσες τιμές βροχόπτωσης—από 24 κλιματικά μοντέλα—των μέγιστων ημερήσιων γεγονότων και των ημερήσιων γεγονότων που αντιστοιχούν στο 99.9 εκατοστημόριο για τις εικοσαετίες 2081-2100, 2041-2060, 2021-2040, και 1995-2014, για το σενάριο RCP4.5, στα ανάντη και κατάντη των θέσεων των γεφυρών #1, #2, #3, και #4, με 2D HEC-RAS.

Όπως φαίνεται στην [Εικόνα 5-39](#), για το σενάριο RCP4.5 και τη μέση τιμή μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης εικοσαετίας από τα 24 κλιματικά μοντέλα, στα ανάντη της γέφυρας #5 (Old Mill Road), με το 2D υδραυλικό μοντέλο, προσομοιώθηκαν αυξήσεις στη μέγιστη στάθμη νερού κατά 0.43 m, 0.38 m, και 0.56 m, για τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 αντίστοιχα, συγκριτικά με την περίοδο βάσης. Επιπλέον, και για τις 4 εικοσαετίες η μέγιστη στάθμη νερού ξεπέρασε αρκετά την κάτω παρειά της

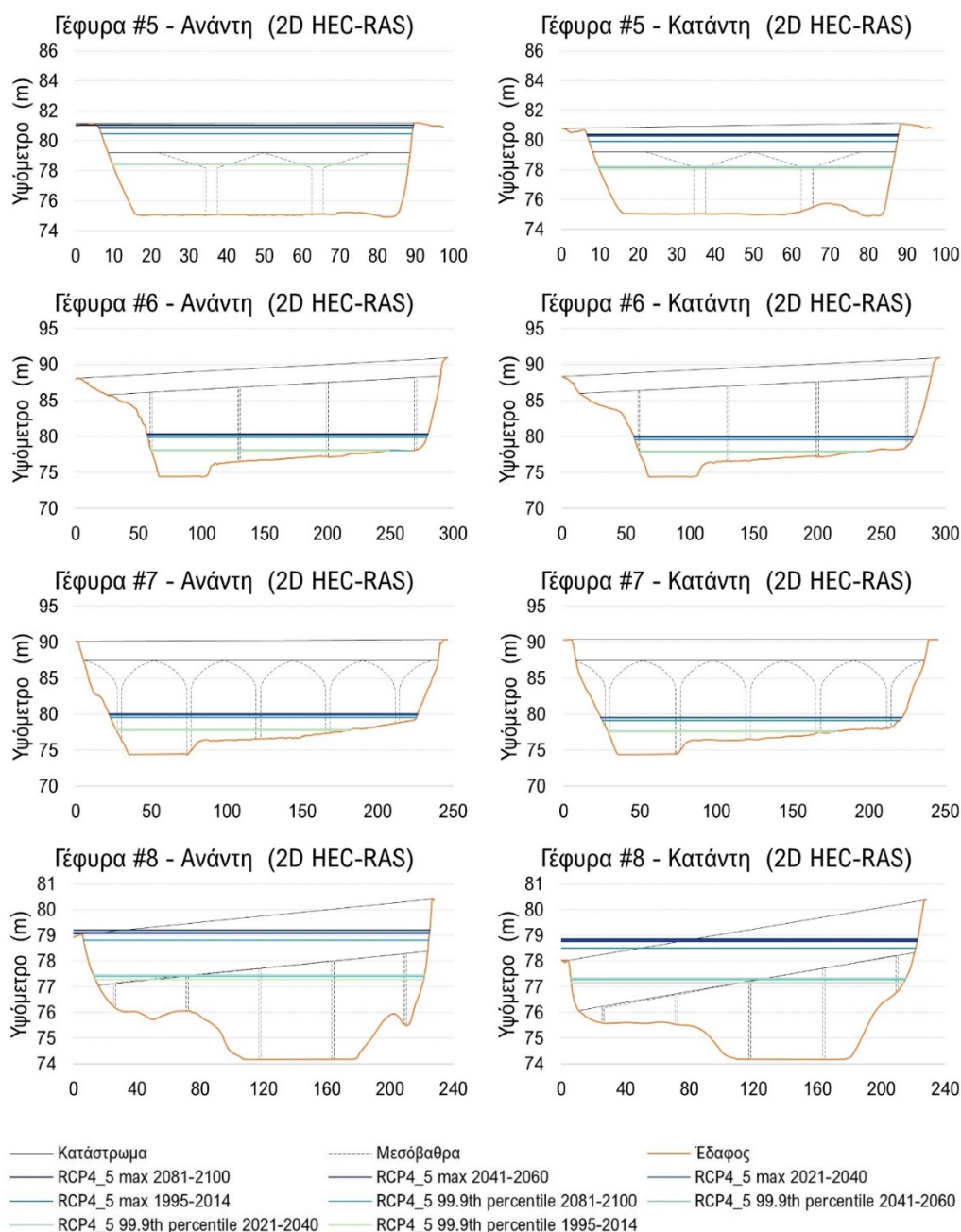
ανωδομής, χωρίς όμως να υπερχειλίσει η γέφυρα. Στα κατάντη της γέφυρας #5 προσομοιώθηκαν αυξήσεις στη μέγιστη στάθμη νερού για τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100, σε σχέση με την περίοδο 1995-2014, κατά 0.39 m, 0.35 m, και 0.47 m αντίστοιχα. Συγχρόνως, και για τις 4 εικοσαετίες, η μέγιστη στάθμη νερού ξεπέρασε την κάτω παρειά της ανωδομής. Για το σενάριο RCP4.5 και τη μέση τιμή-24 κλιματικών μοντέλων-ημερήσιας βροχής που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας, με το 2D μοντέλο παράχθηκαν μικρές αυξήσεις της μέγιστης στάθμης νερού για τις εικοσαετίες 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 συγκριτικά με την περίοδο βάσης, κατά μόλις 0.05 m, 0.06 m, και 0.02 m αντίστοιχα στα ανάντη της γέφυρας #5, ενώ στα κατάντη παράχθηκαν αυξήσεις κατά 0.15 m, 0.16 m, και 0.11 m αντίστοιχα.

Στη γέφυρα #6 (Old Mill Subway Station Bridge), από την υδραυλική προσομοίωση των εξεταζόμενων γεγονότων με το 2D μοντέλο για το σενάριο RCP4.5, η μέγιστη στάθμη νερού ήταν χαμηλότερα από το κατάστρωμα της γέφυρας τόσο στην ανάντη όσο και στην κατάντη όψη της γέφυρας. Για τη μέση τιμή μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης εικοσαετίας από τα 24 κλιματικά μοντέλα, προσομοιώθηκε αύξηση της μέγιστης στάθμης νερού κατά τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 συγκριτικά με την περίοδο βάσης (1995-2014) κατά 0.39 m, 0.35 m, και 0.49 m αντίστοιχα στα ανάντη της γέφυρας #6, ενώ στα κατάντη παράχθηκαν αυξήσεις κατά 0.37 m, 0.34 m, και 0.46 m αντίστοιχα. Για τη μέση τιμή-24 κλιματικών μοντέλων-ημερήσιας βροχής που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας, προσομοιώθηκαν μικρές αυξήσεις της μέγιστης στάθμης νερού για τις εικοσαετίες 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 σε σύγκριση με την περίοδο 1995-2014, κατά μόλις 0.11 m, 0.12 m, και 0.07 m αντίστοιχα στα ανάντη της γέφυρας #6, ενώ στην κατάντη όψη της γέφυρας παράχθηκαν αυξήσεις κατά 0.17 m, 0.18 m, και 0.12 m αντίστοιχα.

Για τη γέφυρα #7 (Bloor Street Humber River Bridge), η προσομοίωση των γεγονότων κλιματικής αλλαγής με το 2D υδραυλικό μοντέλο για το σενάριο RCP4.5 παρήγαγε μέγιστες στάθμες νερού χαμηλότερα από την ανωδομή της γέφυρας τόσο στα ανάντη όσο και στα κατάντη. Για τη μέση τιμή 24 κλιματικών μοντέλων της μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης εικοσαετίας παράχθηκε αύξηση της μέγιστης στάθμης νερού για τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 σε σύγκριση με την εικοσαετία βάσης (1995-2014), κατά 0.37 m, 0.33 m, και 0.48 m αντίστοιχα στην ανάντη όψη της γέφυρας #7, ενώ στην κατάντη όψη προσομοιώθηκαν αυξήσεις κατά 0.35 m, 0.31 m, και 0.42 m

αντίστοιχα. Για τη μέση τιμή ημερήσιας βροχόπτωσης–24 κλιματικών μοντέλων–που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας, προσομοιώθηκαν μικρές αυξήσεις στη μέγιστη στάθμη νερού για τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100, σε σχέση με την περίοδο βάσης, κατά 0.16 m, 0.17 m, και 0.12 m αντίστοιχα, τόσο στα ανάντη όσο και στα κατάντη της γέφυρας #7.

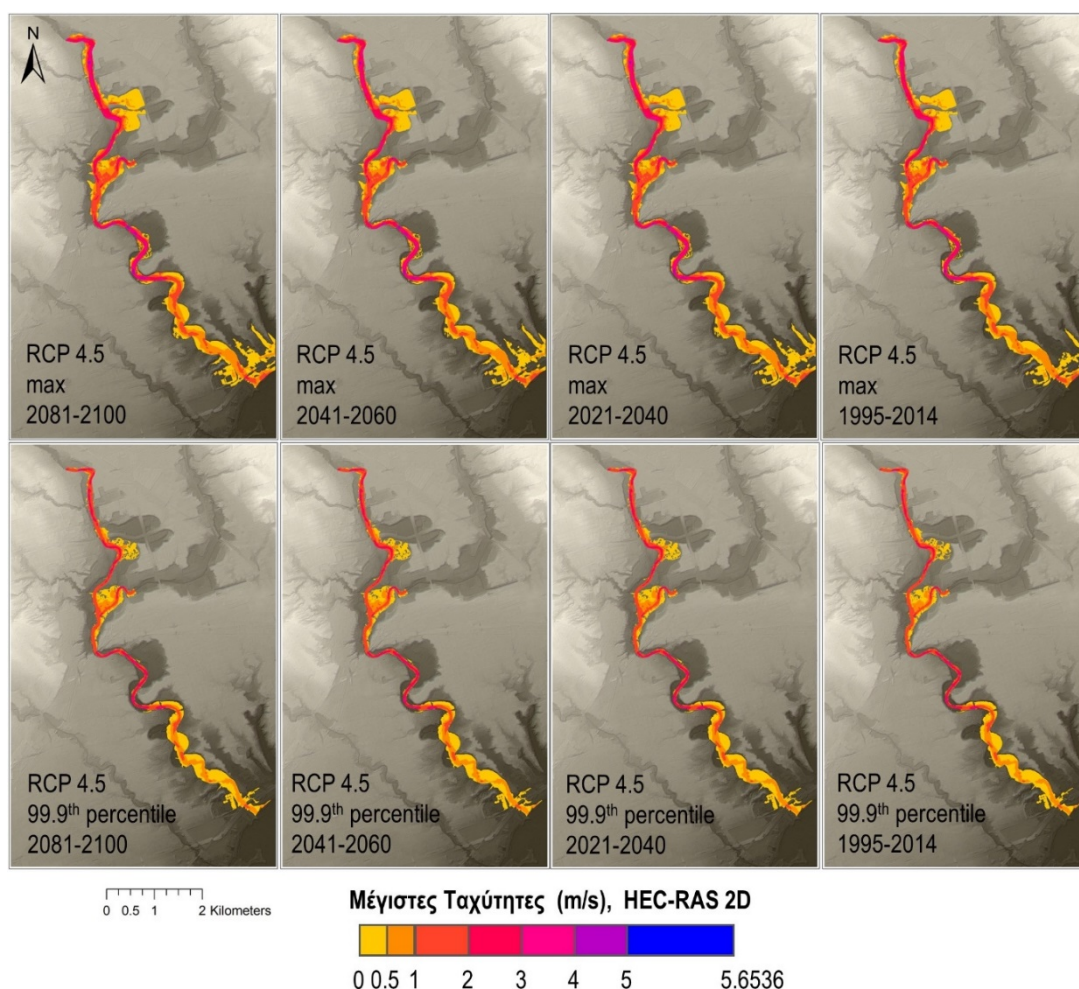
Στα ανάντη της γέφυρας #8 (The Queensway), για το σενάριο RCP4.5 και τη μέση τιμή μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης εικοσαετίας από 24 κλιματικά μοντέλα, με το 2D υδραυλικό μοντέλο προσομοιώθηκε αύξηση της μέγιστης στάθμης νερού κατά 0.31 m, 0.27 m, και 0.41 m, για τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 αντίστοιχα, σε σύγκριση με την περίοδο 1995-2014. Επιπλέον, κατά τις 3 μελλοντικές εικοσαετίες, η μέγιστη στάθμη νερού ξεπέρασε την άνω παρειά του καταστρώματος της γέφυρας για μόλις ορισμένο μήκος της γέφυρας προς τα ανατολικά, ενώ κατά την περίοδο βάσης (1995-2014), η μέγιστη στάθμη νερού ξεπέρασε μόνο την κάτω παρειά της ανωδομής. Στα κατάντη της γέφυρας #8 παράχθηκαν αυξήσεις στη μέγιστη στάθμη νερού για τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 σε σχέση με την περίοδο βάσης, κατά 0.29 m, 0.24 m, και 0.35 m αντίστοιχα. Επιπρόσθετα, η μέγιστη στάθμη πλημμύρας ξεπέρασε σημαντικά την άνω παρειά του καταστρώματος στα ανατολικά για ορισμένο μήκος, και στις 4 εικοσαετίες, έως και 0.48 m για την περίοδο βάσης, έως και 0.77 m για την περίοδο 2021-2040, έως και 0.72 m για την περίοδο 2041-2060, καθώς και έως και 0.83 m για την περίοδο 2081-2100. Για το σενάριο RCP4.5 και τη μέση τιμή ημερήσιας βροχής–24 κλιματικών μοντέλων–που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας, με το 2D μοντέλο προσομοιώθηκαν μικρές αυξήσεις της μέγιστης στάθμης νερού για τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 συγκριτικά με την περίοδο 1995-2014, κατά 0.15 m, 0.16 m, και 0.11 m αντίστοιχα, τόσο στα ανάντη όσο και στα κατάντη της γέφυρας #8. Για τις 4 εικοσαετίες, τόσο στα ανάντη όσο και στα κατάντη, η μέγιστη στάθμη νερού ξεπέρασε την κάτω παρειά της ανωδομής στα ανατολικά για ορισμένο μήκος, και ιδίως στα κατάντη για περίπου το ήμισυ του μήκους της γέφυρας.



Εικόνα 5-39. Μέγιστη στάθμη νερού βάσει των υδρογραφημάτων που προέκυψαν από τις μέσες τιμές βροχόπτωσης—από 24 κλιματικά μοντέλα—των μέγιστων ημερήσιων γεγονότων και των ημερήσιων γεγονότων που αντιστοιχούν στο 99.9 εκατοστημόριο για τις εικοσαετίες 2081-2100, 2041-2060, 2021-2040, και 1995-2014, για το σενάριο RCP4.5, στα ανάντη και κατάντη των θέσεων των γεφυρών #5, #6, #7, και #8, με το 2D HEC-RAS.

Στην [Εικόνα 5-40](#) φαίνεται η χωρική κατανομή των μέγιστων ταχυτήτων του κύματος πλημμύρας για τα εξεταζόμενα βροχοπτωτικά γεγονότα, από την προσομοίωση με το 2D υδραυλικό μοντέλο για το σενάριο RCP4.5. Για τη μέση τιμή της μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης εικοσαετίας από 24 κλιματικά μοντέλα, παράχθηκε μέγιστη ταχύτητα του πλημμυρικού κύματος ίση με 5.46 m/s κατά την περίοδο βάσης 1995-2014, 5.57 m/s στο εγγύς μέλλον (2021-2040), 5.54 m/s μεσοπρόθεσμα (2041-2060), και 5.58 m/s κατά την

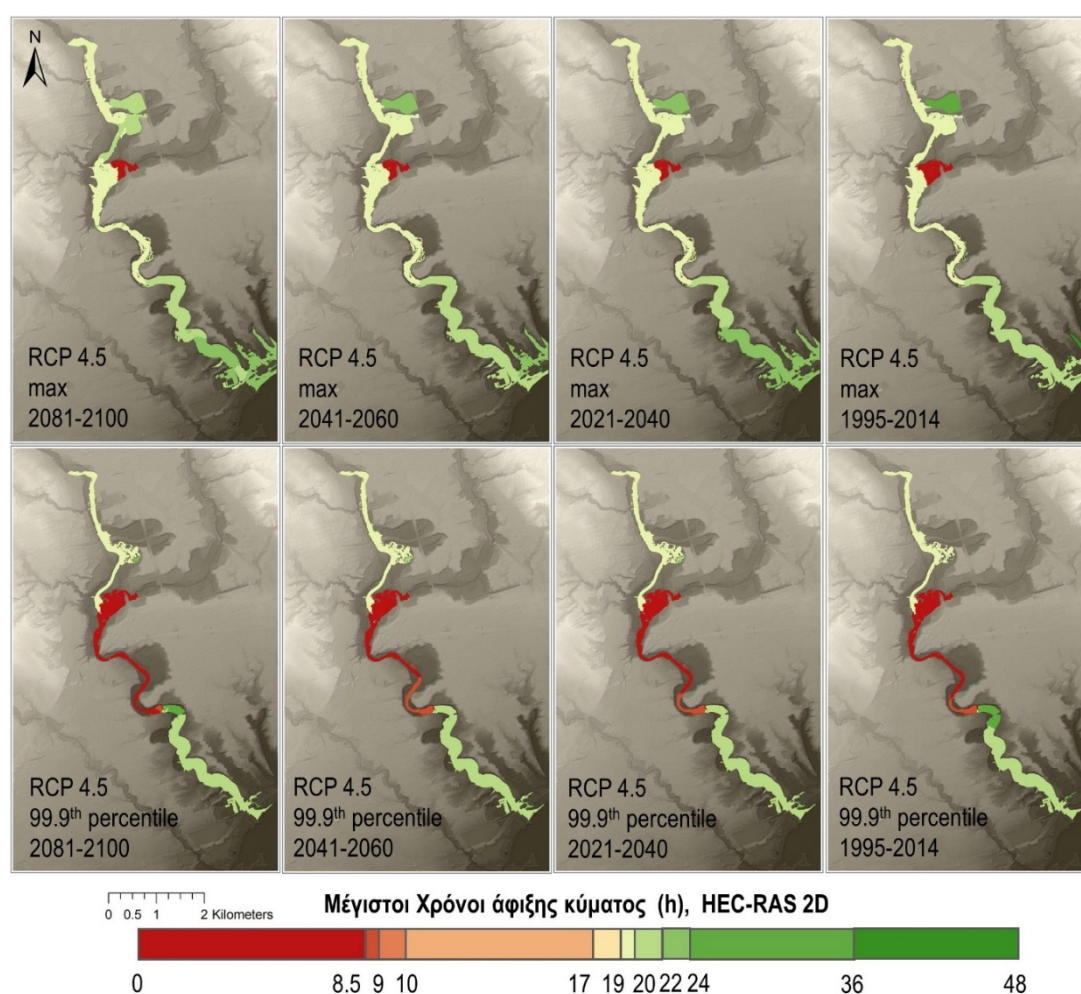
περίοδο 2081-2100. Για τη μέση τιμή ημερήσιας βροχής που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας, προσομοιώθηκε μέγιστη ταχύτητα του πλημμυρικού κύματος ίση με 4.59 m/s για την περίοδο 1995-2014, και παρόμοιες μέγιστες ταχύτητες του κύματος πλημμύρας κατά τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100, ίσες με 4.8 m/s, 4.79 m/s, και 4.74 m/s αντίστοιχα. Για όλα τα γεγονότα κλιματικής αλλαγής προσομοιώθηκαν σημαντικές ταχύτητες του πλημμυρικού κύματος στην κοίτη του ποταμού Humber, για τα πρώτα 7.7 km περίπου του τμήματος του ποταμού, αλλά και εντός της κοίτης του ρέματος Black Creek που διασταυρώνεται με τον ποταμό.



Εικόνα 5-40. Μέγιστες ταχύτητες πλημμυρικού κύματος βάσει των υδρογραφημάτων που προέκυψαν από τις μέσες τιμές βροχόπτωσης—από 24 κλιματικά μοντέλα—των μέγιστων ημερήσιων γεγονότων & των ημερήσιων γεγονότων που αντιστοιχούν στο 99.9 εκατοστημόριο για τις εικοσαετίες 2081-2100, 2041-2060, 2021-2040, και 1995-2014, για το σενάριο RCP4.5, με το 2D HEC-RAS.

Στην [Εικόνα 5-41](#) φαίνονται οι χρόνοι άφιξης των μέγιστων πλημμυρικών βαθών στις πλημμυρικές επιφάνειες με το 2D υδραυλικό μοντέλο για το σενάριο RCP4.5. Για τη μέση τιμή—24 κλιματικών μοντέλων—μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης εικοσαετίας, για τις 4 εξεταζόμενες περιόδους, ο χρόνος άφιξης των μέγιστων πλημμυρικών βαθών καθ' όλο

το μήκος της κοίτης του ποταμού Humber συνέβη περίπου σε 19-22 h, ενώ στην κοίτη του ρέματος Black Creek συνέβη σε μόλις 8 h για τα πρώτα μέτρα, και σε 19.5 h περίπου για τα επόμενα μέτρα έως τη συμβολή με τον ποταμό. Για τη μέση τιμή ημερήσιας βροχής που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας από 24 κλιματικά μοντέλα, για τις 4 εξεταζόμενες εικοσαετίες, εντός της κοίτης του ποταμού Humber τα μέγιστα πλημμυρικά βάθη αφίχθησαν περίπου σε 19 h για τα πρώτα 4 km, σε 8-8.5 h για τα επόμενα 4 km περίπου, σε 20-26 h για το επόμενο 0.5 km, ενώ σε 21 h περίπου για τα τελευταία 3.2 km. Συγχρόνως, στο τμήμα εξόδου του ρέματος Black Creek ο χρόνος άφιξης των μέγιστων πλημμυρικών βαθών συνέβη σε μόλις 8 h.



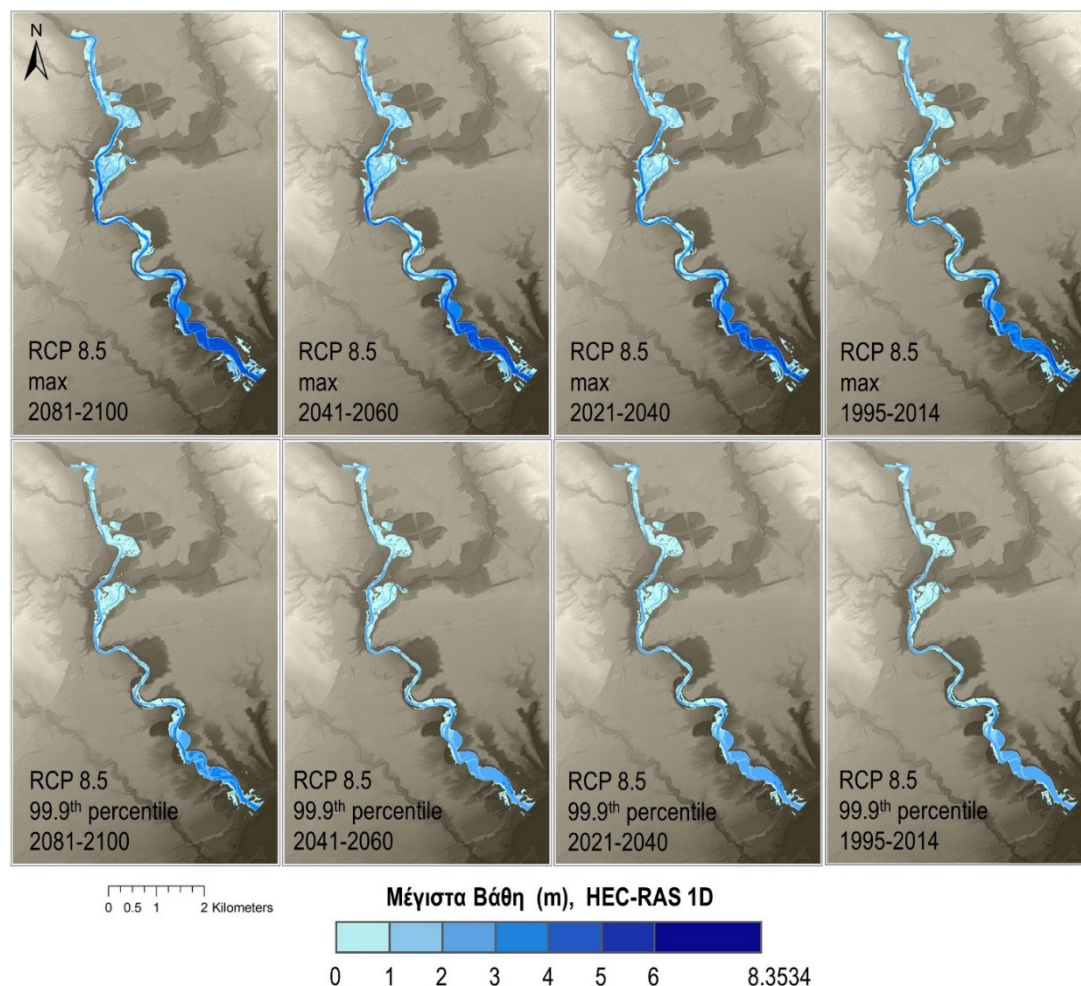
Εικόνα 5-41. Χρόνος άφιξης μέγιστων πλημμυρικών βαθών βάσει των υδρογραφημάτων που προέκυψαν από τις μέσες τιμές βροχόπτωσης–από 24 κλιματικά μοντέλα–των μέγιστων ημερήσιων γεγονότων & των ημερήσιων γεγονότων που αντιστοιχούν στο 99.9 εκατοστημόριο για τις εικοσαετίες 2081-2100, 2041-2060, 2021-2040, και 1995-2014, για το σενάριο RCP4.5, με το 2D HEC-RAS.

5.2.6 Αποτελέσματα υδραυλικού μοντέλου 1D HEC-RAS για το σενάριο RCP8.5

Στο κάτω μέρος του ποταμού Humber που διασχίζει την πόλη του Τορόντο, με το υδραυλικό μοντέλο 1D HEC-RAS και το DTM υψηλής ανάλυσης 0.5 m x 0.5 m, για το σενάριο θερμοκηπικών εκπομπών RCP8.5, παράχθηκαν λεπτομερείς χάρτες πλημμύρας. Οι χάρτες αφορούν τα προσομοιωμένα μέγιστα πλημμυρικά βάθη στις πλημμυρισμένες επιφάνειες (Εικόνα 5-42), τις μέγιστες ταχύτητες του πλημμυρικού κύματος (Εικόνα 5-45), και τους χρόνους άφιξης των μέγιστων πλημμυρικών βαθών στις πλημμυρικές πεδιάδες (Εικόνα 5-46), λόγω των γεγονότων που αφορούν τη μέση τιμή της μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης εικοσαετίας–από 24 κλιματικά μοντέλα–και της ημερήσιας βροχόπτωσης που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας, για τις εικοσαετίες 2081-2100, 2041-2060, 2021-2040, και 1995-2014. Για τις εξεταζόμενες βροχοπτώσεις και το σενάριο RCP8.5, αναπαρίσταται επίσης η μέγιστη στάθμη του νερού στα ανάντη και κατόντη των θέσεων των γεφυρών #1, #2, #3, και #4 στην Εικόνα 5-43, καθώς και των γεφυρών #5, #6, #7, και #8 στην Εικόνα 5-44.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 5-42, υπήρχαν μικρές διαφοροποιήσεις στη μέγιστη πλημμυρισμένη επιφάνεια για τη μέση τιμή των γεγονότων μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης εικοσαετίας, από 2.18 km² για την περίοδο αναφοράς (1995-2014), έως 2.42 km² για τη μακροπρόθεσμη περίοδο (2081-2100), και ταυτόχρονα μια μικρή εξάπλωση της πλημμυρικής έκτασης εκτός κοίτης κατά το τελευταίο km πριν την εκβολή του ποταμού. Για τη μέση τιμή των ημερήσιων βροχοπτώσεων που αντιστοιχούν στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας, δε διέφεραν σημαντικά οι μέγιστες πλημμυρισμένες επιφάνειες κατά τις εικοσαετίες, με την έκταση να κυμαίνεται από 1.73 km² για την περίοδο 1995-2014, έως 1.82 km² για την περίοδο 2081-2100. Με το 1D μοντέλο, για το σενάριο RCP8.5 και τη μέση τιμή μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης εικοσαετίας από τα 24 κλιματικά μοντέλα, παράχθηκε μέγιστο πλημμυρικό βάθος ίσο με 7.13 m κατά την περίοδο βάσης 1995-2014, 7.41 m στο εγγύς μέλλον 2021-2040, 7.69 m μεσοπρόθεσμα (2041-2060), και 7.79 m μακροπρόθεσμα (2081-2100). Για το σενάριο RCP8.5 και τη μέση τιμή ημερήσιας βροχόπτωσης που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας, η προσομοίωση με το 1D υδραυλικό μοντέλο παρήγαγε παρόμοια μέγιστα πλημμυρικά βάθη κατά τις περιόδους 1995-2014, 2021-2040, και 2041-2060, ίσα με 5.98 m, 6.05 m, και 6.07 m αντίστοιχα, ενώ κατά την περίοδο 2081-2100 το μέγιστο πλημμυρικό βάθος προσομοιώθηκε στα 6.19 m. Για όλα τα εξεταζόμενα γεγονότα

κλιματικής αλλαγής παράχθηκαν σημαντικά βάθη εντός της ποτάμιας κοίτης κυρίως κατά τα 4 km πριν την εκβολή του ποταμού, μεγαλύτερα από 3 m για τη μέση τιμή των γεγονότων μέγιστης ημερήσιας βροχής εικοσαετίας, και μεγαλύτερα από 2.5 m για τη μέση τιμή των γεγονότων ημερήσιας βροχής που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας.



Εικόνα 5-42. Μέγιστα πλημμυρικά βάθη βάσει των υδρογραφημάτων που προέκυψαν από τις μέσες τιμές βροχόπτωσης—από 24 κλιματικά μοντέλα—των μέγιστων ημερήσιων γεγονότων και των ημερήσιων γεγονότων που αντιστοιχούν στο 99.9 εκατοστημόριο για τις εικοσαετίες 2081-2100, 2041-2060, 2021-2040, και 1995-2014, για το σενάριο RCP8.5, με το 1D HEC-RAS.

Όπως φαίνεται στην [Εικόνα 5-43](#), στη γέφυρα #1 (Eglinton Avenue West), η προσομοίωση των γεγονότων κλιματικής αλλαγής με το 1D υδραυλικό μοντέλο για το σενάριο RCP8.5, παρήγαγε μέγιστες στάθμες νερού χαμηλότερα από το κατάστρωμα της γέφυρας, τόσο στα ανάντη όσο και στα κατάντη. Για τη μέση τιμή—24 κλιματικών μοντέλων—της μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης εικοσαετίας, παράχθηκε αύξηση της μέγιστης στάθμης νερού κατά τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 συγκριτικά με την περίοδο βάσης (1995-2014), κατά 0.14 m, 0.3 m, και 0.34 m

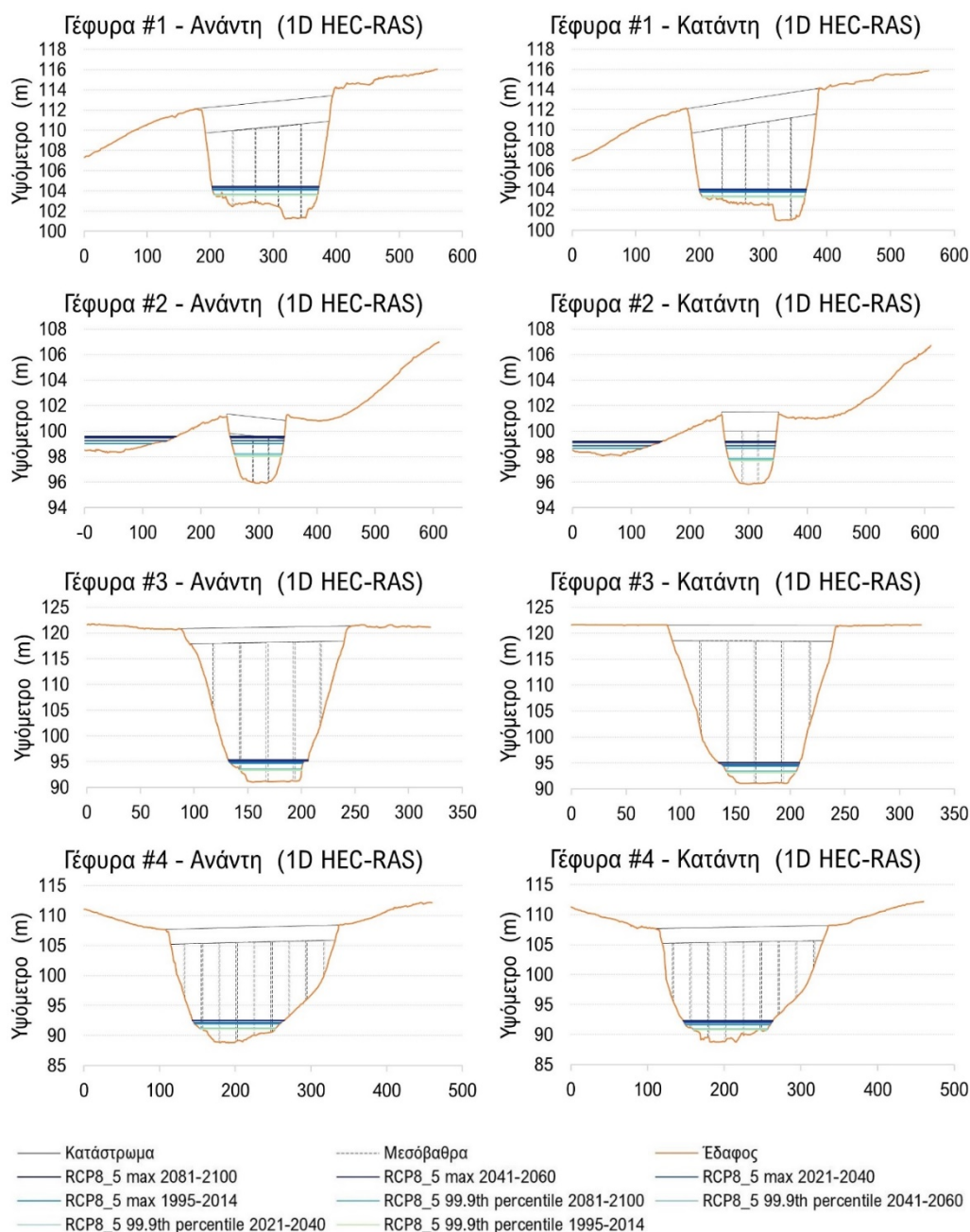
αντίστοιχα στην ανάντη όψη της γέφυρας #1, ενώ στην κατάντη όψη προσομοιώθηκαν αυξήσεις κατά 0.12 m, 0.25 m, και 0.3 m αντίστοιχα. Για τη μέση τιμή–24 κλιματικών μοντέλων–της ημερήσιας βροχής που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας, προσομοιώθηκαν μικρές αυξήσεις της μέγιστης στάθμης νερού για τις 3 μελλοντικές εικοσαετίες σε σύγκριση με την περίοδο 1995-2014, από 0.03 m έως 0.09 m στα ανάντη της γέφυρας #1, και από 0.03 m έως 0.08 m στα κατάντη.

Στα ανάντη της γέφυρας #2 (Scarlett Road), για το σενάριο RCP8.5 και τη μέση τιμή μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης εικοσαετίας 24 κλιματικών μοντέλων, με το 1D υδραυλικό μοντέλο προσομοιώθηκε αύξηση της μέγιστης στάθμης νερού κατά τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100, σε σύγκριση με την εικοσαετία βάσης (1995-2014), κατά 0.22 m, 0.45 m, και 0.54 m, αντίστοιχα. Επιπλέον, κατά τη μεσοπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη περίοδο, η μέγιστη στάθμη νερού ξεπέρασε την κάτω παρειά της ανωδομής της γέφυρας για μόλις ορισμένο μήκος στα δυτικά. Στα κατάντη της γέφυρας #2 προσομοιώθηκαν ακριβώς οι ίδιες αυξήσεις στη μέγιστη στάθμη νερού με αυτές στα ανάντη για τις μελλοντικές εικοσαετίες σε σχέση με την εικοσαετία αναφοράς, ωστόσο δεν ξεπέρασαν την κάτω παρειά της ανωδομής της γέφυρας. Για το σενάριο RCP8.5 και τη μέση τιμή ημερήσιας βροχής–24 κλιματικών μοντέλων–που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας, με το 1D υδραυλικό μοντέλο προσομοιώθηκαν μικρές αυξήσεις της μέγιστης στάθμης νερού για τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 συγκριτικά με την περίοδο 1995-2014, κατά 0.06 m, 0.07 m, και 0.19 m αντίστοιχα στην ανάντη όψη της γέφυρας #2, ενώ στα κατάντη παράχθηκαν αυξήσεις κατά 0.06 m, 0.08 m, και 0.19 m αντίστοιχα.

