



ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ, ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ ΚΑΙ
ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ

*Υδρομετεωρολογικές συνθήκες που επικράτησαν κατά το πλημμυρικό γεγονός
της δυτικής Αττικής στις 15 Νοεμβρίου 2017*

Πτυχιακή εργασία
Κωνσταντίνος Πάνος

Αθήνα, 2018



ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ, ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ ΚΑΙ
ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Επιβλέπων

Κατσαφάδος Πέτρος

Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο

Μέλη

Καρύμπαλης Ευθύμιος

Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο

Χαλκιάς Χρίστος

Καθηγητής, Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο

Ο Κωνσταντίνος Πάνος δηλώνω υπεύθυνα ότι:

1. Είμαι ο κάτοχος των πνευματικών δικαιωμάτων της πρωτότυπης αυτής εργασίας και από όσο γνωρίζω η εργασία μου δε συκοφαντεί πρόσωπα, ούτε προσβάλλει τα πνευματικά δικαιώματα τρίτων.
2. Αποδέχομαι ότι η ΒΚΠ μπορεί, χωρίς να αλλάξει το περιεχόμενο της εργασίας μου, να τη διαθέσει σε ηλεκτρονική μορφή μέσα από τη ψηφιακή βιβλιοθήκη της, να την αντιγράψει σε οποιοδήποτε μέσο ή/και σε οποιοδήποτε μορφότυπο καθώς και να κρατά περισσότερα από ένα αντίγραφα για λόγους συντήρησης και ασφάλειας.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή, κύριο Κατσαφάδο Πέτρο, για την κατανόηση του, καθώς και για την αφιέρωση του χρόνου του καθόλη τη διάρκεια συγγραφής της πτυχιακής μου εργασίας. Οι συμβουλές του αποτέλεσαν καθοριστικό παράγοντα στην διαμόρφωση και υλοποίηση της εργασίας. Επίσης, να ευχαριστήσω τον διδάκτορα, κύριο Βάρλα Γιώργο, για τις συμβουλές και καθοδήγηση που μου προσέφερε. Τέλος, ένα θερμό ευχαριστώ σε συναδέλφους, φίλους και οικογένεια για την στήριξη, ενθάρρυνση, κατανόηση και συμπαράσταση που προσέφεραν σε όλη την φοιτητική μου πορεία.

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία επιχειρείται η μελέτη των υδρομετεωρολογικών συνθηκών που επικράτησαν κατά το πλημμυρικό φαινόμενο της δυτικής Αττικής στις 15 Νοεμβρίου 2017, καθώς και η προσομοίωση του γεγονότος από το σύγχρονο υδρομετεωρολογικό μοντέλου WRF-Hydro 3.0 ως συνιστώσα του συστήματος CHAOS. Το μοντέλο παρήγαγε αποτελέσματα κάθε μια ώρα για τις μεταβλητές ύψος υετού, επιφανειακή απορροή και βάθος νερού της κοίτης για την ευρύτερη περιοχή της Μάνδρας. Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν δορυφορικά δεδομένα του Sentinel-2A στις 02/11/2017 και δεδομένα εξόδου του WRF-Hydro 3.0, για την ανάπτυξη εδαφικών και ατμοσφαιρικών χαρτών, για την καλύτερη αποτύπωση των υδρομετεωρολογικών συνθηκών που επικράτησαν προγενέστερα της πλημμύρας. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως το μέγιστο ύψος υετού παρουσιάστηκε στις βορειο-δυτικές περιοχές της δυτικής Αττικής την ώρα 02:00 UTC με τιμή $48mm$, η μέγιστη επιφανειακή απορροή εμφανίστηκε στα ανάντη του Σαρανταπόταμου την ώρα 05:00 UTC με τιμή $101m^3s^{-1}$ και η μέγιστη ανύψωση της στάθμης της κοίτης υπήρξε επίσης στα ανάντη του Σαρανταπόταμου την ώρα 04:00 UTC με τιμή $267cm$. Τα αποτελέσματα ενώ είχαν μια μικρή απόκλιση από την πραγματικότητα, θεωρούνται σχετικά αξιόλογα.

Λέξεις κλειδιά: υδρομετεωρολογία · Μάνδρα · WRF-Hydro 3.0 · CHAOS · Sentinel-2A

Abstract

This thesis attempts to study the hydrometeorological conditions that prevailed in the flash flood phenomenon of western Attica on 15 November 2017, as well as the simulation of this phenomenon through the modern hydrometeorological model WRF-Hydro 3.0 as component of the CHAOS system. The model produced hourly results for the variables precipitation height, surface runoff and water depth for the wider area of Mandra. Also, satellite data from Sentinel-2A on 02/11/2017 and output data of WRF-Hydro 3.0 were used to develop terrestrial and atmospheric maps to better capture the hydrometeorological conditions prevailing previously of the flash flood. The results showed that the maximum precipitation height occurred in the north-western regions of western Attica at 02:00 UTC with a value of $48mm$, the highest surface runoff occurred in the upstream of Sarantapotamos at 05:00 UTC with a value of $101m^3s^{-1}$, and the maximum elevation of the water level was also found at the upstream of Sarantapotamos at 04:00 UTC with a value of $267cm$. The results, while having a small deviation from reality, were considered relatively remarkable.

Keywords: hydrometeorology · Mandra · WRF-Hydro 3.0 · CHAOS · Sentinel-2A

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1	Αιφνίδιες πλημμύρες	1
1.2	Ο ρόλος της γεωπληροφορικής	2
1.3	Συστήματα πρόγνωσης και προσομοίωσης πλημμυρικών φαινομένων	3
1.4	Στόχος και δομή διπλωματικής	5
2	ΘΕΩΡΙΑ	6
2.1	Βασικά χαρακτηριστικά	6
2.1.1	Ορισμός και παράγοντες επηρεασμού	6
2.1.2	Εποχικότητα και γεωγραφική κατανομή στην Μεσόγειο	6
2.2	Πλημμυρικά επεισόδια	8
2.2.1	Παγκόσμια	8
2.2.2	Στον Ελλαδικό χώρο	9
3	ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	11
3.1	Δορυφορικά δεδομένα	11
3.1.1	Normalized difference vegetation index (NDVI)	11
3.1.2	Normalized difference water index (NDWI _G)	12
3.2	Δεδομένα ΣΓΠ	13
3.2.1	Ψηφιακό μοντέλο εδάφους και υδρογραφικό δίκτυο	13
3.2.2	Βροχόπτωση, θερμοκρασία και άνεμος	15
3.3	Μοντέλο προσομοίωσης CHAOS	16

4	ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ	20
4.1	Εδαφολογία και υδρολιθολογία	20
4.2	Γεωμορφολογία και υδρογραφικό δίκτυο	21
4.3	Χρήσεις γης	25
4.4	Κατανομή μέσης ετήσιας βροχόπτωσης, υγρασίας και θερμοκρασίας	25
5	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	28
5.1	Περιγραφή πλημμυρικού γεγονότος	28
5.2	Συνοπτική κατάσταση ατμόσφαιρας	37
5.3	Βλάστηση και υγρασία εδάφους	41
5.4	Προσομοίωση του πλημμυρικού φαινομένου	43
5.5	Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων	55
6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	58
7	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	60

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αιφνίδιες πλημμύρες

Οι πλημμύρες θεωρούνται από τους πιο θανατηφόρους και καταστροφικούς φυσικούς κινδύνους παγκοσμίως (Diakakis and Deligiannakis 2017; Llasat et al. 2010), με τον τύπο των αιφνίδιων πλημμύρων (flash floods) να χαρακτηρίζονται ως οι πιο επικίνδυνες. Κατατάσσονται στην ίδια κατηγορία φυσικών κινδύνων, με βάση τον αριθμό θυμάτων, με αυτή των σεισμών και τυφώνων (Sene 2016). Η μελέτη τέτοιων φυσικών φαινομένων θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική, καθώς η μελλοντική συχνότητα εμφάνισης τους θα αυξηθεί, εξαιτίας της αστικής επέκτασης σε περιοχές υψηλής επικινδυνότητας και της παγκόσμιας κλιματικής αλλαγής (Karymbalis et al. 2012).

Η επέκταση του πληθυσμού σε τρωτές περιοχές κατά μήκος των ακτών είναι ιδιαίτερα υψηλή, με αποτέλεσμα την ταχεία αύξηση των αστικών οικισμών και άρα των πληθυσμών που εκτίθενται σε πλημμύρες (Gaume et al. 2016; Liu Chunlu and Yan Li 2017). Σύμφωνα με μελέτες (Burrell and Gruntfest 2002; Καρύμπαλης et al. 2014), οι μελλοντικές ανθρώπινες απώλειες θα αυξηθούν ως αποτέλεσμα της ανθρωπογενής παρέμβασης στις κοίτες και τον ευρύτερο χώρο των υδρολογικών λεκανών, ενισχύοντας την ένταση των πλημμυρικών φαινομένων. Βασική αιτία των επιπτώσεων στις ανθρώπινες ζωές και ιδιοκτησίες είναι τα ταχείας κίνησης ρέματα τα οποία αποτελούνται από υψηλή περιεκτικότητα σε στερεά υλικά όπως είναι οι κορμοί δέντρων και οι ογκόλιθοι (Terranova and Gariano 2014).

Αύξηση στις ανθρώπινες απώλειες θα προκαλέσει και η παγκόσμια αλλαγή των υδρομετεωρολογικών συνθηκών. Μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί από την διακυβερνητική επιτροπή για την αλλαγή του κλίματος (IPCC) προτείνουν πως η μελλοντική αύξηση της μέσης θερμο-

κρασίας του πλανήτη ενδέχεται να προκαλέσει αύξηση των ακραίων καιρικών φαινομένων, καθώς και αλλαγή των προτύπων τους (Solomon et al. 2007). Σύμφωνα με Roudier et al. (2016) μια άνοδος 2°C της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη ενδέχεται να προκαλέσει αύξηση της συχνότητας των αιφνίδιων πλημμυρών σε περιοχές της Ευρώπης με γεωγραφικά πλάτη κάτω των 60°N . Η ικανότητα συγκράτησης νερού του αέρα αυξάνεται κατά 7% ανά 1°C θέρμανσης (Κατσαφάδος και Μαυροματίδης 2015). Έτσι, οι καταιγίδες τροφοδοτούνται με μεγαλύτερη ποσότητα υδρατμών, με αποτέλεσμα να παράγουν πιο έντονες βροχοπτώσεις, συμβάλλοντας σε υψηλότερες τιμές επιφανειακής απορροής. Στην περιοχή της Μεσογείου η συχνότητα και βιαιότητα καταρρακτώδους βροχής ($> 64 \text{ mm d}^{-1}$) τείνει να αυξάνεται, παρά την μείωση των ετήσιων βροχοπτώσεων. Αυτό είναι χαρακτηριστικό των θερμών κλιμάτων, καθώς έχοντας μεγαλύτερο ποσοστό υδρατμών στην ατμόσφαιρα, καθίστα εφικτή την παραγωγή πιο έντονων καταιγίδων, ακόμα και όταν το ετήσιο ύψος βροχής είναι χαμηλότερο (Trenberth 2011).

1.2 Ο ρόλος της γεωπληροφορικής

Διαπιστώνουμε πως η ύπαρξη καλύτερης πρόγνωσης και καταγραφής ενός πλημμυρικού φαινομένου θεωρείται ζωτικής σημασίας. Τα τελευταία χρόνια, ο τομέας αυτός έχει ενισχυθεί σημαντικά λόγω της διαθεσιμότητας δορυφορικών δεδομένων και της αυτόματης επεξεργασίας τους από Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (ΣΓΠ). Παθητικά και ενεργητικά συστήματα χρησιμοποιούνται για την καταγραφή πλημμυρικών εκτάσεων, με πιο αποτελεσματικά να ενδείνυνται τα ενεργητικά (Καρτάλης και Φείδας 2015). Τα ΣΓΠ είναι αναγνωρισμένα ως ένα από τα ισχυρότερα εργαλεία ενσωμάτωσης και ανάλυσης χωρικών δεδομένων, στο πλαίσιο αξιολόγησης πλημμυρικών επεισοδίων (Liu Chunlu and Yan Li 2017), έχοντας ως βασικό πλεονέκτημα τον συνδυασμό, την ανάλυση και την οπτικοποίηση δεδομένων διαφορετικού τύπου και πηγής. Προσφέρουν δυνατότητες εξαγωγής δικτύων αποστράγγισης, λεκανών απορροής, επιδεκτικών περιοχών καθώς και τιμές επιφανειακής απορροής (Gioti et al. 2013; Hatzopoulos 2002; Elkhachy 2015). Όλες αυτές οι δυνατότητες είναι εφικτές, εφόσον τροφοδοτούνται με δορυφορικά δεδομένα και με επίγειες μετρήσεις βροχομετρικών σταθμών. Με την ανάπτυξη της τεχνητής νοημοσύνης, αρχίζει να γίνεται εφικτός ο ακριβής υπολογισμός της επιφανειακής απορροής σε λεκάνες χωρίς βροχομετρικούς σταθμούς (Dawson et al. 2006).

1.3 Συστήματα πρόγνωσης και προσομοίωσης πλημμυρικών φαινομένων

Τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για να πραγματοποιηθεί πιο ακριβής η πρόβλεψη και η προειδοποίηση των πλημμυρικών φαινομένων είναι κυρίως τα υδρολογικά και υδρομετεωρολογικά. Τα υδρολογικά μοντέλα είναι ένα σύνολο μαθηματικών συναρτήσεων οι οποίες δέχονται δεδομένα πεδίου για να εκτιμήσουν ποσοτικά τις υδρολογικές μεταβλητές της λεκάνης απορροής. Οι συναρτήσεις αυτές είναι της μορφής:

$$y = h(x_0, x, \theta) \quad (1.1)$$

όπου y είναι οι υδρολογικές μεταβλητές εξόδου (επιφανειακή απορροή, εξατμισοδιαπνοή, εκφόρτιση υπόγειων νερών κλπ), x_0 είναι οι αρχικές συνθήκες του φυσικού συστήματος στην έναρξη της προσομοίωσης (ύψος εδαφικής υγρασίας, στάθμες υπογείου νερού κλπ), x είναι οι υδρολογικές μεταβλητές εισόδου (βροχόπτωση, δυνητική εξατμισοδιαπνοή κλπ) και τέλος το θ αναφέρεται στα χαρακτηριστικά μεγέθη του συστήματος (λεκάνη απορροής) (Ευστρατιάδης et al. 2009; Σταυρούλα 2017)

Τα πιο γνωστά υδρολογικά μοντέλα που έχουν χρησιμοποιηθεί σε πολλά πλημμυρικά φαινόμενα ανα τον κόσμο είναι το Hydrological Modeling System (HEC-HMS), το Soil and Water Assessment Tool (SWAT) και το Système Hydrologique Européenne (SHE).

Το HEC-HMS έχει σχεδιαστεί για να προσομοιώνει τις πλήρεις υδρολογικές διαδικασίες των δενδριτικών συστημάτων λεκανών απορροής. Το λογισμικό περιλαμβάνει παραδοσιακές διαδικασίες υδρολογικής ανάλυσης, όπως είναι η διήθηση, οι μονάδες υδρογραφίας και η υδρολογική δρομολόγηση. Περιλαμβάνει διαδικασίες που είναι απαραίτητες για τη συνεχή προσομοίωση, όπως είναι η εξατμισοδιαπνοή, το λιώσιμο των πάγων και η μέτρηση κορεσμού του εδάφους. Προσφέρει συμπληρωματικά εργαλεία ανάλυσης για την βελτιστοποίηση υδρολογικών μοντέλων, την πρόγνωση ροής ποταμού, την διάβρωση, την μεταφορά ιζημάτων και την ποιότητα του νερού. Διαθέτει ένα εντελώς ολοκληρωμένο περιβάλλον εργασίας που περιλαμβάνει μια βάση δεδομένων, βοηθητικά προγράμματα εισαγωγής δεδομένων, μηχανισμό υπολογισμού και εργαλεία αναφοράς αποτελεσμάτων. Τα αποτελέσματα προσομοίωσης αποθηκεύονται σε ένα σύστημα αποθήκευσης δεδομένων HEC-DSS και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με άλλο λογισμικό για μελέτες διαθεσιμότητας ύδατος, πρόβλεψης ροής, μελλοντικών επιπτώσεων στην αστικοποίηση, σχεδιασμού υπερχειλίσσης δεξαμενών, μείωσης των ζημιών από πλημμύρες, ρύθμισης πλημμυρών και λειτουργία των συστημάτων (HEC 2018).

Το SWAT είναι ένα μοντέλο χωρικής κλίμακας λεκάνης απορροής, που αναπτύχθηκε για να ποσοτικοποιήσει το αντίκτυπο των αλλαγών χρήσεων γης. Το SWAT έχει δυνατότητα εφαρμογής στον δημόσιο τομέα και υποστηρίζεται ενεργά από την Υπηρεσία Γεωργικής Έρευνας USDA του Κέντρου Έρευνας και Επέκτασης του Blackland (Texas). Το μοντέλο χαρακτηρίζεται από μεταβλητές όπως είναι ο καιρός, η επιφανειακή απορροή, η ροή επιστροφής, η διήθηση, η εξατμισοδιαπνοή, οι απώλειες μετάδοσης, η ανάπτυξη των καλλιεργειών, η ροή των υπόγειων υδάτων, τα φυτοφάρμακα και η μεταφορά νερού. Στόχος του είναι η πρόβλεψη των μακροπρόθεσμων επιπτώσεων της αλλαγής χρήσεων γης σε μεγάλες λεκάνες και του χρονοδιαγράμματος των γεωργικών πρακτικών σε μια δεδομένη χρονική περίοδο (περιόδους καλλιέργειας, ημερομηνίες φύτευσης και συγκομιδής κλπ). Το μοντέλο αυτό συνεργάζεται με ΣΓΠ και εφαρμόζεται σε Ευρώπη, Κίνα, Κένυα και Πακιστάν (SWAT 2018).

Το SHE είναι ένα τυπικό μοντέλο υδρολογικής ανάλυσης υλοποιημένο στα πλαίσια των πακέτων MIKE-SHE και SHE-TRAN, το οποίο χρησιμοποιείται σε Γαλλία, Δανία και Αγγλία. Υποστηρίζεται από την Danish Hydrological Institute (DHI) και ανήκει στην κατηγορία μοντέλων συνεχούς προσομοίωσης, δηλαδή τα δεδομένα εισόδου είναι χρονοσειρές παρατηρήσεων μετεωρολογικών μεταβλητών, ενώ τα δεδομένα εξόδου είναι ένα υδρογράφημα της αντίστοιχης χρονικής περιόδου (Abbott et al. 1986a, 1986b).

Για να ληφθούν υπόψη και άλλοι παράγοντες επίδρασης του υδρολογικού κύκλου, όπως είναι η αλλαγή στο κλίμα ή στην μορφολογία του εδάφους, έχουν δημιουργηθεί συζευγμένα υδρομετεωρολογικά μοντέλα. Προσομοιώνουν αποτελεσματικότερα την αλληλεπίδραση υδρολογίας, ατμόσφαιρας και εδάφους, καθώς συμπεριλαμβάνουν περισσότερες μεταβλητές. Είναι εφικτό να προσφέρουν πρόβλεψη και έγκαιρη προειδοποίηση σε περίπτωση ακραίου καιρικού φαινομένου. Η πρόβλεψη και η προειδοποίηση για πλημμυρικά φαινόμενα είναι καθοριστικό στοιχείο στρατηγικής τόσο σε τοπικό όσο και σε παγκόσμιο επίπεδο. Μέσα από δίκτυα μετρητικών σταθμών, τα μοντέλα αυτά λαμβάνουν υπόψη παράγοντες στο ισοζύγιο του νερού όπως είναι η θερμοκρασία, η εξατμισοδιαπνοή, η βροχόπτωση, το κλίμα, η ατμοσφαιρική υγρασία, η υγρασία του εδάφους και υπεδάφους, η κάλυψη γης, η ροή του επιφανειακού νερού, η βλάστηση, η κατανομή των ανέμων και η ακτινοβολία (Σταυρούλα 2017).

Ένα παράδειγμα υδρομετεωρολογικού μοντέλου είναι το Weather Research and Forecasting Model - Hydro (WRF-Hydro) το οποίο είναι έκδοση του (WRF). Διαφέρει από την βασική του έκδοση καθώς γίνεται ανάλυση ροών επιφανειακών υδάτων που επηρεάζουν την υγρασία, την εξατμισοδιαπνοή, την βροχόπτωση και την επιφανειακή θερμοκρασία. Για να λειτουργήσει απαιτούνται γεωλογικά και ατμοσφαιρικά δεδομένα εισόδου. Για τα γεωλογικά δεδομένα συμβάλλουν τα ΣΓΠ ενώ για τα ατμοσφαιρικά, το εδαφικό μοντέλο NOAH (Hiatt 2015). Περισσότερες

πληροφορίες για το WRF-Hydro, το οποίο είναι συνιστώσα του συστήματος προσομοιώσεων CHAOS που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, θα παρουσιαστούν σε επόμενα κεφάλαια.

Όσον αφορά την Ελλάδα, δεν υπάρχει ακόμα ένα αξιόπιστο προγνωστικό σύστημα πλημμυρικού κινδύνου βασιζόμενο σε παρατηρήσεις και σε υδρολογικές προσομοιώσεις που να καλύπτει ολόκληρη την επικράτεια. Επίσης, ανύπαρκτο είναι ένα αντίστοιχο σύστημα διαχείρισης της ποσότητας των υδάτων. Οι μόνες προσπάθειες που έχουν πραγματοποιηθεί είναι από το Ελληνικό Κέντρο Θαλάσσιων Ερευνών (ΕΛΚΕΘΕ) και το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών (ΕΑΑ) (Κοτρώνη και Λαγουβάρδος 2015).

1.4 Στόχος και δομή διπλωματικής

Στην παρούσα εργασία επιχειρείται η αξιοποίηση εξελεγμένων μοντέλων φυσικής βάσης για την καλύτερη καταγραφή, οπτικοποίηση, ανάλυση και μοντελοποίηση του αιφνίδιου πλημμυρικού φαινομένου της δυτικής Αττικής που πραγματοποιήθηκε στις 15 Νοεμβρίου 2017. Λαμβάνοντας υπόψη τα προαναφερθέντα, η εργασία έχει ως στόχο τα εξής:

- Την μελέτη των υδρομετεωρολογικών συνθηκών που επικράτησαν κατά την αιφνίδια πλημμύρα της δυτικής Αττικής στις 15 Νοεμβρίου 2017
- Την προσομοίωση του συγκεκριμένου πλημμυρικού γεγονότος από το σύγχρονο υδρομετεωρολογικό μοντέλο WRF-Hydro 3.0 ως συνιστώσα του CHAOS

Αρχικά αναφέρονται τα βασικά χαρακτηριστικά μιας αιφνίδιας πλημμύρας. Ακολουθεί μια περιγραφή χαρακτηριστικών πλημμυρικών επεισοδίων των τελευταίων χρόνων, από Αμερική, Κίνα και Ευρώπη. Έπειτα, παρουσιάζονται τα δεδομένα και οι μεθοδολογίες που εφαρμόστηκαν για την παραγωγή και οπτικοποίηση της ατμοσφαιρικής και εδαφικής κατάστασης της δυτικής Αττικής, προγενέστερα και κατά την διάρκεια της πλημμύρας. Στην συνέχεια, γίνεται αναφορά στα φυσικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης. Ακολουθούν τα αποτελέσματα του μοντέλου, καθώς και η αξιολόγηση τους. Τέλος, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και οι βιβλιογραφικές αναφορές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΘΕΩΡΙΑ

2.1 Βασικά χαρακτηριστικά

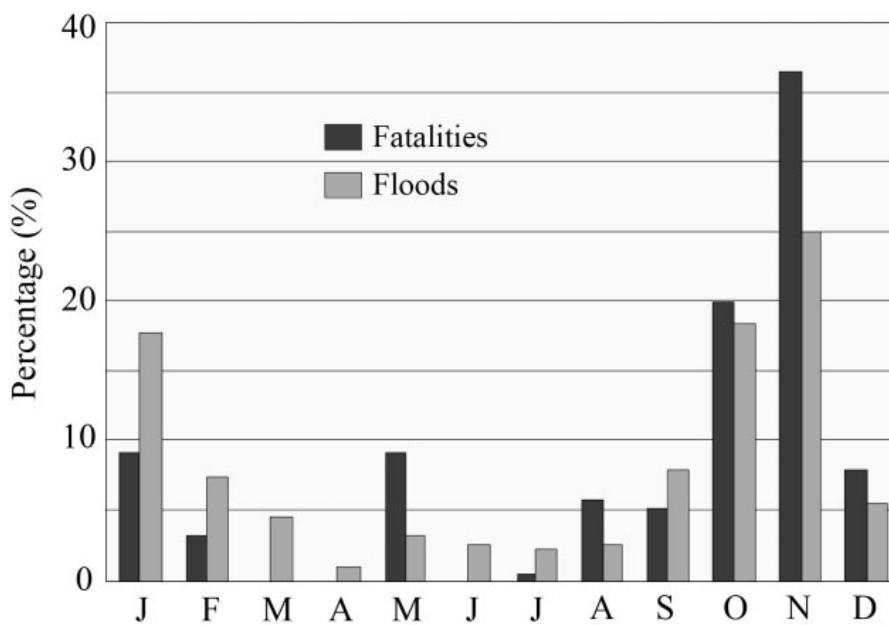
2.1.1 Ορισμός και παράγοντες επηρεασμού

Σύμφωνα με Sene (2016), “οι αιφνίδιες πλημμύρες χαρακτηρίζονται από βαθιά και ταχεία κίνησης ύδατα όπου σε συνδυασμό με μικρό χρόνο απόκρισης της λεκάνης απορροής, αυξάνεται η επικινδυνότητα των ανθρώπων και της περιουσίας τους”. Πρόκειται για ένα τοπικό φαινόμενο το οποίο εκδηλώνεται ξαφνικά, δίνοντας ελάχιστο χρόνο για προειδοποίηση. Οι λεκάνες απορροής της Μεσογείου είναι ιδιαίτερα επιρρεπείς σε τέτοιες πλημμύρες, καθώς το μικρό τους μέγεθος, η γεωμορφολογία, η λιθολογία και οι έντονες βροχοπτώσεις ευνοούν τις συνθήκες ανάπτυξης τέτοιων συμβάντων (Diakakis et al. 2012; Kourgialas and Karantzas 2017). Επιπρόσθετοι παράγοντες είναι οι χρήσεις γης, ιδίως τα ποσοστά φυτοκάλυψης και δομημένης έκτασης (Davie 2008; Fetter 2001), η αρχική περιεκτικότητα σε υγρασία του εδάφους (Aguado and Burt 2010; Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος 1999) και οι μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούσαν στην περιοχή προγενέστερα του πλημμυρικού γεγονότος. Στην Μεσόγειο, η ανάπτυξη τέτοιων φαινομένων συμβαίνει εξαιτίας των φαινομένων ξηρασίας συνοδευόμενα από ισχυρές καταιγίδες (Trenberth 2011).

2.1.2 Εποχικότητα και γεωγραφική κατανομή στην Μεσόγειο

Η συχνότητα εμφάνισης τέτοιων φαινομένων δεν είναι παρόμοια καθόλη την διάρκεια του έτους, καθώς οφείλεται στην διαφοροποίηση του τοπικού κλίματος της κάθε περιοχής. Μελέτες φανε-

ρώνουν πως οι φθινοπωρινοί μήνες έχουν την μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης τέτοιων πλημμυρών στην Μεσόγειο (Gaume et al. 2016; Llasat et al. 2010). Το ίδιο πρότυπο ισχύει και στην Ελλάδα, όπου σύμφωνα με Diakakis et al. (2012) οι περισσότερες καταγραφές πλημμυρών συμβαίνουν τον Νοέμβρη, έχοντας περίπου το 25% των συνολικών συμβάντων και το 35% των συνολικών θυμάτων (βλέπε Σχήμα 2.1).



Σχήμα 2.1: Μηνιαία κατανομή συμβάντων και θυμάτων από πλημμύρες στην Ελλάδα για την περίοδο 1880-2010 (Diakakis and Deligiannakis 2017).

Τα πρότυπα θανάτων διαφέρουν μεταξύ χωρών χαμηλού και υψηλού εισοδήματος, καθώς και μεταξύ δυτικών και ανατολικών πολιτισμών. Αυτό συμβαίνει λόγω διαφορετικών περιβαλλοντικών, κοινωνικο-οικονομικών και πολιτιστικών χαρακτηριστικών (Diakakis and Deligiannakis 2017). Η γεωγραφική κατανομή στην Μεσόγειο είναι ανομοιόμορφη, με τις δυτικές χώρες έχουν υψηλότερο ποσοστό εμφάνισης τέτοιου φαινομένου σε σχέση με τις ανατολικές χώρες. Η Ελλάδα και το Ισραήλ αποτελούν την εξαίρεση στο κανόνα διότι παρουσιάζουν μεγάλο αριθμό συμβάντων σε σχέση με τα δυτικά κράτη (βλέπε Πίνακα 2.1). Καθοριστικός παράγοντας αυτής της γεωγραφικής κατανομής είναι τα συστήματα μέτρησης και τα δίκτυα καταγραφής, τα οποία είναι πυκνότερα στα ανατολικά κράτη.

Οι δυτικές Μεσογειακές χώρες όπως Ιταλία, Γαλλία, Αλγερία και Ισπανία έχουν μεγάλο αριθμό συμβάντων, όπου και στα περισσότερα των περιπτώσεων είναι με καταγεγραμμένη τιμή επιφανειακής απορροής. Να σημειωθεί πως η Ελλάδα είναι η μόνη χώρα με μεγάλο αριθμό πλημμυρών και μικρό αριθμό καταγραφών τιμής επιφανειακής απορροής.

Χώρα	Αριθμός συμβάντων	Με τιμές επιφανειακής απορροής
Ιταλία	46	36
Γαλλία	40	38
Ελλάδα	22	5
Αλγερία	20	1
Ισπανία	16	11
Ισραήλ	11	11
Μαρόκο	7	7
Αίγυπτος	3	0
Τυνησία	3	2
Λίβανος	1	0
Πορτογαλία	1	0
Σλοβενία	1	1
Τουρκία	1	0
Σύνολο	172	112

Πίνακας 2.1: Περιεχόμενα της βάσης δεδομένων των Gaume et al. (2016), με τις πιο αξιοσημείωτες Μεσογειακές αιφνίδιες πλημμύρες για την περίοδο 1940-2015.

2.2 Πλημμυρικά επεισόδια

2.2.1 Παγκόσμια

Ενώ η παρούσα εργασία εστιάζει στην λεκάνη της Μεσογείου, το φαινόμενο της πλημμύρας και συγκεκριμένα της αιφνίδιας είναι ένα φαινόμενο παγκόσμιας κλίμακας. Η Αμερική χαρακτηρίζεται από μεγάλο αριθμό αιφνίδιων πλημμυρών, σύμφωνα με αποτελέσματα της έρευνας των Ashley and Walker (2008). Ο μέσος όρος θανάτων ανα χρονιά έφτανε τους 97.6, με τις πολιτείες με τα περισσότερα φαινόμενα να αποτελούν το Texas, Pennsylvania και South Dakota. Η πλημμύρα του Johnstown της Pennsylvania το 1889 είχε σαν αποτέλεσμα τον θάνατο περισσότερων από 2.000 ανθρώπων, όπως και η πλημμύρα του Big Thompson στο Colorado το 1979 είχε περισσότερους από 140 νεκρούς (Sene 2016). Χαρακτηριστική περίπτωση είναι η πλημμύρα του ποταμού Mississippi το 1993, όπου εξαιτίας κορεσμού του εδάφους και σε συνδυασμό με το απότομο λιώσιμο των πάγων, ο ποταμός διογκώθηκε απο τα 800 μέτρα στα 10 χιλιόμετρα, προκαλώντας οικονομικές καταστροφές εκατομμυρίων δολαρίων (Edward and Burt 1966).

Στην Αυστραλία, τον Απρίλιο του 1974 και τον Μάρτιο του 1975, καταστροφικές αιφνίδιες πλημμύρες έπληξαν τα προάστια του Sydney προκαλώντας ζημιές χρηματικού ύψους \$98 και \$63 εκατομμυρίων αντίστοιχα. Επιπρόσθετα, μια πλημμύρα που άρχισε με βροχοπτώσεις τον Σεπτέμβριο του 2010 επηρέασε περισσότερους από 200.000 ανθρώπους στο Queensland, οδηγώντας σε ζημιές χρηματικού ύψους \$2.38 δισεκατομμυρίων, χαρακτηρίζοντας την ως την πιο περίφημη πλημμύρα στην ιστορία της Αυστραλίας (Liu and Yan Li 2017).

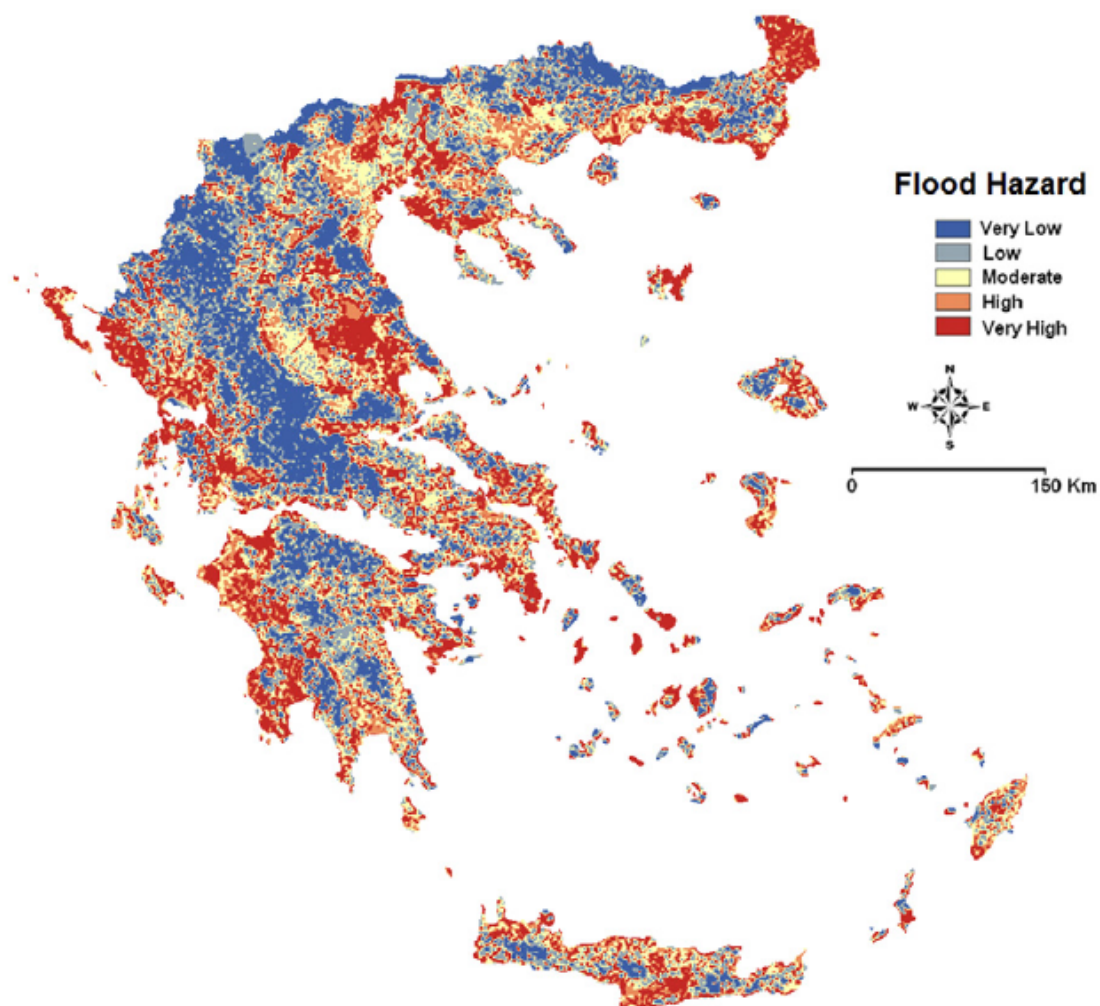
Στην Κίνα το 66% των θανάτων από φυσικές καταστροφές προέρχονται από αιφνίδιες πλημμύρες (Sene 2016). Οι μεγαλύτερες πλημμύρες στην ιστορία έχουν λάβει χώρα στην Κίνα, με σημαντικότερες εκείνες του χίτρινου ποταμού, ο οποίος έχει πλημμυρίσει περισσότερες από 1.500 φορές. Το 1887 λόγω έντονης βροχόπτωσης το νερό ξεχείλισε και έπνιξε πάνω από 900.000 ανθρώπους ενώ άφησε εκατομμύρια ανθρώπους άστεγους (Crawford and Kozlowski 1985).

Όσον αφορά την Ευρώπη, χαρακτηριστικά παραδείγματα πλημμυρικών επεισοδίων μπορούν να βρεθούν στην Ιταλία (Molinari et al. 2014), Γαλλία (Delrieu et al. 2005), Ισπανία (Llasat et al. 2010) και Βρετανία (Archer and Fowler 2018). Κατά την περίοδο 1960-2019, καταγράφηκαν 298 πλημμύρες από τις οποίες οι 33 κατηγοριοποιήθηκαν ως αιφνίδιες πλημμύρες με αποτέλεσμα τον θάνατο περίπου 5.500 ανθρώπων και πρόκληση υλικών ζημιών ύψους \$106 δισεκατομμυρίων (Terranova and Gariano 2014).

2.2.2 Στον Ελλαδικό χώρο

Σύμφωνα με 40ετή μελέτη των Diakakis and Deligiannakis (2017), υπήρξαν 53 θανατηφόρα γεγονότα, προκαλώντας συνολικά 151 θανάτους σε ολόκληρη την χώρα, έχοντας μέση τιμή θανάτου ανά συμβάν ίση με 2,85. Είναι πιο καταστροφικές στο δυτικό τμήμα της Ελλάδας, λόγω κλιματικών, γεωμορφολογικών, εδαφικών και ανθρωπογενών συνθηκών (Llasat et al. 2010). Οι Kourgialas and Karatzas (2017) χρησιμοποιώντας την μέθοδο της σταθμισμένης πολυκριτηριακής ανάλυσης, δημιούργησαν έναν χάρτη επικινδυνότητας για τις καταστροφικές πλημμύρες στην Ελλάδα (βλέπε Σχήμα 2.2). Η περιοχή της δυτικής Αττικής, όπου είναι και η περιοχή μελέτης, παρουσιάζει υψηλά επίπεδα επικινδυνότητας. Μελέτες ίδιας μεθοδολογίας έχουν πραγματοποιηθεί για περιοχές της Ελλάδας μικρότερης κλίμακας, όπως είναι στην λεκάνη απορροής του Έβρου (Kazakis et al. 2015), του ποταμού Κοιλιάρης (Kourgialas and Karatzas 2011) και της Αθήνας (Bathrellos et al. 2017).

Αποτελέσματα της μελέτης των Diakakis and Deligiannakis (2017) δείχνουν πως η Αθήνα είχε αυξημένη συσσώρευση θανάτων, ένα πρότυπο που αποδίδεται σε γεγονότα πολλαπλών θανάτων που συνέβησαν στην περιοχή μεταξύ του 1970 και 1980, τα οποία συνδέονται με την παρατεταμένη αστικοποίηση της περιοχής. Συνήθως οι πλημμύρες στην Αθήνα δημιουργούνται από έντονες αλλά μικρής διάρκειας βροχοπτώσεις, με τον ρόλο της αποψίλωσης των δασών και της αστικοποίησης να παίζουν σημαντικό ρόλο στην δημιουργία και εξέλιξη τους. Οι θάνατοι παρουσιάζουν ισχυρή συσχέτιση με την εποχικότητα. Τα δυστυχήματα συνέβησαν κυρίως τις νυχτερινές ώρες, σε εξωτερικούς χώρους και σε υπαίθριες περιοχές της χώρας. Η κύρια αιτία



Σχήμα 2.2: Χάρτης πλημμυρικής επικινδυνότητας της Ελλάδας (Kourgialas and Karatzas 2017).

θανάτου έδειξε να είναι ο πνιγμός, με τα πιο ευπαθείς άτομα να είναι τα αρσενικά ανεξαρτήτως ηλικίας και οι ηλικιωμένοι ανεξαρτήτως φύλου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

3.1 Δορυφορικά δεδομένα

Για την ανάλυση και οπτικοποίηση των NDVI και NDWI_G, χρησιμοποιήθηκαν δορυφορικά δεδομένα του ευρωπαϊκού προγράμματος Copernicus. Η λήψη της δορυφορικής εικόνας έγινε από τον Sentinel-2A στις 02/11/2017 και ώρα 09:11 UTC. Η εξαγωγή αποτελεσμάτων ήταν εφικτή με την βοήθεια του ελεύθερου και ανοιχτού κώδικα ΣΓΠ λογισμικού QGIS 3.2 Bonn.

3.1.1 Normalized difference vegetation index (NDVI)

Ο πιο συχνά χρησιμοποιούμενος δείκτης βλάστησης, είναι ο κανονικοποιημένος διαφορικός δείκτης βλάστησης (NDVI). Ορίζεται από την ακόλουθη γενική εξίσωση καθώς και από την εφαρμοσμένη στα μήκη κύματος του Sentinel-2A:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad \text{or} \quad NDVI = \frac{R_{835.1nm} - R_{664.5nm}}{R_{835.1nm} + R_{664.5nm}} \quad (3.1)$$

όπου *NIR* το φασματικό κανάλι του κοντινού υπέρυθρου και *RED* το φασματικό κανάλι στην περιοχή του ερυθρού του ορατού. Αντίστοιχα, τα $R_{835.1nm}$ και $R_{664.5nm}$ είναι τα μήκη κύματος της ακτινοβολίας στα οποία καταγράφει ο Sentinel-2A. Το εύρος τιμών του είναι απο -1 έως 1, με το 0 να αποτελεί το όριο στην απουσία βλάστησης (Παρχαρίδης 2015). Η χωρική ανάλυση του δείκτη είναι $10m \times 10m$.