Στη γέφυρα #3 (Lambton Canadian Pacific Railway Bridge), από την υδραυλική προσομοίωση των εξεταζόμενων γεγονότων με το 1D μοντέλο για το σενάριο RCP8.5, παράχθηκαν μέγιστες στάθμες νερού χαμηλότερα από το κατάστρωμα της γέφυρας, τόσο στα ανάντη όσο και στα κατάντη. Για τη μέση τιμή μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης εικοσαετίας από τα 24 κλιματικά μοντέλα, παράχθηκε αύξηση της μέγιστης στάθμης νερού για τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 συγκριτικά με την περίοδο βάσης, κατά 0.27 m, 0.54 m, και 0.64 m αντίστοιχα στην ανάντη όψη της γέφυρας #3, ενώ στην κατάντη όψη προσομοιώθηκαν αυξήσεις κατά 0.26 m, 0.53 m, και 0.63 m αντίστοιχα. Για τη μέση τιμή–από 24 κλιματικά μοντέλα–ημερήσιας βροχόπτωσης που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο

εικοσαετίας, προσομοιώθηκαν αυξήσεις της μέγιστης στάθμης νερού για τις εικοσαετίες 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 σε σύγκριση με την περίοδο 1995-2014, κατά 0.06 m, 0.09 m, και 0.22 m αντίστοιχα στα ανάντη της γέφυρας #3, ενώ στα κατάντη παράχθηκαν αυξήσεις κατά 0.07 m, 0.09 m, και 0.22 m αντίστοιχα.

Για τη γέφυρα #4 (Dundas Street West), η προσομοίωση των γεγονότων κλιματικής αλλαγής με το 1D υδραυλικό μοντέλο για το σενάριο RCP8.5, παρήγαγε μέγιστες στάθμες νερού χαμηλότερα από την ανωδομή της γέφυρας, τόσο στην ανάντη όσο και στην κατάντη όψη της γέφυρας. Για τη μέση τιμή μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης εικοσαετίας από τα 24 κλιματικά μοντέλα, παράχθηκε αύξηση της μέγιστης στάθμης νερού κατά τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 σε σύγκριση με την εικοσαετία βάσης (1995-2014), κατά 0.24 m, 0.52 m, και 0.62 m αντίστοιχα στα ανάντη της γέφυρας #4, ενώ στην κατάντη όψη προσομοιώθηκαν αυξήσεις κατά 0.24 m, 0.52 m, και 0.63 m αντίστοιχα. Για τη μέση τιμή ημερήσιας βροχόπτωσης—από 24 κλιματικά μοντέλα—που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας, η προσομοίωση παρήγαγε αυξήσεις στη μέγιστη στάθμη νερού για τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 σε σχέση με την περίοδο βάσης, κατά 0.05 m, 0.07 m, και 0.17 m αντίστοιχα στα ανάντη της γέφυρας #4, ενώ στα κατάντη παράχθηκαν αυξήσεις κατά 0.06 m, 0.08 m, και 0.19 m αντίστοιχα.



Εικόνα 5-43. Μέγιστη στάθμη νερού βάσει των υδρογραφημάτων που προέκυψαν από τις μέσες τιμές βροχόπτωσης—από 24 κλιματικά μοντέλα—των μέγιστων ημερήσιων γεγονότων και των ημερήσιων γεγονότων που αντιστοιχούν στο 99.9 εκατοστημόριο για τις εικοσαετίες 2081-2100, 2041-2060, 2021-2040, και 1995-2014, για το σενάριο RCP8.5, στα ανάντη και κατάντη των θέσεων των γεφυρών #1, #2, #3, και #4, με το 1D HEC-RAS.

Όπως φαίνεται στην [Εικόνα 5-44](#), για το σενάριο RCP8.5 και τη μέση τιμή μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης εικοσαετίας 24 κλιματικών μοντέλων, στα ανάντη της γέφυρας #5 (Old Mill Road), με το 1D μοντέλο, προσομοιώθηκε αύξηση στη μέγιστη στάθμη νερού κατά 0.17 m στο εγγύς μέλλον, και μεγάλη αύξηση κατά 0.71 m, και 0.9 m, μεσοπρόθεσμα και μακροπρόθεσμα, συγκριτικά με την περίοδο βάσης. Στα κατάντη της γέφυρας #5 προσομοιώθηκαν αυξήσεις στη μέγιστη στάθμη νερού για τις περιόδους 2021-2040,

2041-2060, και 2081-2100, σε σχέση με την περίοδο 1995-2014, κατά 0.14 m, 0.47 m, και 0.61 m αντίστοιχα. Επιπλέον, τόσο στα ανάντη όσο και στα κατάντη της γέφυρας #5, κατά τη μεσοπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη περίοδο, η μέγιστη στάθμη νερού ξεπέρασε την κάτω παρειά της ανωδομής. Για το σενάριο RCP8.5 και τη μέση τιμή-24 κλιματικών μοντέλων-ημερήσιας βροχής που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας, με το 1D μοντέλο παράχθηκαν αυξήσεις της μέγιστης στάθμης νερού για τις εικοσαετίες 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 σε σύγκριση με την περίοδο 1995-2014, κατά 0.07 m, 0.08 m, και 0.2 m αντίστοιχα στα ανάντη της γέφυρας #5, ενώ στα κατάντη παράχθηκαν αυξήσεις κατά 0.06 m, 0.08 m, και 0.2 m αντίστοιχα.

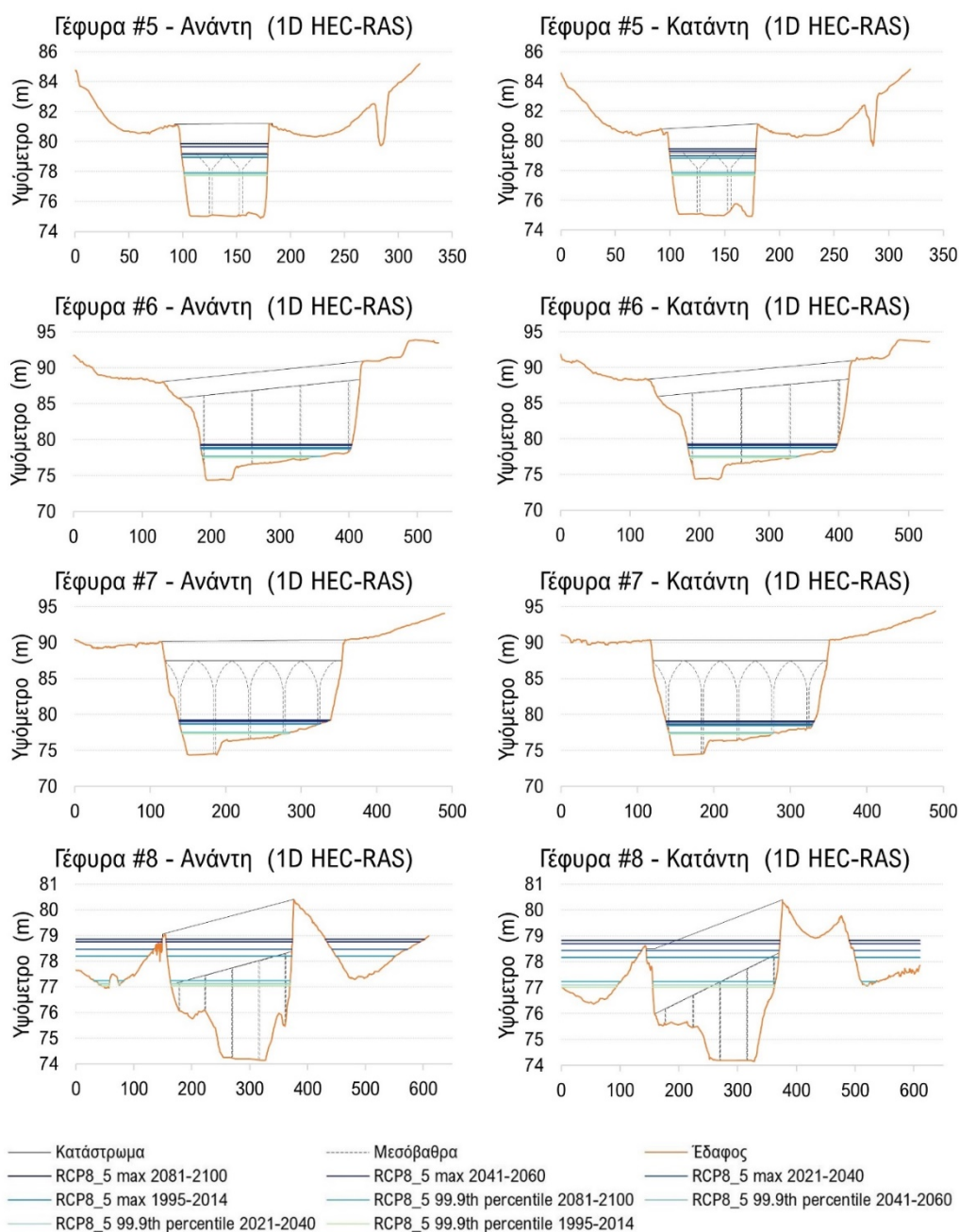
Στη γέφυρα #6 (Old Mill Subway Station Bridge), από την υδραυλική προσομοίωση των εξεταζόμενων γεγονότων με το 1D μοντέλο για το σενάριο RCP8.5, η μέγιστη στάθμη νερού ήταν χαμηλότερα από το κατάστρωμα της γέφυρας, τόσο στην ανάντη όσο και στην κατάντη όψη της γέφυρας. Για τη μέση τιμή μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης εικοσαετίας από τα 24 κλιματικά μοντέλα, παράχθηκε αύξηση της μέγιστης στάθμης νερού για τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 συγκριτικά με την περίοδο βάσης, κατά 0.14 m, 0.43 m, και 0.55 m αντίστοιχα στα ανάντη της γέφυρας #6, ενώ στα κατάντη παράχθηκαν αυξήσεις κατά 0.12 m, 0.42 m, και 0.55 m αντίστοιχα. Για τη μέση τιμή-24 κλιματικών μοντέλων-της ημερήσιας βροχόπτωσης που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας, προσομοιώθηκαν αυξήσεις της μέγιστης στάθμης νερού για τις εικοσαετίες 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 σε σύγκριση με την περίοδο 1995-2014, κατά 0.07 m, 0.08 m, και 0.2 m αντίστοιχα στα ανάντη της γέφυρας #6, ενώ στην κατάντη όψη παράχθηκαν αυξήσεις κατά 0.07 m, 0.09 m, και 0.21 m αντίστοιχα.

Για τη γέφυρα #7 (Bloor Street Humber River Bridge), η προσομοίωση των γεγονότων κλιματικής αλλαγής με το 1D υδραυλικό μοντέλο για το σενάριο RCP8.5, παρήγαγε μέγιστες στάθμες νερού χαμηλότερα από την ανωδομή της γέφυρας τόσο στα ανάντη όσο και στα κατάντη. Για τη μέση τιμή-από 24 κλιματικά μοντέλα-της μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης εικοσαετίας παράχθηκε αύξηση της μέγιστης στάθμης νερού για τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 σε σύγκριση με την περίοδο βάσης (1995-2014), κατά 0.1 m, 0.4 m, και 0.54 m αντίστοιχα στην ανάντη όψη της γέφυρας #7, ενώ στην κατάντη όψη προσομοιώθηκαν αυξήσεις κατά 0.22 m, 0.51 m, και 0.63 m αντίστοιχα. Για τη μέση τιμή ημερήσιας βροχόπτωσης-24 κλιματικών

μοντέλων–που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας, προσομοιώθηκαν αυξήσεις στη μέγιστη στάθμη νερού κατά τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 σε σχέση με την περίοδο βάσης, κατά 0.06 m, 0.08 m, και 0.2 m αντίστοιχα στα ανάντη της γέφυρας #7, ενώ στην κατάντη όψη παράχθηκαν αυξήσεις κατά 0.07 m, 0.09 m, και 0.21 m αντίστοιχα.

Στα ανάντη της γέφυρας #8 (The Queensway), για το σενάριο RCP8.5 και τη μέση τιμή μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης εικοσαετίας 24 κλιματικών μοντέλων, με το 1D υδραυλικό μοντέλο προσομοιώθηκε αύξηση της μέγιστης στάθμης νερού κατά 0.28 m, 0.56 m, και 0.66 m, για τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 αντίστοιχα, σε σύγκριση με την περίοδο 1995-2014. Επιπλέον, κατά τις 3 μελλοντικές εικοσαετίες, η μέγιστη στάθμη νερού ξεπέρασε την κάτω παρειά της ανωδομής της γέφυρας, ενώ για την περίοδο βάσης ξεπέρασε την κάτω παρειά της ανωδομής για αρκετά μεγάλο μήκος της προς τα ανατολικά. Στα κατάντη της γέφυρας #8 παράχθηκαν αυξήσεις στη μέγιστη στάθμη νερού για τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 σε σχέση με την περίοδο βάσης, κατά 0.27 m, 0.54 m, και 0.65 m αντίστοιχα. Επίσης, η μέγιστη στάθμη πλημμύρας ξεπέρασε την άνω παρειά του καταστρώματος στα ανατολικά για μόλις ορισμένο μήκος, έως και 0.18 m κατά τη μεσοπρόθεσμη περίοδο, και έως και 0.29 m μακροπρόθεσμα. Για το εγγύς μέλλον, η μέγιστη στάθμη νερού ξεπέρασε την κάτω παρειά της ανωδομής σε όλο το μήκος της, ενώ για την περίοδο βάσης, υπερέβη την κάτω παρειά της ανωδομής για μεγάλο μήκος της γέφυρας στα ανατολικά. Για το σενάριο RCP8.5 και τη μέση τιμή–24 κλιματικών μοντέλων–ημερήσιας βροχής που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας, με το 1D μοντέλο προσομοιώθηκαν αυξήσεις της μέγιστης στάθμης νερού για τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 συγκριτικά με την περίοδο 1995-2014, κατά 0.07 m, 0.09 m, και 0.21 m αντίστοιχα στα ανάντη της γέφυρας #8. Συγχρόνως, για τις 3 μελλοντικές εικοσαετίες, η μέγιστη στάθμη νερού ξεπέρασε την κάτω παρειά της ανωδομής στα ανατολικά, για μόλις λίγα μέτρα του μήκους της. Στα κατάντη παράχθηκαν αυξήσεις κατά 0.07 m, 0.08 m, και 0.21 m, για τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 αντίστοιχα, σε σχέση με την

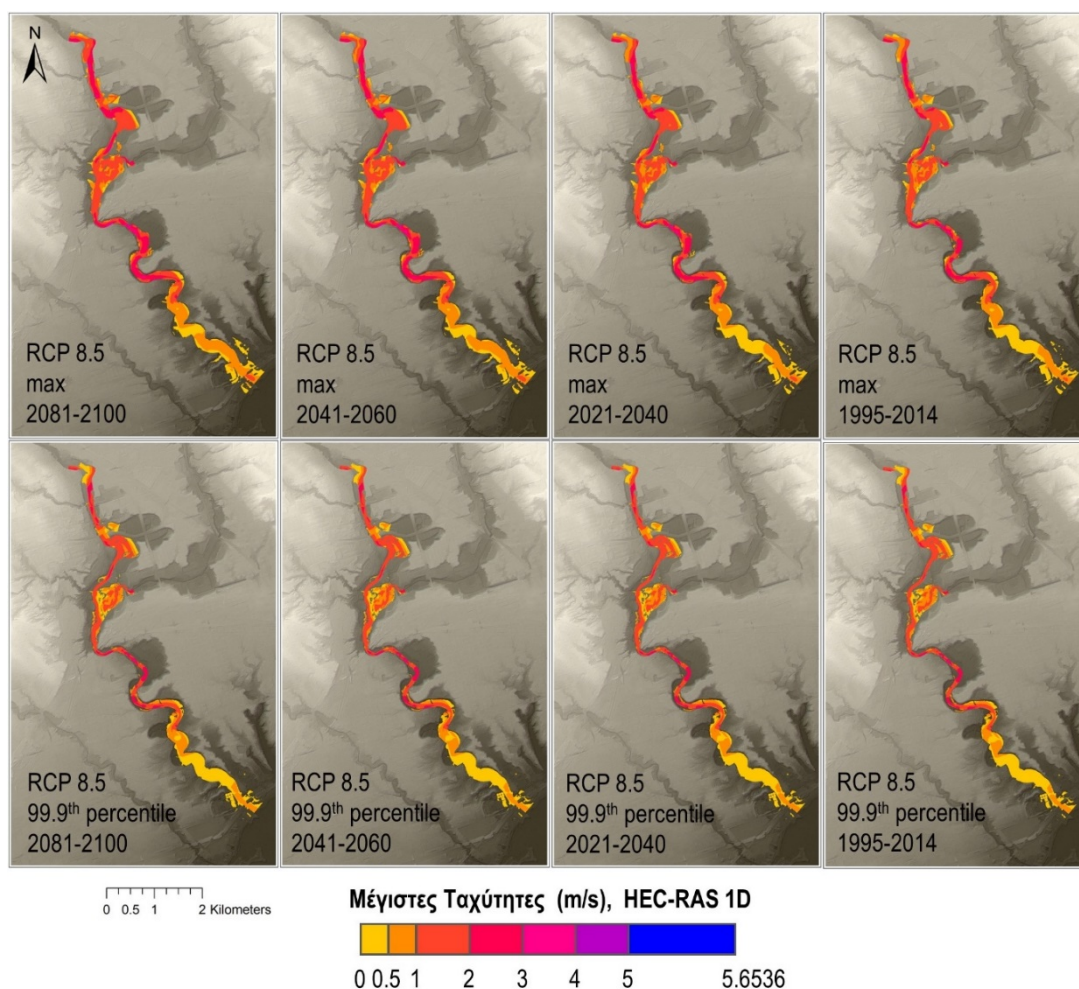
εικοσαετία αναφοράς. Επίσης, και για τις 4 περιόδους, η μέγιστη στάθμη νερού ξεπέρασε την κάτω παρειά της ανωδομής στα ανατολικά, για περίπου το ήμισυ του μήκους της.



Εικόνα 5-44. Μέγιστη στάθμη νερού βάσει των υδρογραφημάτων που προέκυψαν από τις μέσες τιμές βροχόπτωσης—από 24 κλιματικά μοντέλα—των μέγιστων ημερήσιων γεγονότων και των ημερήσιων γεγονότων που αντιστοιχούν στο 99.9 εκατοστημόριο για τις εικοσαετίες 2081-2100, 2041-2060, 2021-2040, και 1995-2014, για το σενάριο RCP8.5, στα ανάντη και κατάντη των θέσεων των γεφυρών #5, #6, #7, και #8, με το 1D HEC-RAS.

Όπως φαίνεται στην [Εικόνα 5-45](#), με το 1D υδραυλικό μοντέλο, για το σενάριο RCP8.5 και τη μέση τιμή μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης εικοσαετίας από τα 24 κλιματικά μοντέλα, παράχθηκε μέγιστη ταχύτητα του πλημμυρικού κύματος ίση με 3.99 m/s κατά

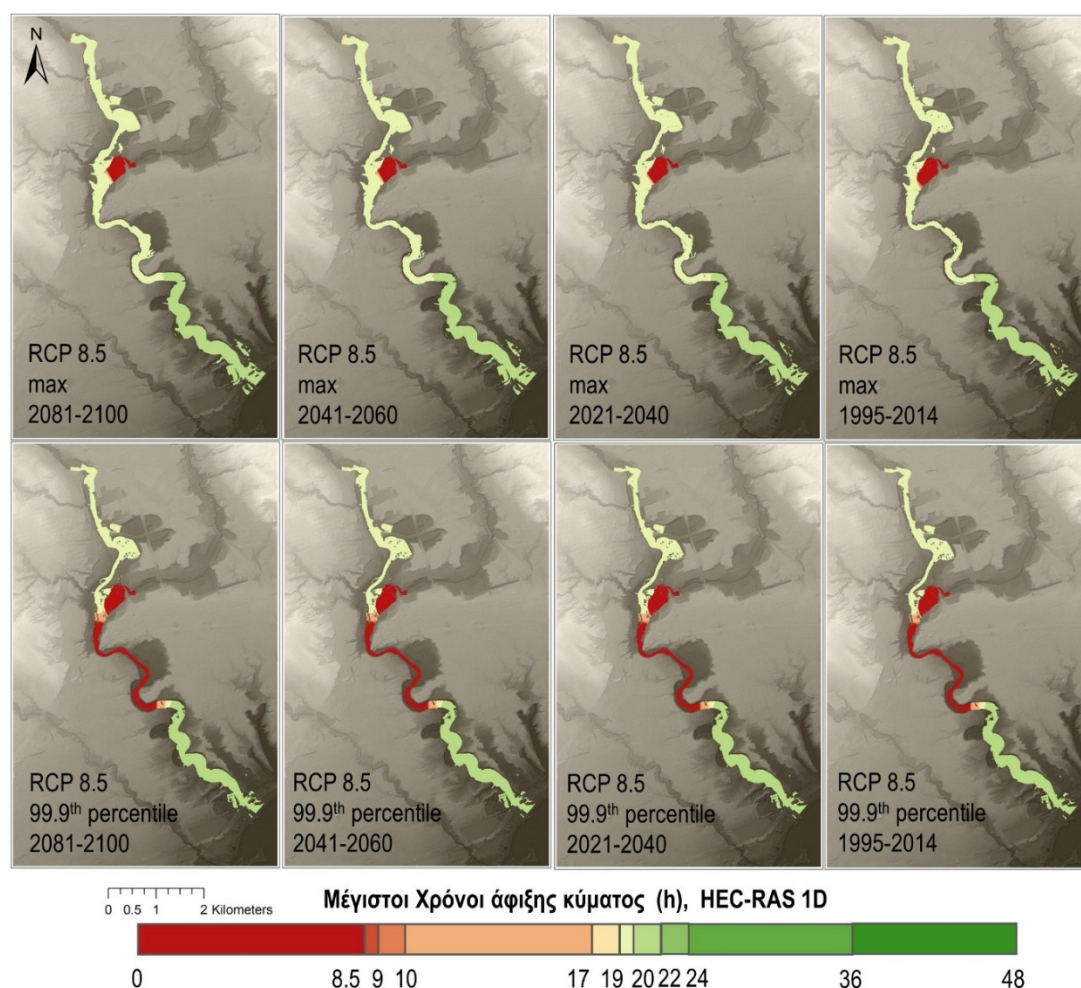
τις εικοσαετίες 1995-2014 και 2021-2040, 4.08 m/s μεσοπρόθεσμα (2041-2060), και 4.21 m/s κατά την περίοδο 2081-2100. Για το σενάριο RCP8.5 και τη μέση τιμή-24 κλιματικών μοντέλων-της ημερήσιας βροχής που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας, με το 1D μοντέλο προσομοιώθηκε και για τις 4 εξεταζόμενες εικοσαετίες η ίδια μέγιστη ταχύτητα του πλημμυρικού κύματος, ίση με 3.98 m/s. Για όλα τα γεγονότα παράχθηκαν σημαντικές ταχύτητες του πλημμυρικού κύματος για τα πρώτα 7.7 km της κοίτης του ποταμού Humber, όπως και στην κοίτη του ρέματος Black Creek. Ιδιαίτερα για τη μέση τιμή των γεγονότων μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης εικοσαετίας, σημαντικές ταχύτητες αναπτύχθηκαν και εκτός κοίτης, περίπου σε απόσταση 4 km από την έναρξη του τμήματος του ποταμού, καθώς και στην πεδιάδα στη συμβολή με το ρέμα.



Εικόνα 5-45. Μέγιστες ταχύτητες πλημμυρικού κύματος βάσει των υδρογραφημάτων που προέκυψαν από τις μέσες τιμές βροχόπτωσης-από 24 κλιματικά μοντέλα-των μέγιστων ημερήσιων γεγονότων & των ημερήσιων γεγονότων που αντιστοιχούν στο 99.9 εκατοστημόριο για τις εικοσαετίες 2081-2100, 2041-2060, 2021-2040, και 1995-2014, για το σενάριο RCP8.5, με το 1D HEC-RAS.

Στην [Εικόνα 5-46](#) φαίνονται οι χρόνοι άφιξης του μέγιστου πλημμυρικού βάθους στις πλημμυρικές πεδιάδες με το 1D υδραυλικό μοντέλο για το σενάριο RCP8.5. Για τη μέση

τιμή μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης εικοσαετίας από τα 24 κλιματικά μοντέλα, για τις 4 εξεταζόμενες εικοσαετίες, εντός της κοίτης του ποταμού Humber ο χρόνος άφιξης των μέγιστων πλημμυρικών βαθών συνέβη περίπου σε 19-21 h, ενώ στην έξοδο του Black Creek συνέβη μόλις σε 8 h για τα πρώτα μέτρα, και για τα επόμενα σε 19.5 h. Για τη μέση τιμή–24 κλιματικών μοντέλων–της ημερήσιας βροχής που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας, για τις 4 εικοσαετίες, εντός της κοίτης του ποταμού Humber ο χρόνος άφιξης των μέγιστων πλημμυρικών βαθών συνέβη περίπου σε 19-19.5 h για τα πρώτα 3.8 km, σε 11-15 h για τα επόμενα 0.2 km, σε 8-8.5 h για τα επόμενα 3.1 km περίπου, σε 11-15 h για τα επόμενα 0.2 km, σε 19-20 h για τα επόμενα 0.2 km, ενώ σε 21 h περίπου για τα τελευταία 4.2 km. Επίσης, στο τμήμα εξόδου του Black Creek, ο χρόνος άφιξης των μέγιστων πλημμυρικών βαθών συνέβη σε μόλις 8 h.



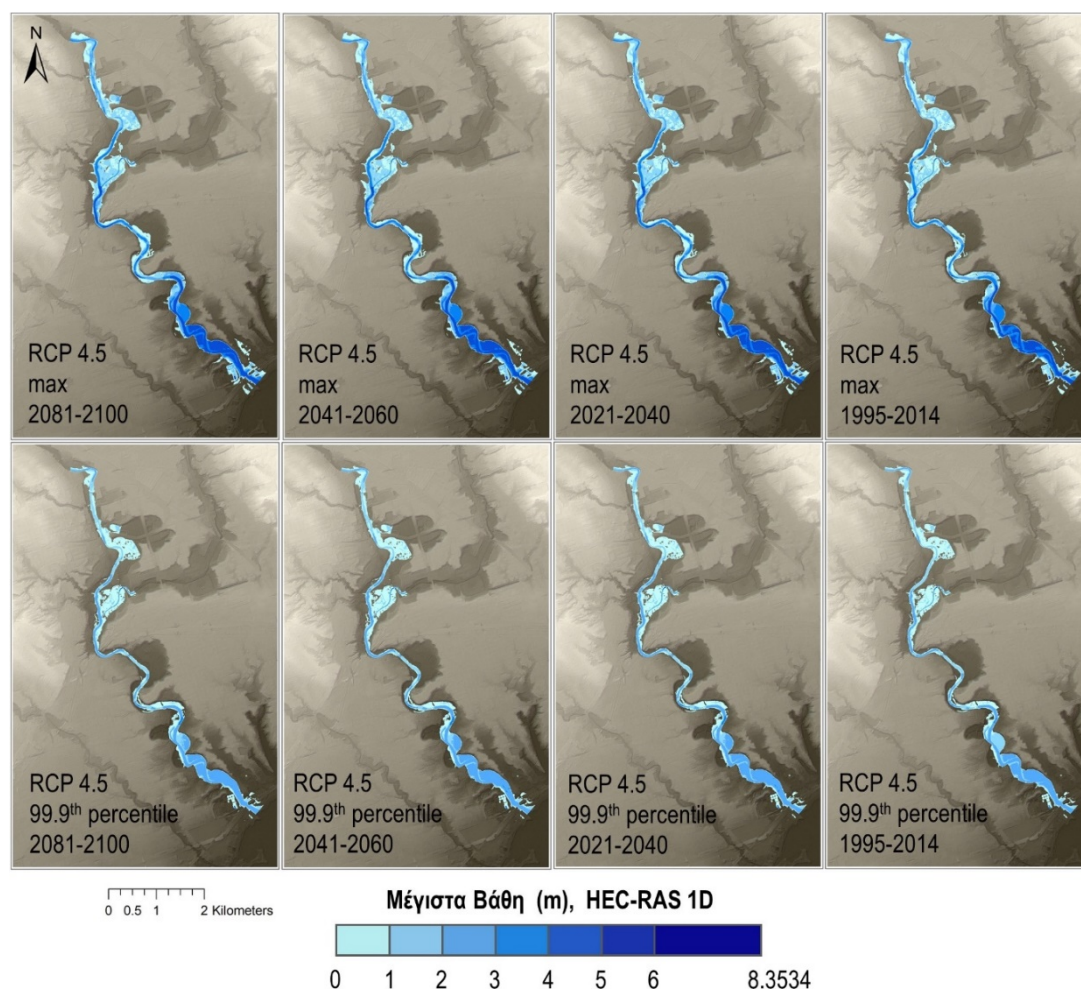
Εικόνα 5-46. Χρόνος άφιξης μέγιστων πλημμυρικών βαθών βάσει των υδρογραφημάτων που προέκυψαν από τις μέσες τιμές βροχόπτωσης–από 24 κλιματικά μοντέλα–των μέγιστων ημερήσιων γεγονότων & των ημερήσιων γεγονότων που αντιστοιχούν στο 99.9 εκατοστημόριο για τις εικοσαετίες 2081-2100, 2041-2060, 2021-2040, και 1995-2014, για το σενάριο RCP8.5, με το 1D HEC-RAS.

5.2.7 Αποτελέσματα υδραυλικού μοντέλου 1D HEC-RAS για το σενάριο RCP4.5

Με το υδραυλικό μοντέλο 1D HEC-RAS παράχθηκαν επίσης λεπτομερείς χάρτες πλημμύρας στο κάτω τμήμα του ποταμού Humber για το σενάριο θερμοκηπικών εκπομπών RCP4.5. Οι χάρτες αφορούν τα προσομοιωμένα μέγιστα πλημμυρικά βάθη στις πλημμυρισμένες επιφάνειες ([Εικόνα 5-47](#)), τις μέγιστες ταχύτητες του πλημμυρικού κύματος ([Εικόνα 5-50](#)), και τους χρόνους άφιξης των μέγιστων πλημμυρικών βαθών στις πλημμυρικές πεδιάδες ([Εικόνα 5-51](#)), λόγω της μέσης τιμής της μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης εικοσαετίας—από 24 κλιματικά μοντέλα—και της ημερήσιας βροχόπτωσης που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας, για τις περιόδους 2081-2100, 2041-2060, 2021-2040, και 1995-2014. Επιπρόσθετα, για τα εξεταζόμενα γεγονότα βροχής και το σενάριο RCP4.5, απεικονίζεται η μέγιστη στάθμη του νερού στα ανάντη και κατάντη των θέσεων των γεφυρών #1, #2, #3, και #4 στην [Εικόνα 5-48](#), καθώς και των γεφυρών #5, #6, #7, και #8 στην [Εικόνα 5-49](#).

Στην [Εικόνα 5-47](#) φαίνονται μικρές διαφοροποιήσεις στη μέγιστη πλημμυρισμένη έκταση για τη μέση τιμή της μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης εικοσαετίας, από 2.24 km² για την εικοσαετία βάσης (1995-2014), έως 2.37 km² μακροπρόθεσμα (2081-2100), ενώ όπως για το σενάριο RCP8.5, έτσι και για το RCP4.5, υπήρξε μια μικρή εξάπλωση της πλημμυρικής έκτασης εκτός κοίτης του ποταμού κατά το τελευταίο km πριν την εκβολή του. Για τη μέση τιμή της ημερήσιας βροχόπτωσης που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας, οι μέγιστες πλημμυρισμένες εκτάσεις δε διέφεραν σημαντικά ανά τις εικοσαετίες, με την επιφάνεια να κυμαίνεται από 1.68 km² για την εικοσαετία 1995-2014, έως 1.72 km² για την περίοδο 2081-2100. Το 1D μοντέλο για το σενάριο RCP4.5 και τη μέση τιμή μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης εικοσαετίας από τα 24 κλιματικά μοντέλα, παρήγαγε μέγιστο πλημμυρικό βάθος ίσο με 7.28 m κατά την περίοδο βάσης 1995-2014, 7.6 m βραχυπρόθεσμα (2021-2040), 7.57 m μεσοπρόθεσμα (2041-2060), και 7.65 m μακροπρόθεσμα (2081-2100). Για το σενάριο RCP4.5 και τη μέση τιμή ημερήσιας βροχής που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας, με το 1D μοντέλο προσομοιώθηκε μέγιστο πλημμυρικό βάθος ίσο με 5.86 m για την περίοδο βάσης 1995-2014, και παρόμοια μέγιστα πλημμυρικά βάθη για τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100, ίσα με 6 m, 6.01 m, και 5.97 m αντίστοιχα. Για τα γεγονότα κλιματικής αλλαγής που μελετήθηκαν, παράχθηκαν σημαντικά βάθη μέσα στην κοίτη του ποταμού, κυρίως κατά τα τελευταία 4 km πριν την εκβολή, μεγαλύτερα από 4 m για

τη μέση των γεγονότων μέγιστης ημερήσιας βροχής εικοσαετίας, και μεγαλύτερα από 2.5 m για τη μέση τιμή των γεγονότων ημερήσιας βροχής που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας.



Εικόνα 5-47. Μέγιστα πλημμυρικά βάθη βάσει των υδρογραφημάτων που προέκυψαν από τις μέσες τιμές βροχόπτωσης—από 24 κλιματικά μοντέλα—των μέγιστων ημερήσιων γεγονότων και των ημερήσιων γεγονότων που αντιστοιχούν στο 99.9 εκατοστημόριο για τις εικοσαετίες 2081-2100, 2041-2060, 2021-2040, και 1995-2014, για το σενάριο RCP4.5, με το 1D HEC-RAS.

Όπως φαίνεται στην [Εικόνα 5-48](#), στη γέφυρα #1 (Eglinton Avenue West), από την προσομοίωση των εξεταζόμενων γεγονότων με το 1D υδραυλικό μοντέλο για το σενάριο RCP4.5, οι μέγιστες στάθμες νερού έφτασαν χαμηλότερα από την ανωδομή της γέφυρας, τόσο στα ανάντη όσο και στα κατάντη. Για τη μέση τιμή μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης εικοσαετίας από τα 24 κλιματικά μοντέλα παράχθηκε αύξηση της μέγιστης στάθμης νερού για τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 συγκριτικά με την περίοδο βάσης, κατά 0.19 m, 0.17 m, και 0.21 m αντίστοιχα στην ανάντη όψη της γέφυρας #1, ενώ στην κατάντη όψη προσομοιώθηκαν αυξήσεις κατά 0.16 m, 0.14 m, και 0.18 m αντίστοιχα. Για τη μέση τιμή ημερήσιας βροχής—από 24

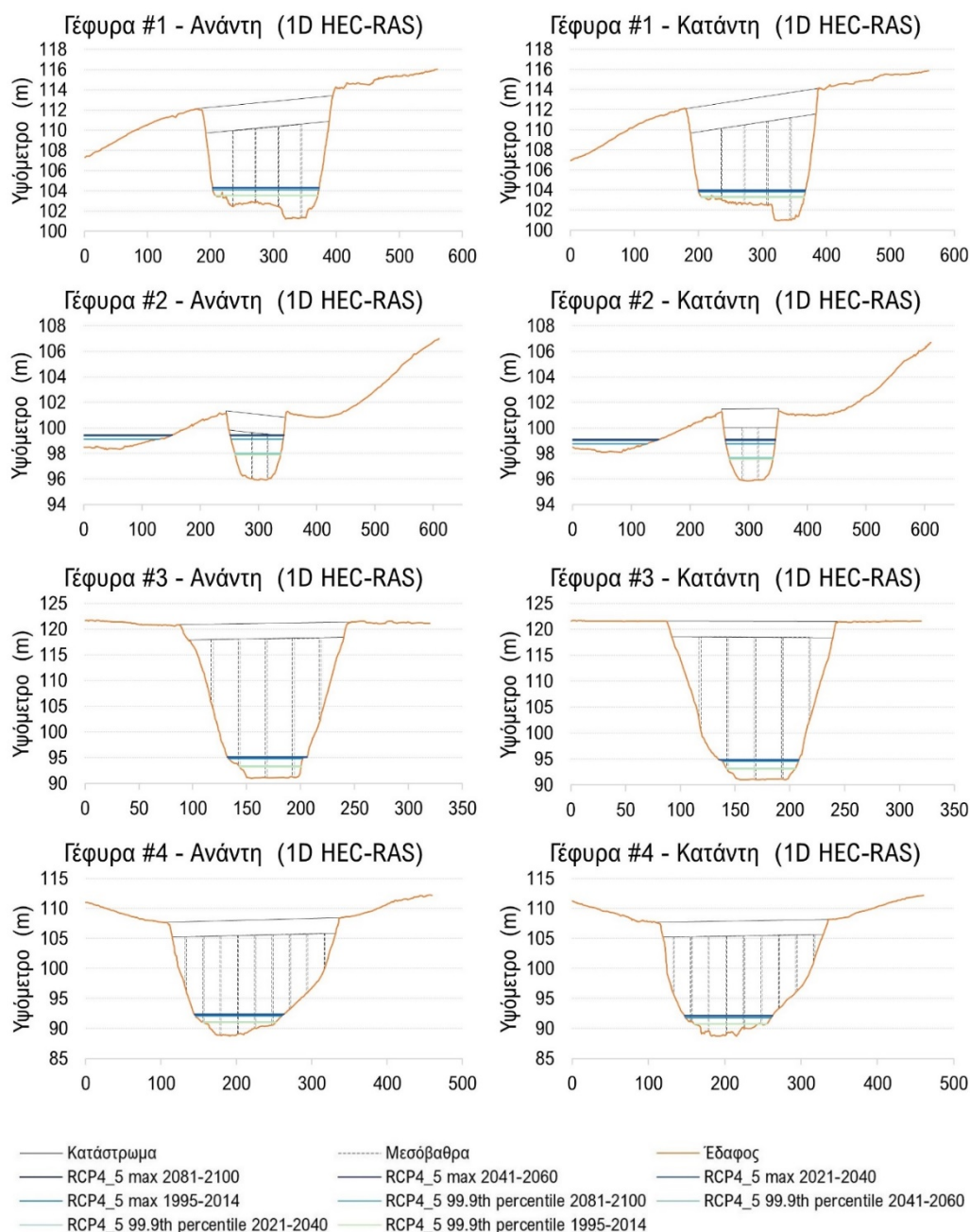
κλιματικά μοντέλα–που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας, προσομοιώθηκαν μικρές αυξήσεις της μέγιστης στάθμης νερού για τις 3 μελλοντικές εικοσαετίες σε σύγκριση με την περίοδο 1995-2014, από 0.04 m έως 0.06 m, τόσο στα ανάντη όσο και στα κατάντη της γέφυρας #1.

Στα ανάντη της γέφυρας #2 (Scarlett Road), για το σενάριο RCP4.5 και τη μέση τιμή μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης εικοσαετίας 24 κλιματικών μοντέλων, με το 1D υδραυλικό μοντέλο προσομοιώθηκε αύξηση της μέγιστης στάθμης νερού κατά 0.27 m, 0.25 m, και 0.31 m, για τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 αντίστοιχα, σε σύγκριση με την εικοσαετία βάσης (1995-2014). Επιπλέον, κατά τις 3 μελλοντικές εικοσαετίες, η μέγιστη στάθμη νερού ξεπέρασε την κάτω παρειά της ανωδομής της γέφυρας στα δυτικά για μόλις λίγα μέτρα του μήκους της. Στα κατάντη της γέφυρας #2 προσομοιώθηκαν ακριβώς οι ίδιες αυξήσεις στη μέγιστη στάθμη νερού με αυτές στα ανάντη για τις μελλοντικές περιόδους σε σχέση με την εικοσαετία αναφοράς, ωστόσο δεν ξεπέρασαν την κάτω παρειά της ανωδομής της γέφυρας. Για το σενάριο RCP4.5 και τη μέση τιμή ημερήσιας βροχής–24 κλιματικών μοντέλων–που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας, με το 1D υδραυλικό μοντέλο προσομοιώθηκαν μικρές αυξήσεις της μέγιστης στάθμης νερού για τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100, συγκριτικά με την περίοδο 1995-2014, κατά μόλις 0.13 m, 0.13 m, και 0.09 m αντίστοιχα στα ανάντη της γέφυρας #2, ενώ στα κατάντη παράχθηκαν αυξήσεις κατά 0.13 m, 0.14 m, και 0.09 m αντίστοιχα.

Για τη γέφυρα #3 (Lambton Canadian Pacific Railway Bridge), η υδραυλική προσομοίωση των γεγονότων κλιματικής αλλαγής με το 1D μοντέλο για το σενάριο RCP4.5, παρήγαγε μέγιστες στάθμες νερού χαμηλότερα από το κατάστρωμα της γέφυρας, τόσο στην ανάντη όσο και στην κατάντη όψη της γέφυρας. Για τη μέση τιμή μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης εικοσαετίας από τα 24 κλιματικά μοντέλα, παράχθηκε αύξηση της μέγιστης στάθμης νερού για τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 συγκριτικά με την εικοσαετία βάσης (1995-2014), κατά 0.33 m, 0.3 m, και 0.37 m αντίστοιχα στα ανάντη της γέφυρας #3, ενώ στα κατάντη παράχθηκαν αυξήσεις κατά 0.32 m, 0.29 m, και 0.36 m αντίστοιχα. Για τη μέση τιμή–από 24 κλιματικά μοντέλα–ημερήσιας βροχής που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας, προσομοιώθηκαν μικρές αυξήσεις της μέγιστης στάθμης νερού για τις εικοσαετίες 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 σε σύγκριση με την περίοδο 1995-2014, κατά μόλις

0.14 m, 0.13 m, και 0.1 m αντίστοιχα στα ανάντη της γέφυρας #3, ενώ στην κατάντη όψη της γέφυρας παράχθηκαν μικρές αυξήσεις κατά 0.13 m, 0.12 m, και 0.09 m αντίστοιχα.

Στη γέφυρα #4 (Dundas Street West), από την προσομοίωση των εξεταζόμενων γεγονότων με το 1D υδραυλικό μοντέλο για το σενάριο RCP4.5, οι μέγιστες στάθμες νερού ήταν χαμηλότερα από την ανωδομή της γέφυρας τόσο στα ανάντη όσο και στα κατάντη. Για τη μέση τιμή–24 κλιματικών μοντέλων–της μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης εικοσαετίας, παράχθηκε αύξηση της μέγιστης στάθμης νερού για τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 σε σχέση με την περίοδο βάσης, κατά 0.31 m, 0.28 m, και 0.35 m αντίστοιχα, τόσο στην ανάντη όσο και στην κατάντη όψη της γέφυρας. Για τη μέση τιμή ημερήσιας βροχής–24 κλιματικών μοντέλων–που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας, προσομοιώθηκαν μικρές αυξήσεις στη μέγιστη στάθμη νερού για τις 3 μελλοντικές εικοσαετίες σε σχέση με την περίοδο βάσης, από 0.07 m έως 0.1 m στα ανάντη της γέφυρας #4, και από 0.08 m έως 0.11 m στα κατάντη.



Εικόνα 5-48. Μέγιστη στάθμη νερού βάσει των υδρογραφημάτων που προέκυψαν από τις μέσες τιμές βροχόπτωσης—από 24 κλιματικά μοντέλα—των μέγιστων ημερήσιων γεγονότων και των ημερήσιων γεγονότων που αντιστοιχούν στο 99.9 εκατοστημόριο για τις εικοσαετίες 2081-2100, 2041-2060, 2021-2040, και 1995-2014, για το σενάριο RCP4.5, στα ανάντη και κατάντη των θέσεων των γεφυρών #1, #2, #3, και #4, με το 1D HEC-RAS.

Όπως φαίνεται στην [Εικόνα 5-49](#), για το σενάριο RCP4.5 και τη μέση τιμή μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης εικοσαετίας από τα 24 κλιματικά μοντέλα, στα ανάντη της γέφυρας #5 (Old Mill Road), με το 1D υδραυλικό μοντέλο, προσομοιώθηκαν αυξήσεις στη μέγιστη στάθμη νερού κατά 0.5 m, 0.42 m, και 0.58 m, για τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 αντίστοιχα, συγκριτικά με την περίοδο βάσης. Επιπλέον, για τις 3 μελλοντικές εικοσαετίες η μέγιστη στάθμη νερού ξεπέρασε την κάτω παρειά της

ανωδομής της γέφυρας. Στα κατάντη της γέφυρας #5 προσομοιώθηκαν αυξήσεις στη μέγιστη στάθμη νερού για τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100, σε σχέση με την εικοσαετία βάσης, κατά 0.32 m, 0.28 m, και 0.38 m αντίστοιχα. Συγχρόνως, για τις περιόδους 2021-2040 και 2081-2100, η μέγιστη στάθμη νερού ξεπέρασε την κάτω παρειά της ανωδομής. Για το σενάριο RCP4.5 και τη μέση τιμή-24 κλιματικών μοντέλων-ημερήσιας βροχής που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας, με το 1D υδραυλικό μοντέλο παράχθηκαν μικρές αυξήσεις της μέγιστης στάθμης νερού για τις εικοσαετίες 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 σε σύγκριση με την περίοδο 1995-2014, κατά μόλις 0.14 m, 0.15 m, και 0.1 m αντίστοιχα στα ανάντη της γέφυρας #5, ενώ στα κατάντη παράχθηκαν αυξήσεις κατά 0.13 m, 0.14 m, και 0.09 m αντίστοιχα.

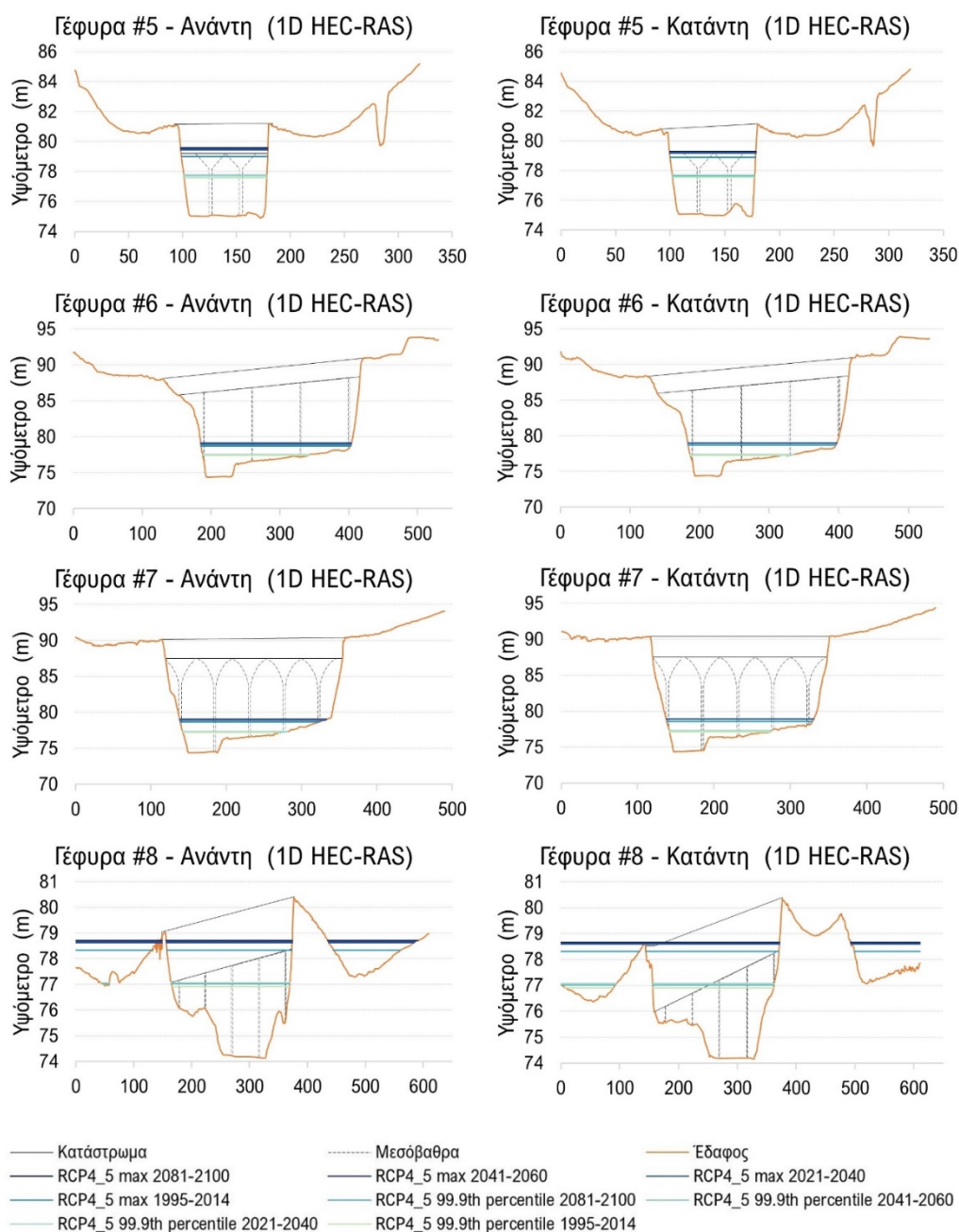
Για τη γέφυρα #6 (Old Mill Subway Station Bridge), η προσομοίωση των γεγονότων κλιματικής αλλαγής με το 1D υδραυλικό μοντέλο για το σενάριο RCP4.5, παρήγαγε χαμηλότερες στάθμες νερού από το κατάστρωμα της γέφυρας, τόσο στην ανάντη όσο και στην κατάντη όψη της γέφυρας. Για τη μέση τιμή μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης εικοσαετίας από τα 24 κλιματικά μοντέλα, προσομοιώθηκε αύξηση της μέγιστης στάθμης νερού για τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 συγκριτικά με την περίοδο βάσης (1995-2014), κατά 0.29 m, 0.25 m, και 0.34 m αντίστοιχα στα ανάντη της γέφυρας #6, ενώ στα κατάντη παράχθηκαν αυξήσεις κατά 0.28 m, 0.24 m, και 0.33 m αντίστοιχα. Για τη μέση τιμή-24 κλιματικών μοντέλων-ημερήσιας βροχής που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας, προσομοιώθηκαν μικρές αυξήσεις της μέγιστης στάθμης νερού κατά τις εικοσαετίες 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 σε σύγκριση με την περίοδο 1995-2014, κατά μόλις 0.13 m, 0.14 m, και 0.1 m αντίστοιχα στα ανάντη της γέφυρας #6, ενώ στην κατάντη όψη της γέφυρας παράχθηκαν αυξήσεις κατά 0.14 m, 0.15 m, και 0.1 m αντίστοιχα.

Στη γέφυρα #7 (Bloor Street Humber River Bridge), από την υδραυλική προσομοίωση των εξεταζόμενων γεγονότων με το 1D μοντέλο για το σενάριο RCP4.5, η μέγιστη στάθμη νερού ήταν χαμηλότερα από την ανωδομή της γέφυρας, τόσο στα ανάντη όσο και στα κατάντη. Για τη μέση τιμή-24 κλιματικών μοντέλων-της μέγιστης ημερήσιας βροχής εικοσαετίας παράχθηκε αύξηση της μέγιστης στάθμης νερού για τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 σε σύγκριση με την εικοσαετία βάσης (1995-2014), κατά 0.28 m, 0.24 m, και 0.33 m αντίστοιχα στην ανάντη όψη της γέφυρας #7, ενώ στην κατάντη όψη προσομοιώθηκαν αυξήσεις κατά 0.32 m, 0.29 m, και 0.37 m αντίστοιχα. Για

τη μέση τιμή ημερήσιας βροχής–24 κλιματικών μοντέλων–που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας, προσομοιώθηκαν μικρές αυξήσεις στη μέγιστη στάθμη νερού κατά τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 σε σχέση με την περίοδο βάσης, κατά 0.14 m, 0.15 m, και 0.1 m αντίστοιχα στα ανάντη της γέφυρας #7, ενώ στα κατάντη παράχθηκαν αυξήσεις κατά 0.15 m, 0.15 m, και 0.11 m αντίστοιχα.

Στα ανάντη της γέφυρας #8 (The Queensway), για το σενάριο RCP4.5 και τη μέση τιμή μέγιστης ημερήσιας βροχής εικοσαετίας από 24 κλιματικά μοντέλα, με το 1D υδραυλικό μοντέλο προσομοιώθηκε αύξηση της μέγιστης στάθμης νερού κατά 0.32 m, 0.29 m, και 0.37 m, για τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 αντίστοιχα, σε σύγκριση με την περίοδο 1995-2014. Επιπλέον, κατά τις 3 μελλοντικές εικοσαετίες, η μέγιστη στάθμη νερού ξεπέρασε την κάτω παρειά της ανωδομής σε όλο το μήκος της γέφυρας, ενώ κατά την περίοδο βάσης (1995-2014), η μέγιστη στάθμη νερού ξεπέρασε την κάτω παρειά της ανωδομής σχεδόν σε ολόκληρο το μήκος της γέφυρας. Στα κατάντη της γέφυρας #8 παράχθηκαν αυξήσεις στη μέγιστη στάθμη νερού για τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 σε σχέση με την περίοδο βάσης, κατά 0.31 m, 0.28 m, και 0.36 m αντίστοιχα. Επιπρόσθετα, η μέγιστη στάθμη πλημμύρας ξεπέρασε την άνω παρειά του καταστρώματος στα ανατολικά για μόλις ορισμένο μήκος στις 3 μελλοντικές εικοσαετίες, έως και 0.1 m για την περίοδο 2021-2040, έως και 0.07 m για την περίοδο 2041-2060, καθώς και έως και 0.15 m για την περίοδο 2081-2100. Για την περίοδο βάσης, η μέγιστη στάθμη πλημμύρας ξεπέρασε την κάτω παρειά της ανωδομής σχεδόν σε ολόκληρο το μήκος της γέφυρας. Για το σενάριο RCP4.5 και τη μέση τιμή ημερήσιας βροχής στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας–24 κλιματικών μοντέλων–η προσομοίωση με το 1D μοντέλο παρήγαγε μικρές αυξήσεις της μέγιστης στάθμης νερού για τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 συγκριτικά με την περίοδο 1995-2014, κατά 0.14 m, 0.15 m, και 0.11 m αντίστοιχα στα ανάντη της γέφυρας #8, ωστόσο δεν ξεπέρασαν την κάτω παρειά της ανωδομής της γέφυρας. Στα κατάντη παράχθηκαν αυξήσεις της μέγιστης στάθμης νερού σε σχέση με την περίοδο αναφοράς, κατά 0.15 m, 0.16 m, και 0.11 m, για τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 αντίστοιχα.

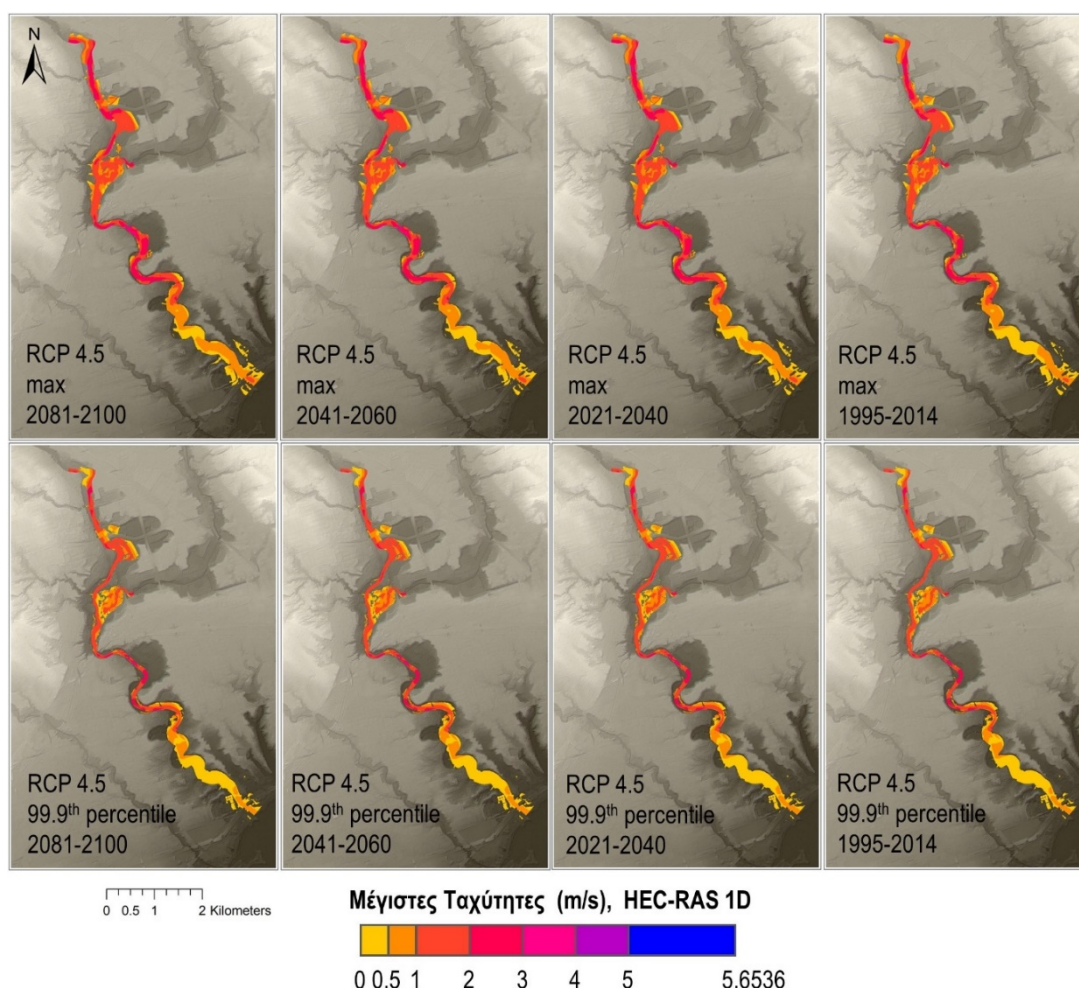
Επιπρόσθετα, για τις 4 εικοσαετίες, η μέγιστη στάθμη νερού ξεπέρασε την κάτω παρειά της ανωδομής στα ανατολικά για περίπου το ήμισυ του μήκους της γέφυρας.



Εικόνα 5-49. Μέγιστη στάθμη νερού βάσει των υδρογραφημάτων που προέκυψαν από τις μέσες τιμές βροχόπτωσης—από 24 κλιματικά μοντέλα—των μέγιστων ημερήσιων γεγονότων και των ημερήσιων γεγονότων που αντιστοιχούν στο 99.9 εκατοστημόριο για τις εικοσαετίες 2081-2100, 2041-2060, 2021-2040, και 1995-2014, για το σενάριο RCP4.5, στα ανάντη και κατάντη των θέσεων των γεφυρών #5, #6, #7, και #8, με το 1D HEC-RAS.

Στην [Εικόνα 5-50](#) φαίνεται η χωρική κατανομή των μέγιστων ταχυτήτων του κύματος πλημμύρας για τα μελετώμενα βροχοπτώτικα γεγονότα, από την προσομοίωση με το 1D υδραυλικό μοντέλο για το σενάριο RCP4.5. Για τη μέση τιμή της μέγιστης ημερήσιας

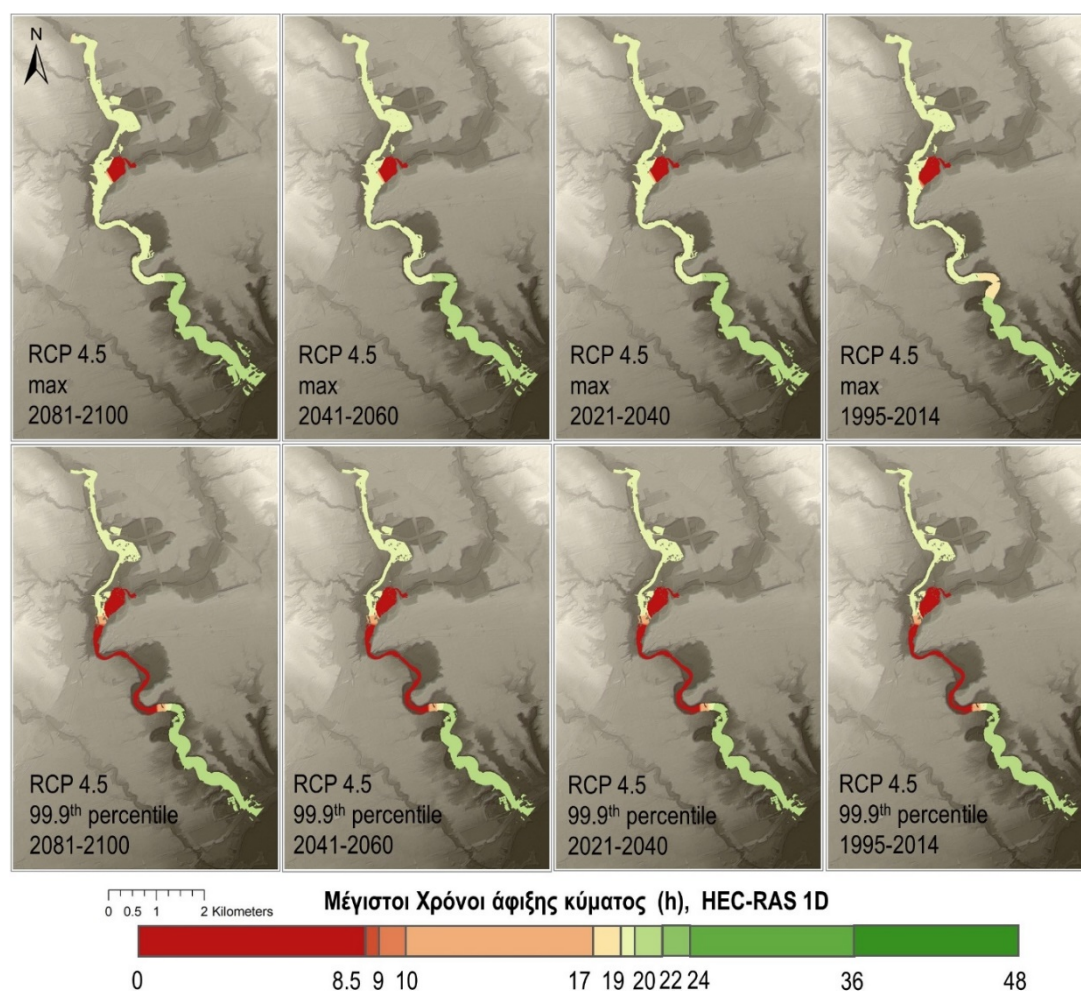
βροχής εικοσαετίας, από 24 κλιματικά μοντέλα, παράχθηκε μέγιστη ταχύτητα πλημμυρικού κύματος ίση με 3.99 m/s κατά τις περιόδους 1995-2014 και 2041-2060, 4 m/s βραχυπρόθεσμα (2021-2040), και 4.05 m/s μακροπρόθεσμα (2081-2100). Για τη μέση τιμή–24 κλιματικών μοντέλων–της ημερήσιας βροχής στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας, παράχθηκε και για τις 4 εξεταζόμενες περιόδους η ίδια μέγιστη ταχύτητα του κύματος πλημμύρας, ίση με 3.98 m/s. Για όλα τα γεγονότα παράχθηκαν σημαντικές ταχύτητες πλημμυρικού κύματος για τα πρώτα 7.7 km περίπου της κοίτης του ποταμού Humber, αλλά και εντός της κοίτης του ρέματος Black Creek. Ειδικά για τη μέση τιμή των γεγονότων μέγιστης ημερήσιας βροχής εικοσαετίας, υψηλές ταχύτητες παράχθηκαν και εκτός κοίτης, σε απόσταση περίπου 4 km από την έναρξη του τμήματος του ποταμού.



Εικόνα 5-50. Μέγιστες ταχύτητες πλημμυρικού κύματος βάσει των υδρογραφημάτων που προέκυψαν από τις μέσες τιμές βροχόπτωσης–από 24 κλιματικά μοντέλα–των μέγιστων ημερήσιων γεγονότων & των ημερήσιων γεγονότων που αντιστοιχούν στο 99.9 εκατοστημόριο για τις εικοσαετίες 2081-2100, 2041-2060, 2021-2040, και 1995-2014, για το σενάριο RCP4.5, με το 1D HEC-RAS.

Στην [Εικόνα 5-51](#) φαίνονται οι χρόνοι άφιξης των μέγιστων πλημμυρικών βαθών στις πλημμυρικές επιφάνειες με το 1D υδραυλικό μοντέλο για το σενάριο RCP4.5. Για τη μέση

τιμή-24 κλιματικών μοντέλων-μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης εικοσαετίας, για τις 4 μελετώμενες περιόδους, η άφιξη των μέγιστων πλημμυρικών βαθών κατά μήκος της κοίτης του ποταμού Humber συνέβη περίπου σε 19-21 h, ενώ στην κοίτη του ρέματος Black Creek συνέβη σε μόλις 8 h για τα πρώτα 0.5-0.7 km, και σε 19.5 h περίπου για το υπόλοιπο μήκος, έως τη συμβολή. Για τη μέση τιμή ημερήσιας βροχής που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας από 24 κλιματικά μοντέλα, για τις 4 μελετώμενες εικοσαετίες, εντός της κοίτης του ποταμού Humber τα μέγιστα πλημμυρικά βάθη αφίχθησαν περίπου σε 19-19.5 h για τα πρώτα 3.8 km, σε 11-15 h για τα επόμενα 0.2 km, σε 8-8.5 h για τα επόμενα 3.1 km περίπου, σε 11-15 h για τα επόμενα 0.2 km, σε 19-20 h για τα επόμενα 0.2 km, ενώ σε 20-21 h περίπου για τα τελευταία 4.2 km. Επίσης, στο τμήμα του Black Creek η άφιξη των μέγιστων πλημμυρικών βαθών συνέβη σε μόλις 8 h.



Εικόνα 5-51. Χρόνος άφιξης μέγιστων πλημμυρικών βαθών βάσει των υδρογραφημάτων που προέκυψαν από τις μέσες τιμές βροχόπτωσης-από 24 κλιματικά μοντέλα-των μέγιστων ημερήσιων γεγονότων & των ημερήσιων γεγονότων που αντιστοιχούν στο 99.9 εκατοστημόριο για τις εικοσαετίες 2081-2100, 2041-2060, 2021-2040, και 1995-2014, για το σενάριο RCP4.5, με το 1D HEC-RAS.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

6.1 Συζήτηση και συμπεράσματα

6.1.1 Μελέτη υδρολογικής απόκρισης της λεκάνης του ρέματος Αλμυρίδας χωρίς καταγεγραμμένη απορροή

Στην εργασία, εξετάζεται η υδρολογική απόκριση μιας μικρής έκτασης λεκάνης υπό το συμβάν αιφνίδιας πλημμύρας της 17^{ης} Οκτωβρίου 2006, χωρίς επαρκή δεδομένα πεδίου. Η λεκάνη δε διαθέτει μετρήσεις απορροής ή/και στάθμης. Μοναδικό διαθέσιμο στοιχείο είναι οι μαρτυρίες των κατοίκων για την ώρα διέλευσης του μέγιστου πλημμυρικού κύματος μεταξύ 12:00 και 13:00. Μετά την πλημμύρα, μετρήθηκε η στάθμη του νερού σε διατομή ελέγχου από πλημμυρικό ίχνος, περίπου 200 m πριν από την εκβολή του ρέματος, περίπου στα 2 m, με μια ποιοτική θεώρηση αβεβαιότητας στη μέτρηση, λόγω της λάσπης και των χαλικιών που μετακινήθηκαν/εναποτέθηκαν από την/ή στη διατομή κατά τη διάρκεια της έντονης βροχόπτωσης. Έγινε υδρολογική προσομοίωση του βροχοπτώσιου συμβάντος, και από τα παραγόμενα υδρογραφήματα επικυρώθηκε το υδρογράφημα που συμφωνεί με τα δεδομένα που συλλέχθηκαν μετά την πλημμύρα μέσω υδραυλικής προσομοίωσης. Καθοριστικός είναι ο ρόλος παραγόντων αβεβαιότητας στον υπολογισμό των υδρολογικών παραμέτρων για την προσέγγιση του πραγματικού υδρογραφήματος. Το ποσοστό αδιαπερατότητας, ο αριθμός καμπύλης CN , ο χρόνος συγκέντρωσης T_c , και ο συντελεστής αποθήκευσης R είναι οι πιο σημαντικές παράμετροι που επηρεάζουν την προσομοιωθείσα μέγιστη απορροή. Ο T_c είναι η πιο ευαίσθητη παράμετρος που προκαλεί μεγάλες χρονικές μετατοπίσεις και διακυμάνσεις της μέγιστης απορροής. Η προσομοιωμένη μέγιστη απορροή των 109 m³/s επικυρώνεται λαμβάνοντας μια μέση τιμή του εύρους του ποσοστού αδιαπερατότητας και προσαρμογή στην εξίσωση Kirpich. Οι χρήσεις γης της περιοχής κατά το γεγονός πιθανώς διαφοροποιούνται από τους χρησιμοποιημένους χάρτες, επομένως παρουσιάζεται μια πιθανή αβεβαιότητα στον υπολογισμό του CN . Όσον αφορά τα όρια αβεβαιότητας του συντελεστή αποθήκευσης R , η μείωση αυτού προκαλεί αύξηση της μέγιστης απορροής, ενώ η αύξησή του οδηγεί σε μείωση αυτής.

Ερευνητές έχουν επισημάνει την ανάγκη για χρονικό βήμα ανάλυσης δεδομένων μικρότερο από ημερήσιο, για τη διερεύνηση πιθανών κινδύνων από ακραία υδρομετεωρολογικά φαινόμενα, και ακριβέστερες προβλέψεις για την κλιματική αλλαγή σε λεκάνες απορροής της Κρήτης και της Μεσογείου (Taroglou et al., 2019; Vozinaki et al., 2018). Η παρούσα υδρολογική ανάλυση στη μικρής έκτασης λεκάνη δείχνει ότι για γεγονότα βροχής μικρής διάρκειας και υψηλής έντασης, η προσομοίωση με διάφορα χρονικά βήματα βροχόπτωσης δημιουργεί σημαντική διαφοροποίηση στη μέγιστη απορροή. Καταγραφές δεδομένων βροχόπτωσης ανά 1 h ή περισσότερο δεν παράγουν αξιόπιστη προσομοίωση της απορροής αιχμής. Σε λεκάνες απορροής παρόμοιας έκτασης συνιστάται το χρονικό βήμα δεδομένων βροχόπτωσης να είναι μικρότερο από 30 min. Για το μελετώμενο γεγονός ισχυρής βροχόπτωσης, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα με 15λεπτο χρονικό βήμα, ως η καλύτερη κατανομή βήματος μικρότερου της 1 h για την επικύρωση του υδρογραφήματος.

6.1.2 Επίδραση της κλιματικής αλλαγής στην υδρολογία της λεκάνης του ρέματος Αλμυρίδας

Οι κλιματικές προβολές της βάσης δεδομένων EURO-CORDEX είναι χωρικής ανάλυσης 12.5 km × 12.5 km, και δε δύνανται να χρησιμοποιηθούν στη μικρής έκτασης υδρολογική λεκάνη της Αλμυρίδας με επιφάνεια κατά μία τάξη μεγέθους μικρότερη από το μέγεθος πλέγματος του CORDEX. Επίσης, τα δεδομένα κλιματικών μοντέλων παρέχονται σε ημερήσιο βήμα, τα οποία δεν είναι κατάλληλα για ανάλυση αιφνιδίων πλημμυρών. Για την περιοχή μελέτης, διατίθενται καταγεγραμμένα δεδομένα βροχόπτωσης με βήμα 10 λεπτών από τα τέλη του 2015 έως σήμερα, ωστόσο, η ελάχιστη απαίτηση για την κλιματική προβολή των δεδομένων στο μέλλον είναι 30 χρόνια. Τα εξεταζόμενα σενάρια αύξησης της βροχόπτωσης αιχμής και ανακατανομής του υπόλοιπου ύψους υετού είναι πολύ πιθανό να συμβούν, καθώς άλλοι βροχομετρικοί σταθμοί της Περιφερειακής Ενότητας Χανίων έχουν ήδη καταγράψει υψηλότερη ημερήσια βροχόπτωση, της τάξης των 400 mm. Συγχρόνως, από σφοδρές καταιγίδες που περνούν πάνω από την Κρήτη, διάφορα γειτονικά βροχόμετρα κοντά στη λεκάνη της Αλμυρίδας έχουν ήδη καταγράψει πιο έντονες βροχοπτώσεις, με χρονικό βήμα δεδομένων μικρότερο της 1 h. Εντάσεις βροχής υψηλότερες από τα 45 mm/h του μελετώμενου γεγονότος έχουν καταγραφεί, υποδεικνύοντας την αναμενόμενη εντατικοποίηση του υδρολογικού κύκλου λόγω της κλιματικής αλλαγής. Αξιολογείται ότι οι εντάσεις βροχοπτώσεων σε λιγότερο από 1 h θα

αυξηθούν περαιτέρω. Από δεδομένα γειτονικών σταθμών για άλλα σφοδρά γεγονότα, εντοπίστηκαν αιχμές βροχόπτωσης ίσες με 20–25 mm σε 10 λεπτά, οι οποίες είναι υψηλότερες από αυτή που καταγράφηκε στο γεγονός του 2006 στην Αλμυρίδα. Αυτός ήταν ο λόγος για την εξέταση της επίδρασης υποθετικών σεναρίων κλιματικής αλλαγής–για το ίδιο συνολικό ύψος υετού με αυτό του μελετώμενου γεγονότος–αυξάνοντας την αιχμή της βροχόπτωσης έως και 300% με ταυτόχρονη ανακατανομή της υπόλοιπης αθροιστικής βροχής. Η εκτέλεση του υδρολογικού μοντέλου με αυξημένη ένταση βροχόπτωσης κατά 100% παρήγαγε μέγιστη απορροή ίση με 130.6 m³/s. Μια τέτοια αύξηση πιθανότατα θα συμβεί σύμφωνα με καταγεγραμμένες βροχοπτώσεις σε κοντινούς σταθμούς. Από τη βάση δεδομένων EURO-CORDEX με προβολές βροχόπτωσης έως το 2098 σε χωρική ανάλυση 12.5 km × 12.5 km, η ημερήσια βροχόπτωση αναμένεται μελλοντικά να φτάσει έως και 345 mm, σύμφωνα με το κλιματικό μοντέλο MPI-ESM-LR_r1i1p1_CSC_REMO, για το σενάριο θερμοκηπικών εκπομπών RCP4.5. Η ανάλυση 11 ισχυρών καταιγιδοφόρων γεγονότων για τα έτη 2015–2019 παρήγαγε αναλογία ημερήσιας προς ωριαία βροχόπτωση ίση προς 6.16 ± 3.49 (Παράρτημα Δ). Εφαρμόζοντας την αναλογία στο ημερήσιο γεγονός των 345 mm, προκύπτει η ωριαία βροχόπτωση μεταξύ 35.8 mm/h και 129.2 mm/h, ήτοι σε ανάλογα μεγέθη με τις εντάσεις βροχής του βασικού σεναρίου και του αναμενόμενου σεναρίου της αυξημένης βροχόπτωσης αιχμής κατά 300% λόγω της κλιματικής αλλαγής.