Σύμφωνα με τη θεωρία του ισοζυγίου ύδατος (βλέπε Εξίσωση 3.2) ο συνολικός όγκος κατακρημνισμάτων (Q_p) αποτελείται απο την ποσότητα διείσδυσης (Q_f), την ποσότητα εξατμι-

σοδιαπνοής (Q_e), την ποσότητα αποχέτευσης (Q_d) και την ποσότητα επιφανειακής απορροής (Q_r) (Chunlu Liu and Yan Li 2017).

$$Q_p = Q_f + Q_e + Q_d + Q_r \quad (3.2)$$

Εφαρμόστηκε αυτός ο δείκτης ώστε να παρατηρηθεί η χωρική κατανομή της βλάστησης στην ευρύτερη περιοχή της Μάνδρας, δηλαδή να ανιχνεύσει την επιρροή των παραγόντων Q_f και Q_e . Όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 2.1, τα ποσοστά φυτοκάλυψης συμβάλλουν ως παράγοντας εξασθένησης μιας αιφνίδιας πλημμύρας, διότι απορροφούν ένα ποσοστό της επιφανειακής απορροής. Το ποσοστό αυτό είναι συνήθως μικρό, καθώς αναφερόμαστε σε αιφνίδιο γεγονός, όμως δεν θεωρείται και μηδαμινό.

3.1.2 Normalized difference water index ($NDWI_G$)

Υπάρχουν δυο βασικοί κανονικοποιημένοι διαφορικοί δείκτες ύδατος ($NDWI$). Ο πρώτος δείκτης ύδατος έχει οριστεί από McFeeters (1996), ο οποίος εντοπίζει υδάτινες μάζες στην επιφάνεια της γης, ενώ ο δεύτερος έχει οριστεί από Gao (1996) και εντοπίζει την υγρασία της βλάστησης. Ο δεύτερος δείκτης ορίζεται από την ακόλουθη γενική εξίσωση, καθώς και από την εφαρμοσμένη στα μήκη κύματος του Sentinel-2A:

$$NDWI_G = \frac{NIR - SWIR_2}{NIR + SWIR_2} \quad \text{or} \quad NDWI_G = \frac{R_{835.1nm} - R_{1613.7nm}}{R_{835.1nm} + R_{1613.7nm}} \quad (3.3)$$

όπου NIR το φασματικό κανάλι του κοντινού υπέρυθρου και $SWIR_2$ το δεύτερο φασματικό κανάλι του μακρινού υπέρυθρου. Εξίσου τα $R_{835.1nm}$ και $R_{1613.7nm}$ είναι τα μήκη κύματος της ακτινοβολίας στα οποία καταγράφει ο Sentinel-2A. Όπως με τον $NDVI$, το εύρος τιμών του είναι από -1 έως 1 , με το 0 να αποτελεί το όριο στην απουσία υγρασίας. Η χωρική ανάλυση του δείκτη είναι $20m \times 20m$.

Ο δείκτης αποτυπώνει την χωρική κατανομή της υγρασίας στην υπάρχουσα βλάστηση για την ευρύτερη περιοχή της Μάνδρας. Η υγρασία της υπάρχουσας βλάστησης συνδέεται άμεσα με την αρχική περιεκτικότητα σε υγρασία του εδάφους (βλέπε Ενότητα 2.1), ο οποίος είναι παράγοντας ενδυνάμωσης μιας πλημμύρας.

3.2 Δεδομένα ΣΓΠ

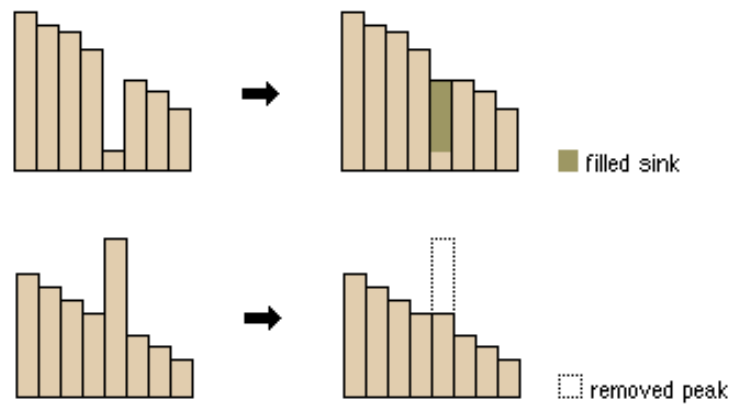
Τα εδαφικά και ατμοσφαιρικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν κατά την παρούσα εργασία ήταν δεδομένα εξόδου (output data) του υδρομετεωρολογικού μοντέλου WRF-Hydro 3.0, πλεγματικής μορφής τύπου .nc και χωρικής διακριτικής ικανότητας για τα εδαφικά $90m \times 90m$, για το ύψος υετού $250m \times 250m$ και για τα ατμοσφαιρικά δεδομένα $900m \times 900m$.

3.2.1 Ψηφιακό μοντέλο εδάφους και υδρογραφικό δίκτυο

Για την δημιουργία του υδρογραφικού δικτύου στην περιοχή της δυτικής Αττικής, αναγκαία ήταν η ύπαρξη ενός ψηφιακού μοντέλου εδάφους. Χρησιμοποιήθηκε το ASTER GDEM του Jet Propulsion Laboratory (NASA), με χωρική διακριτική ικανότητα $30m \times 30m$ για την παραγωγή της λεκάνης απορροής της Μάνδρας. Χρησιμοποιήθηκε και το DEM SRTM (NASA) το οποίο έχει ως βάση το μοντέλο WRF-Hydro 3.0, για την παραγωγή του υδρογραφικού δικτύου, την ιεράρχηση του δικτύου (stream order), την διεύθυνση ροής της υδροσταγόνας (flow direction) και την συσσώρευση ροής της υδροσταγόνας (flow accumulation). Χρησιμοποιήθηκε διαφορετικό DEM για την λεπτομερή καταγραφή της λεκάνης απορροής της Μάνδρας, καθώς το DEM SRTM είχε μικρότερη χωρική ανάλυση και αντιμετώπιζε προβλήματα στο λογισμικό επεξεργασίας.

Το επίπεδο του stream order δεν παράχθηκε από κάποιο ΣΓΠ λογισμικό, καθώς ήταν δεδομένο εξόδου του WRF-Hydro 3.0. Όσον αφορά την παραγωγή της λεκάνης απορροής και του υδρογραφικού δικτύου της Μάνδρας, αναγκαία ήταν η λειτουργία fill sink του ArcGIS 10.4 στο ASTER GDEM. Πολλές φορές στα ψηφιακά μοντέλα εδάφους εμφανίζονται υψομετρικά σφάλματα, εξαιτίας της χωρικής ανάλυσης των δεδομένων ή της στρογγυλοποίησης τους από τα λογισμικά επεξεργασίας. Έτσι, σε κάποιες περιοχές δημιουργούνται κάποια “βαθουλώματα” και κάποιες “κορυφές” οι οποίες δεν είναι αντιπροσωπευτικές της πραγματικότητας. Είναι αναγκαίο να γεμίζονται ώστε να υπάρξει σωστή οριοθέτηση λεκανών απορροής και ποταμών. Αν τα σημεία αυτά δεν είναι γεμάτα, ένα παράγωγο δίκτυο αποστράγγισης μπορεί να είναι ασυνεχές. Το εργαλείο του υδρολογικού πακέτου ArcGIS 10.4 είναι αυτό που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία και η λειτουργία του μπορεί να φανεί από το Σχήμα 3.1 (ESRI 2018a). Για την οριοθέτηση της λεκάνης της Μάνδρας, χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο watershed.

Για την εξαγωγή υδρολογικών χαρακτηριστικών μιας λεκάνης απορροής, αναγκαία είναι η ικανότητα προσδιορισμού της κατεύθυνσης ροής από κάθε κελί στο επίπεδο. Αυτό πραγματοποιήθηκε με το εργαλείο κατεύθυνσης ροής (flow direction). Εξασφαλίζοντας ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους χωρίς τα σφάλματα συνέχειας, είναι εφικτή η έναρξη διαδικασίας παραγωγής

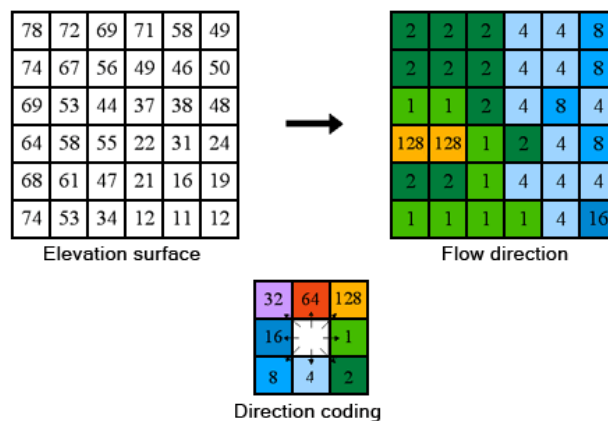


Σχήμα 3.1: Παράδειγμα χρησιμότητας του εργαλείου fill sink του λογισμικού ArcGIS 10.4 για την διόρθωση ασυνέχειας του ψηφιακού μοντέλου εδάφους (ESRI 2018a).

του επιπέδου κατεύθυνσης ροής. Αυτό το εργαλείο δέχεται ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους ως είσοδο και ως έξοδο παράγει ένα επίπεδο που προσδιορίζει την κατεύθυνση ροής κάθε κελιού. Υπάρχουν οκτώ έγκυρες κατευθύνσεις εξόδου σχετικά με τα οκτώ γειτονικά κελιά στα οποία μπορεί να κυκλοφορήσει η ροή υδροσταγόνας (ESRI 2018b). Αυτή η προσέγγιση αναφέρεται συνήθως ως ένα μοντέλο ροής οκτώ κατευθύνσεων (D8) και ακολουθεί την μεθοδολογία των Jenson and Domingue (1988). Η κατεύθυνση ροής καθορίζεται από την κατεύθυνση της κλίσης (s) κάθε κελιού, και υπολογίζεται ως εξής:

$$s = \left(\frac{\Delta z}{d} \right) \times 100 \quad (3.4)$$

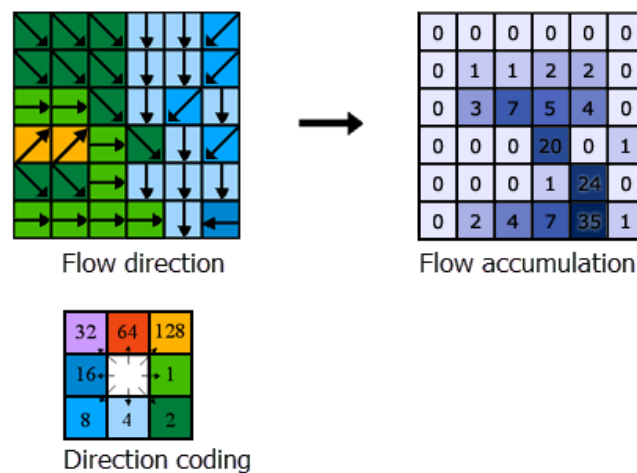
όπου Δz η διαφορά υψομέτρου από τα γειτονικά κελιά και d η απόσταση από το κέντρο κάθε κελιού. Σχηματικά παρουσιάζεται από το Σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.2: Παράδειγμα χρησιμότητας του εργαλείου flow direction του λογισμικού ArcGIS 10.4 για την εξαγωγή του επιπέδου κατεύθυνσης ροής (ESRI 2018b).

Έχοντας το επίπεδο κατεύθυνσης ροής, καθίσταται εφικτή η δημιουργία του επιπέδου συσ-

σώρευσης ροής, όπου είναι το ίδιο το υδρογραφικό δίκτυο. Το εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή αυτού του επιπέδου είναι το εργαλείο συσσώρευσης ροής (flow accumulation). Το εργαλείο συσσώρευσης ροής υπολογίζει την ροή ως το συνολικό βάρος όλων των κελιών που ρέουν σε αυτό. Εάν δεν παρέχεται κανόνας βάρους, εφαρμόζεται η μονάδα. Η κάθε τιμή κελιού στο επίπεδο εξόδου είναι ο αριθμός των κελιών που ρέουν σε αυτό (ESRI 2018c). Στο Σχήμα 3.3, το πάνω αριστερό επίπεδο δείχνει την διεύθυνση της υδροσταγόνας από κελί σε κελί, ενώ στο δεξιά επίπεδο τον συνολικό αριθμό των κελιών που ρέουν από κάθε κελί.



Σχήμα 3.3: Παράδειγμα χρησιμότητας του εργαλείου flow accumulation του λογισμικού ArcGIS 10.4 για την εξαγωγή του επιπέδου συσσώρευσης ροής (ESRI 2018c).

3.2.2 Βροχόπτωση, θερμοκρασία και άνεμος

Τα δεδομένα βροχόπτωσης ήταν δεδομένα εξόδου του WRF-Hydro 3.0. Έγινε η ταξινόμηση τους σε ίσες κλάσεις με σκοπό την καλύτερη οπτικοποίηση τους. Χρησιμοποιήθηκαν πλεγματικά δεδομένα μονώρης αθροιστικής βροχόπτωσης για την ευρύτερη περιοχή της δυτικής Αττικής, χωρικής διακριτικής ικανότητας $250m \times 250m$. Τα δεδομένα ανώτερης ατμόσφαιρας, δηλαδή η θερμοκρασία στα $2m$, $850hPa$, $700hPa$, $500hPa$, οριζόντια ένταση και διεύθυνση ανέμου (U) και κάθετη ένταση και διεύθυνση ανέμου (V) στα $10m$, ήταν επίσης δεδομένα εξόδου του μοντέλου. Αφαιρέθηκαν οι ακραίες τιμές των επιπέδων $700hPa$ και $850hPa$ ώστε να μην αλλοιώνεται η οπτικοποίηση τους. Όσον αφορά τον άνεμο, χρειάστηκε η παρέμβαση του λογισμικού IDV 5.5 για την καλύτερη οπτικοποίηση της έντασης αλλά και της διεύθυνσης του ανέμου στα $10m$.

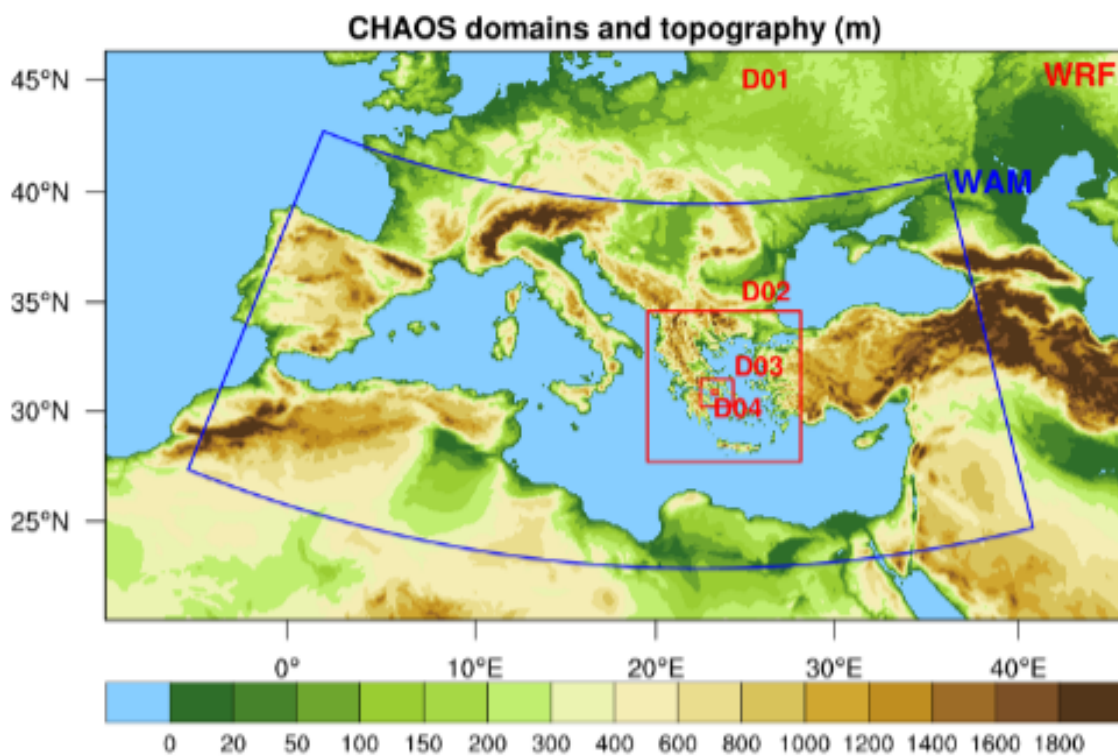
Χρειάστηκε να υπολογιστεί ο συνολικός ή πραγματικός άνεμος (W):

$$W = \sqrt{(V_{10})^2 + (U_{10})^2} \quad (3.5)$$

όπου V_{10} είναι η οριζόντια ένταση του ανέμου και U_{10} η κάθετη ένταση του ανέμου στα $10m$. Η χωρική ανάλυση των ατμοσφαιρικών δεδομένων, ήταν $900m \times 900m$.

3.3 Μοντέλο προσομοίωσης CHAOS

Προκειμένου να αναλυθούν τα υδρομετεωρολογικά χαρακτηριστικά της πλημμύρας, χρησιμοποιήθηκε το ολοκληρωμένο σύστημα μοντελοποίησης CHAOS (Varlas 2017; Varlas et al. 2018) για την εκτέλεση της αριθμητικής προσομοίωσης του φαινομένου από τις 14 Νοεμβρίου στις 12:00 UTC έως 15 Νοεμβρίου στις 12:00 UTC, 2017. Το CHAOS αποτελείται από το ατμοσφαιρικό μοντέλο WRF-ARW 4.0 (Skamarock et al. 2008; Powers et al. 2017), το υδρολογικό μοντέλο WRF-Hydro 3.0 (Gochis et al. 2015), το χημικό μοντέλο WRF-Chem 4.0 (Grell et al. 2005) και το μοντέλο ωκεάνιων κυμάτων WAM 4.5.4 (Wamdi 1988; Komen et al. 1994) συζευγμένο μέσω του OASIS3-MCT 3.0 (Valcke et al. 2015).



Σχήμα 3.4: Οι 4 τομείς με οριζόντια ανάλυση $9km \times 9km$, $3km \times 3km$, $1km \times 1km$, $0.25km \times 0.25km$ και η τοπογραφία του μοντέλου CHAOS.

Χρησιμοποιήθηκαν εργαλεία των ΣΓΠ για την κατασκευή της λεκάνης απορροής της Μάνδρας για το CHAOS. Το WRF-ARW έχει διαμορφωθεί σε 4 τομείς οριζόντιας ανάλυσης $9\text{km} \times 9\text{km}$, $3\text{km} \times 3\text{km}$, $1\text{km} \times 1\text{km}$, $0.25\text{km} \times 0.25\text{km}$ αντίστοιχα (βλέπε Σχήμα 3.4). Χρησιμοποιήθηκαν χρονικά βήματα των 45, 15, 5 και 1ος δευτερολέπτου για τις τέσσερις περιοχές αντίστοιχα.

Οι αρχικές και οριακές συνθήκες βασίστηκαν στις αναλύσεις του Εθνικού Κέντρου Περιβαλλοντικής Πρόβλεψης (NCEP) του Global System Forecasting System (GFS), οριζόντιας ανάλυσης $0.25^\circ \times 0.25^\circ$. Το αρχικό πεδίο της επιφανειακής θερμοκρασίας της θάλασσας (SST) στις 15 Νοεμβρίου 2017 και ώρα 00:00 UTC, βασίστηκε στις πραγματικού χρόνου αναλύσεις RTG (SST) που πάρθηκαν από NCEP. Το αναθεωρημένο σχέδιο Monin-Obukhov χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση των διεργασιών στο επιφανειακό στρώμα (Jimenez et al. 2012), με τροποποιήσεις για την ενθυλάκωση πληροφοριών θαλάσσιας κατάστασης (Varlas 2017; Varlas et al. 2018). Για την προσομοίωση των διεργασιών της πλανητικής οριακής στράθμης (PBL) χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα του Πανεπιστημίου Yonsei (Hong et al. 2006). Οι διαδικασίες εδάφους προσομοιώθηκαν από το ενιαίο μοντέλο επιφανειακού εδάφους (Tewari et al. 2004). Για την επίλυση των διεργασιών μεγάλου και μικρού μήκους κύματος ακτινοβολίας, χρησιμοποιήθηκαν τα συστήματα RRTM (Mlawer et al. 1997) και Dudhia (1989) αντίστοιχα. Για να προσομοιωθεί η μικροφυσική, χρησιμοποιήθηκε το σχήμα Lin (Lin et al. 1983). Επιπλέον, για την προσομοίωση των μεταφορικών διεργασιών, χρησιμοποιήθηκε το σχήμα Kain-Fritsch (Kain 2004).