6.1.3 Υδραυλική στο κάταντες τμήμα του ρέματος Αλμυρίδας

Στη μελέτη, διερευνώνται οι πλημμυρικές επιπτώσεις στο κάταντες τμήμα της μικρής έκτασης υδρολογικής λεκάνης, για την οποία δε διατίθενται μετρήσεις απορροής είτε αεροφωτογραφία της πλημμυρισμένης έκτασης για το αιφνίδιο πλημμυρικό συμβάν, ωστόσο υπάρχουν περιορισμένα διαθέσιμα δεδομένα πεδίου. Από την υδραυλική προσομοίωση του γεγονότος επικυρώθηκε η μέτρηση της στάθμης νερού από πλημμυρικό ίχνος σε διατομή ελέγχου μετά την πλημμύρα, καθώς και η ώρα διέλευσης του μέγιστου πλημμυρικού κύματος, τόσο με το 1D όσο και με το συζευγμένο 1D/2D υδραυλικό μοντέλο. Η πλημμυρική έκταση με το 1D υδραυλικό μοντέλο ήταν περιορισμένης ακρίβειας στις δύο διαστάσεις, σε αντίθεση με την παραγόμενη από το συζευγμένο 1D/2D μοντέλο. Το τελευταίο παρήγαγε 2D χάρτες με περισσότερη λεπτομέρεια και ακρίβεια ως προς την έκταση της πλημμύρας κατά τη μέγιστη απορροή, καθώς και τα μέγιστα πλημμυρικά βάθη και τις ταχύτητες ροής σε κάθε σημείο των

κελιών του υπολογιστικού πλέγματος, ιδίως με το DEM χωρικής ανάλυσης 2 m συγκριτικά με το DEM χωρικής ανάλυσης 5 m. Με το DEM των 2 m, το μέγιστο πλημμυρικό βάθος ήταν αισθητά υψηλότερο εντός του καναλιού στις περισσότερες διατομές, ενώ η συνολικά πλημμυρισμένη έκταση ήταν μικρότερη σε σχέση με το DEM των 5 m. Αυτό εξηγείται καθώς η τοπογραφική πληροφορία λεπτομερέστερης ανάλυσης απεικονίζει την κοίτη του καναλιού βαθύτερα, και τις όχθες υψηλότερα. Επιπλέον, το DEM των 2 m αποτελείται από περισσότερους λόφους και αναχώματα, τα οποία στο 2D υπολογιστικό πλέγμα λειτουργούν ως εμπόδια στη ροή, περιορίζοντας την περαιτέρω επέκταση της πλημμύρας. Καθοριστική είναι η αβεβαιότητα των τιμών υδραυλικών παραμέτρων για την επαλήθευση του ενιαίου 1D/2D υδραυλικού μοντέλου και την ακριβή αναπαράσταση των πλημμυρικών χαρτών. Ο συντελεστής υδατοφράκτη των πλευρικών δομών σύνδεσης της 1D ροής του ρέματος με τις 2D πλημμυρικές επιφάνειες, ακολουθούμενος από το συντελεστή τραχύτητας Manning στις πλημμυρικές πεδιάδες είναι οι πιο σημαντικές παράμετροι που επηρεάζουν το πλημμυρικό βάθος στη διατομή ελέγχου και την απόδοση του υδραυλικού μοντέλου. Η αύξηση του συντελεστή υδατοφράκτη προκαλεί μείωση του πλημμυρικού βάθους στη διατομή ελέγχου, ενώ η αύξηση του συντελεστή τραχύτητας οδηγεί σε αύξηση του προσομοιωμένου βάθους.

6.1.4 Επίδραση της κλιματικής αλλαγής στην υδραυλική του κάταντες τμήματος του ρέματος Αλμυρίδας

Από ιστορικά γεγονότα της βάσης δεδομένων EURO-CORDEX, καθώς και μελλοντικές προβλέψεις καταβιβασμού κλίμακας στους σταθμούς των Καλυβών και του Βάμου που γειτνιάζουν με τη μελετώμενη λεκάνη, αναμένονται βροχοπτώσεις μεγαλύτερης έντασης είτε μεγαλύτερου ύψους από του μελετώμενου γεγονότος. Αυτά τα βροχοπτώτικα γεγονότα αναμένονται να παρουσιάζουν μεγαλύτερη ένταση 3ωρης βροχόπτωσης με παράγοντες από 1.5 έως 2.5, ή συνολικής ημερήσιας βροχής της τάξης των 250-300 mm. Εξετάστηκαν σενάρια δυνητικής εντατικοποίησης της βροχόπτωσης αιχμής για το ίδιο ή μεγαλύτερο συνολικό ύψος υετού, με το 1D/2D υδραυλικό μοντέλο. Τα σενάρια αυξημένης αιχμής σε σχέση με την καταγεγραμμένη βροχόπτωση βασίστηκαν στα δεδομένα του κλιματικού μοντέλου EC-EARTH_RCP8.5_r12i1p1_SMHI_RCA4, που προέβλεπαν πιο εντατικοποιημένα ημερήσια γεγονότα στην περιοχή ενδιαφέροντος. Η εξέταση σεναρίων μεγαλύτερου ύψους βροχής βασίστηκε στα ημερήσια δεδομένα του κλιματικού μοντέλου MPI-ESM-LR_r1i1p1_CSC_REMO (Jacob et al., 2014) για τα σενάρια

συγκεντρώσεων θερμοκηπικών αερίων RCP4.5 και RCP8.5, που προέβλεπαν πιο έντονα βροχοπτώτικα γεγονότα σε παρακείμενους μετεωρολογικούς σταθμούς στο μέλλον. Τα εξαγόμενα υδρογραφήματα των σεναρίων παρήγαγαν αξιοσημείωτα υψηλότερη μέγιστη απορροή. Μείζονος σημασίας είναι η επιλογή του DEM υψηλής ανάλυσης. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων για τα αυξητικά σενάρια της βροχόπτωσης αιχμής για το ίδιο ύψος υετού με του μελετώμενου γεγονότος, παρήγαγε μεγαλύτερη αύξηση στο μέγιστο πλημμυρικό βάθος με το DEM χωρικής ανάλυσης 5 m, ενώ απέδωσε μεγαλύτερη αύξηση στη συνολικά πλημμυρισμένη έκταση με χρήση του DEM 2 m. Για δυνητικά υψηλότερο συνολικό ύψος υετού από το μελετώμενο και αύξηση της βροχόπτωσης αιχμής, η αύξηση του μέγιστου πλημμυρικού βάθους είναι υψηλότερη με το DEM των 2 m σε σύγκριση με χρήση του DEM των 5 m.

Το 1D υδραυλικό μοντέλο με χρήση του DEM 5 m × 5 m παρήγαγε αύξηση κατά 20% στην πλημμυρική έκταση για το αυξητικό σενάριο της βροχόπτωσης αιχμής κατά 300%, ενώ απέδωσε μόλις 4.6% αύξηση στο μέγιστο πλημμυρικό βάθος σε σύγκριση με το βασικό σενάριο. Η ταχύτητα ροής στη διατομή ελέγχου αυξήθηκε επίσης κατά 57% σε σύγκριση με το βασικό σενάριο. Η χρήση του συζευγμένου 1D/2D υδραυλικού μοντέλου παράγει πιο λεπτομερή και με ακρίβεια αποτελέσματα από το 1D μοντέλο και για τα υποθετικά σενάρια κλιματικής αλλαγής, για το ίδιο συνολικό ύψος υετού με αυτό του μελετώμενου γεγονότος. Για το βασικό γεγονός, καθώς και τα σενάρια αύξησης της βροχόπτωσης αιχμής έως και 200%, τα μέγιστα πλημμυρικά βάθη ήταν μεγαλύτερα από περίπου 15% έως 22% με το DEM των 2 m, σε σύγκριση με αυτά του DEM των 5 m. Αντίθετα, η έκταση της πλημμύρας αυξήθηκε σημαντικά, κατά περίπου 45% έως 50%, μέσω του DEM των 5 m, συγκριτικά με αυτήν του DEM των 2 m. Η προβαλλόμενη βροχόπτωση των 345 mm λόγω του σεναρίου μεσαίων εκπομπών του κλιματικού μοντέλου MPI-ESM-LR_r1i1p1_CSC-REMO έδειξε ότι για πιθανή ωριαία ένταση βροχόπτωσης ίση με 40 mm/h, το μέγιστο πλημμυρικό βάθος αυξάνεται κατά 30.2% με το DEM των 5 m και κατά 17% με το DEM των 2 m, σε σύγκριση με τη βροχόπτωση των 196.2 mm του γεγονότος του 2006, όπου η ένταση της βροχόπτωσης ήταν 45 mm/h.

6.1.5 Μελέτη υδρολογικής απόκρισης της λεκάνης του ποταμού Humber που διαθέτει μετρήσεις απορροής

Μελετάται η υδρολογική απόκριση μιας μεσαίας λεκάνης, αποτελούμενη από έξι υπολεκάνες με μετρητές απορροής, υπό έξι μεμονωμένα βροχοπτώτικα γεγονότα που

εξετάζονται σε ζεύγη με παρόμοια χαρακτηριστικά. Κατά την υδρολογική προσομοίωση των συμβάντων, αρκετές παράμετροι επιδρούν στην επικύρωση των καταγεγραμμένων υδρογραφημάτων στην έξοδο των υπολεκανών. Στο μοντέλο HEC-HMS, η βαθμονόμηση του χρόνου συγκέντρωσης T_c πραγματοποιήθηκε με διάφορους εμπειρικούς τύπους και δημιούργησε τις κύριες χρονικές μετατοπίσεις και μεταβολές της προσομοιωμένης απορροής αιχμής. Η αύξηση του T_c παρήγαγε μικρότερη απορροή αιχμής. Η αύξηση του συντελεστή αποθήκευσης R προκάλεσε μετατόπιση στο χρόνο εμφάνισης της απορροής αιχμής προς τα εμπρός, συνοδευόμενη από σημαντική μείωση του μεγέθους της απορροής. Η μείωση του αριθμού καμπύλης CN καθώς και της % αδιαπερατότητας μείωσε επίσης την απορροή αιχμής. Η παράμετρος K της μεθόδου δρομολόγησης Muskingum, που εκφράζει το χρόνο διάδοσης του πλημμυρικού κύματος κατά μήκος του καναλιού, προκάλεσε μόλις μικρές μεταβολές στην απορροή αιχμής. Στο μοντέλο HBV-light, το μέγεθος της απορροής αιχμής καθορίστηκε κυρίως από τη μέγιστη εδαφική ικανότητα αποθήκευσης νερού FC , με την αύξησή της να μειώνει τη μέγιστη απορροή. Η παράμετρος δρομολόγησης $MAXBAS$ επηρέασε ουσιαστικά το χρόνο εμφάνισης της μέγιστης απορροής. Μεγαλύτερες τιμές μετατόπισαν χρονικά την απορροή αιχμής προς τα εμπρός, και μείωσαν την απορροή. Δεδομένου ότι το HBV-light είναι ένα εννοιολογικό μοντέλο, δεν υπήρξε σαφής τάση στην επίδραση των άλλων παραμέτρων, οι οποίες εξαρτώνται όχι μόνο από τις δικές τους τιμές αλλά και από τις τιμές άλλων παραμέτρων.

Εξετάζοντας τα βροχοπτωτικά γεγονότα, για τις υπολεκάνες W800 και W900 με περίπου ίδιο ποσοστό αστικής ανάπτυξης, η υπολεκάνη W900 παρήγαγε ως επί το πλείστον υψηλότερες απορροές αιχμής καθώς η επιφάνειά της είναι μικρότερη κατά 27%, και η κύρια μισογάγγειά της έχει λίγο μεγαλύτερη κλίση, αν και οι κλίσεις των καναλιών είναι σχετικά επίπεδες. Πιο εμφανείς ήταν οι διαφορές στις τιμές των παραμέτρων στο μοντέλο HBV-light, ιδίως στη ρουτίνα της εδαφικής υγρασίας. Απ' την άλλη, για τις υπολεκάνες W790 και W1030 με παρόμοια έκταση, η W790 είναι κυρίως αγροτική με αστικοποίηση ίση με 13.1%, ενώ η υπολεκάνη W1030 είναι κατά 97.7% αστικοποιημένη. Η σύγκριση έδειξε σημαντικά υψηλότερη απορροή αιχμής στην αστική υπολεκάνη, και ταυτόχρονα εμφάνιση της προσομοιωμένης μέγιστης απορροής νωρίτερα και στα δύο υδρολογικά μοντέλα, λόγω της υψηλότερης ταχύτητας ροής.

Αξιολογώντας τους δύο εξεταζόμενους στατιστικούς δείκτες, τα γεγονότα στις 28-30 Μαΐου 2013, στις 7-15 Απριλίου 2013, και στις 26-30 Ιουνίου 2010, απέδωσαν καλύτερα

με το μοντέλο HBV-light. Τα γεγονότα στις 28–30 Μαΐου 2013 και στις 26–30 Ιουνίου 2010 είχαν μικρότερο ύψος υετού από τα συγκρίσιμα ζεύγη τους σε όλες τις υπολεκάνες, το οποίο πιθανώς να συνέβαλε στην καλύτερη προσομοίωση των υδρογραφημάτων τους από το μοντέλο HBV-light, στο οποίο οι αρχικές συνθήκες έλαβαν σωστές τιμές από την κατάλληλη περίοδο προθέρμανσης ενός έτους.

Για το γεγονός στις 28-30 Μαΐου 2013, οι δύο αγροτικές υπολεκάνες είχαν καλύτερους δείκτες NSE με το μοντέλο HBV-light, και παρόμοιους δείκτες σφάλματος συνολικού όγκου βροχής–κατ’ απόλυτη τιμή–με τα δύο μοντέλα. Στις αγροτικές υπολεκάνες με αρκετές αστικοποιημένες περιοχές, και οι δύο δείκτες ήταν παρόμοιοι και στα δύο μοντέλα. Στην αστική και στην ημιαγροτική/ημιαστική υπολεκάνη, οι δείκτες NSE ήταν παρόμοιοι και στα δύο μοντέλα, ενώ οι δείκτες σφάλματος συνολικού όγκου βροχής ήταν πολύ καλύτεροι με το μοντέλο HBV-light.

Για το γεγονός στις 26-30 Ιουνίου 2010, με το μοντέλο HBV-light, η υπολεκάνη W800 παρήγαγε λίγο καλύτερους και τους δύο δείκτες, ενώ οι υπολεκάνες W1030 και W1020 απέδωσαν εμφανώς καλύτερους και τους δύο δείκτες. Για τις υπολεκάνες W790 και W900, οι συντελεστές συνέπειας NSE ήταν καλύτεροι με το μοντέλο HBV-light, ενώ οι δείκτες σφάλματος συνολικού όγκου βροχής ήταν πιο καλοί με το HEC-HMS. Ωστόσο, οι απορροές αιχμής προσομοιώθηκαν καλύτερα με το HBV-light. Η απορροή αιχμής της υπολεκάνης W1460 προσομοιώθηκε επίσης καλύτερα με το μοντέλο HBV-light, μολονότι το μοντέλο HEC-HMS παρήγαγε πιο αποτελεσματικό συντελεστή NSE.

Για το γεγονός στις 7–15 Απριλίου 2013, η συνολική βροχόπτωση ήταν μικρότερη από την αντίστοιχη του συγκρίσιμου ζεύγους του σε όλες τις υπολεκάνες, και ταυτόχρονα, η ένταση της βροχής ήταν μεγαλύτερη κατά τη δεύτερη υδρολογική αιχμή. Αυτοί οι λόγοι καθιστούν κρίσιμη την περίοδο αρχικοποίησης του μοντέλου HBV-light για την εμφανώς καλύτερη προσομοίωση των απορροών αιχμής και την καλύτερη απόδοση του μοντέλου στους δύο δείκτες για όλες τις υπολεκάνες, συγκριτικά με το μοντέλο HEC-HMS. Μοναδική εξαίρεση ήταν η υπολεκάνη W790 με λίγο μικρότερο δείκτη σφάλματος συνολικού όγκου βροχής με το μοντέλο HEC-HMS. Επιπλέον, το μοντέλο HBV-light απέδωσε γενικά καλύτερα, καθώς για θερμοκρασίες υπό το μηδέν κατά τη διάρκεια ορισμένων ωρών της προσομοίωσης, η κατακρήμνιση αποδόθηκε ως χιόνι.

Το γεγονός υψηλότερης έντασης στις 4–10 Ιουλίου 2013, με πολύ μεγάλο συνολικό ύψος υετού στις μελετώμενες υπολεκάνες, απέδωσε καλύτερα στις δύο αγροτικές υπολεκάνες

και στην υπολεκάνη W800 με το μοντέλο HEC-HMS, και για τους δύο δείκτες. Η υπολεκάνη W900 απέδωσε καλύτερα με το μοντέλο HBV-light. Η αστική υπολεκάνη παρήγαγε καλύτερο δείκτη NSE με το μοντέλο HBV-light, ενώ ο δείκτης σφάλματος συνολικού όγκου βροχής ήταν ικανοποιητικότερος με το HEC-HMS. Στην υπολεκάνη W1020, ο δείκτης σφάλματος συνολικού όγκου βροχής ήταν μικρός με το μοντέλο HEC-HMS, ενώ ο συντελεστής NSE ήταν πολύ καλός και παρόμοιος και με τα δύο μοντέλα. Σε γενική εικόνα, το μοντέλο HEC-HMS απέδωσε καλύτερα για το συγκεκριμένο γεγονός.

Για το γεγονός στις 30 Απριλίου–7 Μαΐου 2017, η συνολική βροχόπτωση ήταν μεγαλύτερη από αυτήν του συγκρίσιμου ζεύγους του σε όλες τις υπολεκάνες, με μεγαλύτερες εντάσεις βροχής ως επί το πλείστον κατά την πρώτη υδρολογική αιχμή. Οι υπολεκάνες W790 και W900 απέδωσαν καλύτερα με το μοντέλο HEC-HMS και για τους δύο δείκτες, σε αντίθεση με τις υπολεκάνες W1460 και W1020 που παρήγαγαν καλύτερους δείκτες με το μοντέλο HBV-light. Η υπολεκάνη W800 απέδωσε λίγο υψηλότερο δείκτη NSE με το μοντέλο HEC-HMS, ενώ παρήγαγε καλύτερο δείκτη σφάλματος συνολικού όγκου βροχής με το μοντέλο HBV-light. Η υπολεκάνη W1030 παρήγαγε πιο ικανοποιητικό δείκτη NSE με το μοντέλο HBV-light, ενώ καλύτερο δείκτη σφάλματος συνολικού όγκου βροχής με το μοντέλο HEC-HMS. Στο σύνολο, και τα δύο μοντέλα είχαν παρόμοια καλή απόδοση.

Για το γεγονός στις 22-25 Ιουνίου 2017 με μεγαλύτερο ύψος υετού, μεγαλύτερη μέγιστη ένταση βροχής στις περισσότερες υπολεκάνες, και μικρότερη διάρκεια βροχής από το συγκρίσιμο ζεύγος του, όλες οι υπολεκάνες παρήγαγαν μικρότερους δείκτες σφάλματος συνολικού όγκου βροχής με το μοντέλο HEC-HMS. Ο συντελεστής NSE, με το μοντέλο HBV-light, στις υπολεκάνες W1460 και W800 ήταν λίγο μεγαλύτερος, ενώ στην αστική και ημιαστική υπολεκάνη ήταν πολύ καλύτερος. Επίσης, στην υπολεκάνη W900 ήταν παρόμοιος και με τα δύο μοντέλα, ενώ στην υπολεκάνη W790 ήταν αρκετά μεγαλύτερος με το μοντέλο HEC-HMS. Συνολικά, οι προσομοιώσεις των υδρογραφημάτων και των δύο μοντέλων ήταν ικανοποιητική, και κανένα μοντέλο δεν ξεχώρισε από το άλλο.

6.1.6 Επίδραση της κλιματικής αλλαγής στην υδρολογία της λεκάνης του ποταμού Humber

Για τη λεκάνη ενδιαφέροντος, χρησιμοποιήθηκαν οι κλιματικές προβολές βροχόπτωσης από GCMs του συντονισμένου πειράματος της 5^{ης} φάσης του έργου CMIP5, με χωρική

κατανομή σε ορθογωνικό πλέγμα, με κεντροειδές ανά 6.69 km x 9.26 km. Για τα σενάρια θερμοκηπικών εκπομπών RCP4.5 και RCP8.5, για τις εικοσαετίες 1995-2014 (περίοδος βάσης), 2021-2040 (εγγύς μέλλον), 2041-2060 (μεσοπρόθεσμη περίοδος), και 2081-2100 (μακροπρόθεσμη περίοδος), εξετάστηκαν στις έξι υπολεκάνες οι μέσες τιμές βροχόπτωσης–από 24 κλιματικά μοντέλα–των ημερήσιων γεγονότων που αντιστοιχούν στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας, καθώς και των μέγιστων ημερήσιων γεγονότων βροχόπτωσης εικοσαετίας, κατανέμοντας τη βροχή σε ωριαίο βήμα, με τη θεώρηση ότι η πλειοψηφία της βροχής πέφτει σε 2 h, η οποία θεωρήθηκε ρεαλιστική βάσει της ανάλυσης ιστορικών ισχυρών γεγονότων.

Για το σενάριο RCP8.5 και τη μέση τιμή μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης εικοσαετίας από τα 24 κλιματικά μοντέλα, σε όλες τις υπολεκάνες αναμένεται σημαντική αύξηση στη βροχή και στην προσομοιωμένη απορροή κατά τις περιόδους 2041-2060 και 2081-2100, ενώ μικρότερη αύξηση κατά το εγγύς μέλλον (2021-2040), σε σύγκριση με την εικοσαετία αναφοράς. Ειδικότερα, η υδρολογική προσομοίωση στην έξοδο της αστικής υπολεκάνης W1030 παράγαγε αύξηση της απορροής αιχμής κατά 11.6% κατά την περίοδο 2021-2040, και σημαντικές αυξήσεις ίσες με 23.9% και 34.4%, κατά τη διάρκεια των περιόδων 2041-2060 και 2081-2100 αντίστοιχα, συγκριτικά με την περίοδο βάσης. Στην έξοδο της ημιαγροτικής/ημιαστικής υπολεκάνης W1020–στην οποία εκρέουν επίσης οι υπολεκάνες W1460, W790, W800 και W900–παράχθηκε σημαντική αύξηση της μέγιστης απορροής κατά 18.2% κατά την περίοδο 2021-2040, και πολύ μεγάλες αυξήσεις ίσες προς 40% και 48.8%, κατά τις περιόδους 2041-2060 και 2081-2100 αντίστοιχα, σε σχέση με την περίοδο αναφοράς (1995-2014).

Για το σενάριο RCP8.5 και τη μέση τιμή ημερήσιας βροχόπτωσης που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας, σε όλες τις υπολεκάνες αναμένεται παρόμοια αύξηση στη βροχόπτωση και στην προσομοιωμένη απορροή κατά τις περιόδους 2021-2040 και 2041-2060, ενώ μεγαλύτερη αύξηση κατά τη μακροπρόθεσμη περίοδο 2081-2100, σε σχέση με την εικοσαετία βάσης. Το υδρολογικό μοντέλο στην έξοδο της αστικής υπολεκάνης W1030 παράγαγε αύξηση της απορροής αιχμής κατά 5.9% και 7.9%, κατά τις περιόδους 2021-2040 και 2041-2060 αντίστοιχα, καθώς και σημαντική αύξηση ίση προς 20.5% κατά την περίοδο 2081-2100, σε σύγκριση με την περίοδο βάσης. Στην έξοδο της ημιαστικής υπολεκάνης W1020 παράχθηκαν αυξήσεις της μέγιστης απορροής κατά

5.9%, 7%, και 17.6%, κατά τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 αντιστοίχως, συγκριτικά με την περίοδο βάσης.

Για το σενάριο RCP4.5 και τη μέση τιμή μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης εικοσαετίας, για τις υπολεκάνες W790 και W1030 αναμένεται παρόμοια αύξηση στη βροχόπτωση και στην προσομοιωμένη απορροή κατά τις περιόδους 2021-2040 και 2081-2100, ενώ μικρότερη αύξηση στη βροχή και στην προσομοιωμένη απορροή κατά τη μεσοπρόθεσμη περίοδο 2041-2060, σε σχέση με την εικοσαετία αναφοράς. Για την υπολεκάνη W1460 αναμένεται σημαντική αύξηση στη βροχόπτωση και στην προσομοιωμένη απορροή για τις μελλοντικές εικοσαετίες, συγκριτικά με την περίοδο βάσης. Για τις υπολεκάνες W800, W900, και W1020 αναμένεται αύξηση στη βροχόπτωση και στην προσομοιωμένη απορροή κατά τις περιόδους 2021-2040 και 2081-2100, ενώ μικρότερη αύξηση στη βροχή και στην προσομοιωμένη απορροή κατά τη μεσοπρόθεσμη περίοδο 2041-2060, σε σχέση με την περίοδο βάσης. Η υδρολογική προσομοίωση στην έξοδο της αστικής υπολεκάνης W1030 είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της απορροής αιχμής κατά 14%, 9.4%, και 14.4%, κατά τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 αντίστοιχα, σε σχέση με την περίοδο βάσης. Στην έξοδο της ημιαστικής υπολεκάνης W1020 παράχθηκε αύξηση της μέγιστης απορροής κατά 22%, 19.7%, και 25.4%, κατά τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 αντιστοίχως, σε σύγκριση με την εικοσαετία αναφοράς.

Για το σενάριο RCP4.5 και τη μέση τιμή ημερήσιας βροχόπτωσης που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας, σε όλες τις υπολεκάνες αναμένεται παρόμοια αύξηση στη βροχόπτωση και στην προσομοιωμένη απορροή κατά τις περιόδους 2021-2040 και 2041-2060, ενώ λίγο μικρότερη αύξηση στη βροχή και στην προσομοιωμένη απορροή κατά την περίοδο 2081-2100, σε σύγκριση με την περίοδο βάσης. Το υδρολογικό μοντέλο στην έξοδο της αστικής υπολεκάνης W1030 παράγαγε αύξηση της απορροής αιχμής κατά 12.4%, 11.5%, και 8.8%, κατά τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 αντίστοιχα, συγκριτικά με την περίοδο βάσης. Στην έξοδο της ημιαστικής υπολεκάνης W1020 παράχθηκε αύξηση της μέγιστης απορροής κατά 12.3%, 13.2%, και 9%, κατά τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 αντιστοίχως, σε σχέση με την εικοσαετία βάσης.

6.1.7 Επίδραση της κλιματικής αλλαγής στην υδραυλική των κατάντη τμημάτων του ποταμού Humber

Από τις κλιματικές προβολές βροχόπτωσης 24 κλιματικών μοντέλων υπό μορφή πλέγματος στην περιοχή ενδιαφέροντος, αναμένονται βροχοπτώσεις μεγαλύτερου ύψους από την περίοδο βάσης (1995-2014), οι οποίες θα εντείνουν την έκταση των πλημμυρικών επεισοδίων και θα αυξήσουν τα πλημμυρικά βάθη. Η μέγιστη πλημμυρική επιφάνεια για τις μέσες τιμές βροχόπτωσης των μέγιστων ημερήσιων γεγονότων εικοσαετίας από τα 24 κλιματικά μοντέλα προσομοιώθηκε εμφανώς μικρότερη με το 1D υδραυλικό μοντέλο, κατά περίπου 10.3% έως 16.8% συγκριτικά με το 2D μοντέλο, και για τα δύο σενάρια θερμοκηπικών εκπομπών, για όλες τις εικοσαετίες. Για τις μέσες τιμές βροχόπτωσης των ημερήσιων γεγονότων που αντιστοιχούν στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας των 24 κλιματικών μοντέλων, η μέγιστη πλημμυρική επιφάνεια προσομοιώθηκε αμετάβλητη ή λίγο μεγαλύτερη με το 1D υδραυλικό μοντέλο, κατά περίπου 0.6% έως 1.8% συγκριτικά με το 2D μοντέλο. Απ' την άλλη, για όλες τις εξεταζόμενες βροχοπτώσεις (συνολικά 16), τα μέγιστα πλημμυρικά βάθη που προσομοιώθηκαν με το 1D υδραυλικό μοντέλο ήταν μικρότερα κατά 6.1% έως 6.7%, σε σχέση με το 2D μοντέλο, που αντιστοιχούν σε μείωση κατά 40-50 cm συγκριτικά με το 2D μοντέλο. Πιο επιρρεπείς να πλημμυρίσουν στο μέλλον, λόγω των μέσων τιμών των μέγιστων ημερήσιων βροχοπτώσεων, και για τα δύο σενάρια θερμοκηπικών εκπομπών, είναι οι γέφυρες στις θέσεις Old Mill Road (#5) και θέση The Queensway (#8)–κυρίως στο ανατολικό τμήμα της τελευταίας–λόγω της μικρής απόστασης της κάτω παρειάς του καταστρώματος από την κοίτη του ποταμού. Τα αποτελέσματα των 2D προσομοιώσεων ανέδειξαν την υπερχείλιση περισσότερο εμφανώς, συγκριτικά με το 1D μοντέλο.

Το 2D μοντέλο παρήγαγε πιο λεπτομερή και ακριβή αποτελέσματα σε σχέση με το 1D μοντέλο ως προς την πλημμυρική έκταση, τα μέγιστα πλημμυρικά βάθη, και τις μέγιστες ταχύτητες του πλημμυρικού κύματος, σε κάθε κελί του 2D υπολογιστικού πλέγματος, διαστάσεων 20 m x 20 m. Απ' την άλλη, το 1D μοντέλο ήταν περιορισμένης ακρίβειας στις δύο διαστάσεις, καθώς οι διατομές σχεδιάστηκαν ανά 50-450 m λόγω του έντονου μαιανδρισμού του ποταμού, με την πλειονότητα να απέχουν 50-150 m, επομένως τα αποτελέσματα ενδιάμεσα των διατομών προέκυψαν από παρεμβολή των αποτελεσμάτων στις θέσεις των διατομών. Επιπλέον, η δυνητική πλημμυρική πεδιάδα δεν αποδόθηκε εξ' ολοκλήρου λίγο πριν την εκβολή του ποταμού Humber, από το 1D

μοντέλο, καθώς το λογισμικό δύναται να χρησιμοποιεί για την απόδοση της κάθε διατομής έως 500 σημεία με δεδομένα θέσης-υψομέτρου, που λόγω του υψηλής ανάλυσης DTM, για ορισμένες διατομές υπήρχε ανάγκη για περισσότερες θέσεις-υψομέτρων κατά τη σχεδιάσή τους.

Για το σενάριο RCP8.5 και τη μέση τιμή μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης εικοσαετίας από τα 24 κλιματικά μοντέλα, με το 1D υδραυλικό μοντέλο προσομοιώθηκε αύξηση στη μέγιστη πλημμυρική έκταση κατά 5%, 9.2%, και 11%, κατά τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 αντίστοιχα, συγκριτικά με την περίοδο βάσης. Μεγαλύτερη αύξηση παρήγαγε το 2D υδραυλικό μοντέλο, κατά 7.8%, 15.6%, και 19.8%, κατά τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 αντιστοίχως, σε σύγκριση με την εικοσαετία αναφοράς. Ως προς το μέγιστο πλημμυρικό βάθος, το 1D υδραυλικό μοντέλο παρήγαγε αύξηση κατά 3.9%, 7.9%, και 9.3%, κατά τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 αντίστοιχα, συγκριτικά με την περίοδο βάσης. Παρόμοιες αυξήσεις παράχθηκαν με το 2D μοντέλο, κατά 3.4%, 7.5%, και 9.3%, κατά τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 αντιστοίχως, σε σχέση με την περίοδο αναφοράς.

Για το σενάριο RCP8.5 και τη μέση τιμή ημερήσιας βροχόπτωσης που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας, με το 1D υδραυλικό μοντέλο προσομοιώθηκε αύξηση στη μέγιστη πλημμυρική επιφάνεια κατά μόλις 1.7% κατά τις περιόδους 2021-2040 και 2041-2060, και κατά 5.2% κατά την περίοδο 2081-2100, συγκριτικά με την εικοσαετία βάσης. Το 2D μοντέλο παρήγαγε λίγο μεγαλύτερη αύξηση από το 1D μοντέλο, και συγκεκριμένα κατά 2.3% και 2.9%, κατά τις περιόδους 2021-2040 και 2041-2060 αντίστοιχα, και κατά 6.4% κατά την περίοδο 2081-2100, σε σχέση με την περίοδο βάσης. Το μέγιστο πλημμυρικό βάθος με το 1D μοντέλο αυξήθηκε κατά 1.2% και 1.5%, κατά τις περιόδους 2021-2040 και 2041-2060, και κατά 3.5% κατά την περίοδο 2081-2100, σε σύγκριση με την περίοδο βάσης. Παρόμοια αύξηση παράχθηκε με το 2D μοντέλο, και ειδικότερα κατά 1.1%, 1.4%, και 3.6%, κατά τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 αντιστοίχως, συγκριτικά με την περίοδο βάσης.

Για το σενάριο RCP4.5 και τη μέση τιμή μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης εικοσαετίας, με το 1D υδραυλικό μοντέλο προσομοιώθηκε αύξηση στη μέγιστη πλημμυρική έκταση κατά 5.4%, 4.5%, και 5.8%, κατά τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 αντίστοιχα, σε σχέση με την περίοδο βάσης. Μεγαλύτερη αύξηση παρήγαγε το 2D μοντέλο, κατά 8.7%, 7.9%, και 9.9%, κατά τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και

2081-2100 αντιστοίχως, σε σύγκριση με την περίοδο αναφοράς. Ως προς το μέγιστο πλημμυρικό βάθος, το 1D μοντέλο είχε ως αποτέλεσμα την αύξησή του κατά 4.4%, 4%, και 5.1%, κατά τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 αντίστοιχα, σε σχέση με την περίοδο βάσης. Παρόμοια αύξηση παράχθηκε με το 2D μοντέλο, κατά 4.1%, 3.6%, και 4.9%, κατά τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 αντιστοίχως, σε σύγκριση με την εικοσαετία βάσης.

Για το σενάριο RCP4.5 και τη μέση τιμή ημερήσιας βροχόπτωσης που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας, με το 1D υδραυλικό μοντέλο προσομοιώθηκε αύξηση στη μέγιστη πλημμυρική επιφάνεια κατά 3.6% κατά τις περιόδους 2021-2040 και 2041-2060, και κατά μόλις 2.4% κατά την περίοδο 2081-2100, συγκριτικά με την περίοδο βάσης. Μεγαλύτερες αυξήσεις παρήγαγε το 2D υδραυλικό μοντέλο, κατά 4.8% κατά τις περιόδους 2021-2040 και 2041-2060, και κατά 3.6% κατά την περίοδο 2081-2100, σε σύγκριση με την εικοσαετία αναφοράς. Το μέγιστο πλημμυρικό βάθος με το 1D μοντέλο αυξήθηκε κατά 2.4%, 2.6%, και 1.9%, κατά τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 αντίστοιχα, συγκριτικά με την περίοδο βάσης. Παρόμοια αύξηση παράχθηκε με το 2D μοντέλο, και συγκεκριμένα κατά 2.4%, 2.6%, και 1.8%, κατά τις περιόδους 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100 αντιστοίχως, σε σχέση με την εικοσαετία βάσης.

Ο σχεδιασμός των προσομοιώσεων οδήγησε σε ικανοποιητικά αποτελέσματα που αποσκοπούν στη βελτίωση της πρόβλεψης απορροών από μελλοντικά γεγονότα σε προκαταρκτικό επίπεδο, και στη χαρτογράφηση και καλύτερη διαχείριση πλημμυρών έναντι της κλιματικής μεταβολής.

6.1.8 Εφαρμογή μοντέλων στις δύο υδρολογικές λεκάνες

Η επιλογή εφαρμογής υδρολογικών μοντέλων στις λεκάνες απορροής του ρέματος της Αλμυρίδας και του ποταμού Humber, καθώς και υδραυλικών μοντέλων στα κατάντη τμήματα αυτών, έγινε για να διαπιστωθεί η επίδραση ισχυρών βροχοπτώσεων στην αιχμή των υδρογραφημάτων και στις πλημμυρικές επιπτώσεις. Οι περιορισμοί αφορούν στο διαφορετικό μέγεθος των λεκανών και στα διαφορετικής τάξεως μήκη των κατάντη τμημάτων των ρεμάτων/ποταμών (784 m για το ρέμα της Αλμυρίδας, έναντι 11.7 km για τον ποταμό Humber), που προσομοιώνουν υδρογραφήματα και πλημμυρικά βάθη από τη διόδευση των αντίστοιχων πλημμυρογραφημάτων διαφορετικής τάξης μεγέθους.

Η υδρολογική/υδραυλική προσέγγιση που ακολουθήθηκε στις συγκεκριμένες λεκάνες θα μπορούσε να εφαρμοστεί και σε άλλες υδρολογικές λεκάνες ανάλογης έκτασης, καθώς και για βροχοπτώτικα συμβάντα με ανάλογα υδρομετρικά χαρακτηριστικά. Επιπρόσθετα, θα μπορούσε να εφαρμοστεί και σε άλλα ρέματα/ποτάμια όπου θα υφίστανται στοιχεία από μετρήσεις πεδίου μεταπλημμυρικά (σε περίπτωση λεκανών χωρίς μετρήσεις απορροής), είτε δεδομένα από μετρήσεις απορροών (στην περίπτωση καταγραφών αυτών).

6.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

6.2.1 Υδρολογία και υδραυλική του ρέματος Αλμυρίδας

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε θα μπορούσε να εφαρμοστεί για νέα σφοδρά γεγονότα βροχόπτωσης για τη βελτίωση της διαχείρισης των πλημμυρικών επιπτώσεων. Η επικαιροποίηση του χάρτη χρήσεων γης, καθώς και η ομαδοποίηση των υδρολογικών κατηγοριών εδάφους της περιοχής θα εξυπηρετήσουν τον ορθό υπολογισμό των υδρολογικών παραμέτρων του μοντέλου απωλειών. Η ακρίβεια του εξαγόμενου υδρογραφήματος θα μπορούσε να βελτιωθεί με πλεγματικά δεδομένα βροχόπτωσης, είτε με εγκατάσταση περισσότερων βροχομετρικών σταθμών εντός της υδρολογικής λεκάνης. Η εγκατάσταση μετρητή απορροής ή/και στάθμης σε περιοχές όπως η μελετώμενη που είναι ιδιαίτερα επιρρεπής σε πλημμύρες δεν αναμένεται να εξυπηρετήσει εγγυημένα, καθώς κατά τη διάρκεια ισχυρών πλημμυρικών επεισοδίων συνήθως καταστρέφεται ο εξοπλισμός καταγραφών. Προτείνεται συντονισμένη έρευνα σε συνεργασία με τις τοπικές αρχές, με συλλογή στοιχείων από το πεδίο έπειτα από κάθε πλημμυρικό συμβάν, με καταγραφή πλημμυρικών ιχνών για την καταμέτρηση της πλημμυρικής στάθμης, καθώς και συνεντεύξεων με τους πολίτες. Η χρήση δορυφορικών εικόνων δύναται να δώσει στοιχεία για πιθανή όρια της πλημμυρικής έκτασης κατά τη διέλευση του πλημμυρικού κύματος. Προκειμένου να βελτιωθεί η διαχείριση των πλημμυρικών επιπτώσεων, κρίνεται απαραίτητη η δημιουργία βελτιωμένων χαρτών πλημμυρικής επικινδυνότητας που θα περιλαμβάνουν την επίδραση της κλιματικής μεταβολής. Η εξέταση δεδομένων από πρόσθετα κλιματικά μοντέλα στους γειτνιάζοντες σταθμούς της περιοχής μελέτης θα ενισχύσει την επίδραση της κλιματικής αλλαγής. Η χρήση DEM ακόμα υψηλότερης ανάλυσης, για παράδειγμα 0.5 m, θα αυξήσει την ακρίβεια στην έκταση της πλημμύρας και στην απόδοση της πλημμυρικής στάθμης. Η

συνέχεια στην έρευνα θα μειώσει την αβεβαιότητα από λάθη κατά τις μετρήσεις στάθμης για την επαλήθευση υδραυλικών μοντέλων, και θα καταγράψει δεδομένα από ακραία γεγονότα που πιθανώς μέχρι σήμερα να μην έχουν σημειωθεί, βοηθώντας στη λήψη αποφάσεων σε μέτρα πολιτικής προστασίας, για την αποτελεσματική προσαρμογή στο μεταβαλλόμενο κλίμα. Η κλιματική αλλαγή στην υδρολογική λεκάνη της Αλμυρίδας εξετάστηκε από δεδομένα του κλιματικού μοντέλου MPI-ESM-LR του ινστιτούτου Max Planck, τα οποία είναι καταβιβασμένης κλίμακας στο μετεωρολογικό σταθμό των Καλυβών. Για τα δεδομένα έχει διορθωθεί το μεροληπτικό σφάλμα, και η πρόγνωση της μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης στο μέλλον είναι ίση προς 345 mm. Δεδομένα υφίστανται και από άλλα κλιματικά μοντέλα, και μελλοντικά συνίσταται στατιστική ανάλυση εκατοστημορίων (25%, 50%, 75%) κλπ. Η εξέταση της συγκεκριμένης βροχόπτωσης από το συγκεκριμένο κλιματικό μοντέλο έγινε για να μελετηθεί η επίδραση από την ισχυρότερη μελλοντικά ακραία βροχόπτωση στην περιοχή, βάσει των διατιθέμενων προγνωστικών μοντέλων, καθώς άλλοι υδρομετρικοί σταθμοί της Περιφερειακής Ενότητας Χανίων έχουν ήδη καταγράψει υψηλότερη βροχόπτωση, με γεγονότα ημερήσιας βροχής της τάξης των 400 mm. Επομένως, η πρόγνωση των 345 mm στο μέλλον, αν και είναι η μεγαλύτερη τιμή ημερήσιας βροχόπτωσης από σύνολο κλιματικών μοντέλων, είναι πιθανό να συμβεί. Μελλοντικά, θα μπορούσε να εξεταστεί και η μέση τιμή των μέγιστων ημερήσιων βροχοπτώσεων από όλα τα διατιθέμενα δεδομένα κλιματικών μοντέλων. Μελλοντική έρευνα επίσης θα μπορούσε να αφορά και νέες συγκρίσεις αποτελεσμάτων από μοντέλα, όπως με εφαρμογή του υδρολογικού μοντέλου HBV-light, καθώς και εφαρμογή στο κάτω μέρος της υδρολογικής λεκάνης της Αλμυρίδας του υδραυλικού μοντέλου 2D HEC-RAS. Τα αποτελέσματα της διδακτορικής διατριβής είναι χρήσιμα σε προκαταρκτικό επίπεδο διαχείρισης πλημμυρών. Στο πλαίσιο της ολοκληρωμένης διαχείρισης πλημμυρών, μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να αφορά την εξαγωγή της απορροής σχεδιασμού της λεκάνης μέσω καμπυλών έντασης-διάρκειας-συχνότητας, για τις οποίες απαιτούνται περισσότερα στοιχεία από αυτά που υπήρχαν ήδη διαθέσιμα.

6.2.2 Υδρολογία και υδραυλική του ποταμού Humber

Οι προτεινόμενες υδρολογικές παράμετροι για τα βροχοπτώτικα γεγονότα που ομαδοποιήθηκαν σε ζεύγη με παρόμοια χαρακτηριστικά (υψηλή ένταση βροχόπτωσης, δύο υδρολογικές αιχμές, ή πολλαπλές συνθήκες πρότερης εδαφικής υγρασίας) δύνανται

να χρησιμοποιηθούν σε νέα γεγονότα με παρεμφερείς υδρομετεωρολογικές συνθήκες για να βελτιώσουν τα σχέδια διαχείρισης πλημμυρών. Η επικύρωση των υδρογραφημάτων καινούριων γεγονότων θα μειώσει την αβεβαιότητα που υπεισέρχεται στις εκτιμήσεις. Η χρήση περισσότερο επικαιροποιημένων χρήσεων γης που πιθανώς θα συμπεριλάβουν μια επεκτεινόμενη αστική ανάπτυξη, θα βελτιώσει τις εκτιμήσεις με το υδρολογικό μοντέλο. Η μελλοντική έρευνα από την επιστημονική κοινότητα θα προσδιορίσει ακριβέστερα τις περιόδους επαναφοράς ακραίων βροχοπτώσεων και θα μειώσει την αβεβαιότητα ως προς το χρόνο διάρκειας του κύριου όγκου ισχυρής βροχόπτωσης, αναδεικνύοντας χρόνους σχεδιασμού της πολιτικής προστασίας για την ασφάλεια πολιτών και υποδομών. Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DTM) που χρησιμοποιήθηκε για το σχεδιασμό του υδραυλικού συστήματος και των δύο μοντέλων (HEC-RAS 1D και 2D) ήταν υψηλής χωρικής ανάλυσης 0.5 m x 0.5 m. Ωστόσο, η τοπογραφία από ψηφιακό μοντέλο επιφανείας (Digital Surface Model - DSM) που θα περιλαμβάνει κτίρια και έργα υποδομής, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων. Τα DSM ωστόσο, έχουν συνήθως το μειονέκτημα της συμπερίληψης δενδροφύτευσης ως εμπόδια στη ροή. Ο τρέχων σχεδιασμός του 1D μοντέλου περιλάμβανε 104 διατομές σε απόσταση 50-450 m. Ωστόσο, οι διατομές θα μπορούσαν να σχεδιαστούν πυκνότερα, ιδιαίτερα σε υφιστάμενες αποστάσεις άνω των 300 m, εν τούτοις ο ποταμός είναι έντονου μαιανδρισμού και επομένως η κάθετη σχεδίαση των διατομών δεν τους επιτρέπει να καλύπτουν μεγάλο πλάτος. Για το 2D μοντέλο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ένα πιο πυκνό πλέγμα 10 m x 10 m, είτε 5 m x 5 m, προκειμένου να συγκριθούν τα αποτελέσματα με την τρέχουσα σχεδίαση του πλέγματος των 20 m. Ωστόσο, ο ήδη μεγάλος υπολογιστικός χρόνος για την εκτέλεση του 2D μοντέλου θα αυξηθεί σημαντικά, επομένως είναι απαραίτητος ένας υπολογιστής μεγάλων δυνατοτήτων. Σε αυτή τη μελέτη, τα δεδομένα κλιματικών μοντέλων από το έργο CMIP5 που χρησιμοποιήθηκαν, είναι ημερήσια, από τα οποία δημιουργήθηκαν υποθετικές κατανομές με ωριαίο χρονικό βήμα. Ωστόσο, δεδομένα βροχόπτωσης με χρονικό βήμα μικρότερο από ημερήσιο, ή ακόμα και ωριαίο, από κλιματικά μοντέλα άλλης βάσης δεδομένων, είτε από την επικαιροποιημένη βάση δεδομένων CMIP6, θα ενισχύσουν την αυξανόμενη ένταση των βροχοπτώσεων, και θα βελτιώσουν την ανάλυση της επίδρασης της κλιματικής αλλαγής στις απορροές αιχμής στις εξόδους των υπολεκανών. Τα δεδομένα μελλοντικής βροχόπτωσης που χρησιμοποιήθηκαν από τα GCMs είναι χωρικής ανάλυσης 6.69 km x 9.26 km. Η αποτύπωση της χωρικής

διακύμανσης της βροχόπτωσης από δεδομένα κλιματικών μοντέλων ακόμη υψηλότερης χωρικής ανάλυσης θα μπορούσε να βελτιώσει τα εξαγόμενα υδρογραφήματα, και κατά συνέπεια να οδηγήσει σε πιο ακριβή προσομοίωση πλημμυρών. Η ακριβέστερη γεωμετρική σχεδίαση των τεχνικών έργων από μετρήσεις πεδίου, καθώς και η συλλογή στοιχείων από το πεδίο έπειτα από πλημμύρες στην πόλη του Τορόντο, και η χρήση δορυφορικών εικόνων θα βελτιώσει το σχεδιασμό και τη βαθμονόμηση των υδραυλικών μοντέλων για τη χαρτογράφηση της πλημμυρικής επικινδυνότητας. Η μείωση των αβεβαιοτήτων, που αφορούν τις τιμές των παραμέτρων κατά το σχεδιασμό των υδραυλικών μοντέλων χωροχρονικά, θα είναι χρήσιμη για την έγκυρη λήψη αποφάσεων σε ακραίες καταιγίδες που αναμένονται να πλήξουν την περιοχή στο μέλλον. Στην παρούσα διατριβή έγινε ανάλυση ευαισθησίας του συντελεστή τραχύτητας Manning n στις πλημμυρικές πεδιάδες του ρέματος Αλμυρίδας. Ωστόσο, δεν έγινε ανάλυση ευαισθησίας του συντελεστή τραχύτητας Manning εντός της κοίτης τόσο του ρέματος Αλμυρίδας, όσο και του ποταμού Humber. Ο συντελεστής τραχύτητας Manning n είναι η πιο ευαίσθητη παράμετρος στην υδραυλική/υδροδυναμική διόδευση πλημμυρικών κυμάτων. Στις συγκεκριμένες μελέτες περίπτωσης, οι τιμές του συντελεστή τραχύτητας Manning n εντός της ποτάμιας κοίτης ελήφθησαν από Chow (1959) βάσει της κατάστασης/μορφής των διατομών του ρέματος της Αλμυρίδας και του ποταμού Humber, με τις τιμές αυτές να είναι σταθερές για όλο το μήκος έκαστου ποτάμιου τμήματος της διόδευσης. Μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να αφορά διαφοροποίηση του συντελεστή Manning εντός της κοίτης από τις πλημμυρικές πεδιάδες για το τμήμα του ποταμού Humber, είτε και χωρική διαφοροποίηση στο σχεδιασμό του 2D υπολογιστικού πλέγματος κατά την εφαρμογή του συζευγμένου 1D/2D και 2D μοντέλου για τις δύο μελέτες περίπτωσης, βάσει των χρήσεων γης, για την ποσοτικοποίηση των πλημμυρικών επιπτώσεων. Μελλοντικά, θα μπορούσαν να γίνουν και νέες συγκρίσεις αποτελεσμάτων από μοντέλα, όπως με εφαρμογή στην κατάντη περιοχή του ποταμού Humber του συζευγμένου υδραυλικού μοντέλου 1D/2D HEC-RAS.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ahmed, S.; Tsanis, I. Watershed Response to Bias-Corrected Improved Skilled Precipitation and Temperature under Future Climate—A Case Study on Spencer Creek Watershed, Ontario, Canada. *Hydrol. Curr. Res.* **2016a**, 7, 246, doi:10.4172/2157-7587.1000246.
- Ahmed, S.; Tsanis, I. Hydrologic and Hydraulic Impact of Climate Change on Lake Ontario Tributary. *American Journal of Water Resources* **2016b**, 4(1), 1-15, doi:10.12691/ajwr-4-1-1.
- Alfieri, L.; Burek, P.; Feyen, L.; Forzieri, G. Global warming increases the frequency of river floods in Europe. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **2015**, 19, 2247–2260, doi:10.5194/hess-19-2247-2015.
- Alipour, A.; Jafarzadegan, K.; Moradkhani, H. Global sensitivity analysis in hydrodynamic modeling and flood inundation mapping. *Environmental Modelling and Software* **2022**, 152, 105398, doi:10.1016/j.envsoft.2022.105398.
- Anquetin, S.; Braud, I.; Vannier, O.; Viallet, P.; Boudevillain, B.; Creutin, J.-D.; Manus, C. Sensitivity of the hydrological response to the variability of rainfall fields and soils for the Gard 2002 flash-flood event. *J. Hydrol.* **2010**, 394(1-2), 134-147, doi:10.1016/j.jhydrol.2010.07.002.
- Awol, F.S.; Coulibaly, P.; Tsanis, I. Identification of Combined Hydrological Models and Numerical Weather Predictions for Enhanced Flood Forecasting in a Semiurban Watershed. *J. Hydrol. Eng.* **2021**, 26, 04020057. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0002018](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0002018).
- Ballesteros, J.A.; Bodoque, J.M.; Díez-Herrero, A.; Sánchez-Silva, M.; Stoffel, M. Calibration of floodplain roughness and estimation of flood discharge based on tree-ring evidence and hydraulic modelling. *J. Hydrol.* **2011**, 403, 103–115, doi:10.1016/j.jhydrol.2011.03.045.
- Bao, J.; Sherwood, S.C.; Alexander, L.V.; Evans, J.P. Future increases in extreme precipitation exceed observed scaling rates. *Nature Climate Change* **2017**, 7, 128-132, doi:10.1038/nclimate3201.
- Barkau, R.L. *UNET One-Dimensional Unsteady Flow through a Full Network of Open Channels, User's Manual*; CPD-66, Version 3.1; U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center: Davis, CA, USA, 1996.
- Bergström, S. *Development and Application of a Conceptual Runoff Model for Scandinavian Catchments*; SMHI Report RHO 7; Swedish Meteorological and Hydrological Institute: Norrköping, Sweden, 1976.
- Bergström, S. *The HBV Model: Its Structure and Applications*; SMHI Reports Hydrology No. 4; Swedish Meteorological and Hydrological Institute: Norrköping, Sweden, 1992.
- Boithias, L.; Sauvage, S.; Lenica, A.; Roux, H.; Abbaspour, K.C.; Larnier, K.; Dartus, D.; Sánchez-Pérez J.M. Simulating Flash Floods at Hourly Time-Step Using the SWAT Model. *Water* **2017**, 9(12), 929, doi:10.3390/w9120929.
- Borga, M.; Anagnostou, E.N.; Blöschl, G.; Creutin, J.-D. Flash flood forecasting, warning and risk management: the HYDRATE project. *Environ. Sci. Policy* **2011**, 14(7), 834–844, doi:10.1016/j.envsci.2011.05.017.
- Brunner, G.W.; CEIWR-HEC. *HEC-RAS, River Analysis System, 2D Modeling User's Manual*; CPD-68A, Version 5.0; U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center: Davis, CA, USA, 2016a.

- Brunner, G.W.; CEIWR-HEC. *HEC-RAS, River Analysis System, 2D Modeling User's Manual*; CPD-68A, Version 6.0 Beta; U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center: Davis, CA, USA, 2020a.
- Brunner, G.W.; CEIWR-HEC. *HEC-RAS, River Analysis System User's Manual*; CPD-68, Version 5.0; U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center: Davis, CA, USA, 2016b.
- Brunner G.W.; CEIWR-HEC. *HEC-RAS, River Analysis System User's Manual*; CPD-68, Version 6.0 Beta; U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center: Davis, CA, USA, 2020b.
- Brunner, G.W. *HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual*; CPD-69, Version 5.0; U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center: Davis, CA, USA, 2016.
- Brunner, G.W. *HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual*; CPD-69, Version 6.0 Beta; U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center: Davis, CA, USA, 2020.
- Buttle, J.M.; Allen, D.M.; Caissie, D.; Davison, B.; Hayashi, M.; Peters, D.L.; Pomeroy, J.W.; Simonovic, S.; St-Hilaire, A.; Whitfield, P.H. Flood processes in Canada: Regional and special aspects. *Canadian Water Resources Journal* **2016**, *41*(1-2), 7-30, doi:10.1080/07011784.2015.1131629.
- Camera, C.; Bruggeman, A.; Zittis, G.; Sofokleous, I.; Arnault, J. Simulation of extreme rainfall and streamflow events in small Mediterranean watersheds with a one-way-coupled atmospheric-hydrologic modelling system. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* **2020**, *20*, 2791-2810, doi:10.5194/nhess-20-2791-2020.
- Cameron, T.; Ackerman, P.E. *HEC-GeoRAS GIS Tools for Support of HEC-RAS using ArcGIS® 10 User's Manual*; CPD-83, Version 10; U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center: Davis, CA, USA, 2012.
- Cannon, A.J.; Sobie, S.R.; Murdock, T.Q. Bias Correction of GCM Precipitation by Quantile Mapping: How Well Do Methods Preserve Changes in Quantiles and Extremes? *Journal of Climate* **2015**, *28*(17), 6938-6959, doi:10.1175/JCLI-D-14-00754.1.
- Carter, R.W. Magnitude and frequency of floods in suburban areas. *US Geol. Surv. Prof. Pap.* **1961**, *424*, 9–11.
- Chapi, K.; Rudra, R.P.; Ahmed, S.I.; Khan, A.A.; Gharabaghi, B.; Dickinson, W.T.; Goel, P.K. Spatial-Temporal Dynamics of Runoff Generation Areas in a Small Agricultural Watershed in Southern Ontario. *J. Water Resour. Prot.* **2015**, *7*, 14–40, doi:10.4236/jwarp.2015.71002.
- Cheng, C.S.; Li, Q.; Li, G.; Auld, H. Possible Impacts of Climate Change on Daily Streamflow and Extremes at Local Scale in Ontario, Canada. Part II: Future Projection. *Atmos. Clim. Sci.* **2012**, *2*, 427–440, doi:10.4236/acs.2012.24037.
- Chow, V.T.; Maidment, D.R.; Mays, L.W. *Applied hydrology*; McGraw-Hill: New York, NY, USA, 1988; ISBN 0 07-010810-2.
- Chow, V.T. *Open-Channel Hydraulics*; McGraw-Hill: New York, NY, USA, 1959.
- Christensen, J.H.; Carter, T.R.; Giorgi, F. PRUDENCE Employs New Methods to Assess European Climate Change. *EoS Trans. AGU* **2002**, *83*(13), 147, doi:10.1029/2002EO000094.
- Ciscar, J.C.; Feyen, L.; Soria, A.; Lavallo, C.; Raes, F.; Perry, M.; Nemry, F.; Demirel, H.; Rozsai, M.; Dosio, A.; Donatelli, M.; Srivastava, A.; Fumagalli, D.; Niemeyer, S.; Shrestha, S.; Ciaian, P.; Himics, M.; Van Doorslaer, B.; Barrios, S.; Ibáñez, N.; Forzieri, G.; Rojas, R.; Bianchi, A.; Dowling, P.; Camia, A.; Libertà, G.; San Miguel, J.; de Rigo, D.; Caudullo, G.; Barredo, J.-I.; Paci, D.; Pycroft, J.; Saveyn, B.; Van Regemorter, D.; Revesz, T.; Vandyck, T.; Vrontisi, Z.; Baranzelli, C.; Vandecasteele, I.; Batista e Silva, F.; Ibarreta, D. *Climate Impacts in Europe – The JRC PESETA II Project*; JRC Scientific and Policy Reports, EUR 26586EN; Joint Research Centre, Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2014.

- CIVICA and TRCA. *Final Report Humber River Hydrology Update*; TRC14-004; Toronto and Region Conservation for the Living City: Toronto, ON, Canada, 2015.
- Clement, M.A.; Kilsby, C.G.; Moore, P. Multi-temporal synthetic aperture radar flood mapping using change detection. *J. Flood Risk Manag.* **2017**, *11*(2), 152–168, doi:10.1111/jfr3.12303.
- Climate Data Canada. 2021. Available online: <https://climatedata.ca/download/> (accessed on 12 March 2021).
- Daggupati, P.; Shukla, R.; Mekonnen, B.; Rudra, R.; Biswas, A.; Goel, P.K.; Prasher, S.; Yang, W. Hydrological Responses to Various Land Use, Soil and Weather Inputs in Northern Lake Erie Basin in Canada. *Water* **2018**, *10*, 222, doi:10.3390/w10020222.
- Daliakopoulos, I.N.; Tsanis, I.K. A weather radar data processing module for storm analysis. *J. Hydroinform.* **2012**, *14*, 332–344, doi:10.2166/hydro.2011.118.
- Darbandsari, P.; Coulibaly, P. Inter-comparison of lumped hydrological models in data-scarce watersheds using different precipitation forcing data sets: Case study of Northern Ontario, Canada. *J. Hydrol. Reg. Stud.* **2020**, *31*, 100730, doi:10.1016/j.ejrh.2020.100730.
- Dasallas, L.; Kim, Y.; An, H. Case Study of HEC-RAS 1D–2D Coupling Simulation: 2002 Baeksan Flood Event in Korea. *Water* **2019**, *11*, 2048, doi:10.3390/w11102048.
- de Lange, M.; McBean, E. Modeling Investigation to Support Integrated Water Management in Southern Ontario: Considering Climate Change and Urbanization. *Journal of Water Management Modeling* **2017**, *25*, C425, doi:10.14796/JWMM.C425.
- Dankers, R.; Feyen, L. Climate change impact on flood hazard in Europe: An assessment based on high-resolution climate simulations. *Journal of Geophysical Research* **2008**, *113*, D19105, doi:10.1029/2007JD009719.
- Delidjakova, K.; Bello, R.; MacMillan, G. *Measurement of Evapotranspiration Across Different Land Cover Types in the Greater Toronto Area*; Sustainable Technologies Evaluation Program, Toronto and Region Conservation Authority: Toronto, ON, Canada, 2014.
- Deng, Z.; Qiu, X.; Liu, J.; Madras, N.; Wang, X.; Zhu, H. Trend in frequency of extreme precipitation events over Ontario from ensembles of multiple GCMs. *Clim. Dyn.* **2016**, *46*, 2909–2921, doi:10.1007/s00382-015-2740-9.
- Déqué, M.; Somot, S.; Sanchez-Gomez, E.; Goodess, C.M.; Jacob, D.; Lenderink, G.; Christensen, O.B. The spread amongst ENSEMBLES regional scenarios: regional climate models, driving general circulation models and interannual variability. *Clim Dyn* **2012**, *38*, 951–964, doi:10.1007/s00382-011-1053-x.
- Dibike, Y.B.; Coulibaly, P. Hydrologic impact of climate change in the Saguenay watershed: Comparison of downscaling methods and hydrologic models. *J. Hydrol.* **2005**, *307*, 145–163, doi:10.1016/j.jhydrol.2004.10.012.
- Dimitriadis, P.; Tegos, A.; Oikonomou, A.; Pagana, V.; Koukouvinos, A.; Nikos, M.; Koutsoyiannis, D.; Efstratiadis, A. Comparative evaluation of 1D and quasi-2D hydraulic models based on benchmark and real-world applications for uncertainty assessment in flood mapping. *J. Hydrol.* **2016**, *534*, 478–492, doi:10.1016/j.jhydrol.2016.01.020.
- Domeneghetti, A.; Vorogushyn, S.; Castellarin, A.; Merz, B.; Brath, A. Probabilistic flood hazard mapping: Effects of uncertain boundary conditions. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **2013**, *17*, 3127–3140, doi:10.5194/hess-17-3127-2013.
- Dong, F.; Neumann, A.; Kim, D.-K.; Huang, J.; Arhonditsis, G.B. A season-specific, multi-site calibration strategy to study the hydrological cycle and the impact of extreme-flow events along an urban-to-agricultural gradient. *Ecol. Inform.* **2019**, *54*, 100993, doi:10.1016/j.ecoinf.2019.100993.

- Dougherty, M.; Dymond, R.L.; Goetz, S.J.; Jantz, C.A.; Goulet, N. Evaluation of Impervious Surface Estimates in a Rapidly Urbanizing Watershed. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* **2004**, *70*, 1275–1284, doi:10.14358/PERS.70.11.1275.
- Efstratiadis, A.; Koussis, A.D.; Koutsoyiannis, D.; Mamassis, N. Flood design recipes vs. reality: Can predictions for ungauged basins be trusted? *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* **2014**, *14*, 1417–1428, doi:10.5194/nhess-14-1417-2014.
- European Commission (EC). *Directive on the Assessment and Management of Flood Risks*; Official Journal of the European Union: Strasbourg, France, 2007; pp. L288/27–L288/34; EP & CEU (2007/60/EC).
- European Environment Agency (EEA). *Mapping the Impacts of Natural Hazards and Technological Accidents in Europe: An Overview of the Last Decade*; Technical Report No 13/2010; EEA: Copenhagen, Denmark, 2010; ISSN:1725-2237, doi:10.2800/62638.
- European Environmental Agency (EEA). CORINE Land Cover 1990-2000 Changes (CLC2000), 2016. Available online: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/> (accessed on 19 December 2018).
- Eyring, V.; Bony, S.; Meehl, G.A.; Senior, C.A.; Stevens, B.; Stouffer, R.J.; Taylor, K.E. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geosci. Model Dev.* **2016**, *9*, 1937–1958, doi:10.5194/gmd-9-1937-2016.
- Fang, X.; Cleveland, T.; Garcia, C.A.; Thompson, D.; Malla, R. *Literature Review on Timing Parameters for Hydrographs*; Report 0-4696-1, Project Number 0-4696; Department of Civil Engineering, Lamar University: Beaumont, TX, USA, 2005.
- Feng, B.; Zhang, Y.; Bourke, R. Urbanization impacts on flood risks based on urban growth data and coupled flood models. *Natural Hazards* **2021**, *106*, 613–627, doi:10.1007/s11069-020-04480-0.
- Feldman, A.D. *Hydrologic Modeling System HEC-HMS Technical Reference Manual*; CPD-74B; U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center: Davis, CA, USA, 2000.
- Filianoti, P.; Gurnari, L.; Zema, D.A.; Bombino, G.; Sinagra, M.; Tucciarelli, T. An Evaluation Matrix to Compare Computer Hydrological Models for Flood Predictions. *Hydrology* **2020**, *7*(3), 42, doi:10.3390/hydrology7030042.
- Finger, D.; Vis, M.; Huss, M.; Seibert, J. The value of multiple data set calibration versus model complexity for improving the performance of hydrological models in mountain catchments. *Water Resour. Res.* **2015**, *51*, 1939–1958, doi:10.1002/2014WR015712.
- Fonseca, A.R.; Santos, J.A. Predicting hydrologic flows under climate change: The Tâmega Basin as an analog for the Mediterranean region. *Sci. Total Environ.* **2019**, *668*, 1013–1024, doi:10.1016/j.scitotenv.2019.01.435.
- Ford, D.T.; Hamilton, D. Computer Models for Water-Excess Management. In *Water Resources Handbook*; Mays, L.W., Ed.; McGraw-Hill: New York, NY, USA, 1996.
- Fourniotis, N.T.; Horsch, G.M.; Leftheriotis, G.A. On the Hydrodynamic Geometry of Flow-Through versus Restricted Lagoons. *Water* **2018**, *10*(3), 237, doi:10.3390/w10030237.
- Fread, D.L.; Jin, M.; and Lewis, J.M. *An LPI Numerical Solution for Unsteady Mixed Flow Simulation*; North American Water Congress, Anaheim, CA, June 22–28, 1996, American Society of Civil Engineers, 1996.
- Gaume, E.; Bain, V.; Bernardara, P.; Newinger, O.; Barbuc, M.; Bateman, A.; Blaškovičová, L.; Blöschl, G.; Borga, M.; Dumitrescu, A.; Daliakopoulos, I.; Garcia, J.; Irimescu, A.; Kohnova, S.; Koutroulis, A.; Marchi, L.; Matreata, S.; Medina, V.; Preciso, E.; Sempere-Torres, D.; Stancalie, G.; Szolgay, J.; Tsanis, I.; Velasco, D.; Viglione, A. A compilation of data on European flash floods. *J. Hydrol.* **2009**, *367*(1–2), 70–78, doi:10.1016/j.jhydrol.2008.12.028.

- Gaur, A.; Gaur, A.; Simonovic, S.P. Future Changes in Flood Hazards across Canada under a Changing Climate. *Water* **2018**, *10*(10), 1441, doi:10.3390/w10101441.
- Georgoulas, A.K.; Akritidis, D.; Kalisoras, A.; Kapsomenakis, J.; Melas, D.; Zerefos, C.S.; Zanis, P. Climate change projections for Greece in the 21st century from high-resolution EURO-CORDEX RCM simulations. *Atmospheric Research* **2022**, *271*, 106049, doi:10.1016/j.atmosres.2022.106049.
- Ghimire, E.; Sharma, S.; Lamichhane, N. Evaluation of one-dimensional and two-dimensional HEC-RAS models to predict flood travel time and inundation area for flood warning system. *ISH Journal of Hydraulic Engineering* **2022**, *28*(1), 110-126, doi:10.1080/09715010.2020.1824621.
- Giandotti, M. Previsione delle piene e delle magre dei corsi d'acqua. *Ist. Poligr. Dello Stato* **1934**, *8*, 107–117.
- Givati, A.; Gochis, D.; Rummeler, T.; Kunstmann, H. Comparing One-Way and Two-Way Coupled Hydrometeorological Forecasting Systems for Flood Forecasting in the Mediterranean Region. *Hydrology* **2016**, *3*(2), 19, doi:10.3390/hydrology3020019.
- Golmohammadi, G.; Prasher, S.; Madani, A.; Rudra, R. Evaluating Three Hydrological Distributed Watershed Models: MIKE-SHE, APEX, SWAT. *Hydrology* **2014**, *1*, 20–39, doi:10.3390/hydrology1010020.
- Golmohammadi, G.; Rudra, R.; Dickinson, T.; Goel, P.; Veliz, M. Predicting the temporal variation of flow contributing areas using SWAT. *J. Hydrol.* **2017**, *547*, 375–386, doi:10.1016/j.jhydrol.2017.02.008.
- Goodell, C. Lateral Structure Coefficients. 2013. Available online: <http://hecrasmodel.blogspot.com/2013/12/lateral-structure-coefficients.html> (accessed on 10 February 2020).
- Grillakis, M.G.; Koutroulis, A.G.; Komma, J.; Tsanis, I.K.; Wagner, W.; Blöschl, G. Initial soil moisture effects on flash flood generation—A comparison between basins of contrasting hydro-climatic conditions. *J. Hydrol.* **2016**, *541*, 206–217, doi:10.1016/j.jhydrol.2016.03.007.
- Grillakis, M.G.; Koutroulis, A.G.; Tsanis, I.K. Multisegment statistical bias correction of daily GCM precipitation output. *J. Geophys. Res. Atmos.* **2013**, *118*, 3150–3162, doi:10.1002/jgrd.50323.
- Government of Canada, Agriculture and Agri-food Canada. Land Use 1990, 2000 & 2010. Available online: <https://open.canada.ca/data/en/dataset/18e3ef1a-497c-40c6-8326-aac1a34a0dec> (accessed on 18 December 2019).
- Government of Canada, Agriculture and Agri-Food Canada. Ontario Detailed Soil Survey. 2015. Available online: <https://open.canada.ca/data/en/dataset/a75c3d6c-354d-436d-999d-431fb3a9de79> (accessed on 11 May 2020).
- Government of Canada, Canadian Soil Information Service. National Soil Database (NSDB): Detailed Soil Survey (DSS) Compilations. 2014. Available online: <http://sis.agr.gc.ca/cansis/nsdb/dss/v3/index.html> (accessed on 11 May 2020).
- Government of Canada. Environment and Climate Change Canada. 2020. Available online: <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change.html> (accessed on 23 June 2020).
- Government of Canada (GOC). Flooding events in Canada: Ontario. 2023. Available online: <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/water-overview/quantity/floods/events-ontario.html> (accessed on 13 January 2023).
- Guthrie, R.; Deniseger, J. *Impervious Surfaces in French Creek*; Ministry of Water, Land and Air Protection: Vancouver Island, BC, Canada, 2001.

- Habert, J.; Ricci, S.; Le Pape, E.; Thual, O.; Piacentini, A.; Goutal, N.; Jonville, G.; Rochoux, M. Reduction of the uncertainties in the water level-discharge relation of a 1D hydraulic model in the context of operational flood forecasting. *J. Hydrol.* **2016**, *532*, 52–64, doi:10.1016/j.jhydrol.2015.11.023.
- Haghnegahdar, A.; Tolson, B.A.; Craig, J.R.; Paya, K.T. Assessing the performance of a semi-distributed hydrological model under various watershed discretization schemes. *Hydrol. Process.* **2015**, *29*, 4018–4031, doi:10.1002/hyp.10550.
- Han, S.; Coulibaly, P.; Biondi, D. Assessing Hydrologic Uncertainty Processor Performance for Flood Forecasting in a Semiurban Watershed. *J. Hydrol. Eng.* **2019**, *24*, 05019025, doi:10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001828.
- Hapuarachchi, H.A.P.; Wang, Q.J.; Pagano, T.C. A review of advances in flash flood forecasting. *Hydrol. Process.* **2011**, *25*(18), 2771–2784, doi:10.1002/hyp.8040.
- Iordanidou, V.; Koutroulis, A.G.; Tsanis, I.K. Mediterranean cyclone characteristics related to precipitation occurrence in Crete, Greece. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* **2015**, *15*, 1807–1819, doi:10.5194/nhess-15-1807-2015.
- IPCC. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp, 2013.
- IPCC. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC: Geneva, Switzerland, 151 pp, 2014.
- IPCC. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Pian, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp, 2021.
- IPCC. *Special Report on Emission Scenarios, A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2000.
- Jacob, D.; Petersen, J.; Eggert, B.; Alias, A.; Christensen, O.B.; Bouwer, L.M.; Braun, A.; Colette, A.; Déqué, M.; Georgievski, G.; et al. EURO-CORDEX: New high-resolution climate change projections for European impact research. *Reg. Environ. Chang.* **2014**, *14*, 563–578, doi:10.1007/s10113-013-0499-2.
- Johnstone, D.; Cross, W.P. *Elements of Applied Hydrology*, 1st ed; Ronald Press: New York, NY, USA, 1949.
- Kastridis, A.; Stathis, D. Evaluation of Hydrological and Hydraulic Models Applied in Typical Mediterranean Ungauged Watersheds Using Post-Flash-Flood Measurements. *Hydrology* **2020**, *7*(1), 12, doi:10.3390/hydrology7010012.
- Katzav, J.; Parker, W.S. The future of climate modeling. *Climatic Change* **2015**, *132*, 475–487, doi:10.1007/s10584-015-1435-x.
- Kaykhosravi, S.; Khan, U.T.; Jadidi, M.A. The Effect of Climate Change and Urbanization on the Demand for Low Impact Development for Three Canadian Cities. *Water* **2020**, *12*, 1280, doi:10.3390/w12051280.