Μοντέλο CHAOS	Στοιχεία
Ατμοσφαιρικό μοντέλο	WRF-ARW 4.0
Υδρολογικό μοντέλο	WRF-Hydro 3.0
Χημικό μοντέλο	WRF-Chem 4.0
Μοντέλο ωκεάνιων κυμάτων	WAM 4.5.4 συζευγμένο μέσω του OASIS3-MCT 3.0
Οριζόντια ανάλυση	$9\text{km} \times 9\text{km}$, $3\text{km} \times 3\text{km}$, $1\text{km} \times 1\text{km}$, $0.25\text{km} \times 0.25\text{km}$
Χρονικά βήματα	45, 15, 5 και 1 δευτερόλεπτα
Αρχικές και οριακές συνθήκες	GFS $0.25^\circ \times 0.25^\circ$
SST	NCEP
Επιφανειακό στρώμα	Αναθεωρημένο σχέδιο Monin-Obukhov
PBL	YSU
Επιφανειακό έδαφος	Ενιαίο μοντέλο επιφανειακού εδάφους NOAH
Μικροφυσική	Lin
Μεταφορικές διεργασίες (Cumulus)	Kain-Fritsch
Ακτινοβολία	RRTM and Dudhia
Συζευγμένο με WRF-Hydro 3.0	Ενεργοποιημένο
Τοπογραφία	USGS

Πίνακας 3.1: Συνοπτικός πίνακας με τα στοιχεία προσομοίωσης του μοντέλου CHAOS για την περιοχή της Μάνδρας.

Το WRF-Hydro 3.0 διαμορφώθηκε στο τέταρτο πεδίου ορισμού του WRF-ARW 4.0, το οποίο καλύπτει την λεκάνη απορροής της Μάνδρας με πέντε φορές καλύτερη ανάλυση ($50\text{m} \times 50\text{m}$). Εφαρμόστηκε το ψηφιακό μοντέλο εδάφους από Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) (Jarvis et al. 2008), με χωρική διακριτική ικανότητα $90\text{m} \times 90\text{m}$, το οποίο διανέμεται από NASA. Τα γεωφυσικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν από USGS. Δεδομένα από τον τέταρτο τομέα του μοντέλου CHAOS παρεμβάλλονται στο πεδίο ορισμού του WRF-Hydro 3.0 για να ωθούν τις υδρολογικές εξισώσεις και τις μετεωρολογικές πληροφορίες, κάθε μια ώρα. Συνοπτικά τα στοιχεία του μοντέλου και της προσομοίωσης αναγράφονται στο Πίνακα 3.1.

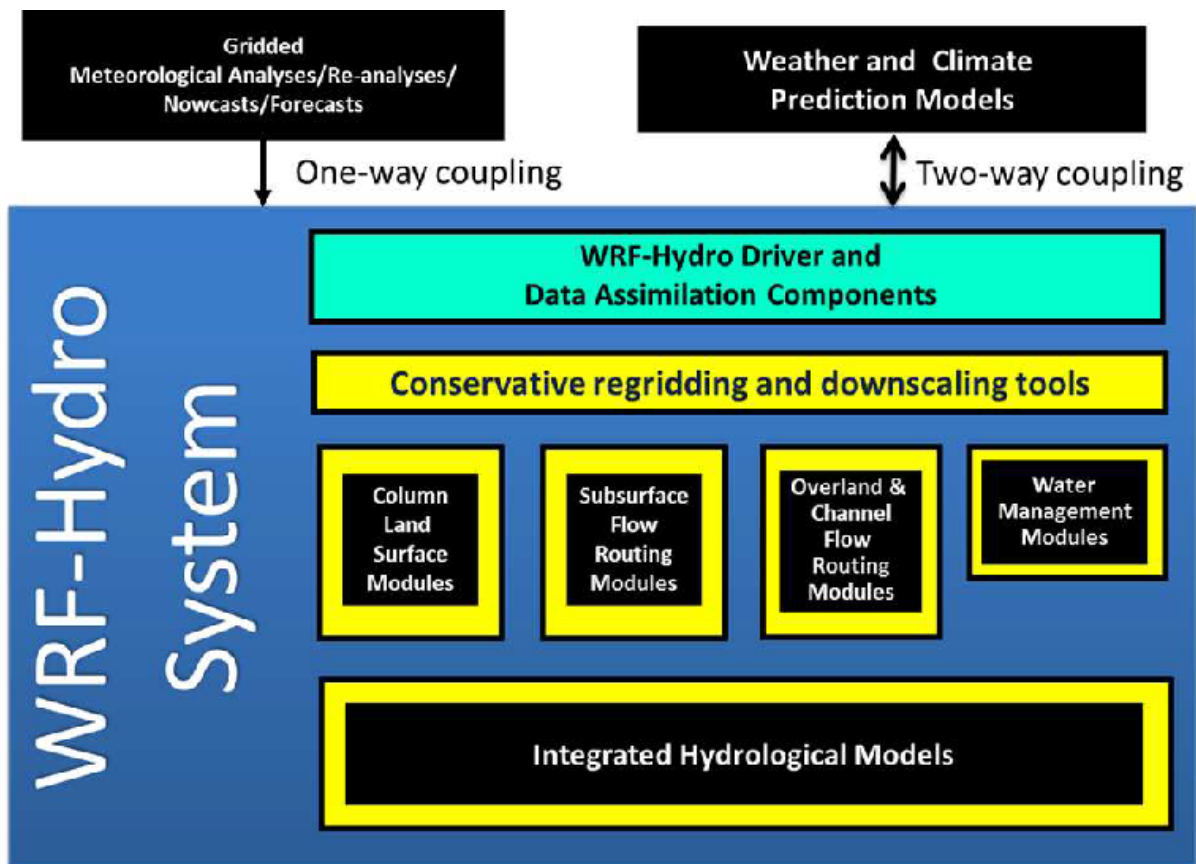
Routing Input File Content	Information
Topography	Required - in units of meters
Flow direction	Required
Flow accumulation	Required
Channel grid	Required
Stream order	Required for channel routing - using the Strahler (1952) stream order convention
Land use	Required
Grid of latitude and longitude values	Required - in units of decimal degrees
Grid of overland flow roughness scaling parameters	Required - set to = 1.0 until calibration
Grid of surface retention depth scaling parameters	Required - set to = 1.0 until calibration
Lakes	Optional
Groundwater Basin Mask	Optional
Grid of monitoring points	Optional

Σχήμα 3.5: Δεδομένα υψηλής χωρικής ανάλυσης που περιέχονται μέσα σε ένα routing input file (Katsafados et al. 2018).

Το WRF-Hydro δέχεται ένα routing input file το οποίο δεν περιλαμβάνει μόνο πληροφορίες τοπογραφίας, αλλά και επιφανειακά δεδομένα όπως είναι το επίπεδο συσσώρευσης ροής (flow direction) το υδρογραφικό δίκτυο (channel grid), τις τάξεις των κλάδων του υδρογραφικού (stream order) και τις χρήσεις γης (land use). Χρησιμοποιήθηκε το εμπορικό λογισμικό ArcGIS για την παραγωγή των παραπάνω επιφανειακών δεδομένων. Εκτός από το ArcGIS, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και το WRF-Hydro GIS Pre Processing Tool το οποίο είναι ένα αυτόνομο πρόγραμμα γραμμένο σε Python. Πιο αναλυτικά, τα στοιχεία που περιέχει ένα routing input file παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.5.

Σκοπός ανάπτυξης του WRF-Hydro ήταν για την διευκόλυνση της αναπαράστασης των υδρολογικών διαδικασιών του εδάφους, υπεδάφους, καναλιών, καθώς και να διευκολύνει την

σύζευξη των υδρολογικών μοντέλων με αυτά των ατμοσφαιρικών. Το WRF-Hydro είναι ένα πλήρες υδρολογικό μοντέλο ικανό να καταγράφει την χωρική κατανομή των μετεωρολογικών και επιφανειακών συνθηκών (Givati et al. 2016). Είναι σχεδιασμένο να προσφέρει μια βελτιωμένη εικόνα της υδρολογίας στην επιφάνεια, όπως και της ενεργειακής της κατάστασης, έχοντας χωρική διακριτική ανάλυση $1\text{km} \times 1\text{km}$ ή μικρότερη. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε μόνο του σαν αυτόνομο υδρολογικό μοντέλο ή μέσω σύζευξης με ένα ατμοσφαιρικό μοντέλο. Ένα γενικευμένο εννοιολογικό σχεδιάγραμμα για την αρχιτεκτονική του WRF-Hydro φαίνεται στο Σχήμα 3.6. Ανήκει στο ενδιάμεσο στάδιο όπου μπορεί να λειτουργήσει αυτόνομα για υδρολογικές διεργασίες, ενώ μπορεί να συζευχθεί με ένα ατμοσφαιρικό ή κλιματικό μοντέλο.



Σχήμα 3.6: Γενικευμένο εννοιολογικό σχεδιάγραμμα για την αρχιτεκτονική του WRF-Hydro (Katsafados et al. 2018).

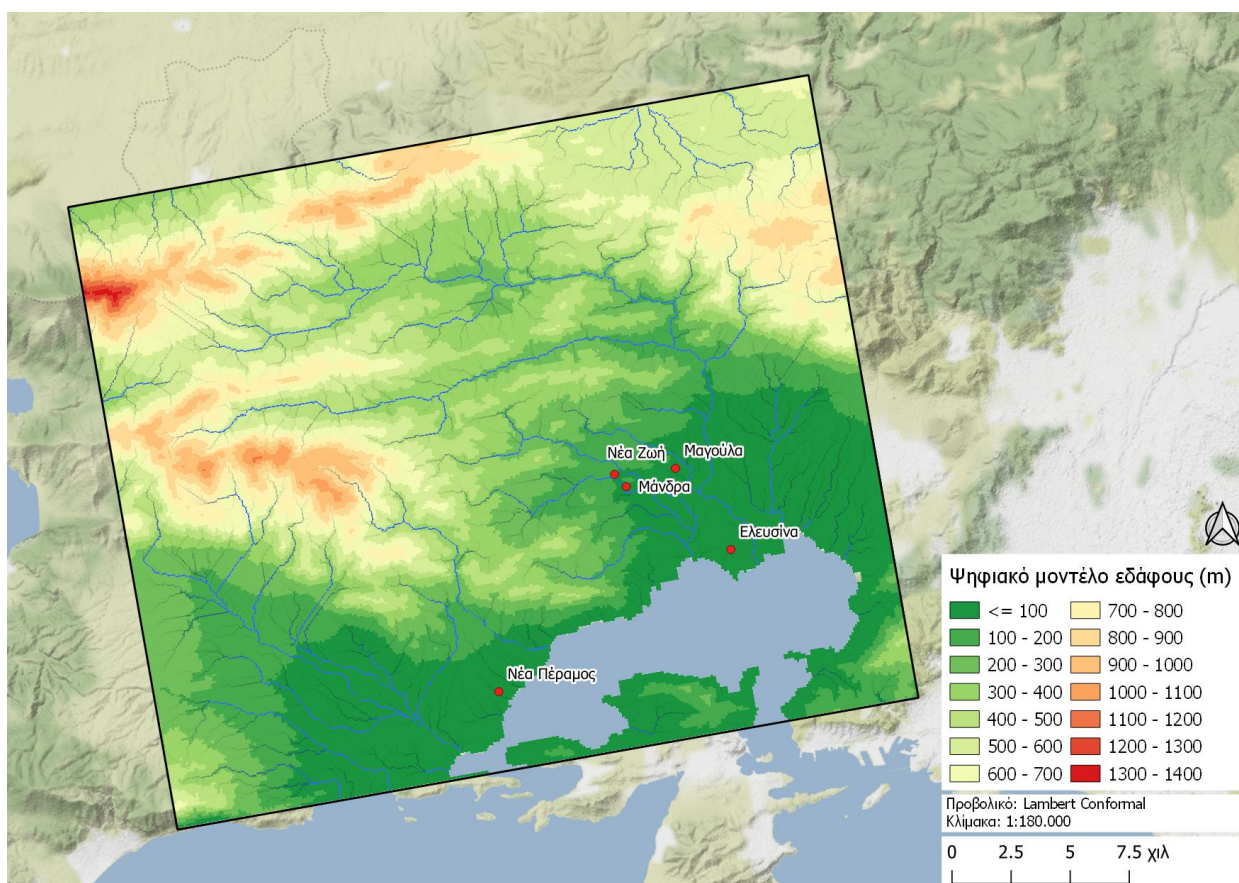
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

4.1 Εδαφολογία και υδρολιθολογία

Σύμφωνα με τον εδαφολογικό χάρτη (βλέπε Σχήμα 4.2) της Ειδικής Γραμματείας Υδάτων (ΕΓΥ) για το υδατικό διαμέρισμα Αττικής, στα βορειο-δυτικά βρίσκεται επιφάνεια εδαφικού τύπου Α (αμμώδη, πηλοαμμώδη, αμμοπηλώδη, ιλυώδη), στα νότια εδαφικού τύπου Β (ιλυοπηλώδη), ενώ εμφανίζονται τοπικά και περιοχές εδαφικού τύπου C (αμμο-αργιλοπηλώδη, αμμοαργιλώδη) (BEYOND 2018).



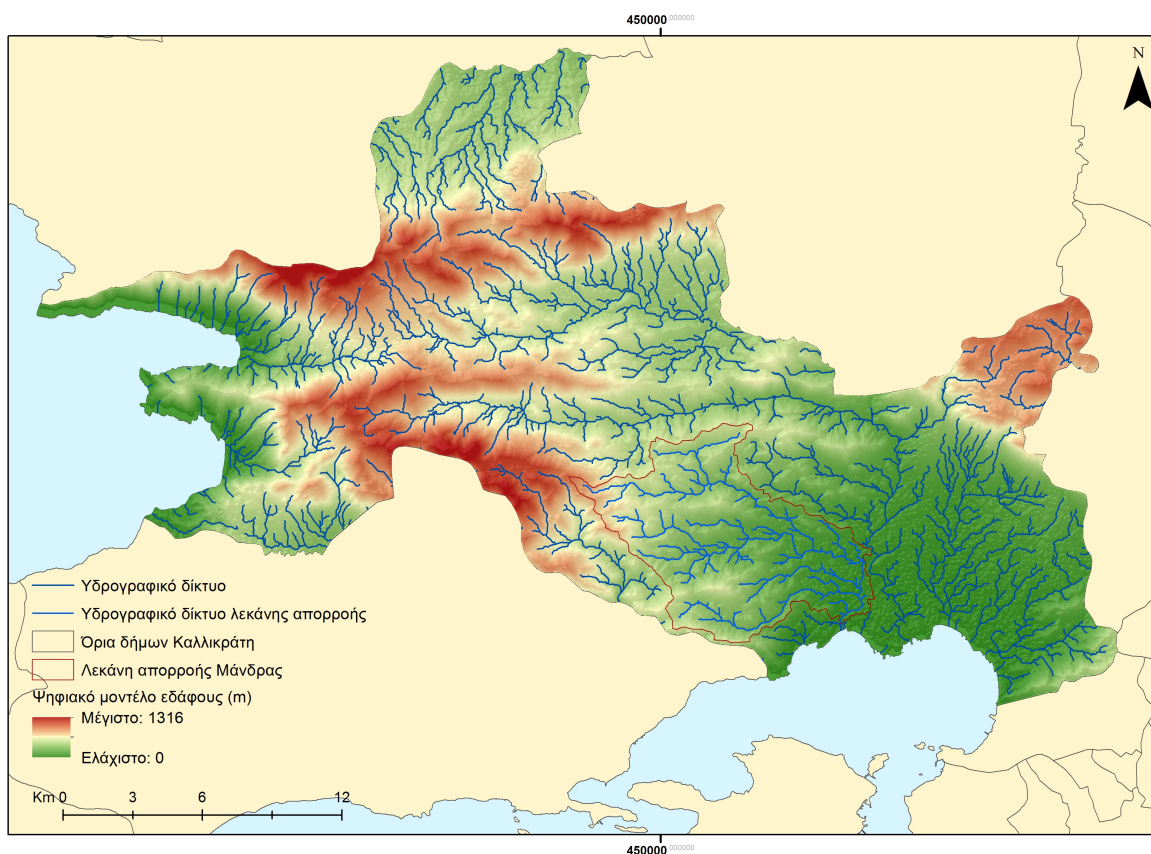


Σχήμα 4.3: Χάρτης υψομετρικού αναγλύφου για την περιοχή της δυτικής Αττικής, χωρικής διακριτικής ικανότητας $50m \times 50m$ (Ιδία επεξεργασία).

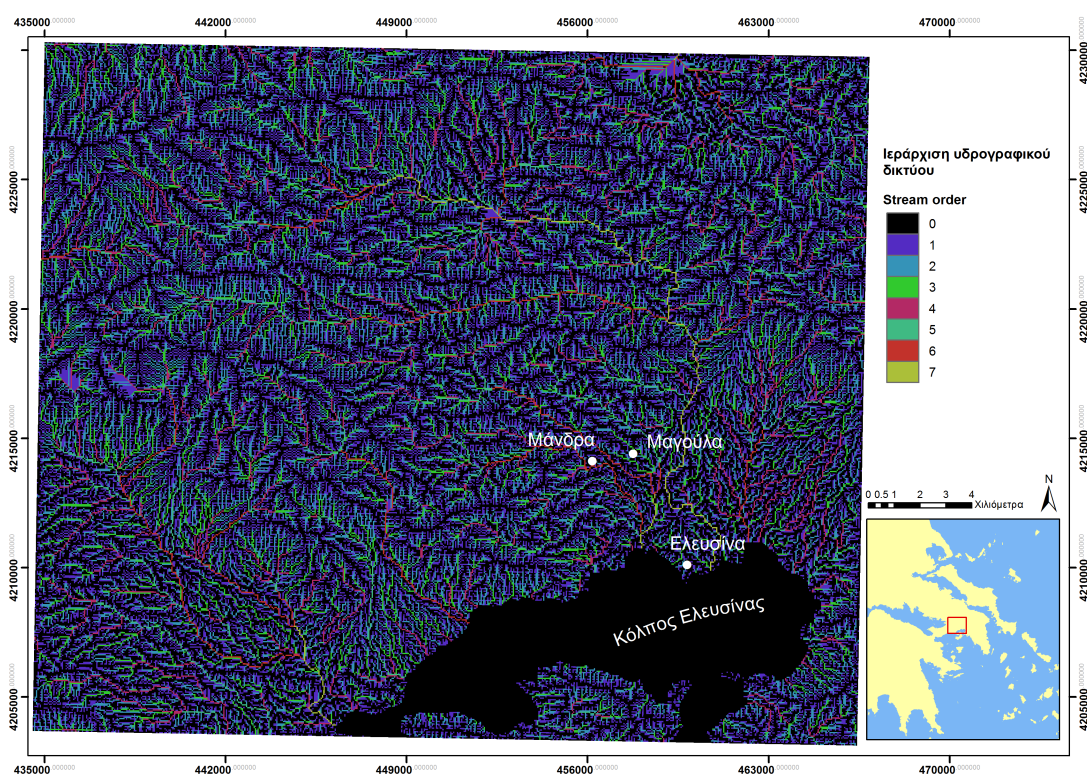
τάξης. Το μεγαλύτερο ποσοστό του υδρογραφικού δικτύου κατατάσσεται σε κλάδους 1ης και 2ης τάξης. Η πλημμύρα έλαβε μέρος σε κοίτη μικρότερης τάξης από αυτής του Σαρανταπόταμου ποταμού (Σούρες και Αγ. Αικατερίνης), δηλαδή το μέγεθος της κοίτης δεν είναι πάντα σημαντικός παράγοντας στην ανάπτυξη μια πλημμύρας.

Για την εύρεση ρεμάτων που καθίστανται ικανά να συσσωρεύουν ικανές ποσότητες νερού για την ανάπτυξη επιφανειακής απορροής, αναγκαία ήταν η δημιουργία ενός επιπέδου συσσώρευσης ροής (flow accumulation). Για να πραγματοποιηθεί το επίπεδο αυτό, όπως αναφέραμε και στην Ενότητα 3.2.1, έπρεπε να κατασκευαστεί το επίπεδο κατεύθυνσης ροής (flow direction) (βλέπε Σχήμα 4.6). Στον χάρτη φαίνεται η κατεύθυνση κάθε υδροσταγόνας από την στιγμή που θα φτάσει στο έδαφος. Για την δυτική Αττική η πλειοψηφία των υδροσταγώνων θα κινηθούν κυρίως βόρεια και νότια.