- Kirpich, P.Z. Time of concentration of small agricultural watershed. *ASCE Civ. Eng.* **1940**, *10*, 362–370, doi:10.1155/2013/214140.
- Koutroulis, A.G.; Grillakis, M.G.; Tsanis, I.K.; Jacob, D. Exploring the ability of current climate information to facilitate local climate services for the water sector. *Earth Perspect.* **2015**, *2*, 1–19, doi:10.1186/s40322-015-0032-5.
- Koutroulis, A.G.; Tsanis, I.K. A method for estimating flash flood peak discharge in a poorly gauged basin: Case study for the 13-14 January 1994 flood, Giofiros basin, Crete, Greece. *J. Hydrol.* **2010**, *385*, 150-164, doi:10.1016/j.jhydrol.2010.02.012.
- Koutroulis, A.G.; Tsanis, I.K.; Daliakopoulos, I.N. Seasonality of floods and their hydrometeorologic characteristics in the island of Crete. *J. Hydrol.* **2010**, *394*, 90–100, doi:10.1016/j.jhydrol.2010.04.025.
- Koutroulis, A.G.; Vrohidou, A.-E.K.; Tsanis, I.K. Spatiotemporal Characteristics of Meteorological Drought for the Island of Crete. *J. Hydrometeorol.* **2011**, *12*(2), 206–226, doi:10.1175/2010JHM1252.1.
- Kundzewicz, Z.W.; Pińskwar, I.; Brakenridge, G.R. Large floods in Europe, 1985–2009. *Hydrol. Sci. J.* **2013**, *58*, 1–7, doi:10.1080/02626667.2012.745082.
- Kundzewicz, Z.W.; Radziejewski, M.; Pińskwar, I. Precipitation extremes in the changing climate of Europe. *Clim Res* **2006**, *31*, 51-58, doi:10.3354/cr031051.
- Kundzewicz, Z.W.; Schellnhuber, H.-J. Floods in the IPCC TAR perspective. *Natural Hazards* **2004**, *31*, 111-128, doi:10.1023/B:NHAZ.0000020257.09228.7b.
- Lagasio, M.; Fagugli, G.; Ferraris, L.; Fiori, E.; Gabellani, S.; Masi, R.; Mazzarella, V.; Milelli, M.; Parodi, A.; Pignone, F.; Puca, S.; Pulvirenti, L.; Silvestro, F.; Squicciarino, G.; Parodi, A. A Complete Meteo/Hydro/Hydraulic Chain Application to Support Early Warning and Monitoring Systems: The Apollo Mediane Use Case. *Remote Sensing* **2022**, *14*(24), 6348, doi:10.3390/rs14246348.
- Lamichhane, N.; Sharma, S. Effect of input data in hydraulic modeling for flood warning systems. *Hydrol. Sci. J.* **2018**, *63*, 938–956, doi:10.1080/02626667.2018.1464166.
- Leach, J.M.; Kornelsen, K.C.; Coulibaly, P. Assimilation of near-real time data products into models of an urban basin. *J. Hydrol.* **2018**, *563*, 51–64, doi:10.1016/j.jhydrol.2018.05.064.
- Linsley, R.K.; Kohler, M.A.; Paulhus, J.L.H. *Hydrology for engineers*; McGraw-Hill: New York, NY, USA, 1982.
- Liu, Z.; Merwade, V.; Jafarzadegan, K. Investigating the role of model structure and surface roughness in generating flood inundation extents using one- and two- dimensional hydraulic models. *Journal of Flood Risk Management* **2019**, *12*(1), e12347, doi:10.1111/jfr3.12347.
- Llasat, M.C.; Llasat-Botija, M.; Prat, M.A.; Porcú, F.; Price, C.; Mugnai, A.; Lagouvardos, K.; Kotroni, V.; Katsanos, D.; Michaelides, S.; Yair, Y.; Savvidou, K.; Nicolaides, K. High-impact floods and flash floods in Mediterranean countries: the FLASH preliminary database. *Adv. Geosci.* **2010**, *23*, 47-55, doi:10.5194/adgeo-23-47-2010.
- López-Ballesteros, A.; Senent-Aparicio, J.; Martínez, C.; Pérez-Sánchez, J. Assessment of future hydrologic alteration due to climate change in the Arachthos River basin (NW Greece). *Science of the Total Environment* **2020**, *733*, 139299, doi:10.1016/j.scitotenv.2020.139299.
- Malagò, A.; Efstathiou, D.; Bouraoui, F.; Nikolaidis, N.P.; Franchini, M.; Bidoglio, G.; Kritsotakis, M. Regional scale hydrologic modeling of a karst-dominant geomorphology: The case study of the Island of Crete. *J. Hydrol.* **2016**, *540*, 64-81, doi:10.1016/j.jhydrol.2016.05.061.
- Malone, L. (World Meteorological Organization -WMO). *Climate Indices and Analysis for Sectoral Application*; The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics (ICTP) Summer

- School on Climate Impacts Modeling for Developing Countries: Water, Agriculture and Health; 5-16 September 2011, Trieste, Italy. Available online: <https://indico.ictp.it/event/a10167/session/16/contribution/12/material/0/0.pdf> (accessed on 25 July 2022).
- Marchi, L.; Borga, M.; Preciso, E.; Gaume, E. Characterisation of selected extreme flash floods in Europe and implications for flood risk management. *J. Hydrol.* **2010**, *394*(1-2), 118-133, doi:10.1016/j.jhydrol.2010.07.017.
- Maurer, E.P.; Hidalgo, H.G.; Das, T.; Dettinger, M.D.; Cayan, D.R. The utility of daily large-scale climate data in the assessment of climate change impacts on daily streamflow in California. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **2010**, *14*(6), 1125-1138, doi:10.5194/hess-14-1125-2010.
- McNeil, D. *An Independent Review of the 2019 Flood Events in Ontario*; McNeil Consulting Inc: Winnipeg, Manitoba, 2019.
- Mearns, L.O.; Gutowski, W.; Jones, R.; Leung, R.; McGinnis, S.; Nunes A.; Qian, Y. A Regional Climate Change Assessment Program for North America. *EoS Trans. AGU* **2009**, *90*(36), 311, doi:10.1029/2009E0360002.
- Mentzafou, A.; Varlas, G.; Dimitriou, E.; Papadopoulos, A.; Pytharoulis, I.; Katsafados, P. Modeling the Effects of Anthropogenic Land Cover Changes to the Main Hydrometeorological Factors in a Regional Watershed, Central Greece. *Climate* **2019**, *7*(11), 129, doi:10.3390/cli7110129.
- Mitsopoulos, G.; Panagiotatou, E.; Sant, V.; Baltas, E.; Diakakis, M.; Lekkas, E.; Stamou, A. Optimizing the Performance of Coupled 1D/2D Hydrodynamic Models for Early Warning of Flash Floods. *Water* **2022**, *14*, 2356, doi:10.3390/w14152356.
- Moriasi, D.N.; Gitau, M.W.; Pai, N.; Daggupati, P. Hydrologic and Water Quality Models: Performance Measures and Evaluation Criteria. *Transactions of the ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers)* **2015**, *58*(6), 1763-1785, doi:10.13031/trans.58.10715.
- Muhammad, A.; Stadnyk, T.A.; Unduche, F.; Coulibaly, P. Multi-Model Approaches for Improving Seasonal Ensemble Streamflow Prediction Scheme with Various Statistical Post-Processing Techniques in the Canadian Prairie Region. *Water* **2018**, *10*, 1604, doi:10.3390/w10111604.
- Nash, J.E.; Sutcliffe, J.V. River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *J. Hydrol.* **1970**, *10*, 282-290, doi:10.1016/0022-1694(70)90255-6.
- Nemec, W.; Postma, G. Quaternary alluvial fans in southwestern Crete: Sedimentation processes and geomorphic evolution. In *Alluvial Sedimentation*; Marzo, M., Puigdefábregas, C., Eds.; *Spec. Publs Int. Ass. Sediment* Wiley-Blackwell: Oxford, UK, 1993; Volume 17, pp. 235-276, doi:10.1002/9781444303995.ch18.
- Nerantzaki, S.D.; Efstathiou, D.; Giannakis, G.V.; Kritsotakis, M.; Grillakis, M.G.; Koutroulis, A.G.; Tsanis, I.K.; Nikolaidis, N.P. Climate change impact on the hydrological budget of a large Mediterranean island. *Hydrol. Sci. J.* **2019**, *64*, 1190-1203, doi:10.1080/02626667.2019.1630741.
- Nirupama, N.; Armenakis, C.; Montpetit, M. Is flooding in Toronto a concern? *Nat. Hazards* **2014**, *72*, 1259-1264, doi:10.1007/s11069-014-1054-2.
- Ontario Ministry of Natural Resources. Provincial Digital Elevation Model. 2013. Available online: <https://library.carleton.ca/find/gis/geospatial-data/provincial-digital-elevation-model> (accessed on 27 May 2019).
- Paixao, E.; Mirza, M.M.Q.; Shephard, M.W.; Auld, H.; Klaassen, J.; Smith, G. An integrated approach for identifying homogeneous regions of extreme rainfall events and estimating IDF curves in Southern Ontario, Canada: Incorporating radar observations. *J. Hydrol.* **2015**, *528*, 734-750. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.06.015>.

- Papaoiannou, G.; Loukas, A.; Vasiliades, L.; Aronica, G.T. Sensitivity analysis of a probabilistic flood inundation mapping framework for ungauged catchments. *Eur. Water* **2017**, *60*, 9–16.
- Papaoiannou, G.; Loukas, A.; Vasiliades, L.; Aronica, G.T. Flood inundation mapping sensitivity to riverine spatial resolution and modelling approach. *Nat. Hazards* **2016**, *83*, 117–132, doi:10.1007/s11069-016-2382-1.
- Parisi, S.; Pascale, S.; Sdao, F.; Soupios, P. Assessment and mapping of the intrinsic vulnerability to pollution: An example from Keritis River Basin (Northwestern crete, Greece). *Environ. Earth Sci.* **2013**, *70*, 2659–2670, doi:10.1007/s12665-013-2321-3.
- Patel, D.P.; Ramirez, J.A.; Srivastava, P.K.; Bray, M.; Han, D. Assessment of flood inundation mapping of Surat city by coupled 1D/2D hydrodynamic modeling: A case application of the new HEC-RAS 5. *Nat. Hazards* **2017**, *89*, 93–130, doi:10.1007/s11069-017-2956-6.
- Perdikaris, J.; Gharabaghi, B.; Rudra, R. Reference Time of Concentration Estimation for Ungauged Catchments. *Earth Sci. Res.* **2018**, *7*, 58–73, doi:10.5539/esr.v7n2p58.
- Perra, E.; Piras, M.; Deidda, R.; Paniconi, C.; Mascaro, G.; Vivoni, E.R.; Cau, P.; Marras, P.A.; Ludwig, R.; Meyer, S. Multimodel assessment of climate change-induced hydrologic impacts for a Mediterranean catchment. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **2018**, *22*, 4125–4143, doi:10.5194/hess-22-4125-2018.
- Perumal, M. Hydrodynamic derivation of a variable parameter Muskingum method: 2. Verification. *Hydrol. Sci. J.* **1994**, *39*, 443–458, doi:10.1080/02626669409492767.
- Petroselli, A.; Vojtek, M.; Vojteková, J. Flood mapping in small ungauged basins: A comparison of different approaches for two case studies in Slovakia. *Hydrol. Res.* **2018**, *50*, 379–392, doi:10.2166/nh.2018.040.
- Pilgrim, D.H.; Cordery, I. Flood runoff. In *Handbook of Hydrology*; Maidment, D.R., Ed.; McGraw-Hill: New York, NY, USA, 1993.
- Poméon, T.; Jackisch, D.; Diekkrüger, B. Evaluating the performance of remotely sensed and reanalysed precipitation data over West Africa using HBV light. *J. Hydrol.* **2017**, *547*, 222–235, doi:10.1016/j.jhydrol.2017.01.055.
- Public Safety Canada (PSC). Canadian disaster database. 2023. Available online: <http://cdd.publicsafety.gc.ca/srchpg-eng.aspx> (accessed on 13 January 2023).
- Radchenko, I.; Breuer, L.; Forkutsa, I.; Frede, H.-G. Simulating Water Resource Availability under Data Scarcity—A Case Study for the Ferghana Valley (Central Asia). *Water* **2014**, *6*, 3270–3299, doi:10.3390/w6113270.
- Rincón, D.; Velandia, J.F.; Tsanis, I.; Khan, U.T. Stochastic Flood Risk Assessment under Climate Change Scenarios for Toronto, Canada Using CAPRA. *Water* **2022**, *14*(2), 227, doi:10.3390/w14020227.
- Rocha, J.; Duarte, A.; Silva, M.; Fabres, S.; Vasques, J.; Revilla-Romero, B.; Quintela, A. The Importance of High Resolution Digital Elevation Models for Improved Hydrological Simulations of a Mediterranean Forested Catchment. *Remote Sens.* **2020**, *12*(20), 3287, doi:10.3390/rs12203287.
- Rojas, R.; Feyen, L.; Bianchi, A.; Dosio, A. Assessment of future flood hazard in Europe using a large ensemble of bias-corrected regional climate simulations. *Journal of Geophysical Research* **2012**, *117*, D17109, doi:10.1029/2012JD017461.
- Rose, A.; Wilson, J.E.; Lavkulich, L.M. Analysis of Impervious Surface Area, and the Impacts on Soil-Based Agriculture and the Hydrologic Cycle: A Case Study in the Agricultural Land Reserve in Metro Vancouver, British Columbia, Canada. *Agric. Sci.* **2017**, *8*, 837–856, doi:10.4236/as.2017.88062.

- Rozalis, S.; Morin, E.; Yair, Y.; Price, C. Flash flood prediction using an uncalibrated hydrological model and radar rainfall data in a Mediterranean watershed under changing hydrological conditions. *J. Hydrol.* **2010**, 394(1-2), 245–255, doi:10.1016/j.jhydrol.2010.03.021.
- Rudra, R.P.; Dickinson, W.T.; Ahmed, S.I.; Patel, P.; Zhou, J.; Gharabaghi, B.; Khan, A.A. Changes in Rainfall Extremes in Ontario. *Int. J. Environ. Res.* **2015**, 9, 1117–1126, doi:10.22059/ijer.2015.1000.
- Ruti, P.M.; Somot, S.; Giorgi, F.; Dubois, C.; Flaounas, E.; Obermann, A.; Dell'Aquila, A.; Pisacane, G.; Harzallah, A.; Lombardi, E.; Ahrens, B.; Akhtar, N.; Alias, A.; Arsouze, T.; Aznar, R.; Bastin, S.; Bartholy, J.; Béranger, K.; Beuvier, J.; Bouffies-Cloch  , S.; Brauch, J.; Cabos, W.; Calmanti, S.; Calvet, J.-C.; Carillo, A.; Conte, D.; Coppola, E.; Djurdjevic, V.; Drobinski, P.; Elizalde-Arellano, A.; Gaertner, M.; Galán, P.; Gallardo, C.; Gualdi, S.; Goncalves, M.; Jorba, O.; Jordà, G.; L'Heveder, B.; Lebeaupin-Brossier, C.; Li, L.; Liguori, G.; Lionello, P.; Maci  s, D.; Nabat, P.;   nol, B.; Raikovic, B.; Ramage, K.; Sevault, F.; Sannino, G.; Struglia, M.V.; Sanna, A.; Torma, C.; Vervatis, V. Med-CORDEX initiative for Mediterranean climate studies. *Bulletin of the American Meteorological Society* **2016**, 97(7), 1187-1208, doi:10.1175/BAMS-D-14-00176.1.
- Sahraei, S.; Asadzadeh, M.; Unduche, F. Signature-based multi-modelling and multi-objective calibration of hydrologic models: Application in flood forecasting for Canadian Prairies. *J. Hydrol.* **2020**, 588, 125095, doi:10.1016/j.jhydrol.2020.125095.
- Samarasinghe, J.T.; Basnayaka, V.; Gunathilake, M.B.; Azamathulla, H.M.; Rathnayake, U. Comparing Combined 1D/2D and 2D Hydraulic Simulations Using High-Resolution Topographic Data: Examples from Sri Lanka—Lower Kelani River Basin. *Hydrology* **2022**, 9(2), 39, doi:10.3390/hydrology9020039.
- Santos, R.M.B.; Sanches Fernandes, L.F.; Cortes, R.M.V.; Pacheco, F.A.L. Hydrologic Impacts of Land Use Changes in the Sabor River Basin: A Historical View and Future Perspectives. *Water* **2019**, 11(7), 1464, doi:10.3390/w11071464.
- Sapountzis, M.; Kastridis, A.; Kazamias, A.P.; Karagiannidis, A.; Nikopoulos, P.; Lagouvardos, K. Utilization and uncertainties of satellite precipitation data in flash flood hydrological analysis in ungauged watersheds. *Global NEST Journal* **2021**, 23(3), 388-399, doi:10.30955/gnj.003905.
- Sarhadi, A.; Soltani, S.; Modarres, R. Probabilistic flood inundation mapping of ungauged rivers: Linking GIS techniques and frequency analysis. *J. Hydrol.* **2012**, 458-459, 68–86, doi:10.1016/j.jhydrol.2012.06.039.
- Scharffenberg, W. *Hydrologic Modeling System HEC-HMS User's Manual*; CPD-74A, Version 4.2; U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center: Davis, CA, USA, 2016.
- Schenk, O.; Gärtner, K. Parallel Sparse Direct and Multi-Recursive Iterative Linear Solvers: PARDISO User Guide Version 7.2, 2020.
- Seibert, J. HBV light version 2 User's Manual, 2005. Available online: https://www.geo.uzh.ch/dam/jcr:c8afa73c-ac90-478e-a8c7-929eed7b1b62/HBV_manual_2005.pdf (accessed on 20 November 2020).
- Seibert, J.; Vis, M.J.P. Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment-runoff-model software package. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **2012**, 16, 3315–3325, doi:10.5194/hess-16-3315-2012.
- Senatore, A.; Fuoco, D.; Maiolo, M.; Mendicino, G.; Smiatek, G.; Kunstmann, H. Evaluating the uncertainty of climate model structure and bias correction on the hydrological impact of projected climate change in a Mediterranean catchment. *Journal of Hydrology: Regional Studies* **2022**, 42, 101120, doi:10.1016/j.ejrh.2022.101120.

- Shahruckh, M.; Soupios, P.; Papadopoulos, N.; Sarris, A. Geophysical investigations at the Istron archaeological site, eastern Crete, Greece using seismic refraction and electrical resistivity tomography. *J. Geophys. Eng.* **2012**, 9, 749–760, doi:10.1088/1742-2132/9/6/749.
- Sharifi, S.; Hosseini, S.M. Methodology for Identifying the Best Equations for Estimating the Time of Concentration of Watersheds in a Particular Region. *J. Irrig. Drain. Eng.* **2011**, 137, 712–719, doi:10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000373.
- Sharma, V.C.; Regonda, S.K. Two-Dimensional Flood Inundation Modeling in the Godavari River Basin, India—Insights on Model Output Uncertainty. *Water* **2021**, 13(2), 191, doi:10.3390/w13020191.
- Shustikova, I.; Domeneghetti, A.; Neal, J.C.; Bates, P.; Castellarin, A. Comparing 2D capabilities of HEC-RAS and LISFLOOD-FP on complex topography. *Hydrological Sciences Journal* **2019**, 64(14), 1769–1782, doi:10.1080/02626667.2019.1671982.
- Simas, M.J.; Hawkins, R.H. Lag Time Characteristics in Small Watersheds in the United States. In Proceedings of the Second Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference, ASCE, Las Vegas, NV, USA, 28 July–1 August 2002.
- Singh, J.; Ghosh, S.; Simonovic, S.P.; Karmakar, S. Identification of flood seasonality and drivers across Canada. *Hydrological Processes* **2021**, 35(10), e14398, doi:10.1002/hyp.14398.
- Somot, S.; Ruti, P.; Ahrens, B.; Coppola, E.; Jordà, G.; Sannino, G.; Solmon, F. Editorial for the Med-CORDEX special issue. *Clim Dyn* **2018**, 51, 771–777, doi:10.1007/s00382-018-4325-x.
- Soulis, E.D.; Sarhadi, A.; Tinel, M.; Suthar, M. Extreme precipitation time trends in Ontario, 1960–2010. *Hydrol. Process.* **2016**, 30, 4090–4100, doi:10.1002/hyp.10969.
- Steele-Dunne, S.; Lynch, P.; McGrath, R.; Semmler, T.; Wang, S.; Hanafin, J.; Nolan, P. The impacts of climate change on hydrology in Ireland. *J. Hydrol.* **2008**, 356, 28–45, doi:10.1016/j.jhydrol.2008.03.025.
- Sucozhañay, A.; Célleri, R. Impact of Rain Gauges Distribution on the Runoff Simulation of a Small Mountain Catchment in Southern Ecuador. *Water* **2018**, 10, 1169, doi:10.3390/w10091169.
- Tan, X.; Gan, T.Y.; Chen, Y.D. Synoptic moisture pathways associated with mean and extreme precipitation over Canada for summer and fall. *Clim. Dyn.* **2019**, 52, 2959–2979, doi:10.1007/s00382-018-4300-6.
- Tapoglou, E.; Vozinaki, A.-E.K.; Tsanis, I.K. Climate Change Impact on the Frequency of Hydrometeorological Extremes in the Island of Crete. *Water* **2019**, 11, 587, doi:10.3390/w11030587.
- Taylor, K.E.; Stouffer, R.J.; Meehl, G.A. An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bulletin of the American Meteorological Society* **2012**, 93(4), 485–498, doi:10.1175/BAMS-D-11-00094.1.
- Teng, J.; Jakeman, A.J.; Vaze, J.; Croke, B.F.W.; Dutta, D.; Kim, S. Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. *Environ. Model. Softw.* **2017**, 90, 201–216, doi:10.1016/j.envsoft.2017.01.006.
- Thiessen, A.H. Precipitation Averages for Large Areas. *Monthly Weather Review* **1911**, 39(7), 1082–1084. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1911\)39<1082b:PAFLA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1911)39<1082b:PAFLA>2.0.CO;2).
- Tigkas, D.; Christelis, V.; Tsakiris, G. The global optimisation approach for calibrating hydrological models: The case of Medbasin-D model. In *9th World Congress of EWRA 'Water Resources Management in a Changing World: Challenges and Opportunities'*, Istanbul, Turkey, 10–13 June 2015.

- Todaro, V.; D’Oria, M.; Secci, D.; Zanini, A.; Tanda, M.G. Climate Change over the Mediterranean Region: Local Temperature and Precipitation Variations at Five Pilot Sites. *Water* **2022**, *14*(16), 2499, doi:10.3390/w14162499.
- TRCA. *Humber River State of the Watershed Report—Land and Resource Use*; Toronto and Region Conservation for the Living City: Toronto, ON, Canada, 2008.
- TRCA. *Humber River Watershed Scenario Modelling and Analysis Report*; Toronto and Region Conservation Authority: Toronto, ON, Canada, 2008.
- TRCA. *State of the Watershed Report: Highland Creek Watershed*; Toronto and Region Conservation Authority: Toronto, ON, Canada, 1999.
- Toronto and Region Conservation Authority. Open Data and Information. 2020. Available online: <https://trca.ca/about/open/> (accessed on 19 December 2019).
- Trudeau, M.P.; Richardson, M. Empirical assessment of effects of urbanization on event flow hydrology in watersheds of Canada’s Great Lakes-St Lawrence basin. *J. Hydrol.* **2016**, *541*, 1456–1474, doi:10.1016/j.jhydrol.2016.08.051.
- Tsanis, I.K.; Koutroulis, A.G.; Daliakopoulos, I.N.; Jacob, D. Severe climate-induced water shortage and extremes in Crete. *Clim. Change* **2011**, *106*, 667–677, doi:10.1007/s10584-011-0048-2.
- Tsanis, I.K.; Seiradakis, K.D.; Daliakopoulos, I.N.; Grillakis, M.G.; Koutroulis, A.G. Assessment of GeoEye-1 stereo-pair-generated DEM in flood mapping of an ungauged basin. *J. Hydroinform.* **2013**, *16*, 1–18, doi:10.2166/hydro.2013.197.
- Unduche, F.; Tolossa, H.; Senbeta, D.; Zhu, E. Evaluation of four hydrological models for operational flood forecasting in a Canadian Prairie watershed. *Hydrol. Sci. J.* **2018**, *63*, 1133–1149, doi:10.1080/02626667.2018.1474219.
- U.S. Army Corps of Engineers. *Flood-Runoff Analysis Engineer Manual*; EM 1110-2-1417; Engineering and Design: Washington, DC, USA, 1994.
- United States Department of Agriculture (USDA). *Engineering Hydrology Training Series, Module 104: Runoff Curve Number Computations*; Soil Conservation Service: Washington, DC, USA, 1989.
- United States Department of Agriculture (USDA). *National Engineering Handbook, Chapter 4: Storm Rainfall Depth and Distribution*; 210-630-H.; Natural Resources Conservation Service: Washington, DC, USA, 2019.
- United States Department of Agriculture (USDA). *National Engineering Handbook, Chapter 7: Hydrologic Soil Groups*; 210-VI-NEH.; Natural Resources Conservation Service: Washington, DC, USA, 2009.
- United States Department of Agriculture (USDA). *National Engineering Handbook, Chapter 15: Time of Concentration*; 210-VI-NEH; Natural Resources Conservation Service: Washington, DC, USA, 2010.
- United States Department of Agriculture (USDA). *National Engineering Handbook, Hydrology, Supplement A, Section 4*; Soil Conservation Service: Washington, DC, USA, 1956; Chapter 10.
- United States Department of Agriculture (USDA). *Urban Hydrology for Small Watersheds, TR-55*; 2nd ed.; Natural Resources Conservation Service: Springfield, VA, USA, 1986.
- van den Besselaar, E.J.M.; Klein Tank, A.M.G.; Buishand, T.A. Trends in European precipitation extremes over 1951–2010. *Int. J. Climatol.* **2013**, *33*(12), 2682–2689, doi:10.1002/joc.3619.
- van Vuuren, D.P.; Edmonds, J.; Kainuma, M.; Riahi, K.; Thomson, A.; Hibbard, K.; Hurtt, G.C.; Kram, T.; Krey, V.; Lamarque, J.-F.; Masui, T.; Meinshausen, M.; Nakicenovic, N.; Smith, S.J.; Rose, S.K. The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change* **2011**, *109*, 5–31, doi:10.1007/s10584-011-0148-z.

- Venetsanou, P.; Anagnostopoulou, C.; Loukas, A.; Voudouris, K. Hydrological impacts of climate change on a data-scarce Greek catchment. *Theoretical and Applied Climatology* **2020**, *140*, 1017–1030, doi:10.1007/s00704-020-03130-6.
- Verheye, W.; de la Rosa, D. Mediterranean soils. In *Land Use, Land Cover and Soil Sciences*; Verheye, W., Ed.; UNESCO-EOLSS Publishers: Oxford, UK, 2006.
- Vozinaki, A.-E.K.; Morianou, G.G.; Alexakis, D.D.; Tsanis, I.K. Comparing 1D and combined 1D/2D hydraulic simulations using high-resolution topographic data: A case study of the Koiliaris basin, Greece. *Hydrol. Sci. J.* **2016**, *62*, 642–656, doi:10.1080/02626667.2016.1255746.
- Vozinaki, A.-E.K.; Tapoglou, E.; Tsanis, I.K. Hydrometeorological impact of climate change in two Mediterranean basins. *Int. J. River Basin Manag.* **2018**, *16*, 245–257, doi:10.1080/15715124.2018.1437742.
- Vrochidou, A.-E.K.; Tsanis, I.K. Assessing precipitation distribution impacts on droughts on the island of Crete. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* **2012**, *12*, 1159–1171, doi:10.5194/nhess-12-1159-2012.
- Wahren, F.T.; Julich, S.; Nunes, J.P.; Gonzalez-Pelayo, O.; Hawtree, D.; Feger, K.-H.; Keizer, J.J. Combining digital soil mapping and hydrological modeling in a data scarce watershed in north-central Portugal. *Geoderma* **2016**, *264*, 350–362, doi:10.1016/j.geoderma.2015.08.023.
- Washington State Department of Transportation (WSDT). *Highway Runoff Manual*; M 31-16.05; Engineering and Regional Operations: Washington, DC, USA, 2019.
- Wazneh, H.; Arain, M.A.; Coulibaly, P. Historical Spatial and Temporal Climate Trends in Southern Ontario, Canada. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* **2017**, *56*, 2767–2787, doi:10.1175/JAMC-D-16-0290.1.
- Westerberg, I.K.; Birkel, C. Observational uncertainties in hypothesis testing: Investigating the hydrological functioning of a tropical catchment. *Hydrol. Process.* **2015**, *29*, 4863–4879, doi:10.1002/hyp.10533.
- Wijayarathne, D.; Boodoo, S.; Coulibaly, P.; Sills, D. Evaluation of Radar Quantitative Precipitation Estimates (QPEs) as an Input of Hydrological Models for Hydrometeorological Applications. *J. Hydrometeorol.* **2020**, *21*, 1847–1864, doi:10.1175/JHM-D-20-0033.1.
- Williams, G.B. Flood Discharge and the Dimensions of Spillways in India. *Engineering (London)* **1922**, *134*, 321–322.
- Yang, Y.; Gan, T.Y.; Tan, X. Spatiotemporal Changes in Precipitation Extremes over Canada and Their Teleconnections to Large-Scale Climate Patterns. *J. Hydrometeorol.* **2019**, *20*, 275–296, doi:10.1175/JHM-D-18-0004.1.
- Zahmatkesh, Z.; Han, S.; Coulibaly, P. Understanding Uncertainty in Probabilistic Floodplain Mapping in the Time of Climate Change. *Water* **2021**, *13*(9), 1248, doi:10.3390/w13091248.
- Zhang, X.; Vincent, L.A.; Hogg, W.D.; Niitsoo, A. Temperature and Precipitation Trends in Canada During the 20th Century. *Atmosphere-Ocean* **2000**, *38*(3), 395–429, doi:10.1080/07055900.2000.9649654.
- Zheng, Y.; Sun, H. An Integrated Approach for the Simulation Modeling and Risk Assessment of Coastal Flooding. *Water* **2020**, *12*(8), 2076, doi:10.3390/w12082076.
- Zotou, I.; Karamvasis, K.; Karathanassi, V.; Tsihrintzis, V.A. Potential of Two SAR-Based Flood Mapping Approaches in Supporting an Integrated 1D/2D HEC-RAS Model. *Water* **2022**, *14*(24), 4020, doi:10.3390/w14244020.

8. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

8.1 Παράρτημα Α – Τιμές αναφοράς του CN και της % ολικής αδιαπερατότητας των υπολεκανών του ποταμού Humber, για το μοντέλο HEC-HMS

8.1.1 Υπολογισμοί των τιμών αναφοράς του CN για συνθήκες απορροής Τύπου II

Ακολουθώς (Πίνακας 8-1, Πίνακας 8-2, Πίνακας 8-3, Πίνακας 8-4, Πίνακας 8-5, Πίνακας 8-6, και Πίνακας 8-7) παρουσιάζονται οι αναλυτικοί υπολογισμοί του CN για κανονικές συνθήκες πρότερης υγρασίας (Τύπου II) για κάθε υπολεκάνη του ποταμού Humber, όπως προκύπτουν από εφαρμογή της Εξίσωσης (5), βάσει του επιμέρους CN κάθε χρήσης γης/ομάδας εδάφους και του σταθμισμένου ως προς την έκταση επίπεδου στοιχείου χρήσης γης/ομάδας εδάφους. Τις επιμέρους τιμές του CN για κανονικές συνθήκες απορροής (Τύπου II) παρουσίασε ο Πίνακας 4-5. Ο τύπος εδάφους AB θεωρείται συνδυασμός των υδρολογικών τύπων εδάφους A και B σε ίσες αναλογίες. Οι αταξινόμητοι τύποι εδάφους θεωρούνται μείξη των τεσσάρων τύπων εδάφους (A, B, Γ και Δ) σε ίσες αναλογίες.

Για την υπολεκάνη W1460, οι τιμές του CN του αστικού ιστού ανά κατηγορία εδάφους υπολογίστηκαν για κάλυψη του αστικού ιστού κατά 35% από υψηλά οικιστικές περιοχές, κατά 60% από οικιστικά αγροκτήματα, και κατά 5% από γήπεδα γκολφ. Οι δρόμοι της υπολεκάνης W1460 είναι χαλικόστρωτοι.

Πίνακας 8-1. Υπολογισμός της τιμής αναφοράς του CN_{II} της υπολεκάνης W1460 του ποταμού Humber.

Χρήσεις γης	Υδρολογικοί τύποι εδάφους	W1460			
		Επιφάνεια (km ²)	$\frac{A_{i,LU-SG}}{A_{total}}$	$CN_{II,i}$	$\frac{A_{i,LU-SG} \times CN_{II,i}}{A_{total}}$
Αστικός ιστός	AB	0.376847	0.0023	69	0.16
	Γ	1.081758	0.0067	83	0.56
	A	7.874465	0.0488	62	3.02
	Δ	0.213857	0.0013	87	0.12
	B	0.829695	0.0051	75	0.39
	Αταξινόμητοι	0.739554	0.0046	77	0.35
Δρόμοι	AB	0.706992	0.0044	80.5	0.35
	Γ	0.339795	0.0021	89	0.19
	A	3.898708	0.0242	76	1.84

	Δ	0.177545	0.0011	91	0.10
	B	0.324912	0.002	85	0.17
	Αταξινόμητοι	0.403086	0.0025	85	0.21
Λίμνες	AB	0.143612	0.0009	100	0.09
	Γ	0.312806	0.0019	100	0.19
	A	1.298913	0.008	100	0.80
	Δ	0.304977	0.0019	100	0.19
	B	0.07506	0.0005	100	0.05
	Αταξινόμητοι	0.438924	0.0027	100	0.27
Δάση	AB	9.66033	0.0599	48	2.87
	Γ	2.416207	0.015	73	1.09
	A	49.181401	0.3047	36	10.97
	Δ	2.288964	0.0142	79	1.12
	B	2.032888	0.0126	60	0.76
	Αταξινόμητοι	6.290435	0.039	62	2.42
Δασικοί υγρότοποι	AB	0.09227	0.0006	100	0.06
	Γ	0.443655	0.0027	100	0.27
	A	0.581591	0.0036	100	0.36
	Δ	0.331941	0.0021	100	0.21
	B	0.256517	0.0016	100	0.16
	Αταξινόμητοι	0.187415	0.0012	100	0.12
Δέντρα	AB	0.084089	0.0005	54	0.03
	Γ	0.056894	0.0004	76	0.03
	A	0.481045	0.003	43	0.13
	Δ	0.049431	0.0003	82	0.03
	B	0.113217	0.0007	65	0.05
	Αταξινόμητοι	0.065708	0.0004	67	0.03
Δενδρώδεις υγρότοποι	AB	0.015614	0.0001	100	0.01
	Γ	0.058352	0.0004	100	0.04
	A	0.268703	0.0017	100	0.17
	Δ	0.047856	0.0003	100	0.03
	B	0.094726	0.0006	100	0.06
	Αταξινόμητοι	0.075567	0.0005	100	0.05
Καλλιεργήσιμες εκτάσεις	AB	10.320989	0.0639	71	4.54
	Γ	3.267216	0.0202	83	1.68
	A	41.086073	0.2546	67	17.06
	Δ	0.849103	0.0053	86	0.45
	B	6.547284	0.0406	76	3.08
	Αταξινόμητοι	2.069537	0.0128	78	1.00
Υγροβιότοποι	AB	0.080166	0.0005	100	0.05
	Γ	0.543487	0.0034	100	0.34
	A	0.743228	0.0046	100	0.46
	Δ	0.299647	0.0019	100	0.19
	B	0.276605	0.0017	100	0.17
	Αταξινόμητοι	0.405323	0.0025	100	0.25
Θαμνώδεις υγρότοποι	AB	0.001714	0	100	0
	Γ	0.041081	0.0003	100	0.03
	A	0.046656	0.0003	100	0.03

	Δ	0.033361	0.0002	100	0.02
	B	0.053123	0.0003	100	0.03
	Αταξινόμητοι	0.014561	0.0001	100	0.01
Άλλες εκτάσεις	Γ	0.002698	0	0	0
	A	0.003602	0	0	0
ΣΥΝΟΛΟ:		161.401773	1	CN_{II}	59

Για την υπολεκάνη W790, οι τιμές του CN του αστικού ιστού ανά υδρολογικό τύπο εδάφους υπολογίστηκαν για κάλυψη του αστικού ιστού κατά 50% από υψηλά οικιστικές περιοχές, και κατά 50% από οικιστικά αγροκτήματα. Οι δρόμοι της υπολεκάνης W790 είναι χαλικόστρωτοι.

Πίνακας 8-2. Υπολογισμός της τιμής αναφοράς του CN_{II} της υπολεκάνης W790 του ποταμού Humber.