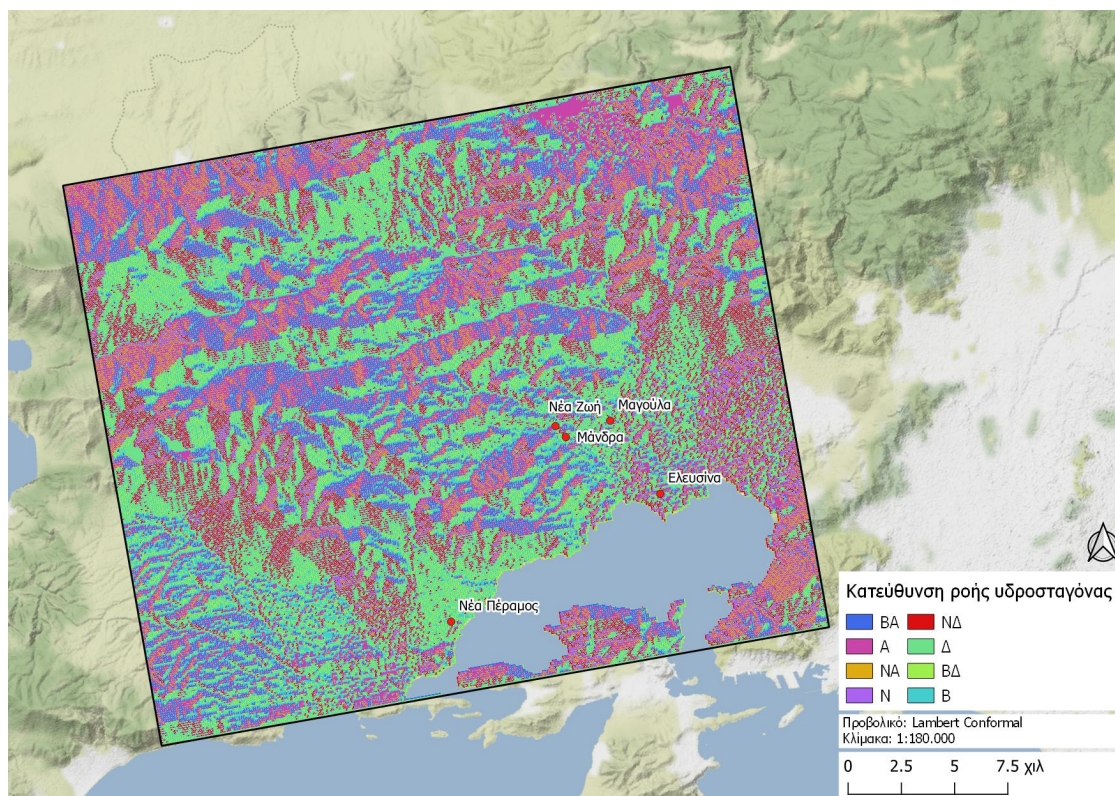
Με την πληροφορία αυτή, ήταν εφικτό να κατασκευαστεί το επίπεδο της συσσώρευσης ροής (βλέπε Σχήμα 4.7). Στον χάρτη διακρίνονται καλύτερα τα όρια και το μέγεθος του βασικού υδρογραφικού συστήματος το οποίο επηρεάζει το αποτέλεσμα ενός πλημμυρικού φαινομένου.



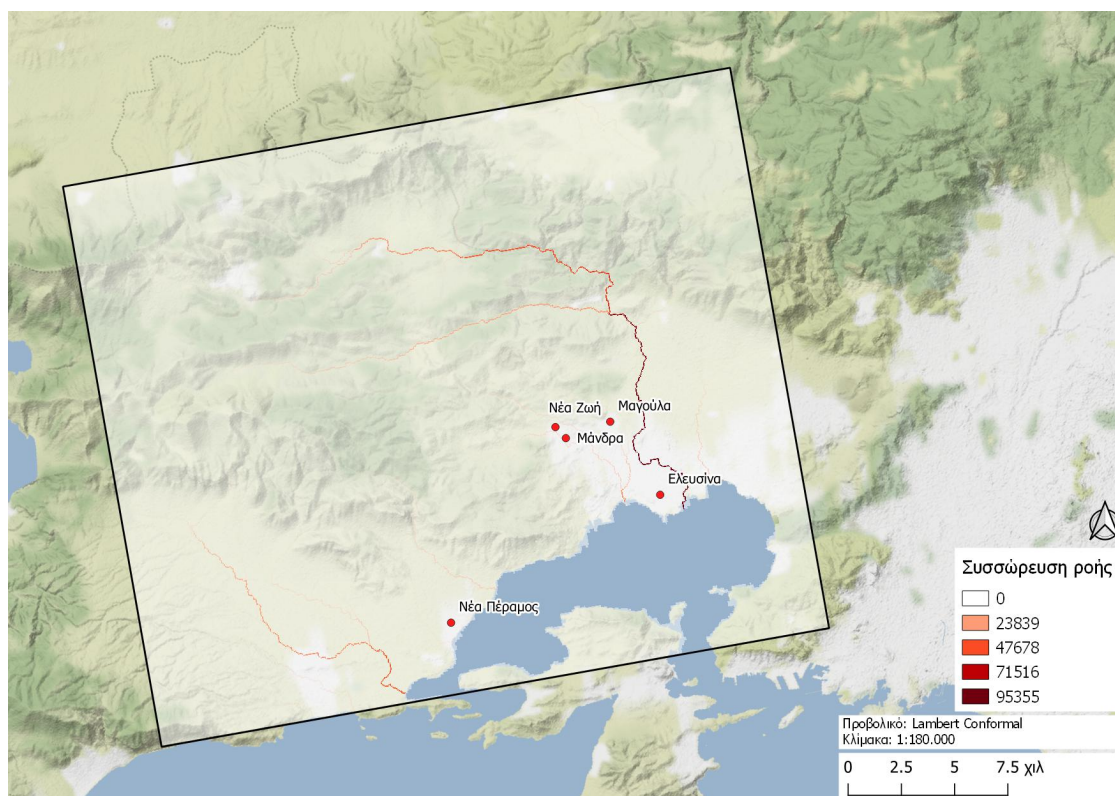
Σχήμα 4.4: Χάρτης τοπικού υδρογραφικού δικτύου και λεκάνης απορροής της Μάνδρας, από τα δεδομένα ASTER DEM, χωρικής διακριτικής ικανότητας $30m \times 30m$ (Ιδία επεξεργασία).



Σχήμα 4.5: Χάρτης ιεράρχησης του υδρογραφικού δικτύου (stream order) για την περιοχή μελέτης, χωρικής διακριτικής ικανότητας $50m \times 50m$ (Ιδία επεξεργασία).



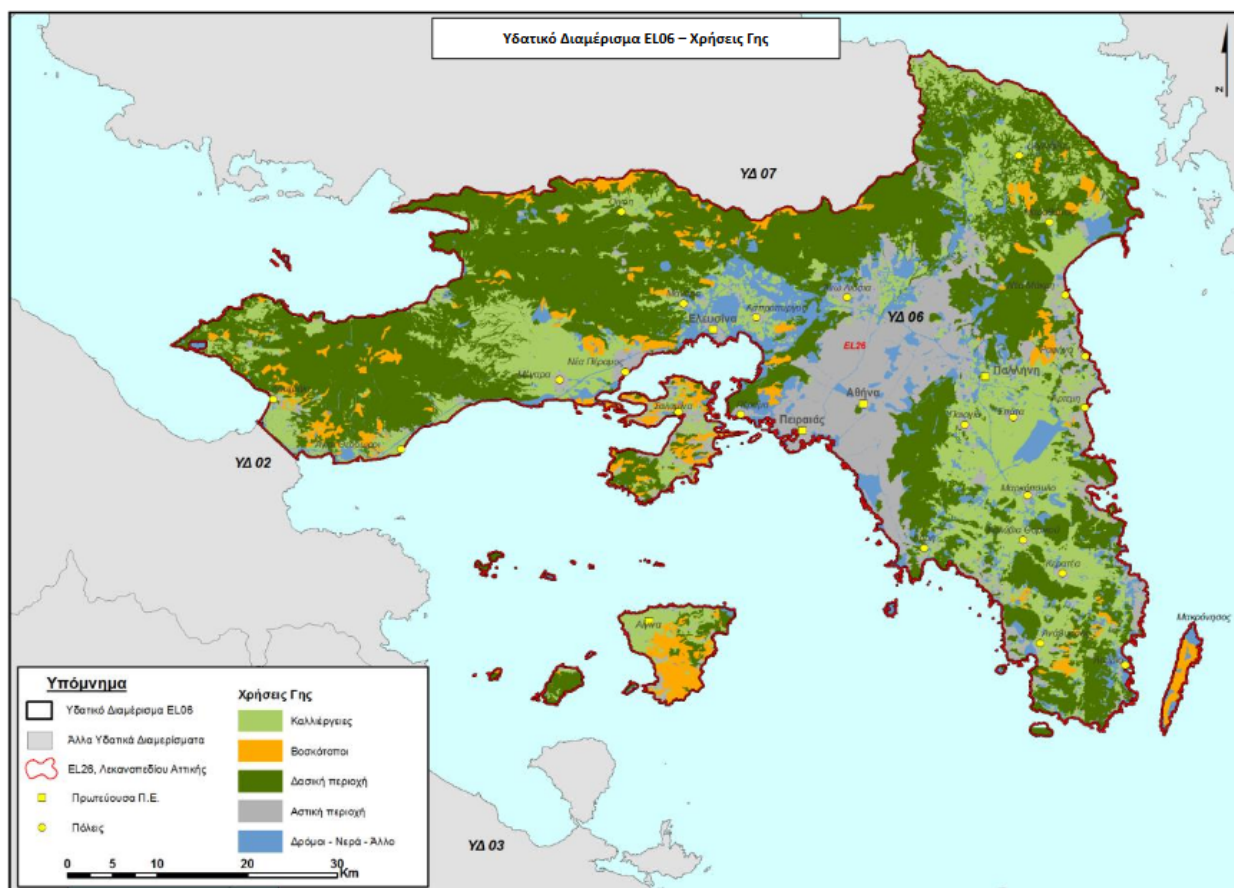
Σχήμα 4.6: Χάρτης κατεύθυνσης της ροής της υδροσταγόνας (flow direction) για την περιοχή μελέτης, χωρικής διακριτικής ικανότητας 50m x 50m (Ιδία επεξεργασία).



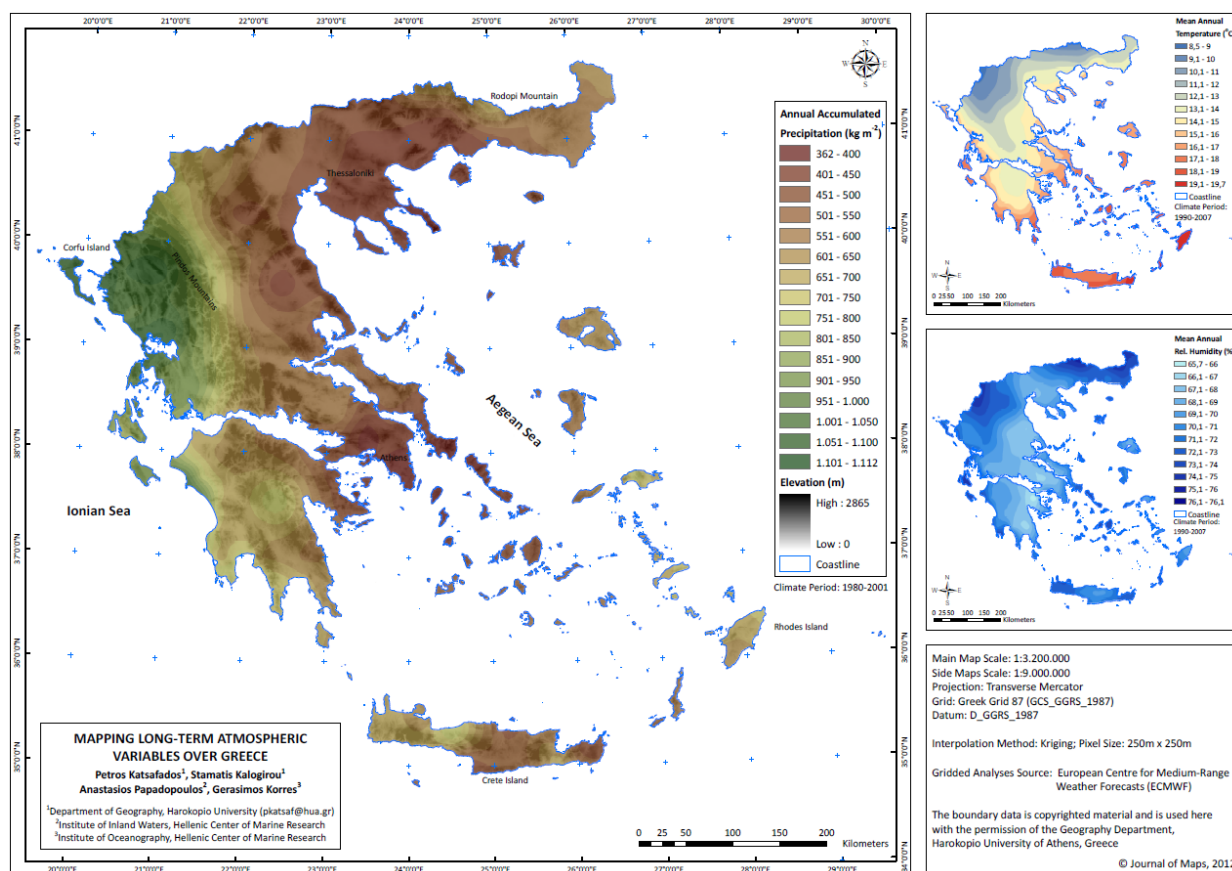
Σχήμα 4.7: Χάρτης συσσώρευσης ροής (flow accumulation) για την περιοχή μελέτης, χωρικής διακριτικής ικανότητας 50m x 50m (Ιδία επεξεργασία).

4.3 Χρήσεις γης

Οι χρήσεις γης της δυτικής Αττικής, αποτελούνται κυρίως από αστικές περιοχές, δρόμους και δασικές περιοχές (βλέπε Σχήμα 4.8). Στο βορειο-δυτικό τμήμα, υπάρχει μεγάλη δασική έκταση με ελάχιστα βοσκοτόπια ενώ το κομμάτι εντός των περιοχών αποτελούνται από δομημένη έκταση. Οι δασικές εκτάσεις θα μπορούσαν να αποτελέσουν παράγοντα εξομάλυνσης του φαινομένου άμα δεν υπήρχε έντονος κορεσμός τους, όπως φαίνεται στην Ενότητα 5.3.



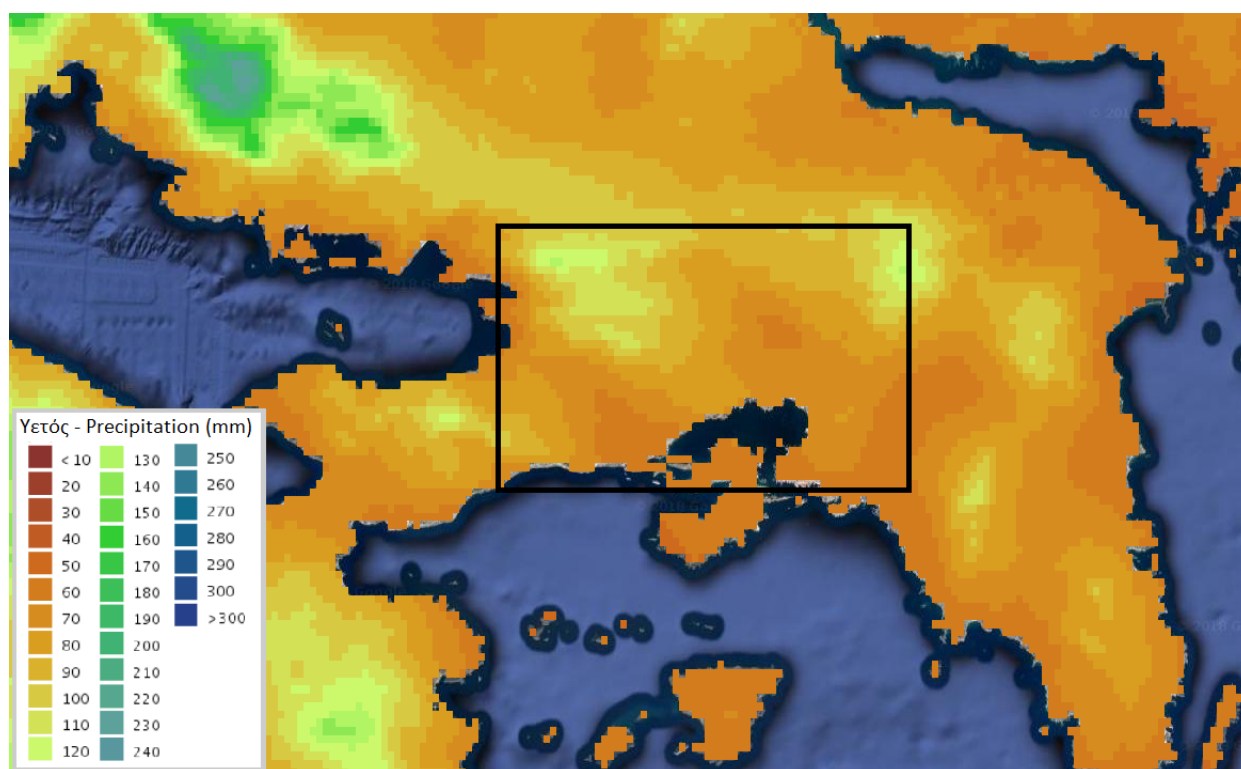
κατανομή της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας διακρίνουμε μια εμφανή διαίρεση της χώρας μεταξύ νότου και βορά, με την μέση ετήσια θερμοκρασία στην περιοχή της δυτικής Αττικής να κυμαίνεται στους 17.1-19°C.



Σχήμα 4.9: Κλιματικός χάρτης του μέσου ετήσιου ύψους υετού στην Ελλάδα (Katsafados et al. 2012).

Στην κατανομή της μέσης ετήσιας σχετικής υγρασίας, υπάρχει ένα πρότυπο το οποίο είναι παρόμοιο με αυτό της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας. Ανεξαρτήτως της εμφανούς μεταβλητότητας μεταξύ νότου-βορά σε όρους μέσης ετήσιας θερμοκρασίας, η χωρική μεταβολή της σχετικής υγρασία στην Ελλάδα υποδηλώνει μια σημαντική διαίρεση ανατολής-δύσης. Αυτό συμβαίνει διότι τα βουνά της Πίνδου λειτουργούν ως ένα φυσικό όριο (προκαλώντας ορογραφικές καταιγίδες) που χωρίζει το υγρότερο δυτικό τμήμα από το ανατολικό τμήμα της Ελληνικής χερσονήσου (Katsafados et al. 2012). Στην δυτική Αττική οι τιμές μέσης ετήσιας σχετικής υγρασίας κυμαίνονται μεταξύ 66.1-69%.

Η δυτική Αττική χαρακτηρίζεται από ξηρασία και υψηλές θερμοκρασίες, το οποίο φαίνεται και από το μέσο μηνιαίο ύψος υετού τον Νοέμβριο. Στον χάρτη μέσου μηνιαίο ύψος υετού για τον μήνα Νοέμβρη, οι τιμές κυμαίνονται από 40-60mm (βλέπε Σχήμα 4.10). Παρόλα αυτά ο Νοέμβριος του 2017 φαίνεται να διαφοροποιείται αρκετά από τους προηγούμενους, καθώς έριξε το 40% της ετήσιας βροχόπτωσης μέσα σε 7 ώρες (NewsIT 2017b).



Σχήμα 4.10: Κλιματικός χάρτης του μέσου μηνιαίο ύψος υετού για τον μήνα Νοέμβρη για την περίοδο 1971-2000. Στο μαύρο πλαίσιο περικλείεται η λεκάνη απορροής της Μάνδρας (Κλιματικός Άτλαντας Ελλάδας, ΕΜΥ).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

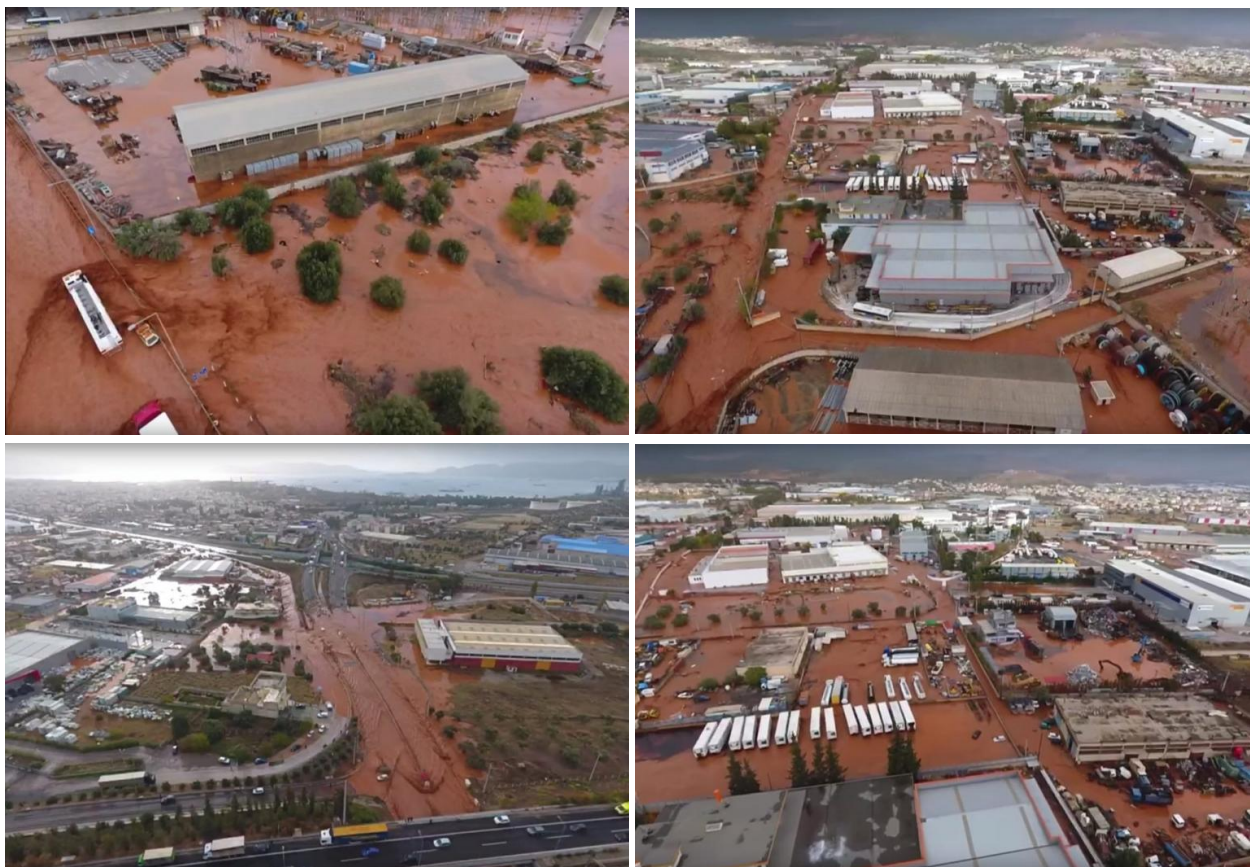
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.1 Περιγραφή πλημμυρικού γεγονότος

Ο Νοέμβριος του 2017 χαρακτηρίστηκε από μεγάλα ύψη βροχοπτώσεων, όπου σε ορισμένες περιπτώσεις είχαν και πολύ μεγάλες εντάσεις. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με τις εδαφικές συνθήκες (κορεσμός εδάφους), προκάλεσε τοπικά καταστροφικές πλημμύρες. Αναμφίβολα το σημαντικότερο πλημμυρικό επεισόδιο ήταν εκείνο της Μάνδρας και Νέας Περάμου στις 15/11, λόγω της απώλειας πολλών ανθρώπινων ζωών, ωστόσο μεγάλες υλικές ζημιές καταγράφηκαν επίσης σε Άργος-Ναύπλιο 8/11, Κέρκυρα 11/11, Σύμη 13/11, Θεσσαλία και κεντρική Μακεδονία 15-17/11 στα όρια των λεκανών απορροής των ποταμών Πηνειού και Αλιάκμονα (ΕΜΥ:Κλιματικό δελτίο 2017).

Ένα χαμηλό βαρομετρικό σύστημα βορειο-δυτικά της Ελλάδας προκάλεσε ακραία καιρικά φαινόμενα που χαρακτηρίστηκαν τα σημαντικότερα καιρικά φαινόμενα για το έτος του 2017. Οι ισχυρές καταιγίδες λόγω στασιμότητας του συστήματος (από τις 14 Νοεμβρίου έως και τις 19 Νοεμβρίου) ήταν επαρκείς για την δημιουργία της πλημμύρας στην Μάνδρα.

Η πλημμύρα της Τετάρτης 15/11/2017 στη δυτική Αττική άφησε πίσω της 24 νεκρούς, κυρίως στη Μάνδρα, και ανυπολόγιστες υλικές καταστροφές (βλέπε Σχήμα 5.1 και 5.2). Ενώ το φαινόμενο ήταν τοπικό, ήταν αρκετό για να προκαλέσει την τρίτη μεγαλύτερη καταστροφή από πλημμύρες στην Αττική, όσον αφορά στον αριθμό θυμάτων. Είχε προηγηθεί μεγάλη πλημμύρα στα δυτικά προάστια, στις 5 και 6 Νοεμβρίου το 1961 και στην ίδια περιοχή στις 2 και 3 Νοεμβρίου το 1977 (NewsIT 2017a). Το φαινόμενο ξεκίνησε με ελάχιστα χιλιοστά υετού από την προηγούμενη ημέρα 14/11, δημιουργώντας ιδανικές συνθήκες κορεσμού του εδάφους.



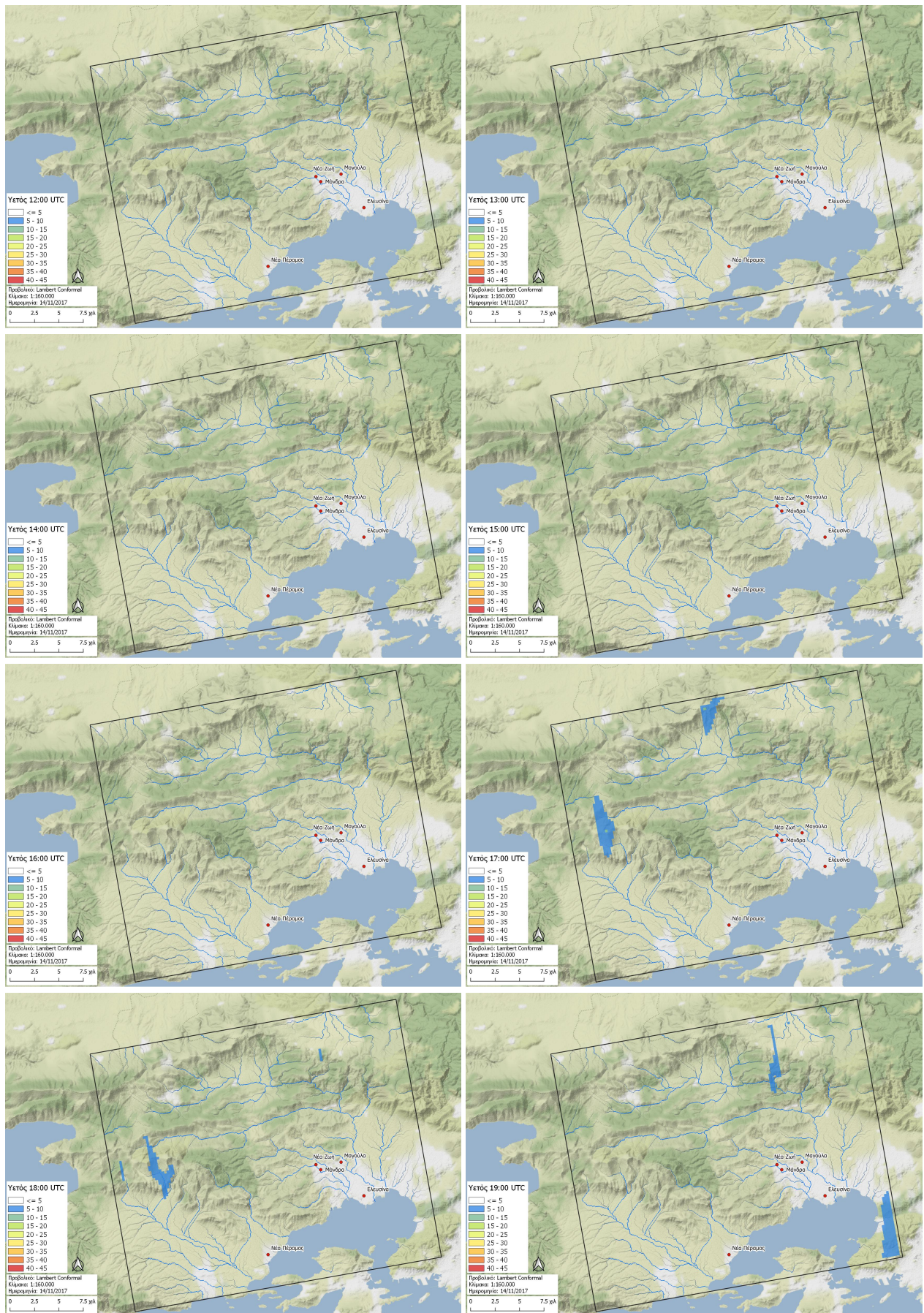
Σχήμα 5.1: Εικόνες από drone που αποτυπώνουν το μέγεθος και την έκταση της πλημμύρας, εντός της πόλης της Μάνδρας (NewsIT 2017a).

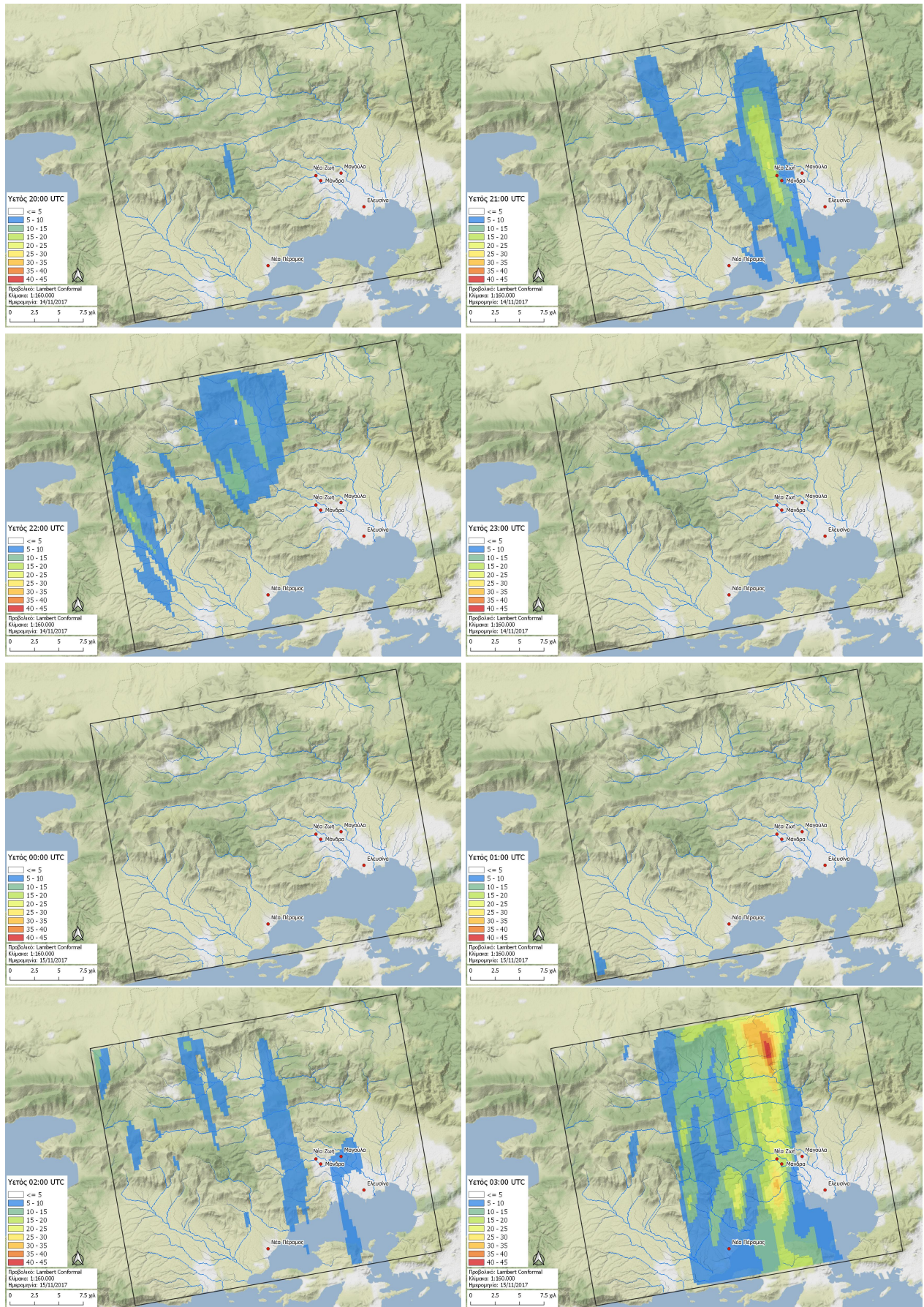


Σχήμα 5.2: Δορυφορικές εικόνες πολύ υψηλής ανάλυσης $0.31\text{m} \times 0.31\text{m}$ από τον δορυφόρο WorldView-4 στις 21/11/2017 για την περιοχή της Μάνδρας (BEYOND 2017).

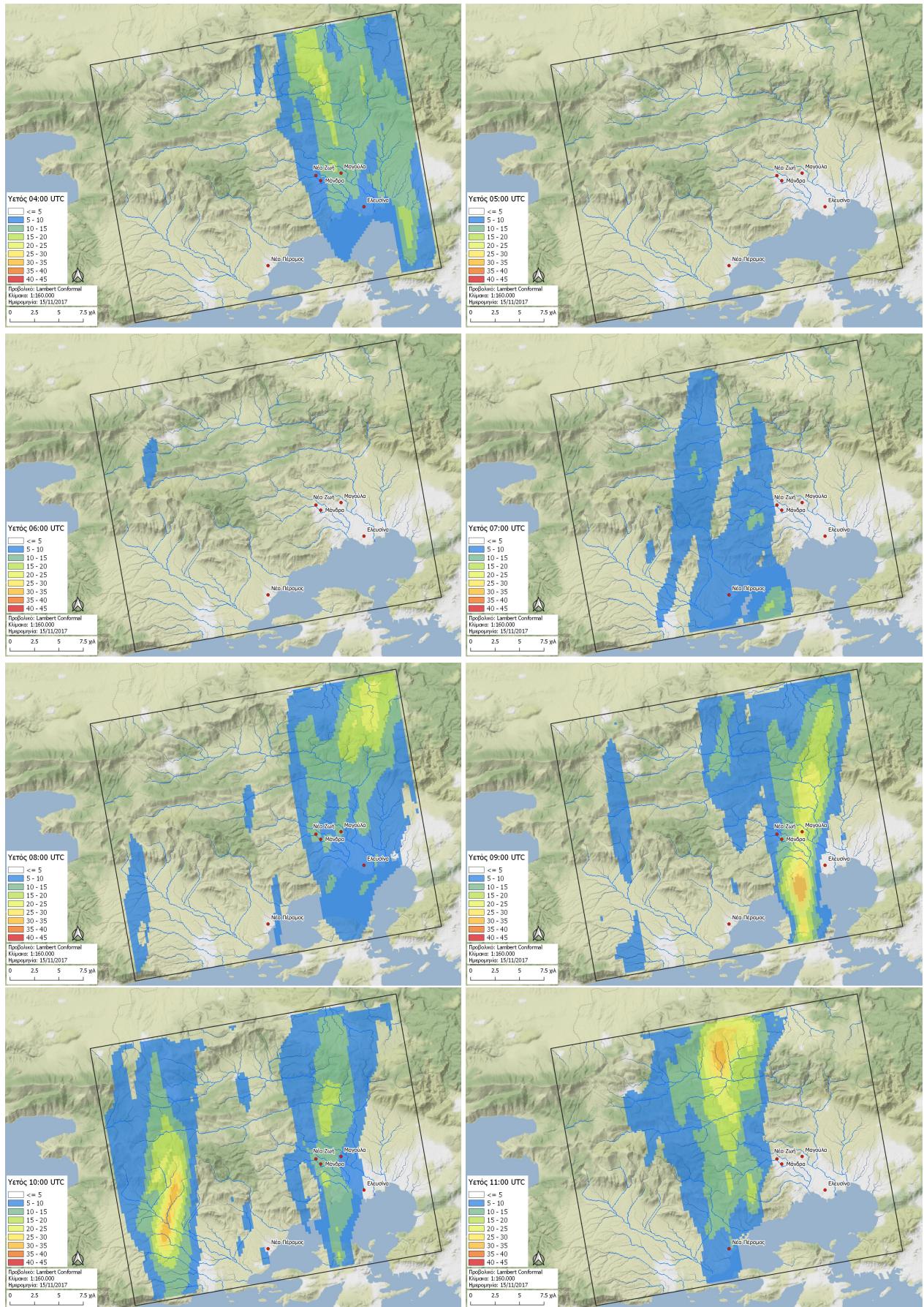
Ακολουθεί συνοπτικά η εξέλιξη της καταιγίδας, καθώς θα αναλυθεί λεπτομερώς στην Ενότητα 5.4. Ο χρόνος είναι σε μονάδες UTC, οπότε τοπική ώρα Ελλάδας κάθε φορά θα είναι $\text{UTC} + 3\text{h}$. Το πρώτο δωρο 12:00-19:00 UTC (βλέπε Σχήμα 5.3), δεν παρουσιάστηκαν τοπικά σημεία τα οποία ξεπέρασαν τα 5mm ύψος υετού. Απο τις 20:00-03:00 UTC (βλέπε Σχήμα 5.4), εμφανίζονται στα βόρεια και δυτικά της αστικής περιοχής της Μάνδρας και Μαγούλας κάποιες τοπικές καταιγίδες, αποδίδοντας ύψος υετού (ολικό μέγιστο) έως και 45mm . Στις

04:00-11:00 UTC (βλέπε Σχήμα 5.5), παρουσιάζεται ύψος υετού έως και ($40mm$) στα βόρεια, βορειο-ανατολικά της Μάνδρας και νότιο-δυτικά της Νέας Περάμου.



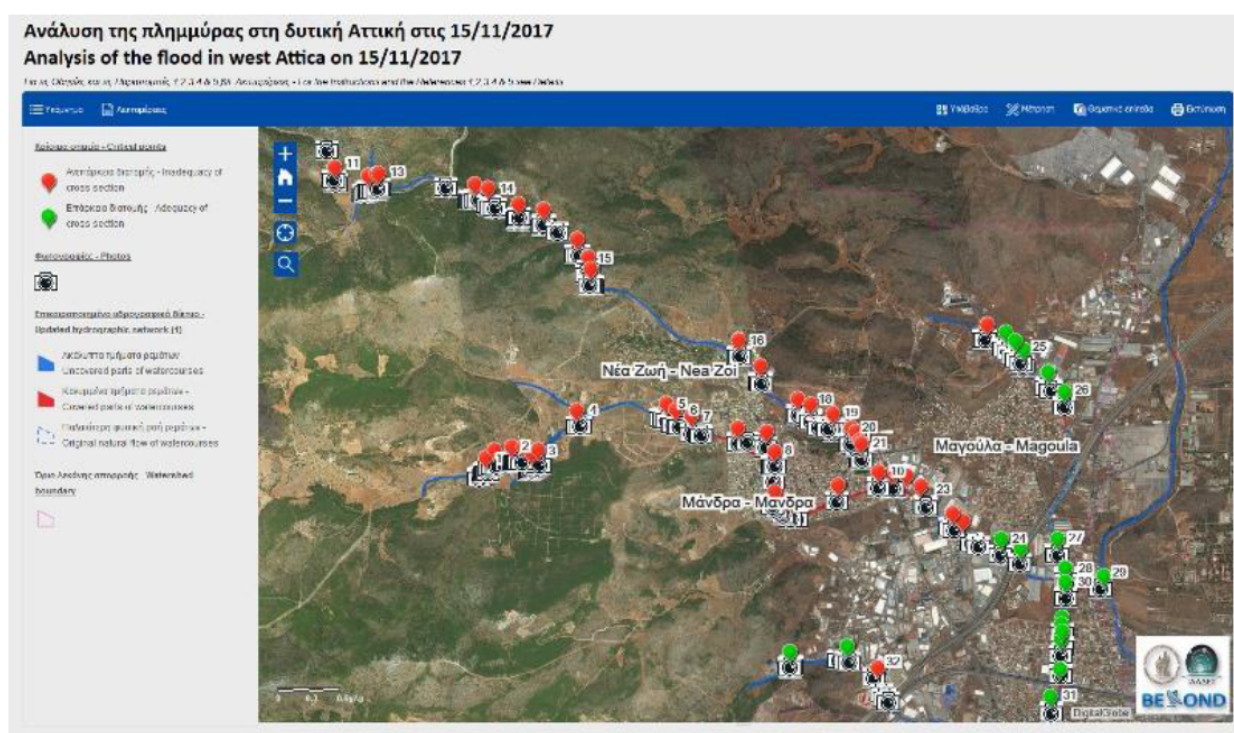


Σχήμα 5.4: Χωρική κατανομή μονώρης αθροιστικής βροχόπτωσης (mm) για τις 14-15/11/2017 και ώρες 20:00-03:00 UTC (Ιδία επεξεργασία).