Χρήσεις γης	Υδρολογικοί τύποι εδάφους	W790			
		Επιφάνεια (km ²)	$\frac{A_{i,LU-SG}}{A_{total}}$	$CN_{II,i}$	$\frac{A_{i,LU-SG} \times CN_{II,i}}{A_{total}}$
Αστικός ιστός	A	1.413773	0.0224	66	1.48
	Δ	0.072638	0.0011	89	0.10
	Γ	4.010548	0.0634	85	5.39
	Αταξινόμητοι	0.478	0.0076	79	0.60
Δρόμοι	A	0.358633	0.0057	76	0.43
	Δ	0.035128	0.0006	91	0.05
	Γ	1.790799	0.0283	89	2.52
	Αταξινόμητοι	0.140893	0.0022	85	0.19
Λίμνες	A	0.137197	0.0022	100	0.22
	Δ	0.076383	0.0012	100	0.12
	Γ	0.574356	0.0091	100	0.91
	Αταξινόμητοι	0.031532	0.0005	100	0.05
Δάση	A	1.140607	0.018	36	0.65
	Δ	0.317285	0.005	79	0.40
	Γ	6.028247	0.0953	73	6.96
	Αταξινόμητοι	1.279544	0.0202	63	1.27
Δασικοί υγρότοποι	A	0.034445	0.0005	100	0.05
	Δ	0.002116	0	100	0
	Γ	0.133438	0.0021	100	0.21
	Αταξινόμητοι	0.042147	0.0007	100	0.07
Δέντρα	A	0.042858	0.0007	43	0.03
	Δ	0.0027	0	82	0
	Γ	0.272123	0.0043	76	0.33
	Αταξινόμητοι	0.041524	0.0007	67	0.04
Δενδρώδεις υγρότοποι	A	0.013315	0.0002	100	0.02
	Δ	0.017378	0.0003	100	0.03
	Γ	0.169837	0.0027	100	0.27
	Αταξινόμητοι	0.012134	0.0002	100	0.02
Καλλιεργήσιμες εκτάσεις	A	4.363158	0.069	67	4.62
	Δ	0.370405	0.0059	86	0.50
	Γ	36.11939	0.5711	83	47.40

	Αταξινόμητοι	2.247227	0.0355	78	2.77
Υγροβιότοποι	A	0.111986	0.0018	100	0.18
	Δ	0.053935	0.0009	100	0.09
	Γ	0.949982	0.015	100	1.50
	Αταξινόμητοι	0.274673	0.0043	100	0.43
Θαμνώδεις υγρότοποι	A	0.005094	0.0001	100	0.01
	Δ	0.028713	0.0005	100	0.05
	Γ	0.05055	0.0008	100	0.08
	Αταξινόμητοι	0.001617	0	100	0
ΣΥΝΟΛΟ:		63.246309	1	CN_{II}	80

Για την υπολεκάνη W800, οι τιμές του CN του αστικού ιστού ανά κατηγορία εδάφους υπολογίστηκαν λαμβάνοντας υπόψη ότι ο αστικός ιστός αποτελείται κατά 70% από υψηλά οικιστικές περιοχές, και κατά 30% από οικιστικά αγροκτήματα. Οι δρόμοι της υπολεκάνης W800 είναι χαλικόστρωτοι.

Πίνακας 8-3. Υπολογισμός της τιμής αναφοράς του CN_{II} της υπολεκάνης W800 του ποταμού Humber.

Χρήσεις γης	Υδρολογικοί τύποι εδάφους	W800			
		Επιφάνεια (km ²)	$\frac{A_{i,LU-SG}}{A_{total}}$	$CN_{II,i}$	$\frac{A_{i,LU-SG} \times CN_{II,i}}{A_{total}}$
Αστικός ιστός	Αταξινόμητοι	2.052302	0.0107	82	0.88
	Γ	21.94547	0.1141	87	9.93
	Δ	0.750108	0.0039	90	0.35
	B	7.873023	0.0409	81	3.32
	A	4.106024	0.0214	70	1.49
Δρόμοι	Αταξινόμητοι	0.503913	0.0026	85	0.22
	Γ	8.424729	0.0438	89	3.90
	Δ	0.248399	0.0013	91	0.12
	B	2.551436	0.0133	85	1.13
	A	1.143936	0.0059	76	0.45
Λίμνες	Αταξινόμητοι	0.698045	0.0036	100	0.36
	Γ	1.02165	0.0053	100	0.53
	Δ	0.148824	0.0008	100	0.08
	B	0.438924	0.0023	100	0.23
	A	0.295234	0.0015	100	0.15
Δάση	Αταξινόμητοι	3.718612	0.0193	62	1.20
	Γ	18.317046	0.0953	73	6.95
	Δ	0.954672	0.005	79	0.39
	B	2.985367	0.0155	60	0.93
	A	6.798904	0.0354	36	1.27
Δασικοί υγρότοποι	Αταξινόμητοι	0.038603	0.0002	100	0.02
	Γ	0.417657	0.0022	100	0.22
	Δ	0.240028	0.0012	100	0.12
	B	0.505886	0.0026	100	0.26
	A	0.111073	0.0006	100	0.06
Δέντρα	Αταξινόμητοι	0.100753	0.0005	67	0.04
	Γ	0.531079	0.0028	76	0.21

	Δ	0.037655	0.0002	82	0.02
	B	0.163837	0.0009	65	0.06
	A	0.09	0.0005	43	0.02
Δενδρώδεις υγρότοποι	Αταξινόμητοι	0.054712	0.0003	100	0.03
	Γ	0.229357	0.0012	100	0.12
	Δ	0.058993	0.0003	100	0.03
	B	0.087599	0.0005	100	0.05
	A	0.033176	0.0002	100	0.02
Καλλιεργήσιμες εκτάσεις	Αταξινόμητοι	4.3389	0.0226	78	1.76
	Γ	75.971166	0.3951	83	32.79
	Δ	1.819008	0.0095	86	0.81
	B	12.583718	0.0654	76	4.97
	A	6.824482	0.0355	67	2.38
Υγροβιότοποι	Αταξινόμητοι	0.575293	0.003	100	0.30
	Γ	1.54695	0.008	100	0.80
	Δ	0.161443	0.0008	100	0.08
	B	0.228279	0.0012	100	0.12
	A	0.229149	0.0012	100	0.12
Θαμνώδεις υγρότοποι	Αταξινόμητοι	0.002109	0	100	0
	Γ	0.090616	0.0005	100	0.05
	Δ	0.068553	0.0004	100	0.04
	B	0.106518	0.0006	100	0.06
	A	0.006607	0	100	0
Άλλες εκτάσεις	Αταξινόμητοι	0.003749	0	0	0
	Γ	0.021246	0.0001	0	0
	Δ	0.0027	0	0	0
	B	0.016009	0.0001	0	0
	A	0.003467	0	0	0
ΣΥΝΟΛΟ:		192.276988	1	CN_{II}	79

Για την υπολεκάνη W900, οι τιμές του CN του αστικού ιστού ανά κατηγορία εδάφους υπολογίστηκαν λαμβάνοντας υπόψη ότι ο αστικός ιστός αποτελείται κατά 50% από υψηλά οικιστικές περιοχές, κατά 45% από οικιστικά αγροκτήματα, και κατά 5% από γήπεδα γκολφ. Οι δρόμοι της υπολεκάνης W900 είναι χαλικόστρωτοι.

Πίνακας 8-4. Υπολογισμός της τιμής αναφοράς του CN_{II} της υπολεκάνης W900 του ποταμού Humber.

Χρήσεις γης	Υδρολογικοί τύποι εδάφους	W900			
		Επιφάνεια (km ²)	$\frac{A_{i,LU-SG}}{A_{total}}$	$CN_{II,i}$	$\frac{A_{i,LU-SG} \times CN_{II,i}}{A_{total}}$
Αστικός ιστός	Αταξινόμητοι	2.750091	0.0196	79	1.55
	Γ	17.601591	0.1255	85	10.67
	Δ	1.167728	0.0083	88	0.73
	A	1.001539	0.0071	65	0.46
	B	0.901096	0.0064	77	0.49
Δρόμοι	Αταξινόμητοι	0.811759	0.0058	85	0.49
	Γ	6.807569	0.0485	89	4.32
	Δ	0.552384	0.0039	91	0.36

	A	0.378389	0.0027	76	0.21
	B	0.356706	0.0025	85	0.22
Λίμνες	Αταξινόμητοι	0.076634	0.0005	100	0.05
	Γ	0.134659	0.001	100	0.10
	Δ	0.074825	0.0005	100	0.05
	A	0.029979	0.0002	100	0.02
	B	0.080384	0.0006	100	0.06
Δάση	Αταξινόμητοι	2.28414	0.0163	62	1.01
	Γ	3.921416	0.028	73	2.04
	Δ	1.163468	0.0083	79	0.66
	A	0.884057	0.0063	36	0.23
	B	1.129106	0.0081	60	0.48
Δασικοί υγροβιότοποι	Αταξινόμητοι	0.01528	0.0001	100	0.01
	Γ	0.066669	0.0005	100	0.05
	Δ	0.108938	0.0008	100	0.08
	A	0.004343	0	100	0
	B	0.049547	0.0004	100	0.04
Δέντρα	Αταξινόμητοι	0.092815	0.0007	67	0.04
	Γ	0.172018	0.0012	76	0.09
	Δ	0.019854	0.0001	82	0.01
	A	0.020792	0.0001	43	0.01
	B	0.047431	0.0003	65	0.02
Δενδρώδεις υγρότοποι	Αταξινόμητοι	0.012348	0.0001	100	0.01
	Γ	0.017948	0.0001	100	0.01
	Δ	0.009726	0.0001	100	0.01
	A	0.002416	0	100	0
	B	0.029957	0.0002	100	0.02
Καλλιεργήσιμες εκτάσεις	Αταξινόμητοι	9.697325	0.0691	78	5.39
	Γ	67.221809	0.4793	83	39.78
	Δ	3.710689	0.0265	86	2.28
	A	3.061194	0.0218	67	1.46
	B	13.383928	0.0954	76	7.25
Υγροβιότοποι	Αταξινόμητοι	0.129023	0.0009	100	0.09
	Γ	0.174903	0.0012	100	0.12
	Δ	0.039146	0.0003	100	0.03
	A	0.007709	0.0001	100	0.01
	B	0.031734	0.0002	100	0.02
Θαμνώδεις υγρότοποι	Γ	0.001973	0	100	0
	Δ	0.004029	0	100	0
	A	0.003581	0	100	0
	B	0.001802	0	100	0
Άλλες εκτάσεις	Γ	0.0009	0	0	0
	B	0.0009	0	0	0
ΣΥΝΟΛΟ:		140.248247	1	CN_{II}	81

Για την υπολεκάνη W1030, οι τιμές του *CN* του αστικού ιστού ανά κατηγορία εδάφους υπολογίστηκαν για κάλυψη του αστικού ιστού κατά 70% από υψηλά οικιστικές

περιοχές, και κατά 30% από βιομηχανικές περιοχές. Οι δρόμοι της υπολεκάνης W1030 είναι ασφαλοστρωμένοι με δίκτυο ομβρίων.

Πίνακας 8-5. Υπολογισμός της τιμής αναφοράς του CN_{II} της υπολεκάνης W1030 του ποταμού Humber.

Χρήσεις γης	Υδρολογικοί τύποι εδάφους	W1030			
		Επιφάνεια (km ²)	$\frac{A_{i,LU-SG}}{A_{total}}$	$CN_{II,i}$	$\frac{A_{i,LU-SG} \times CN_{II,i}}{A_{total}}$
Αστικός ιστός	Γ	22.037718	0.3666	90	32.99
	Δ	2.707124	0.045	92	4.14
	Αταξινόμητοι	18.026791	0.2999	87	26.09
	A	0.798337	0.0133	78	1.04
	B	0.781838	0.013	86	1.12
Δρόμοι	Γ	6.87189	0.1143	98	11.20
	Δ	0.844846	0.0141	98	1.38
	Αταξινόμητοι	6.359943	0.1058	98	10.37
	A	0.116677	0.0019	98	0.19
	B	0.158065	0.0026	98	0.26
Λίμνες	Γ	0.005843	0.0001	100	0.01
	Αταξινόμητοι	0.000082	0	100	0
Δάση	Γ	0.133749	0.0022	73	0.16
	Αταξινόμητοι	0.002749	0	62	0
Δέντρα	Γ	0.007109	0.0001	76	0.01
	Δ	0.0018	0	82	0
	Αταξινόμητοι	0.000053	0	67	0
Καλλιεργήσιμες εκτάσεις	Γ	0.806538	0.0134	86.5	1.16
	Δ	0.39489	0.0066	90	0.59
	Αταξινόμητοι	0.054387	0.0009	81	0.07
Υγροβιότοποι	Γ	0.005439	0.0001	100	0.01
	Δ	0.00211	0	100	0
ΣΥΝΟΛΟ:		60.117977	1	CN_{II}	91

Για την υπολεκάνη W1020, οι τιμές του CN του αστικού ιστού ανά κατηγορία εδάφους υπολογίστηκαν για αστικό ιστό αποτελούμενο κατά 60% από υψηλά οικιστικές περιοχές, και κατά 40% από βιομηχανικές περιοχές. Οι δρόμοι της υπολεκάνης W1020 είναι χαλικόστρωτοι και ασφαλοστρωμένοι με δίκτυο ομβρίων, σε ίσα ποσοστά.

Πίνακας 8-6. Υπολογισμός της τιμής αναφοράς του CN_{II} της υπολεκάνης W1020 του ποταμού Humber.

Χρήσεις γης	Υδρολογικοί τύποι εδάφους	W1020			
		Επιφάνεια (km ²)	$\frac{A_{i,LU-SG}}{A_{total}}$	$CN_{II,i}$	$\frac{A_{i,LU-SG} \times CN_{II,i}}{A_{total}}$
Αστικός ιστός	Αταξινόμητοι	10.727364	0.0445	87	3.87
	Δ	2.496927	0.0104	92	0.95
	A	12.098613	0.0502	79	3.96
	Γ	78.73318	0.3265	90	29.38
	B	1.30397	0.0054	86	0.47
Δρόμοι	Αταξινόμητοι	1.894389	0.0079	92	0.72

	Δ	0.851915	0.0035	94.5	0.33
	A	2.502708	0.0104	87	0.90
	Γ	21.329159	0.0884	93.5	8.27
	B	0.531057	0.0022	91.5	0.20
Λίμνες	Αταξινόμητοι	0.576165	0.0024	100	0.24
	Δ	0.035514	0.0001	100	0.01
	A	0.30182	0.0013	100	0.13
	Γ	0.78817	0.0033	100	0.33
	B	0.051985	0.0002	100	0.02
Δάση	Αταξινόμητοι	2.730223	0.0113	62	0.70
	Δ	0.527971	0.0022	79	0.17
	A	4.017087	0.0167	36	0.60
	Γ	10.633696	0.0441	73	3.22
	B	0.369263	0.0015	60	0.09
Δασικοί υγρότοποι	Αταξινόμητοι	0.040539	0.0002	100	0.02
	A	0.041041	0.0002	100	0.02
	Γ	0.083713	0.0003	100	0.03
Δέντρα	Αταξινόμητοι	0.15763	0.0007	67	0.04
	Δ	0.008965	0	82	0
	A	0.172739	0.0007	43	0.03
	Γ	0.456395	0.0019	76	0.14
	B	0.036801	0.0002	65	0.01
Δενδρώδεις υγρότοποι	Αταξινόμητοι	0.035529	0.0001	100	0.01
	Δ	0.014915	0.0001	100	0.01
	A	0.074225	0.0003	100	0.03
	Γ	0.19089	0.0008	100	0.08
	B	0.015293	0.0001	100	0.01
Καλλιεργήσιμες εκτάσεις	Αταξινόμητοι	6.832466	0.0283	78	2.21
	Δ	0.674267	0.0028	86	0.24
	A	7.155872	0.0297	67	1.99
	Γ	68.49208	0.284	83	23.57
	B	2.187527	0.0091	76	0.69
Υγροβιότοποι	Αταξινόμητοι	0.483451	0.002	100	0.20
	Δ	0.079813	0.0003	100	0.03
	A	0.373146	0.0015	100	0.15
	Γ	0.977067	0.0041	100	0.41
	B	0.024475	0.0001	100	0.01
Θαμνώδεις υγρότοποι	Αταξινόμητοι	0.004269	0	100	0
	A	0.009031	0	100	0
	Γ	0.022021	0.0001	100	0.01
Άλλες εκτάσεις	Αταξινόμητοι	0.000002	0	0	0
	A	0.000898	0	0	0
	Γ	0.0108	0	0	0
ΣΥΝΟΛΟ:		241.157037	1	CN_{II}	85

Για την υπολεκάνη W1180, οι τιμές του CN του αστικού ιστού ανά υδρολογική κατηγορία εδάφους προέκυψαν για 100% κάλυψη του αστικού ιστού από υψηλά οικιστικές

περιοχές. Οι δρόμοι της υπολεκάνης W1180 είναι ασφαλτοστρωμένοι με δίκτυο ομβρίων.

Πίνακας 8-7. Υπολογισμός της τιμής αναφοράς του CN_{II} της υπολεκάνης W1180 του ποταμού Humber.

Χρήσεις γης	Υδρολογικοί τύποι εδάφους	W1180			
		Επιφάνεια (km ²)	$\frac{A_{i,LU-SG}}{A_{total}}$	$CN_{II,i}$	$\frac{A_{i,LU-SG} \times CN_{II,i}}{A_{total}}$
Αστικός ιστός	Γ	11.35574	0.381	90	34.29
	A	5.792813	0.1944	77	14.97
	Αταξινόμητοι	5.393426	0.181	86	15.56
	Δ	0.183661	0.0062	92	0.57
Δρόμοι	Γ	3.879971	0.1302	98	12.76
	A	1.612792	0.0541	98	5.30
	Αταξινόμητοι	1.3854	0.0465	98	4.56
	Δ	0.031254	0.001	98	0.10
Λίμνες	Γ	0.000261	0	100	0
	A	0.000511	0	100	0
	Αταξινόμητοι	0.163149	0.0055	100	0.55
Υγροβιότοποι	Αταξινόμητοι	0.002434	0.0001	100	0.01
ΣΥΝΟΛΟ:		29.801412	1	CN_{II}	89

8.1.2 Υπολογισμοί των τιμών αναφοράς της % ολικής αδιαπερατότητας

Στους πίνακες που ακολουθούν (Πίνακας 8-8, Πίνακας 8-9, Πίνακας 8-10, Πίνακας 8-11, Πίνακας 8-12, Πίνακας 8-13, και Πίνακας 8-14) παρουσιάζονται οι αναλυτικοί υπολογισμοί της % συνολικής αδιαπερατότητας για κάθε υπολεκάνη του ποταμού Humber, όπως προκύπτουν από εφαρμογή της Εξίσωσης (8), βάσει της επιμέρους % αδιαπερατότητας κάθε χρήσης γης και της σταθμισμένης έκτασης κάθε χρήσης γης. Τις επιμέρους τιμές της % αδιαπερατότητας παρουσίασε ο Πίνακας 4-6.

Για την υπολεκάνη W1460, η τιμή της αδιαπερατότητας του αστικού ιστού (38%) υπολογίστηκε για κάλυψη του αστικού ιστού κατά 35% από υψηλά οικιστικές περιοχές, κατά 60% από οικιστικά αγροκτήματα, και κατά 5% από γήπεδα γκολφ, με επιμέρους τιμές της % αδιαπερατότητας ίσες με 65, 25, και 0, αντίστοιχα (Πίνακας 4-6).

Πίνακας 8-8. Υπολογισμός της τιμής αναφοράς της % ολικής αδιαπερατότητας της υπολεκάνης W1460 του ποταμού Humber.

Χρήσεις γης	W1460			
	Επιφάνεια (km ²)	$\frac{A_{i,LU}}{A_{total}}$	% Αδιαπερατότητα _i	$\frac{A_{i,LU} \times \%Αδιαπερατότητα_i}{A_{total}}$
Αστικός ιστός	11.116175	0.069	38	2.60
Δρόμοι	5.851037	0.036	100	3.63
Λίμνες	2.574292	0.016	0	0.00
Δάση	71.870224	0.445	1	0.45

Δασικοί υγρότοποι	1.893388	0.012	0	0.00
Δέντρα	0.850385	0.005	1	0.01
Δενδρώδεις υγρότοποι	0.560818	0.003	0	0.00
Καλλιεργήσιμες εκτάσεις	64.140201	0.397	3	1.19
Υγροβιότοποι	2.348457	0.015	0	0.00
Θαμνώδεις υγρότοποι	0.190496	0.001	0	0.00
Άλλες εκτάσεις	0.0063	0.000039033	-	-
ΣΥΝΟΛΟ:	161.401773	1	% Ολική Αδιαπερατότητα	8

Για την υπολεκάνη W790, η τιμή της αδιαπερατότητας του αστικού ιστού (45%) υπολογίστηκε για αστικό ιστό αποτελούμενο κατά 50% από υψηλά οικιστικές περιοχές, και κατά 50% από οικιστικά αγροκτήματα, με επιμέρους τιμές της % αδιαπερατότητας ίσες με 65 και 25, αντίστοιχα (Πίνακας 4-6).

Πίνακας 8-9. Υπολογισμός της τιμής αναφοράς της % ολικής αδιαπερατότητας της υπολεκάνης W790 του ποταμού Humber.

Χρήσεις γης	W790			
	Επιφάνεια (km ²)	$\frac{A_{i,LU}}{A_{total}}$	% Αδιαπερατότητα _i	$\frac{A_{i,LU} \times \% \text{Αδιαπερατότητα}_i}{A_{total}}$
Αστικός ιστός	5.974959	0.094	45	4.25
Δρόμοι	2.325453	0.037	100	3.68
Λίμνες	0.819468	0.013	0	0.00
Δάση	8.765683	0.139	1	0.14
Δασικοί υγρότοποι	0.212146	0.003	0	0.00
Δέντρα	0.359205	0.006	1	0.01
Δενδρώδεις υγρότοποι	0.212664	0.003	0	0.00
Καλλιεργήσιμες εκτάσεις	43.100182	0.681	3	2.04
Υγροβιότοποι	1.390576	0.022	0	0.00
Θαμνώδεις υγρότοποι	0.085974	0.001	0	0.00
ΣΥΝΟΛΟ:	63.24631	1	% Ολική Αδιαπερατότητα	10

Για την υπολεκάνη W800, η τιμή της αδιαπερατότητας του αστικού ιστού (53%) υπολογίστηκε για αστικό ιστό αποτελούμενο κατά 70% από υψηλά οικιστικές περιοχές, και κατά 30% από οικιστικά αγροκτήματα, με επιμέρους τιμές της % αδιαπερατότητας ίσες με 65 και 25, αντίστοιχα (Πίνακας 4-6).

Πίνακας 8-10. Υπολογισμός της τιμής αναφοράς της % ολικής αδιαπερατότητας της υπολεκάνης W800 του ποταμού Humber.

Χρήσεις γης	W800			
	Επιφάνεια (km ²)	$\frac{A_{i,LU}}{A_{total}}$	% Αδιαπερατότητα _i	$\frac{A_{i,LU} \times \% \text{Αδιαπερατότητα}_i}{A_{total}}$
Αστικός ιστός	36.726927	0.191	53	10.12
Δρόμοι	12.872413	0.067	100	6.69
Λίμνες	2.602678	0.014	0	0.00

Δάση	32.774601	0.170	1	0.17
Δασικοί υγρότοποι	1.313247	0.007	0	0.00
Δέντρα	0.923323	0.005	1	0.00
Δενδρώδεις υγρότοποι	0.463837	0.002	0	0.00
Καλλιεργήσιμες εκτάσεις	101.537273	0.528	3	1.58
Υγροβιότοποι	2.741115	0.014	0	0.00
Θαμνώδεις υγρότοποι	0.274402	0.001	0	0.00
Άλλες εκτάσεις	0.047172	0.0002453336	-	-
ΣΥΝΟΛΟ:	192.276988	1	% Ολική Αδιαπερατότητα	19

Για την υπολεκάνη W900, η τιμή της αδιαπερατότητας του αστικού ιστού (44%) υπολογίστηκε για κάλυψη του αστικού ιστού κατά 50% από υψηλά οικιστικές περιοχές, κατά 45% από οικιστικά αγροκτήματα, και κατά 5% από γήπεδα γκολφ, με επιμέρους τιμές της % αδιαπερατότητας ίσες με 65, 25, και 0, αντίστοιχα (Πίνακας 4-6).

Πίνακας 8-11. Υπολογισμός της τιμής αναφοράς της % ολικής αδιαπερατότητας της υπολεκάνης W900 του ποταμού Humber.

Χρήσεις γης	W900			
	Επιφάνεια (km ²)	$\frac{A_{i,LU}}{A_{total}}$	% Αδιαπερατότητα _i	$\frac{A_{i,LU} \times \% \text{Αδιαπερατότητα}_i}{A_{total}}$
Αστικός ιστός	23.422045	0.167	44	7.31
Δρόμοι	8.906808	0.064	100	6.35
Λίμνες	0.39648	0.003	0	0.00
Δάση	9.382187	0.067	1	0.07
Δασικοί υγρότοποι	0.244778	0.002	0	0.00
Δέντρα	0.352911	0.003	1	0.00
Δενδρώδεις υγρότοποι	0.072396	0.001	0	0.00
Καλλιεργήσιμες εκτάσεις	97.074943	0.692	3	2.08
Υγροβιότοποι	0.382514	0.003	0	0.00
Θαμνώδεις υγρότοποι	0.011385	0.000081	0	0.00
Άλλες εκτάσεις	0.0018	0.0000128344	-	-
ΣΥΝΟΛΟ:	140.248247	1	% Ολική Αδιαπερατότητα	16

Για την υπολεκάνη W1030, η τιμή της αδιαπερατότητας του αστικού ιστού (67%) υπολογίστηκε λαμβάνοντας υπόψη ότι ο αστικός ιστός αποτελείται κατά 70% από υψηλά οικιστικές περιοχές, και κατά 30% από βιομηχανικές περιοχές, με επιμέρους τιμές της % αδιαπερατότητας ίσες με 65 και 72, αντίστοιχα (Πίνακας 4-6).

Πίνακας 8-12. Υπολογισμός της τιμής αναφοράς της % ολικής αδιαπερατότητας της υπολεκάνης W1030 του ποταμού Humber.

Χρήσεις γης	W1030			
	Επιφάνεια (km ²)	$\frac{A_{i,LU}}{A_{total}}$	% Αδιαπερατότητα _i	$\frac{A_{i,LU} \times \% \text{Αδιαπερατότητα}_i}{A_{total}}$
Αστικός ιστός	44.351808	0.738	67	49.50

Δρόμοι	14.351421	0.239	100	23.87
Λίμνες	0.005925	0.00010	0	0.00
Δάση	0.136497	0.002	1	0.00
Δέντρα	0.008962	0.00015	1	0.00
Καλλιεργήσιμες εκτάσεις	1.255815	0.021	3	0.06
Υγροβιότοποι	0.007549	0.00013	0	0.00
ΣΥΝΟΛΟ:	60.117977	1	% Ολική Αδιαπερατότητα	73

Για την υπολεκάνη W1020, η τιμή της αδιαπερατότητας του αστικού ιστού (68%) υπολογίστηκε λαμβάνοντας υπόψη ότι ο αστικός ιστός αποτελείται κατά 60% από υψηλά οικιστικές περιοχές, και κατά 40% από βιομηχανικές περιοχές, με επιμέρους τιμές της % αδιαπερατότητας ίσες με 65 και 72, αντίστοιχα (Πίνακας 4-6).

Πίνακας 8-13. Υπολογισμός της τιμής αναφοράς της % ολικής αδιαπερατότητας της υπολεκάνης W1020 του ποταμού Humber.

Χρήσεις γης	W1020			
	Επιφάνεια (km ²)	$\frac{A_{i,LU}}{A_{total}}$	% Αδιαπερατότητα _i	$\frac{A_{i,LU} \times \% \text{Αδιαπερατότητα}_i}{A_{total}}$
Αστικός ιστός	105.360054	0.437	68	29.62
Δρόμοι	27.109228	0.112	100	11.24
Λίμνες	1.753654	0.007	0	0.00
Δάση	18.27824	0.076	1	0.08
Δασικοί υγρότοποι	0.165294	0.001	0	0.00
Δέντρα	0.83253	0.003	1	0.00
Δενδρώδεις υγρότοποι	0.330852	0.001	0	0.00
Καλλιεργήσιμες εκτάσεις	85.342212	0.354	3	1.06
Υγροβιότοποι	1.937952	0.008	0	0.00
Θαμνώδεις υγρότοποι	0.035322	0.00015	0	0.00
Άλλες εκτάσεις	0.0117	0.00004852	-	-
ΣΥΝΟΛΟ:	241.157038	1	% Ολική Αδιαπερατότητα	42

Για την υπολεκάνη W1180, η τιμή της αδιαπερατότητας του αστικού ιστού (65%) προέκυψε για κάλυψη του αστικού ιστού αποκλειστικά από υψηλά οικιστικές περιοχές.

Πίνακας 8-14. Υπολογισμός της τιμής αναφοράς της % ολικής αδιαπερατότητας της υπολεκάνης W1180 του ποταμού Humber.

Χρήσεις γης	W1180			
	Επιφάνεια (km ²)	$\frac{A_{i,LU}}{A_{total}}$	% Αδιαπερατότητα _i	$\frac{A_{i,LU} \times \% \text{Αδιαπερατότητα}_i}{A_{total}}$
Αστικός ιστός	22.725639	0.763	65	49.57
Δρόμοι	6.909417	0.232	100	23.18
Λίμνες	0.163922	0.006	0	0.00
Υγροβιότοποι	0.002434	0.000082	0	0.00
ΣΥΝΟΛΟ:	29.801412	1	% Ολική Αδιαπερατότητα	73

8.2 Παράρτημα Β – Ποσοστά κάλυψης των χρήσεων γης των έξι υπολεκανών του ποταμού Humber ανά υψομετρική ζώνη, για το μοντέλο HBV-light

Ακολουθώς (Πίνακας 8-15, Πίνακας 8-16, Πίνακας 8-17, Πίνακας 8-18, Πίνακας 8-19, και Πίνακας 8-20) παρουσιάζεται η ποσοστιαία κάλυψη των χρήσεων γης, όπως ορίστηκαν στο υδρολογικό μοντέλο HBV-light, για κάθε υψομετρική ζώνη, σε κάθε υπολεκάνη του ποταμού Humber. Στο HBV-light υπάρχει η δυνατότητα καταχώρισης έως τριών ζωνών χρήσεων γης. Έγινε συγχώνευση των λιμνών, δασών, δασικών υγροτόπων, δέντρων, δενδρωδών υγροτόπων, υγροβιοτόπων, και θαμνωδών υγροτόπων στην κατηγορία δάση και υγροβιότοποι. Η δεύτερη κατηγορία ήταν οι καλλιεργήσιμες εκτάσεις. Επίσης, συγχωνεύτηκαν ο αστικός ιστός και οι δρόμοι στην κατηγορία αστικός ιστός.

Πίνακας 8-15. Ποσοστιαία κάλυψη χρήσεων γης ανά υψομετρική ζώνη στην υπολεκάνη W1460 του ποταμού Humber.

W1460			
Υψομετρική ζώνη	% Δάση και Υγροβιότοποι	% Καλλιεργήσιμες εκτάσεις	% Αστικός ιστός
428 m	15.3	15	3
271 m	21.7	9.7	2
291 m	12.8	15	5.5
<i>ΣΥΝΟΛΟ:</i>	<i>49.8</i>	<i>39.7</i>	<i>10.5</i>

Πίνακας 8-16. Ποσοστιαία κάλυψη χρήσεων γης ανά υψομετρική ζώνη στην υπολεκάνη W790 του ποταμού Humber.

W790			
Υψομετρική ζώνη	% Δάση και Υγροβιότοποι	% Καλλιεργήσιμες εκτάσεις	% Αστικός ιστός
290 m	5.85	24.35	3.1
269 m	5.85	27.45	0
212 m	7	16.4	10
<i>ΣΥΝΟΛΟ:</i>	<i>18.7</i>	<i>68.2</i>	<i>13.1</i>

Πίνακας 8-17. Ποσοστιαία κάλυψη χρήσεων γης ανά υψομετρική ζώνη στην υπολεκάνη W800 του ποταμού Humber.

W800			
Υψομετρική ζώνη	% Δάση και Υγροβιότοποι	% Καλλιεργήσιμες εκτάσεις	% Αστικός ιστός
250 m	4.7	16.3	4
260 m	6	15	4
294 m	4.7	6.5	13.8
175 m	6	15	4
<i>ΣΥΝΟΛΟ:</i>	<i>21.4</i>	<i>52.8</i>	<i>25.8</i>

Πίνακας 8-18. Ποσοστιαία κάλυψη χρήσεων γης ανά υψομετρική ζώνη στην υπολεκάνη W900 του ποταμού Humber.

W900			
Υψομετρική ζώνη	% Δάση και Υγροβιότοποι	% Καλλιεργήσιμες εκτάσεις	% Αστικός ιστός
285 m	2.6	30	0.7
255 m	2.6	28.3	2.4
205 m	2.6	10.8	20
<i>ΣΥΝΟΛΟ:</i>	<i>7.8</i>	<i>69.1</i>	<i>23.1</i>

Πίνακας 8-19. Ποσοστιαία κάλυψη χρήσεων γης ανά υψομετρική ζώνη στην υπολεκάνη W1030 του ποταμού Humber.

W1030			
Υψομετρική ζώνη	% Δάση και Υγροβιότοποι	% Καλλιεργήσιμες εκτάσεις	% Αστικός ιστός
199 m	0.2	1.5	48.3
132 m	0	0.6	49.4
<i>ΣΥΝΟΛΟ:</i>	<i>0.2</i>	<i>2.1</i>	<i>97.7</i>

Πίνακας 8-20. Ποσοστιαία κάλυψη χρήσεων γης ανά υψομετρική ζώνη στην υπολεκάνη W1020 του ποταμού Humber.

W1020			
Υψομετρική ζώνη	% Δάση και Υγροβιότοποι	% Καλλιεργήσιμες εκτάσεις	% Αστικός ιστός
252 m	5	13	15.3
200 m	4	20	9.3
157 m	0.7	2.4	30.3
<i>ΣΥΝΟΛΟ:</i>	<i>9.7</i>	<i>35.4</i>	<i>54.9</i>

8.3 Παράρτημα Γ – Μέγιστη ημερήσια βροχόπτωση εικοσαετίας και ημερήσια βροχόπτωση που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας, για 4 εικοσαετίες, 24 κλιματικά μοντέλα, και 2 σενάρια θερμοκηπικών εκπομπών, στις υπολεκάνες του ποταμού Humber

Παρακάτω, για κάθε υπολεκάνη του ποταμού Humber, για καθεμιά από τις τέσσερις εικοσαετίες κλιματικών δεδομένων (1995-2014, 2021-2040, 2041-2060, και 2081-2100), και για καθένα από τα 24 κλιματικά μοντέλα της βάσης δεδομένων CMIP5, παρατίθεται η μέγιστη ημερήσια βροχόπτωση εικοσαετίας (Πίνακας 8-21, και Πίνακας 8-23), και η ημερήσια βροχόπτωση που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας (Πίνακας 8-22, και Πίνακας 8-24), για τα κλιματικά σενάρια θερμοκηπικών εκπομπών RCP8.5 και RCP4.5, και υπολογίζονται οι μέσες τιμές τους, από τα 24 κλιματικά μοντέλα.

Πίνακας 8-21. Μέγιστη ημερήσια βροχόπτωση εικοσαετίας, ανά υπολεκάνη & ανά κλιματικό μοντέλο, για τέσσερις εξεταζόμενες εικοσαετίες, για το σενάριο εκπομπών RCP8.5.