Σχήμα 5.5: Χωρική κατανομή μονώρης αθροιστικής βροχόπτωσης (mm) για τις 15/11/2017 και ώρες 04:00-11:00 UTC (Ιδία επεξεργασία).

Βασική αιτία της καταστροφής αυτής, εκτός απο τον φυσικό παράγοντα, ήταν και ο ανθρωπογενής, κυρίως οι δομημένες περιοχές κατα μήκος της κοίτης του υδρογραφικού. Σύμφωνα με μελέτη του BEYOND (2017), προκύπτει ότι η αστική επέκταση την τελευταία 20ετία παρεμπόδισε περεταίρω τη φυσική ροή στην περίπτωση του ρέματος Σούρες, βόρεια της αστικής περιοχής της Μάνδρας. Ωστόσο η υπάρχουσα δόμηση προ εικοσαετίας παρεμπόδιζε ήδη τη φυσική ροή του ρέματος Αγίας Αικατερίνης/Κατσημίδα, εντός της αστικής περιοχής της Μάνδρας. Πλημμύρισε το μεγαλύτερο τμήμα της Μάνδρας, κυρίως η ζώνη εκατέρωθεν της παλαιότερης φυσικής κοίτης του ρέματος Αγίας Αικατερίνης/Κατσημίδα. Επίσης, πλημμύρισε ένα πολύ μεγάλο τμήμα της βιομηχανικής περιοχής εκατέρωθεν της Εθνικής Οδού Ελευσίνας-Θηβών, από ανάντη του Εργοταξίου του δήμου Μάνδρας μέχρι κατάντη της Αττικής οδού. Τέλος, πλημμύρισε και μια περιοχή δυτικά της αστικής περιοχής της Μαγούλας.



Σχήμα 5.6: Τα κρίσιμα σημεία όπου υπήρχε επάρκεια και ανεπάρκεια των υφιστάμενων τεχνικών έργων ή και πλήρης ανυπαρξία μέτρων αντιπλημμυρικής προστασίας (BEYOND 2017).

Ως ενισχυτικοί παράγοντες της πλημμύρας θεωρήθηκαν οι αυθαίρετες ανθρώπινες παρεμβάσεις εντός της κοίτης των ποταμών και η ανεπάρκεια των υφιστάμενων τεχνικών έργων ή και πλήρης ανυπαρξία μέτρων αντιπλημμυρικής προστασίας και αποχέτευσης οδοποιίας (βλέπε Σχήμα 5.6). Ως χαρακτηριστικά παραδείγματα αναφέρονται τα εξής:

- I. Η τοποθεσία της Μάνδρας βρίσκεται μέσα στη φυσική ροή του ρέματος Αγίας Αικατερίνης/Κατσημίδα χωρίς να υπάρχει εκτροπή της κοίτης ή κάποιων αντιπλημμυρικών έργων (βλέπε Σχήμα 5.7)

- II. Η φυσική ροή του ρέματος Σούρες παρεμποδίζεται σε διάφορα σημεία από ιδιωτικές και δημοτικές εγκαταστάσεις
- III. Υπάρχουν δρόμοι στα δυτικά και βόρεια της αστικής περιοχής της Μάνδρας, που διασχίζουν τα ρέματα χωρίς καμία διευθέτηση της κοίτης

Όμως, υπήρχαν και τεχνικά έργα που λειτούργησαν με επάρκεια και εξομάλυναν την πλημμύρα. Ως χαρακτηριστικά παραδείγματα αναφέρονται τα εξής:

- I. Η διευθέτηση του ρέματος Σούρες, ήταν γενικά επαρκής
- II. Τα τεχνικά έργα στην κοίτη του ρέματος Μικρό Αικατερίνη βόρεια και ανατολικά της αστικής περιοχής της Μαγούλας ήταν επαρκή
- III. Η εκτροπή των διευθετημένων ρεμάτων Σούρες και Μικρό Αικατερίνη, μετά την συμβολή τους, μέσω κλειστού τεχνικού έργου και η εκβολή τους στον Σαρανταπόταμο ήταν επαρκής και αποσόβησε την πλημμύρα της Ελευσίνας.

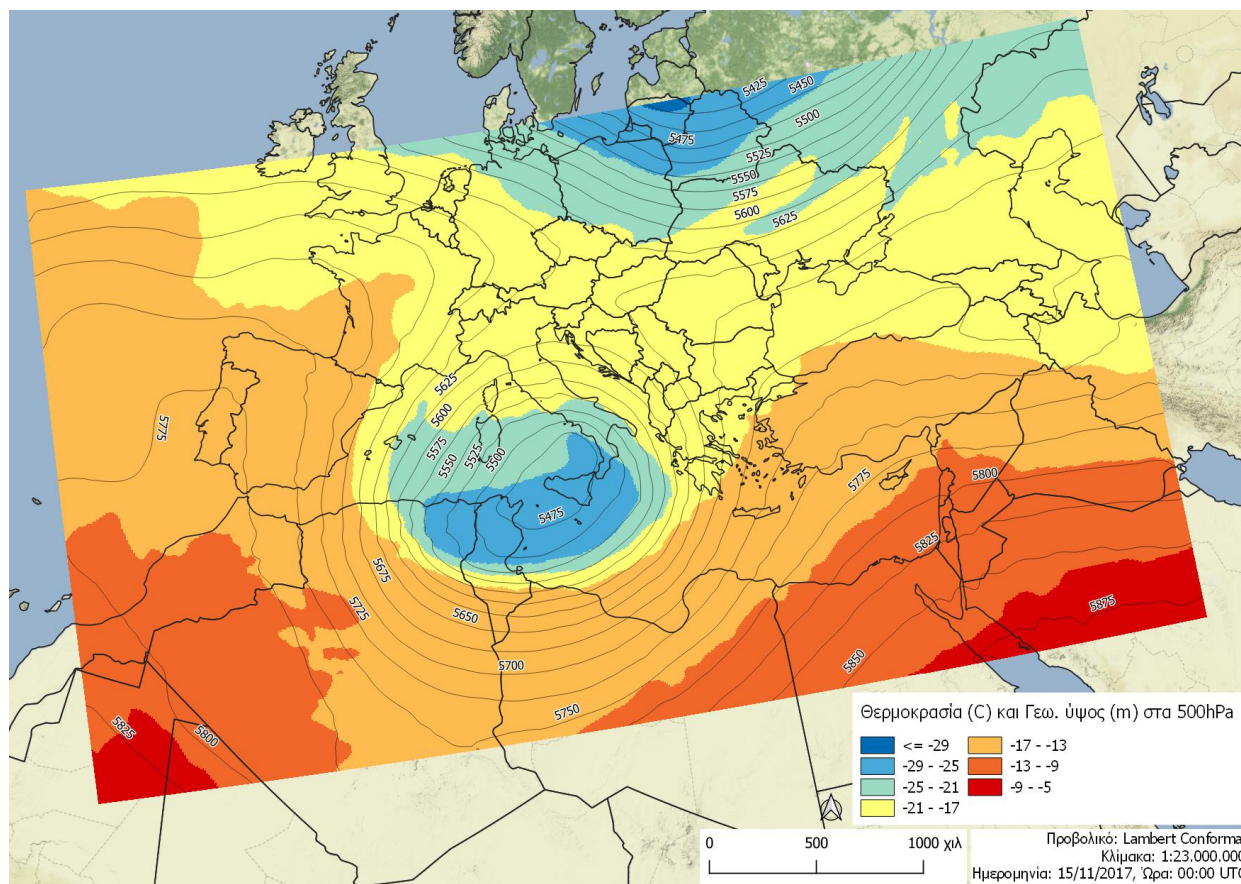
Όσον αφορά την επιρροή των διαχρονικά καμένων εκτάσεων στην πλημμύρα, φαίνεται να κρίνεται μικρή. Το συνολικό ποσοστό των καμένων εκτάσεων ως προς την έκταση της λεκάνης απορροής προκύπτει να είναι το 34.56%. Ωστόσο, αυτό οφείλεται ουσιαστικά στην παλαιότερη πυρκαγιά στο όρος Πατέρα, το έτος 1986, με ποσοστό καμένης γης 29.04%, έκταση η οποία έχει πλέον αναδασωθεί. Ομοίως έχει αναδασωθεί η επόμενη μεγαλύτερη καμένη έκταση από την πυρκαγιά ανατολικά της κοινότητας Παλαιοκούντουρα με ποσοστό 3.50% το έτος 1989. Όλες οι άλλες πυρκαγιές μαζί, μετά το 1989 έως και σήμερα, έκαψαν μόλις το 2.02% της λεκάνης απορροής (BEYOND 2017).



Σχήμα 5.7: Η τοποθεσία της Μάνδρας μέσα στη φυσική ροή του ρέματος Αγίας Αικατερίνης/Κατσημίδη, καθώς και η γενικά επαρκής διευσθέτηση του ρέματος Σούρες (Lekkas et al. 2017).

5.2 Συνοπτική κατάσταση ατμόσφαιρας

Στην ενότητα αυτή αναφέρονται οι συνοπτικές συνθήκες στη Μεσόγειο θάλασσα που οδήγησαν στην καταστροφική πλημμύρα της δυτικής Αττικής. Στις 13 Νοεμβρίου 2017, μια μάζα ψυχρού αέρα συνδέθηκε με μια καλά καθορισμένη σφήνα υφέσεως βόρειο και βορειο-ανατολικής διεύθυνσης εκτεινόμενη από την βόρεια Ιταλία μέχρι και την Λιβύη, οδηγώντας στη δημιουργία ενός χαμηλού βαρομετρικού πάνω από την βόρεια Ιταλία και ένα δευτερεύον χαμηλό βαρομετρικό σύστημα στα νοτιοανατολικά της Σικελίας. Στις 14 Νοεμβρίου και τα δύο αυτά συστήματα συγχωνεύτηκαν σε ένα κύτταρο ισχυρής βροχόπτωσης πάνω από το Τυρρηνικό πέλαγος, συνοδευόμενο από ψυχρή αέρια μάζα ανώτερης ατμόσφαιρας η οποία ενίσχυσε την αστάθεια του κυττάρου, φτάνοντας στους -20°C στο κέντρο της σφήνας υφέσεως προερχόμενη από την βορειο-ανατολική Ευρώπη. Αυτό το βαθύ χαμηλό βαρομετρικό παρέμεινε σχεδόν στάσιμο κατά τη διάρκεια της περιόδου από τις 14 Νοεμβρίου έως και τις 19 Νοεμβρίου, καλύπτοντας την Ιταλία, Σικελία και το Τυρρηνικό Πέλαγος, λόγω εμποδισμού της ροής στην ανώτερη ατμόσφαιρα που σχηματίστηκε στην ανατολική Μεσόγειο στα 500hPa (βλέπε Σχήμα 5.8). Στο επίπεδο των 500hPa η ελάχιστη θερμοκρασία πάνω από την Τυνησία και Σικελία βρίσκεται στους -29°C .

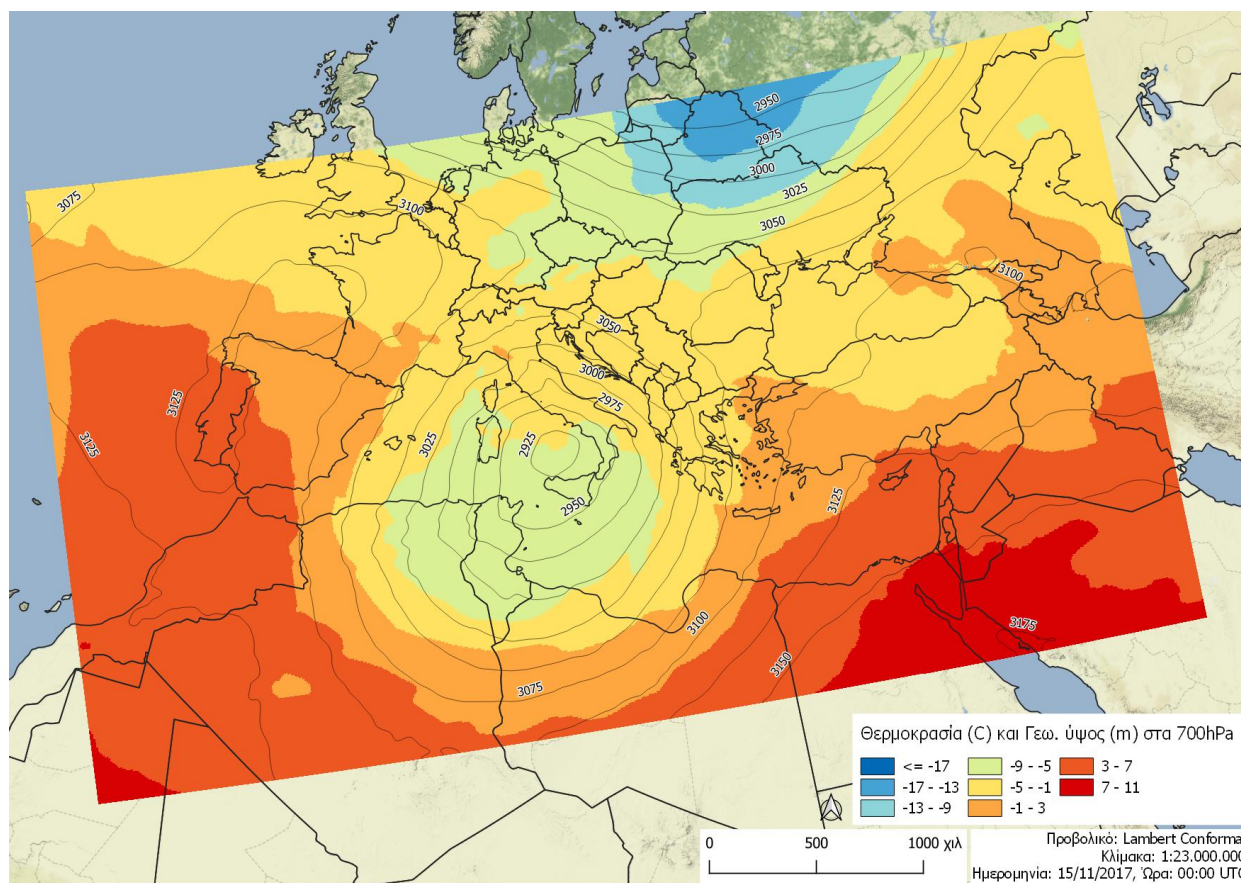


Σχήμα 5.8: Χάρτης θερμοκρασίας και γεωδυναμικού ύψους στις 15 Νοεμβρίου 2017 (00:00 UTC) στα 500hPa , χωρικής ανάλυσης $900\text{m} \times 900\text{m}$ (Ιδία επεξεργασία).

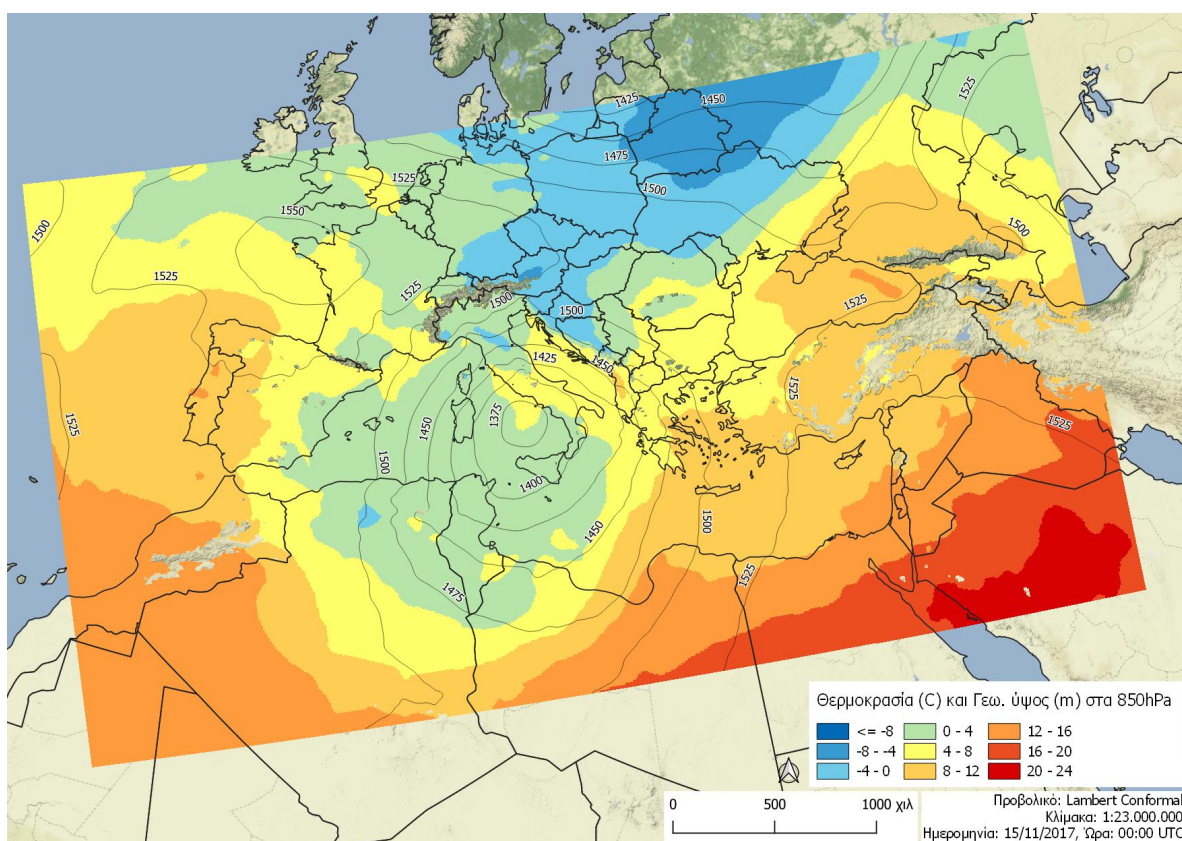
Στις 15 Νοεμβρίου, την ημέρα που σημειώθηκε η πλημμύρα, το σύστημα ήταν καλά οργανωμένο, υποστηριζόμενο από μια σφήνα υφέσεως στα $700hPa$ και $850hPa$ (βλέπε Σχήμα 5.9 και 5.10). Στο επίπεδο των $700hPa$ η ελάχιστη θερμοκρασία φτάνει και τους $-9^{\circ}C$ πάνω από την Σικελία και Τυνησία, ενώ στο επίπεδο των $850hPa$ κυμαίνεται στους $-4^{\circ}C$.

Τα αποτελέσματα αυτού του εμποδισμού μπορούν να φανούν και στην επιφανειακή θερμοκρασία, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.11, όπου ανάμεσα στην δυτική Ελλάδα και ανατολική Ιταλία παρατηρείται μια διαφορά θερμοκρασίας της τάξης των $5^{\circ}C$ τουλάχιστον.

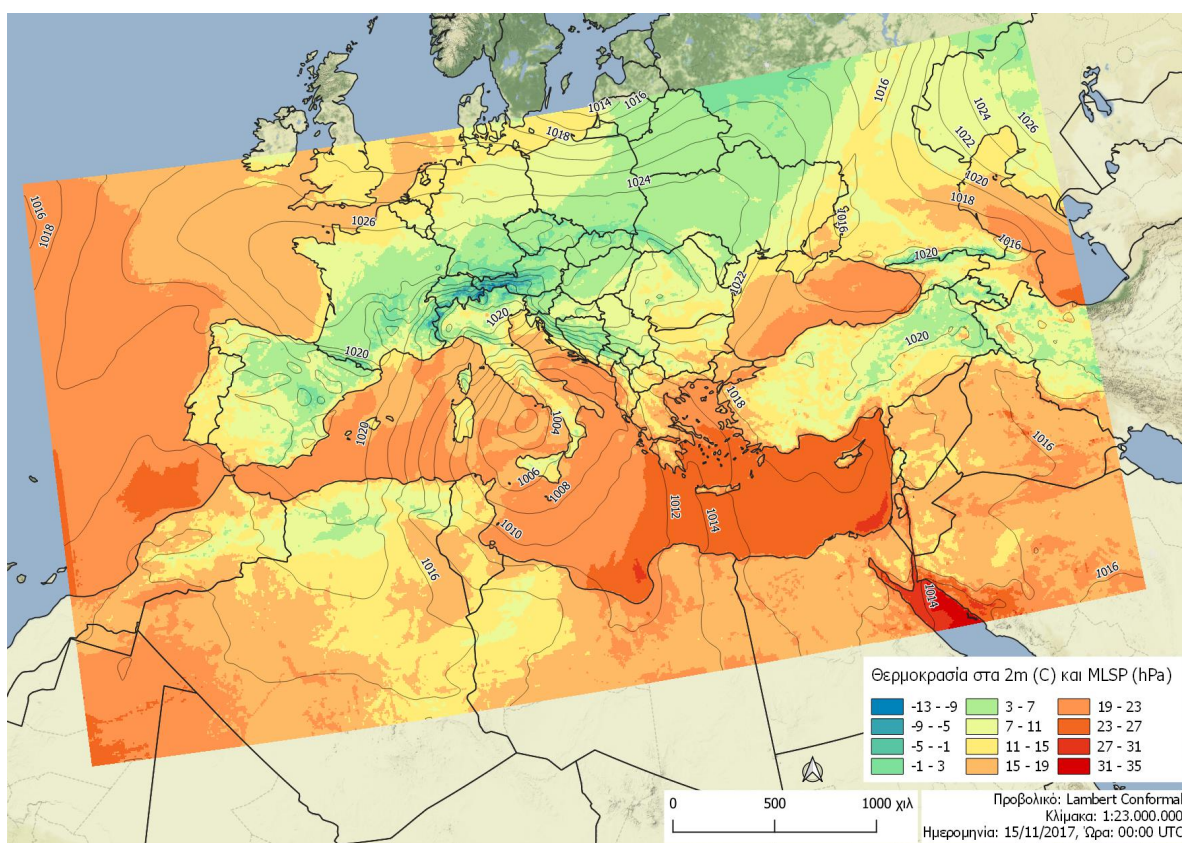
Στην ανατολική άκρη του κυκλωνικού συστήματος σχηματίστηκε ένα ψυχρό μέτωπο, το οποίο συνδέεται με τις σοβαρές καταιγίδες στην δυτική Αττική, που και τελικά οδήγησαν σε σοβαρές πλημμύρες στη Μάνδρα. Οι άνεμοι στα $10m$ του συστήματος αυτού παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.12, λαμβάνοντας μέγιστη τιμή έντασης ανέμου τα $20 - 25ms^{-1}$ στην βορειο-ανατολική Ιταλία, Σλοβενία, Κροατία, Αλβανία και δυτική Ελλάδα. Το σύστημα συνέχισε να δίνει μεγάλα ποσά υετού μέχρι τις 16 Νοεμβρίου στην ηπειρωτική Ελλάδα, μέχρι που κινήθηκε δυτικά στις 17 Νοεμβρίου και σταμάτησε να επηρεάζει την περιοχή.