A/A	RCP8.5 / Κλιματικό μοντέλο	20ετία	Μέγιστη ημερήσια βροχόπτωση εικοσαετίας (mm)						
			W1460	W790	W800	W900	W1030	W1020	W1180
1	HadGEM2-AO	1995-2014	109.548	125.738	123.682	136.321	108.876	126.169	104.743
		2021-2040	101.718	109.888	101.892	120.921	85.537	106.338	81.481
		2041-2060	112.118	123.179	116.516	138.048	101.604	122.890	97.378
		2081-2100	76.167	77.918	83.179	104.533	83.144	93.433	81.025
2	HadGEM2-ES	1995-2014	104.281	116.826	109.107	120.352	86.151	107.961	82.040
		2021-2040	62.771	77.995	81.675	98.839	92.785	93.371	90.281
		2041-2060	69.817	65.943	64.000	72.118	67.937	66.264	66.949
		2081-2100	129.925	155.655	164.356	157.561	145.699	158.923	137.711
3	MPI-ESM-MR	1995-2014	76.007	76.053	71.397	79.971	65.341	73.272	64.713
		2021-2040	100.295	111.400	105.411	116.765	91.847	105.993	81.691
		2041-2060	118.665	135.255	133.450	144.814	116.722	134.612	112.574
		2081-2100	104.207	111.861	105.670	121.253	100.339	109.962	90.071
4	MPI-ESM-LR	1995-2014	77.332	73.467	77.169	77.820	72.732	76.578	94.413
		2021-2040	60.631	66.544	62.755	71.104	61.663	66.385	61.204
		2041-2060	92.991	76.358	61.127	79.180	69.448	65.956	94.000
		2081-2100	83.569	79.242	82.322	85.573	97.447	90.109	95.306
5	MIROC-ESM-CHEM	1995-2014	69.094	76.742	92.551	67.719	78.073	74.764	72.058
		2021-2040	120.088	140.715	138.470	154.089	124.860	134.220	120.043
		2041-2060	152.599	182.037	185.537	192.122	163.059	183.366	155.198
		2081-2100	133.662	159.924	162.040	175.094	145.730	164.787	139.755
6	MRI-CGCM3	1995-2014	145.989	165.593	158.967	175.895	132.325	160.145	125.854
		2021-2040	110.586	123.759	124.044	136.733	116.979	129.164	114.319
		2041-2060	102.259	107.719	95.153	102.611	109.447	95.639	97.143
		2081-2100	80.354	75.731	79.275	83.241	95.490	85.324	89.333
7	MIROC-ESM	1995-2014	87.888	96.401	92.330	103.637	79.262	93.322	75.940
		2021-2040	112.836	126.723	124.628	141.195	115.814	131.274	111.804
		2041-2060	79.929	80.320	74.977	84.166	67.305	76.783	64.671
		2081-2100	100.299	88.726	115.948	123.810	110.259	112.750	105.338
8	CNRM-CM5	1995-2014	78.748	88.941	97.767	93.931	86.381	92.825	80.942
		2021-2040	64.312	79.383	82.611	85.071	72.652	81.100	68.620
		2041-2060	122.348	145.915	148.797	154.047	127.619	146.034	119.917
		2081-2100	90.848	108.225	108.630	123.921	102.462	114.634	99.170
9	CSIRO-Mk3-6-0	1995-2014	83.431	98.320	99.131	104.890	88.771	99.328	86.028
		2021-2040	96.304	93.415	94.442	101.098	108.751	103.467	108.845
		2041-2060	109.643	130.295	128.364	138.935	113.720	128.052	109.704
		2081-2100	154.318	175.776	175.042	190.401	156.209	172.983	149.417
10	MIROC5	1995-2014	150.181	177.429	179.997	197.858	171.012	187.525	166.474
		2021-2040	75.328	79.286	68.290	75.019	89.947	68.598	90.727
		2041-2060	89.905	104.687	115.520	108.333	114.429	111.841	110.765
		2081-2100	142.277	167.119	165.061	182.374	149.451	170.272	144.064
11	GFDL-ESM2G	1995-2014	81.592	83.323	83.091	88.485	77.997	80.202	75.140
		2021-2040	140.510	157.724	152.055	169.418	126.299	153.498	120.280
		2041-2060	64.097	71.628	73.090	69.382	60.623	68.653	58.559
		2081-2100	132.206	151.437	144.982	162.782	116.872	144.870	118.126

12	NorESM1-M	1995-2014	62.067	62.624	61.326	57.897	55.458	56.332	56.013
		2021-2040	113.424	133.829	134.736	140.598	116.048	132.911	110.088
		2041-2060	137.209	134.404	125.832	141.845	114.707	131.138	111.805
		2081-2100	122.477	139.107	134.716	141.510	106.979	129.896	101.678
13	BNU-ESM	1995-2014	109.548	125.738	123.682	136.321	108.876	126.169	104.743
		2021-2040	75.082	87.189	86.938	95.846	78.897	89.431	76.321
		2041-2060	92.081	104.949	102.126	111.525	87.125	102.877	83.059
		2081-2100	97.198	111.820	111.177	118.307	95.895	110.711	91.635
14	CCSM4	1995-2014	198.710	222.199	218.846	237.238	188.878	221.883	177.950
		2021-2040	188.230	214.912	210.169	231.239	185.613	215.194	178.096
		2041-2060	115.734	137.831	146.495	136.899	133.199	142.095	126.091
		2081-2100	68.646	68.097	70.242	72.436	85.137	76.760	86.449
15	GFDL-ESM2M	1995-2014	107.638	116.980	101.004	136.321	88.245	117.322	87.533
		2021-2040	118.636	143.031	141.685	149.670	118.804	140.384	112.612
		2041-2060	158.689	184.214	179.114	201.201	156.273	184.730	151.279
		2081-2100	137.990	164.128	162.389	171.583	135.869	160.623	129.154
16	IPSL-CM5A-LR	1995-2014	89.211	102.554	100.498	107.773	84.465	99.915	80.011
		2021-2040	68.630	63.250	63.330	62.986	78.532	65.344	75.158
		2041-2060	130.127	155.064	156.448	157.137	127.223	149.214	118.178
		2081-2100	117.304	139.985	141.260	155.456	127.769	144.409	123.633
17	GFDL-CM3	1995-2014	62.956	66.241	69.530	58.142	67.747	61.808	67.975
		2021-2040	77.670	90.606	88.517	95.297	62.845	84.474	56.765
		2041-2060	99.846	115.064	113.134	121.103	96.402	112.807	91.365
		2081-2100	94.550	110.539	109.067	120.789	95.552	110.954	91.894
18	NorESM1-ME	1995-2014	101.921	117.652	112.287	121.966	93.922	113.189	89.334
		2021-2040	90.497	78.406	76.600	85.399	93.811	83.424	82.578
		2041-2060	116.054	133.705	127.661	140.834	109.111	130.414	104.563
		2081-2100	151.074	168.668	156.191	182.046	134.795	164.584	130.706
19	FGOALS-g2	1995-2014	74.073	77.335	74.227	86.575	77.369	78.993	67.558
		2021-2040	89.012	77.509	75.684	81.036	69.971	77.034	63.253
		2041-2060	84.563	96.059	94.313	105.540	88.909	97.032	81.079
		2081-2100	70.788	74.023	70.781	78.530	72.768	78.172	67.426
20	CanESM2	1995-2014	59.255	54.786	57.171	58.174	68.024	59.964	62.345
		2021-2040	114.847	128.595	119.959	140.771	100.417	124.356	96.291
		2041-2060	95.629	111.450	110.847	118.608	95.751	110.840	91.350
		2081-2100	90.064	98.514	94.718	113.736	93.910	100.823	85.666
21	CESM1-CAM5	1995-2014	71.087	59.933	63.875	64.389	79.354	70.123	78.106
		2021-2040	94.953	81.150	76.846	80.937	84.537	78.504	74.042
		2041-2060	99.816	119.033	121.682	130.419	114.258	124.227	111.722
		2081-2100	65.254	63.330	68.342	67.356	78.071	71.240	79.921
22	IPSL-CM5A-MR	1995-2014	105.899	104.642	112.673	128.525	97.126	117.851	91.691
		2021-2040	96.334	112.067	109.451	110.543	96.788	96.139	93.749
		2041-2060	99.221	116.848	114.739	91.055	98.618	95.201	91.920
		2081-2100	143.498	168.746	172.548	192.609	162.579	180.442	156.859
23	bcc-csm1-1-m	1995-2014	126.761	143.515	140.510	160.934	124.146	147.278	120.034
		2021-2040	92.673	103.726	90.003	126.286	97.234	114.203	100.670
		2041-2060	130.785	150.834	145.830	169.717	125.086	152.455	120.119
		2081-2100	202.971	226.007	213.854	231.897	164.353	210.790	151.706

24	bcc-csm1-1	1995-2014	78.000	88.371	86.093	82.938	93.098	87.079	91.779
		2021-2040	66.330	65.281	67.393	72.323	81.398	75.213	81.530
		2041-2060	81.719	82.910	89.080	88.634	94.410	91.397	93.969
		2081-2100	81.864	78.631	80.574	76.714	85.149	80.727	85.158
		Μέση τιμή μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης (1995-2014)	96.301	105.059	104.455	111.836	94.735	105.417	91.809
		Μέση τιμή μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης (2021-2040)	104.487	117.771	113.438	130.065	104.114	117.856	99.246
		Μέση τιμή μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης (2041-2060)	116.332	133.740	129.629	144.939	114.061	131.982	110.171
		Μέση τιμή μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης (2081-2100)	119.509	135.316	134.225	151.426	122.398	139.256	117.057

Πίνακας 8-22. Ημερήσια βροχόπτωση που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας, ανά υπολεκάνη & ανά κλιματικό μοντέλο, για τέσσερις εξεταζόμενες εικοσαετίες, για το σενάριο εκπομπών RCP8.5.

A/A	RCP8.5 / Κλιματικό μοντέλο	20ετία	Ημερήσια βροχή που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο 20ετίας (mm)						
			W1460	W790	W800	W900	W1030	W1020	W1180
1	HadGEM2-AO	1995-2014	54.626	51.149	48.510	54.833	54.525	51.492	51.641
		2021-2040	63.800	60.191	60.153	70.722	63.681	67.634	63.956
		2041-2060	56.430	52.265	56.575	57.513	61.591	59.741	62.599
		2081-2100	47.929	43.380	46.430	48.542	63.516	51.997	64.992
2	HadGEM2-ES	1995-2014	55.161	53.465	56.460	56.993	62.381	58.662	60.477
		2021-2040	57.752	53.256	51.518	57.950	54.323	53.666	56.617
		2041-2060	53.339	52.284	51.596	57.234	61.325	56.765	61.892
		2081-2100	87.264	79.216	80.654	85.137	87.816	85.797	85.643
3	MPI-ESM-MR	1995-2014	51.289	49.746	52.311	49.764	53.439	52.495	51.491
		2021-2040	59.803	57.092	56.441	63.418	62.039	61.098	58.701
		2041-2060	72.798	68.913	69.344	77.769	77.386	76.039	76.241
		2081-2100	79.260	73.276	73.491	82.139	85.908	82.393	85.394
4	MPI-ESM-LR	1995-2014	57.275	51.509	51.663	55.653	61.235	55.373	59.988
		2021-2040	50.621	46.180	45.649	48.868	49.165	47.158	50.390
		2041-2060	52.632	54.965	53.600	53.261	64.169	52.721	59.879
		2081-2100	64.786	58.775	57.232	61.357	63.741	60.213	66.176
5	MIROC-ESM-CHEM	1995-2014	52.725	53.218	57.597	56.163	61.157	56.934	54.792
		2021-2040	82.654	87.423	88.080	95.760	103.342	95.048	95.750
		2041-2060	74.352	73.543	74.754	79.888	80.635	80.871	79.209
		2081-2100	69.777	67.365	66.980	73.894	82.142	74.423	79.796
6	MRI-CGCM3	1995-2014	62.363	64.129	64.221	67.675	68.628	67.704	67.505
		2021-2040	54.347	50.870	52.079	55.739	62.080	56.884	63.154
		2041-2060	81.324	75.959	77.598	77.110	80.764	79.472	76.382
		2081-2100	68.656	65.359	66.963	66.304	67.637	67.656	64.250
7	MIROC-ESM	1995-2014	58.179	54.600	55.947	57.919	63.303	57.985	57.191
		2021-2040	55.323	51.712	53.083	54.962	56.860	54.329	56.471
		2041-2060	53.057	46.427	46.740	49.813	55.874	49.931	52.408
		2081-2100	54.959	52.955	51.555	52.643	57.334	53.279	55.872
8	CNRM-CM5	1995-2014	50.659	51.222	55.034	50.575	57.564	60.148	56.721
		2021-2040	52.881	49.242	51.301	53.513	59.570	53.545	55.033
		2041-2060	56.432	56.007	58.123	59.202	66.481	62.384	66.416
		2081-2100	56.751	57.705	61.572	65.691	67.524	66.689	70.612

9	CSIRO-Mk3-6-0	1995-2014	51.093	48.438	48.092	51.987	53.011	53.121	54.850
		2021-2040	73.471	66.344	66.961	69.157	79.849	69.592	69.387
		2041-2060	76.397	71.123	75.755	71.595	82.373	75.034	75.765
		2081-2100	83.315	84.252	86.206	98.744	99.500	99.030	101.143
10	MIROC5	1995-2014	105.284	130.083	134.474	144.497	120.704	137.787	118.420
		2021-2040	57.851	55.651	58.573	57.354	59.688	61.996	59.642
		2041-2060	67.548	66.489	66.287	68.352	75.705	70.358	66.194
		2081-2100	66.264	64.940	69.441	66.417	87.124	73.297	81.295
11	GFDL-ESM2G	1995-2014	68.239	64.636	62.981	67.604	67.392	67.231	64.444
		2021-2040	63.579	59.544	60.351	66.453	71.351	62.733	72.829
		2041-2060	52.725	52.955	54.704	55.220	56.131	54.008	54.187
		2081-2100	68.178	59.833	63.816	70.141	82.061	74.531	83.239
12	NorESM1-M	1995-2014	48.510	47.285	48.988	47.673	49.755	49.461	51.859
		2021-2040	72.976	67.215	65.626	71.813	68.276	69.759	66.470
		2041-2060	61.051	60.617	62.137	66.362	76.162	68.402	78.058
		2081-2100	64.547	61.148	62.789	68.946	75.108	68.039	69.855
13	BNU-ESM	1995-2014	61.663	60.212	62.941	63.038	65.422	63.975	63.597
		2021-2040	55.244	51.421	52.280	52.993	55.031	52.992	54.881
		2041-2060	57.771	53.404	53.230	56.488	58.640	55.902	56.094
		2081-2100	62.770	60.588	59.308	64.150	61.917	62.088	58.814
14	CCSM4	1995-2014	65.073	66.473	70.177	77.005	81.545	77.481	82.950
		2021-2040	65.576	61.331	60.827	65.976	82.850	68.746	72.187
		2041-2060	69.365	64.463	62.045	65.184	61.507	65.843	62.333
		2081-2100	46.031	43.489	46.939	46.538	54.931	48.481	55.878
15	GFDL-ESM2M	1995-2014	58.270	53.731	54.932	57.139	62.451	56.742	59.640
		2021-2040	73.547	70.462	72.878	77.954	89.699	80.681	80.257
		2041-2060	68.008	63.136	63.666	66.062	70.184	66.728	70.077
		2081-2100	70.728	68.093	68.757	74.880	77.683	74.313	72.952
16	IPSL-CM5A-LR	1995-2014	58.754	58.569	59.406	59.058	63.789	62.109	60.798
		2021-2040	53.613	55.939	58.998	57.201	64.295	60.376	59.993
		2041-2060	52.905	53.693	55.067	56.133	61.613	56.704	55.318
		2081-2100	57.743	55.868	54.471	63.070	63.857	62.787	61.233
17	GFDL-CM3	1995-2014	46.710	46.155	48.177	50.867	56.387	52.625	55.747
		2021-2040	54.959	52.422	53.543	53.585	56.003	53.741	55.227
		2041-2060	61.194	59.210	63.970	59.514	69.863	62.281	68.716
		2081-2100	63.974	62.513	63.303	63.815	69.578	65.184	70.745
18	NorESM1-ME	1995-2014	75.929	66.807	69.524	74.250	75.540	70.379	70.999
		2021-2040	57.949	55.086	58.616	56.811	60.395	58.744	56.884
		2041-2060	76.653	74.581	72.189	80.791	70.200	77.952	71.054
		2081-2100	48.442	45.207	47.861	46.904	52.549	47.397	51.329
19	FGOALS-g2	1995-2014	60.885	61.177	61.324	67.000	64.059	64.805	61.816
		2021-2040	51.786	52.531	52.144	55.610	53.123	55.197	50.701
		2041-2060	58.257	53.359	51.003	51.008	54.180	51.480	53.644
		2081-2100	50.797	49.646	51.638	53.316	57.558	54.529	55.722
20	CanESM2	1995-2014	49.805	47.014	49.130	49.441	51.450	50.269	52.059
		2021-2040	42.884	42.768	44.863	45.241	50.719	46.756	50.186
		2041-2060	49.819	47.166	47.906	50.035	52.501	50.417	51.490
		2081-2100	63.628	59.636	61.437	60.751	76.633	63.154	75.723

21	CESM1-CAM5	1995-2014	51.916	52.818	51.998	56.774	63.035	56.770	60.663
		2021-2040	55.247	55.818	58.685	56.427	63.922	60.107	62.231
		2041-2060	55.982	51.080	53.943	61.956	61.569	57.748	61.702
		2081-2100	57.251	56.545	55.199	58.523	63.981	58.119	58.966
22	IPSL-CM5A-MR	1995-2014	53.875	58.413	52.173	53.889	58.545	53.259	54.836
		2021-2040	60.704	65.910	67.738	64.217	65.726	69.365	62.906
		2041-2060	51.944	51.894	52.826	58.681	60.813	60.274	55.422
		2081-2100	58.334	60.321	61.395	70.095	88.172	73.885	91.914
23	bcc-csm1-1-m	1995-2014	57.122	52.932	54.826	60.514	64.033	60.284	64.622
		2021-2040	79.067	78.117	66.461	80.618	79.515	76.083	75.425
		2041-2060	58.656	56.192	56.937	56.815	61.207	58.764	62.566
		2081-2100	72.124	69.453	72.125	77.965	81.484	79.875	82.581
24	bcc-csm1-1	1995-2014	63.119	65.709	65.599	62.018	64.671	73.406	63.600
		2021-2040	60.723	57.962	59.043	58.151	62.504	61.294	59.193
		2041-2060	67.486	62.905	66.105	66.707	77.189	70.091	76.774
		2081-2100	74.862	72.790	73.621	75.016	81.222	77.570	75.882
	Μέση τιμή ημερήσιας βροχής στο 99.9 εκατοστημόριο (1995-2014)		59.105	58.729	59.854	62.180	64.334	62.937	62.529
	Μέση τιμή ημερήσιας βροχής στο 99.9 εκατοστημόριο (2021-2040)		62.533	61.196	61.709	65.476	67.615	65.266	64.843
	Μέση τιμή ημερήσιας βροχής στο 99.9 εκατοστημόριο (2041-2060)		63.361	61.548	62.667	65.538	68.709	65.832	66.906
	Μέση τιμή ημερήσιας βροχής στο 99.9 εκατοστημόριο (2081-2100)		66.198	64.367	65.600	70.512	75.528	70.993	74.347

Πίνακας 8-23. Μέγιστη ημερήσια βροχόπτωση εικοσαετίας, ανά υπολεκάνη & ανά κλιματικό μοντέλο, για τέσσερις εξεταζόμενες εικοσαετίες, για το σενάριο εκπομπών RCP4.5.

A/A	RCP4.5 / Κλιματικό μοντέλο	20ετία	Μέγιστη ημερήσια βροχόπτωση εικοσαετίας (mm)						
			W1460	W790	W800	W900	W1030	W1020	W1180
1	HadGEM2-ES	1995-2014	131.941	151.379	145.006	167.278	125.244	150.325	118.931
		2021-2040	74.441	61.634	56.913	64.068	64.089	60.784	56.143
		2041-2060	125.410	146.721	142.499	159.585	122.147	145.154	116.354
		2081-2100	139.630	155.300	148.921	175.515	134.697	158.380	130.223
2	HadGEM2-AO	1995-2014	109.548	125.738	123.682	140.067	108.876	126.169	104.743
		2021-2040	104.961	126.394	125.306	130.950	107.593	124.397	102.498
		2041-2060	61.882	59.089	54.487	67.220	72.561	68.218	72.755
		2081-2100	90.142	104.191	103.673	116.456	93.692	107.555	88.540
3	MPI-ESM-MR	1995-2014	76.004	75.853	71.077	79.857	64.783	72.876	64.353
		2021-2040	121.155	135.119	128.461	143.206	108.775	130.358	104.782
		2041-2060	100.104	108.327	103.311	117.328	90.164	107.134	87.029
		2081-2100	72.182	73.027	84.471	94.938	90.354	90.817	90.616
4	MPI-ESM-LR	1995-2014	64.233	66.637	69.875	70.414	71.950	69.982	72.029
		2021-2040	77.462	75.422	76.711	81.331	90.946	84.662	90.369
		2041-2060	61.842	55.391	59.370	56.550	60.229	58.436	58.037
		2081-2100	71.436	69.926	65.761	79.667	82.839	67.651	83.645
5	MIROC-ESM-CHEM	1995-2014	104.101	89.794	92.551	96.159	103.226	93.666	89.820
		2021-2040	122.131	146.538	148.567	155.953	131.248	148.213	124.933
		2041-2060	136.164	160.508	159.918	171.053	139.772	160.596	133.149
		2081-2100	164.941	190.260	188.040	205.374	165.813	191.054	159.313

6	MIROC-ESM	1995-2014	66.375	61.467	62.114	64.327	67.345	62.385	58.216
		2021-2040	106.997	123.307	122.496	138.133	113.746	128.209	109.677
		2041-2060	85.433	96.306	93.537	108.089	85.185	98.583	82.162
		2081-2100	105.915	122.447	121.487	143.653	118.872	132.193	116.310
7	MRI-CGCM3	1995-2014	94.032	86.810	90.317	97.877	113.136	99.333	105.902
		2021-2040	127.479	133.221	132.061	145.442	141.653	135.184	124.832
		2041-2060	110.331	133.014	138.705	149.401	133.110	143.152	129.842
		2081-2100	96.765	108.181	103.927	120.277	95.135	104.363	90.742
8	CNRM-CM5	1995-2014	71.238	90.172	97.578	100.252	88.086	95.092	85.050
		2021-2040	64.753	77.999	79.531	89.339	75.332	82.887	72.081
		2041-2060	75.440	69.819	67.817	67.846	75.260	70.597	75.781
		2081-2100	69.231	59.824	62.333	77.851	79.048	72.271	82.798
9	CSIRO-Mk3-6-0	1995-2014	83.431	98.320	99.131	104.890	88.771	99.328	86.028
		2021-2040	100.335	98.898	80.380	115.915	72.922	95.225	73.806
		2041-2060	134.884	162.349	163.116	176.761	144.109	164.559	138.139
		2081-2100	117.772	141.190	141.129	153.090	124.911	142.433	120.377
10	IPSL-CM5A-MR	1995-2014	105.324	121.977	121.118	130.484	98.644	119.769	92.688
		2021-2040	142.434	166.901	169.643	190.436	156.670	176.852	150.801
		2041-2060	155.567	179.561	177.258	191.570	147.442	176.568	138.040
		2081-2100	124.708	151.047	157.538	160.863	134.799	153.302	125.672
11	GFDL-ESM2M	1995-2014	107.638	116.980	101.004	136.321	88.245	117.322	87.533
		2021-2040	121.005	148.753	151.855	154.828	129.534	148.305	122.929
		2041-2060	68.385	57.239	57.181	67.527	72.395	64.403	64.620
		2081-2100	107.638	135.650	130.756	145.485	111.875	133.753	107.684
12	BNU-ESM	1995-2014	109.548	125.738	123.682	136.321	108.876	126.169	104.743
		2021-2040	90.386	98.267	99.403	104.001	111.008	99.145	98.170
		2041-2060	83.428	93.649	91.487	98.742	82.031	92.191	79.224
		2081-2100	65.039	67.262	65.636	74.768	69.793	70.301	65.984
13	NorESM1-M	1995-2014	71.382	67.323	68.832	70.563	75.942	72.457	72.881
		2021-2040	120.499	135.250	129.760	147.296	119.667	134.014	108.833
		2041-2060	91.783	86.242	71.895	109.538	73.213	88.978	75.435
		2081-2100	130.260	154.229	156.325	163.691	137.460	155.327	131.043
14	IPSL-CM5A-LR	1995-2014	112.578	130.710	131.754	152.979	129.366	141.989	128.347
		2021-2040	97.604	111.891	108.818	114.358	87.310	105.843	81.454
		2041-2060	90.325	103.558	98.740	112.163	95.038	100.902	93.791
		2081-2100	66.999	77.863	76.124	83.966	67.817	76.715	62.611
15	CESM1-CAM5	1995-2014	97.215	104.697	98.861	124.387	89.614	108.074	88.563
		2021-2040	115.890	131.409	130.308	146.754	120.289	136.380	117.852
		2041-2060	104.169	123.807	125.461	141.772	121.652	132.847	121.279
		2081-2100	85.349	73.044	72.110	83.882	79.416	75.547	78.352
16	FGOALS-g2	1995-2014	91.677	103.742	102.299	111.203	92.395	104.196	89.404
		2021-2040	94.894	111.501	113.331	119.199	100.397	112.980	95.868
		2041-2060	79.966	89.582	88.233	94.854	77.232	89.018	73.414
		2081-2100	98.692	113.122	112.206	120.662	97.193	112.578	93.386
17	MIROC5	1995-2014	79.762	87.299	81.030	129.038	98.819	106.379	104.381
		2021-2040	133.935	156.898	157.949	175.936	150.913	165.944	147.412
		2041-2060	115.288	128.701	134.299	147.306	125.070	136.762	121.227
		2081-2100	139.326	162.768	161.761	172.535	141.030	162.296	133.871

18	GFDL-ESM2G	1995-2014	111.054	125.805	111.694	138.784	91.943	119.137	89.011
		2021-2040	114.993	133.114	128.750	143.213	106.567	129.468	101.016
		2041-2060	158.445	180.503	171.698	194.664	140.098	173.698	132.856
		2081-2100	101.160	115.012	112.069	121.635	95.829	108.971	93.292
19	CanESM2	1995-2014	65.304	68.846	65.348	63.149	68.382	62.996	63.003
		2021-2040	48.033	48.403	51.177	49.809	56.828	51.492	56.360
		2041-2060	95.652	105.236	97.347	114.103	79.394	100.070	75.988
		2081-2100	79.412	82.601	84.518	95.041	83.796	90.516	83.014
20	bcc-csm1-1	1995-2014	102.139	118.723	115.050	129.942	99.766	118.064	95.701
		2021-2040	55.838	55.483	59.070	63.742	67.006	64.842	68.036
		2041-2060	95.267	112.970	111.603	123.198	97.782	113.517	93.654
		2081-2100	119.752	134.257	129.334	148.597	114.930	135.067	111.498
21	bcc-csm1-1-m	1995-2014	169.208	196.777	201.033	243.912	207.458	225.941	209.132
		2021-2040	78.115	72.911	70.815	97.383	89.563	90.682	92.169
		2041-2060	98.674	112.168	110.250	130.554	104.784	119.841	103.274
		2081-2100	123.504	143.421	144.614	164.911	139.141	155.101	137.038
22	CCSM4	1995-2014	186.852	226.493	235.283	247.054	211.697	237.527	199.007
		2021-2040	204.339	220.241	169.127	233.149	123.900	186.566	122.000
		2041-2060	138.516	150.990	149.346	143.235	139.560	126.656	134.201
		2081-2100	130.113	147.494	146.503	152.112	106.379	140.688	116.119
23	GFDL-CM3	1995-2014	56.522	76.304	80.621	76.749	74.882	80.541	72.232
		2021-2040	66.590	80.482	81.175	88.166	73.018	82.472	70.144
		2041-2060	128.281	147.341	140.004	154.761	113.205	139.671	106.599
		2081-2100	96.481	111.728	108.105	114.910	83.419	104.420	75.385
24	NorESM1-ME	1995-2014	92.113	103.317	96.105	111.417	77.369	99.679	68.663
		2021-2040	129.622	149.761	143.623	159.181	123.989	147.397	119.184
		2041-2060	91.141	106.368	102.960	117.982	95.386	109.970	92.326
		2081-2100	112.608	124.764	114.758	136.623	99.685	122.424	97.173
		Μέση τιμή μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης (1995-2014)	98.301	109.204	107.710	121.809	101.867	112.892	97.932
		Μέση τιμή μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης (2021-2040)	109.802	126.786	124.728	139.837	114.091	128.810	109.782
		Μέση τιμή μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης (2041-2060)	110.589	124.820	121.928	139.593	110.118	126.665	106.942
		Μέση τιμή μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης (2081-2100)	110.982	127.769	126.990	144.100	114.499	130.729	112.034

Πίνακας 8-24. Ημερήσια βροχόπτωση που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο εικοσαετίας, ανά υπολεκάνη & ανά κλιματικό μοντέλο, για τέσσερις εξεταζόμενες εικοσαετίες, για το σενάριο εκπομπών RCP4.5.

A/A	RCP4.5 / Κλιματικό μοντέλο	20ετία	Ημερήσια βροχή που αντιστοιχεί στο 99.9 εκατοστημόριο 20ετίας (mm)						
			W1460	W790	W800	W900	W1030	W1020	W1180
1	HadGEM2-ES	1995-2014	54.698	53.143	56.812	55.882	62.459	58.659	58.944
		2021-2040	53.799	49.519	51.001	52.534	51.999	51.230	53.019
		2041-2060	54.303	49.628	49.558	52.320	57.533	52.681	57.347
		2081-2100	84.667	86.040	85.829	92.474	85.645	92.160	83.507
2	HadGEM2-AO	1995-2014	59.678	56.342	57.806	57.882	67.147	60.107	59.649
		2021-2040	55.467	52.507	53.050	57.890	60.158	57.771	58.257
		2041-2060	45.346	45.442	46.916	48.638	52.720	49.122	51.936
		2081-2100	57.542	54.666	53.284	54.961	63.079	57.765	62.753

3	MPI-ESM-MR	1995-2014	54.100	52.505	54.428	50.944	54.886	52.744	54.518
		2021-2040	70.705	62.132	62.101	67.294	72.904	66.445	66.446
		2041-2060	64.609	64.691	62.339	66.902	70.744	65.258	66.953
		2081-2100	62.703	59.720	59.463	61.809	59.846	61.537	61.254
4	MPI-ESM-LR	1995-2014	47.644	45.959	48.108	47.465	50.391	49.478	48.102
		2021-2040	55.851	53.800	56.242	54.803	59.652	57.811	56.370
		2041-2060	52.049	50.050	50.086	51.823	55.344	52.723	53.288
		2081-2100	58.633	53.617	56.571	55.956	57.466	58.061	56.794
5	MIROC-ESM-CHEM	1995-2014	56.241	62.609	66.647	64.112	76.477	71.186	72.180
		2021-2040	62.635	62.991	62.955	72.525	73.868	70.232	74.141
		2041-2060	60.199	52.442	60.059	63.225	67.269	63.213	68.494
		2081-2100	56.744	54.438	57.078	58.449	62.436	59.353	62.487
6	MIROC-ESM	1995-2014	52.840	50.107	51.808	52.347	54.864	53.392	54.118
		2021-2040	59.662	55.135	52.504	59.014	61.024	56.619	56.323
		2041-2060	55.053	53.346	54.096	56.943	62.849	58.177	58.695
		2081-2100	60.574	57.679	56.923	61.820	65.137	61.554	67.506
7	MRI-CGCM3	1995-2014	69.923	66.449	66.812	74.456	71.665	71.789	67.113
		2021-2040	81.838	81.487	72.592	81.620	79.207	89.635	86.885
		2041-2060	99.289	90.172	90.247	97.947	94.960	97.337	85.506
		2081-2100	64.627	65.359	63.145	69.851	68.486	65.776	64.161
8	CNRM-CM5	1995-2014	52.728	51.462	56.298	53.316	62.104	58.586	61.343
		2021-2040	51.332	53.279	55.410	52.494	57.550	53.465	58.561
		2041-2060	59.613	52.831	53.247	53.676	60.125	56.305	57.627
		2081-2100	55.110	56.617	57.504	59.846	63.627	60.053	58.914
9	CSIRO-Mk3-6-0	1995-2014	53.873	53.639	53.994	57.679	56.241	59.141	55.148
		2021-2040	56.493	53.287	54.622	58.071	57.243	57.302	56.962
		2041-2060	68.479	68.822	74.571	74.667	86.262	79.421	86.570
		2081-2100	59.661	55.665	57.835	59.990	64.282	61.118	60.131
10	IPSL-CM5A-MR	1995-2014	61.247	62.653	63.779	59.452	59.870	57.998	58.647
		2021-2040	63.908	63.636	66.608	67.959	73.206	71.262	72.302
		2041-2060	49.544	50.671	50.786	56.236	55.451	55.176	54.798
		2081-2100	63.883	60.310	57.656	65.240	66.508	64.890	64.861
11	GFDL-ESM2M	1995-2014	57.077	53.937	55.641	55.647	61.936	56.792	59.068
		2021-2040	68.339	64.508	76.989	88.970	79.263	84.655	78.736
		2041-2060	50.126	47.757	48.115	50.711	50.617	50.976	51.017
		2081-2100	51.688	49.437	50.090	53.087	55.105	51.219	56.748
12	BNU-ESM	1995-2014	57.263	56.559	57.988	61.271	64.249	62.168	63.690
		2021-2040	54.122	51.574	53.163	52.373	54.143	53.763	53.188
		2041-2060	62.988	65.851	66.179	78.516	74.228	74.328	72.537
		2081-2100	53.187	51.256	53.059	55.650	61.002	56.701	59.826
13	NorESM1-M	1995-2014	57.948	57.679	57.674	57.556	57.330	57.620	57.923
		2021-2040	62.793	60.233	69.197	58.596	68.150	61.645	64.454
		2041-2060	51.089	49.806	51.141	51.213	53.249	50.738	50.133
		2081-2100	55.852	52.369	53.270	53.567	60.552	56.210	54.663
14	IPSL-CM5A-LR	1995-2014	75.830	74.082	72.759	73.980	63.949	73.488	61.419
		2021-2040	43.091	44.132	44.256	44.030	45.429	44.533	44.566
		2041-2060	63.547	68.102	69.387	69.399	75.402	71.731	73.094
		2081-2100	53.935	53.644	54.190	54.001	61.431	56.689	59.248

15	CESM1-CAM5	1995-2014	60.854	55.021	53.113	59.645	63.942	58.396	59.177
		2021-2040	55.022	53.157	57.413	57.999	62.016	60.692	61.991
		2041-2060	79.227	73.693	73.518	76.770	81.879	75.842	71.792
		2081-2100	60.668	59.051	63.262	62.556	66.694	66.939	62.481
16	FGOALS-g2	1995-2014	62.726	61.015	61.355	68.255	63.632	66.323	65.085
		2021-2040	65.360	62.814	64.797	69.244	79.119	69.064	70.365
		2041-2060	50.524	45.761	44.414	48.070	51.321	46.312	46.813
		2081-2100	46.561	47.131	50.786	48.262	57.294	51.476	54.606
17	MIROC5	1995-2014	48.422	47.253	48.790	50.893	59.424	52.854	56.931
		2021-2040	71.447	75.584	79.856	83.890	95.490	84.539	89.814
		2041-2060	76.979	87.247	83.355	95.967	86.797	94.054	82.191
		2081-2100	62.642	63.098	67.827	71.866	84.413	74.554	71.875
18	GFDL-ESM2G	1995-2014	53.155	50.170	50.763	50.766	54.911	52.114	53.954
		2021-2040	65.124	63.875	65.297	68.383	75.839	71.192	70.595
		2041-2060	53.820	51.247	50.592	52.583	56.303	53.598	52.267
		2081-2100	50.192	48.643	52.254	60.327	63.410	60.102	64.689
19	CanESM2	1995-2014	62.958	58.769	57.106	58.496	62.067	60.100	60.937
		2021-2040	44.032	46.436	48.185	47.720	52.949	49.016	53.285
		2041-2060	55.537	52.321	54.429	61.684	63.190	60.168	60.411
		2081-2100	46.688	43.321	45.038	45.900	48.185	45.982	48.606
20	bcc-csm1-1	1995-2014	49.561	48.231	48.606	50.606	51.444	50.742	51.289
		2021-2040	53.131	49.129	49.860	49.120	55.085	49.794	48.349
		2041-2060	71.511	66.253	66.244	70.877	74.303	72.732	71.357
		2081-2100	62.331	58.455	60.098	61.168	68.106	63.080	62.671
21	bcc-csm1-1-m	1995-2014	53.938	52.106	56.276	56.912	64.161	59.448	63.619
		2021-2040	61.684	58.750	59.058	61.282	66.721	61.551	60.006
		2041-2060	64.247	57.588	61.002	59.864	67.237	63.286	66.866
		2081-2100	75.057	67.765	66.139	68.944	70.604	69.231	66.829
22	CCSM4	1995-2014	51.762	50.603	54.774	51.220	53.644	54.094	52.792
		2021-2040	68.500	64.468	64.677	69.918	79.748	71.752	81.853
		2041-2060	55.851	55.182	55.556	60.576	58.399	62.123	59.456
		2081-2100	53.862	52.632	58.387	58.977	65.855	61.756	71.649
23	GFDL-CM3	1995-2014	43.133	43.189	45.958	46.911	53.086	49.039	52.635
		2021-2040	54.552	54.684	55.034	57.486	65.115	57.261	61.622
		2041-2060	61.010	60.222	62.449	65.039	68.979	66.737	68.146
		2081-2100	60.068	56.278	54.818	57.694	62.418	57.890	62.840
24	NorESM1-ME	1995-2014	58.726	58.222	60.116	55.250	60.831	57.126	60.545
		2021-2040	58.030	53.953	56.287	59.781	63.378	58.512	59.056
		2041-2060	48.598	46.685	49.198	49.928	56.033	50.552	51.072
		2081-2100	58.186	56.730	56.889	63.186	63.314	63.925	63.724
Μέση τιμή ημερήσιας βροχής στο 99.9 εκατοστημόριο (1995-2014)			56.514	55.071	56.559	57.123	60.446	58.474	58.701
Μέση τιμή ημερήσιας βροχής στο 99.9 εκατοστημόριο (2021-2040)			60.753	58.761	60.348	63.064	66.853	63.561	64.395
Μέση τιμή ημερήσιας βροχής στο 99.9 εκατοστημόριο (2041-2060)			61.261	59.422	60.179	63.635	66.370	63.971	63.691
Μέση τιμή ημερήσιας βροχής στο 99.9 εκατοστημόριο (2081-2100)			60.018	57.769	58.765	61.636	64.979	62.392	63.221

8.4 Παράρτημα Δ – Ισχυρά βροχοπτώτικα γεγονότα περιόδου 2015-2019 στο σταθμό των Αγ. Πάντων

Ο Πίνακας 8-25 παρουσιάζει σχετικά με έντεκα ισχυρά βροχοπτώτικα γεγονότα της περιόδου 9/2015 έως 2/2019, όπως καταγράφηκαν από το μετεωρολογικό σταθμό των Αγ. Πάντων, πλησίον της λεκάνης απορροής της Αλμυρίδας, το ημερήσιο ύψος υετού, τη μέγιστη ωριαία βροχόπτωση, καθώς και το λόγο της ημερήσιας βροχής προς τη μέγιστη ωριαία βροχή.

Πίνακας 8-25. Ημερήσια βροχόπτωση (mm), μέγιστη ωριαία βροχόπτωση (mm/h), και λόγος ημερήσιας προς μέγιστη ωριαία βροχόπτωση, από 11 ισχυρά βροχοπτώτικα γεγονότα της περιόδου 2015-2019, του μετεωρολογικού σταθμού Αγ. Πάντων.

Ημερομηνία	Ημερήσια βροχόπτωση (mm)	Μέγιστη ένταση βροχόπτωσης (mm/h)	Λόγος: Ημερήσια/Μέγιστη ωριαία βροχόπτωση
24/10/2015	66.8	12.4	5.39
18/12/2015	56.0	9.8	5.71
31/10/2016	98.4	21.4	4.60
30/11/2016	71.0	7.8	9.10
11/2/2017	92.8	26.0	3.57
26/10/2017	162.4	43.4	3.74
23/12/2017	75.0	8.8	8.52
2/1/2019	55.8	30.2	1.85
13/2/2019	83.0	12.0	6.92
24/2/2019	50.8	12.8	3.97
25/2/2019	161.2	11.2	14.39
Μέση τιμή			6.16
Τυπική απόκλιση			3.49