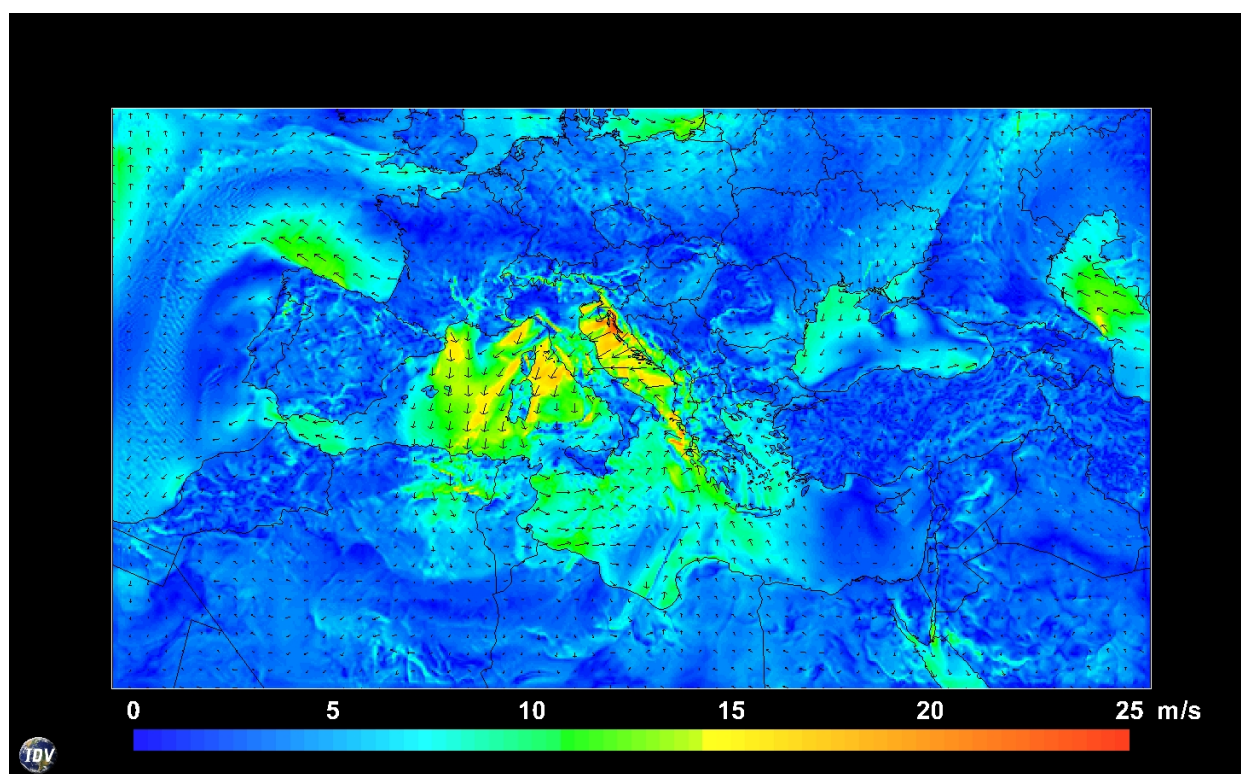
Σχήμα 5.9: Χάρτης θερμοκρασίας και γεωδυναμικού ύψους στις 15 Νοεμβρίου 2017 (00:00 UTC) στα $700hPa$, χωρικής ανάλυσης $900m \times 900m$ (Ιδία επεξεργασία).



Σχήμα 5.10: Χάρτης θερμοκρασίας και γεωδυναμικού ύψους στις 15 Νοεμβρίου 2017 (00:00 UTC) στα 850hPa, χωρικής ανάλυσης $900m \times 900m$ (Ιδία επεξεργασία).



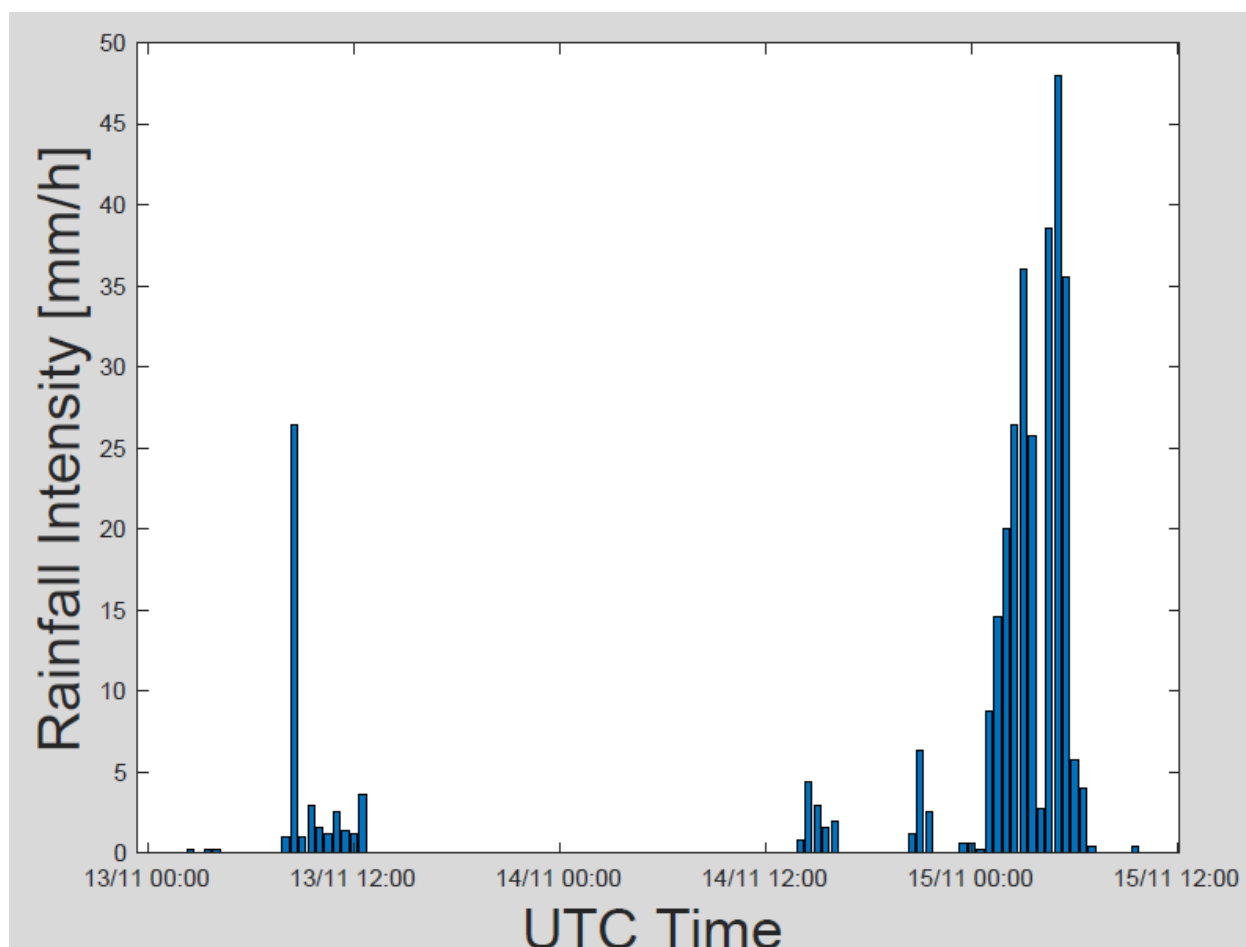
Σχήμα 5.11: Χάρτης θερμοκρασίας και επιφανειακής πίεσης από την μέση στάθμη θάλασσας στις 15 Νοεμβρίου 2017 (00:00 UTC) στα 2m, χωρικής ανάλυσης $900m \times 900m$ (Ιδία επεξεργασία).



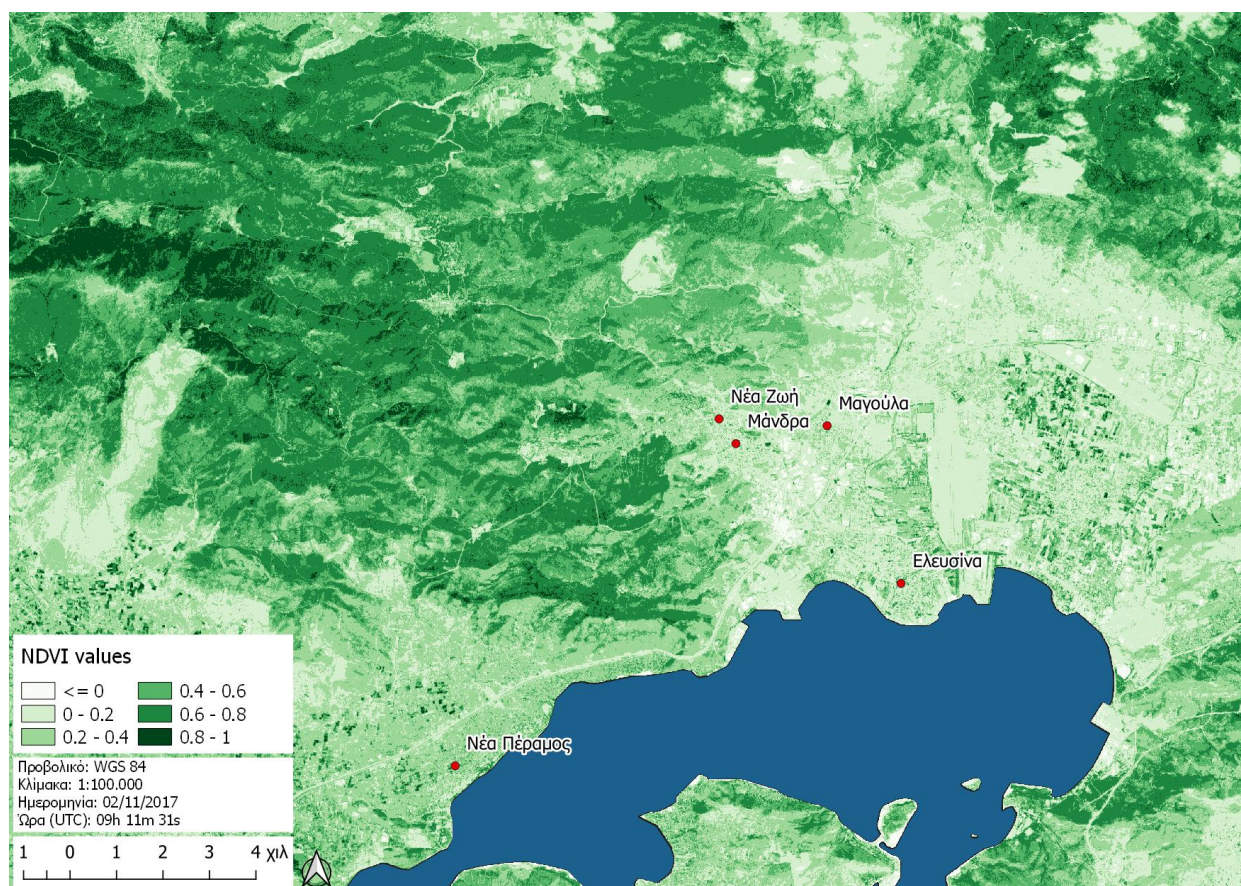
Σχήμα 5.12: Χάρτης έντασης και διεύθυνσης του πραγματικού ανέμου στις 15 Νοεμβρίου 2017 (00:00 UTC) στα 10m, χωρικής ανάλυσης $900m \times 900m$ (Ιδία επεξεργασία).

5.3 Βλάστηση και υγρασία εδάφους

Στην Ενότητα 2.1, αναφέρθηκε πως οι παράγοντες της βλάστησης και του εδαφικού κορεσμού, είναι καθοριστικοί για την εξέλιξη ενός πλημμυρικού φαινομένου. Σε αιφνίδιες πλημμύρες ο παράγοντας επιρροής δεν είναι εκτεταμένος, εξαιτίας του μικρού χρονικού διαστήματος και της μεγάλης έντασης της βροχής, όμως η συμβολή στην εξομάλυνση του φαινομένου είναι υπαρκτή. Χρησιμοποιώντας τους δείκτες NDVI και NDWI_G, ήταν εφικτός ο εντοπισμός της υγιούς βλάστησης και τον κορεσμό της αντίστοιχα. Στο Σχήμα 5.14 και Σχήμα 5.15 φαίνεται η χωρική κατανομή των δεικτών στις 02/11/2017, με χωρική ανάλυση $10m \times 10m$ για NDVI και $20m \times 20m$ για NDWI_G. Τα αποτελέσματα μπορεί να παράχθηκαν 13 ημέρες προγενέστερα της πλημμύρας, όμως η διαφοροποίηση των δεικτών μέσα σε ένα τόσο μικρό χρονικό διάστημα είναι αμελητέα. Οι συνθήκες που επικρατούσαν προγενέστερα της λήψης της εικόνας, ήταν παρόμοιες με αυτές που επικράτησαν προγενέστερα της πλημμύρας, άρα η απόκλιση από την πραγματικότητα είναι ελάχιστη (βλέπε Σχήμα 5.13).



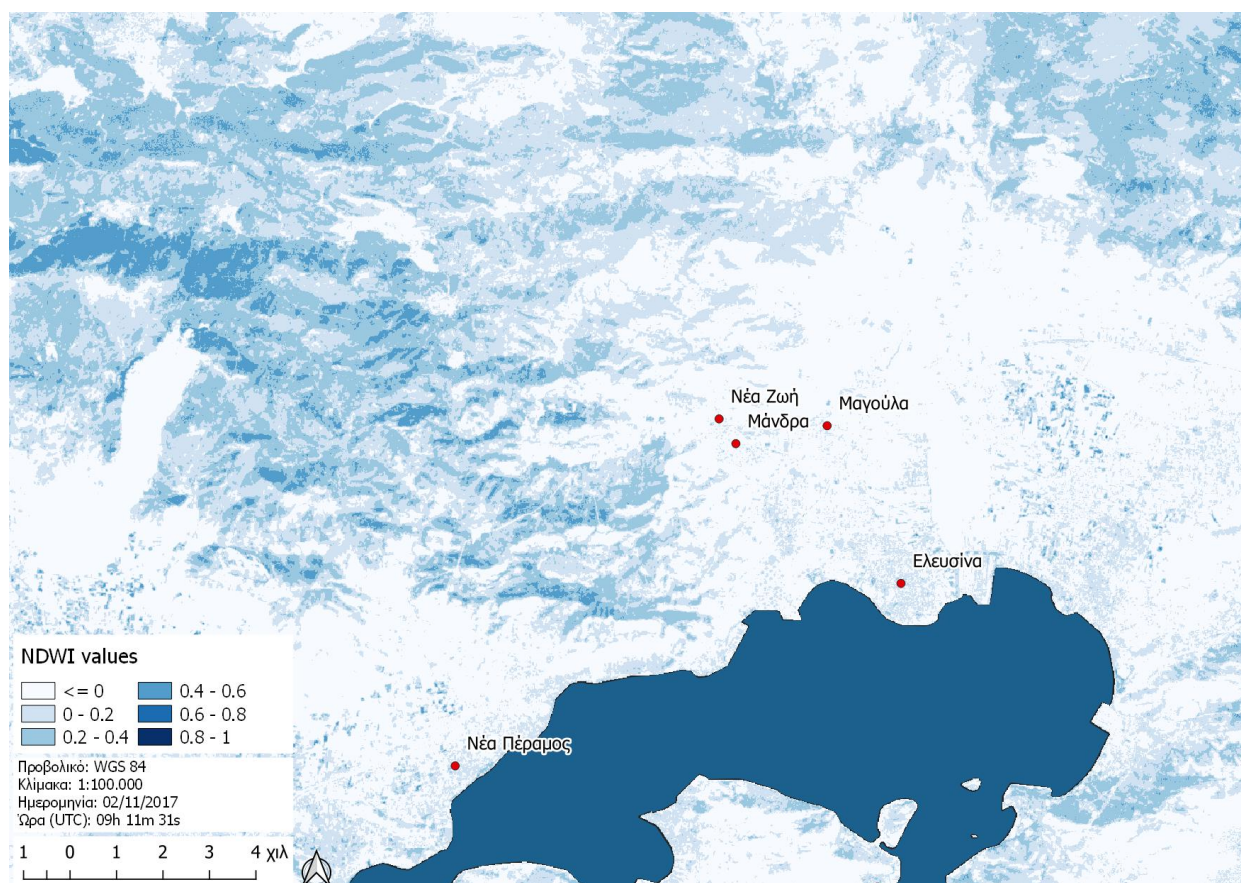
Σχήμα 5.13: Τα χιλιοστά υετού που έπεσαν τις ημέρες προγενέστερα της πλημμύρας στην Μάνδρα στις 15/11/2017 (Lekkas et al. 2017).



Σχήμα 5.14: Οπτικοποίηση της χωρικής κατανομής του δείκτη NDVI για την ευρύτερη περιοχή της δυτικής Αττικής στις 02/11/2017 (Ιδία επεξεργασία).

Όσον αφορά τον NDVI, το πρότυπο του διαμορφώνεται σύμφωνα με την μορφολογία του ορεινού όγκου στα δυτικά της Μάνδρας και Νέας Ζωής. Οι τιμές του δείκτη κυμαίνονται από 0-0.2 μέσα στην αστική περιοχή της Μάνδρας, ενώ δυτικά και βόρεια της αστικής περιοχής ο δείκτης αυξάνεται σε τιμές που κυμαίνονται από 0.6-0.8, το οποίο δηλώνει έντονη εμφάνιση υγιούς βλάστησης. Κατά την διάρκεια του φαινομένου, η δασική έκταση δυτικά και νοτιο-δυτικά της αστικής περιοχής, ήταν ικανή να απορροφήσει μια ποσότητα των υδροσταγόνων που έφτασαν στην επιφάνεια. Κοντά στον Σαρανταπόταμο, που βρίσκεται βόρεια της εισόδου της Ελευσίνας και εκτείνεται μέχρι τους βόρειους ορεινούς όγκους, ο δείκτης NDVI έχει αρκετά χαμηλές τιμές, εξαιτίας της αστικοποίησης και της δομημένης γης.

Το ίδιο μοτίβο παρατηρούμε και για τον NDWI_G, δηλαδή όπου υπάρχει εμφανής υγιούς βλάστηση, υπάρχει και κορεσμός της. Στα δυτικά και στα νοτιο-δυτικά η βλάστηση παρουσιάζει αρκετά μεγάλα ποσοστά κορεσμού, λαμβάνοντας τιμές από 0.4-0.8, καθώς βόρεια της Μάνδρας και Νέας Ζωής, ο δείκτης παίρνει τιμές από 0.2-0.4. Αφού οι προγενέστερες συνθήκες ήταν παρόμοιες κατά την ημερομηνία λήψης της δορυφορικής εικόνας με αυτής του γεγονότος, συμπεραίνουμε πως βασική φυσική αιτία (εκτός της έντονης βροχόπτωσης) ανάπτυξης αυτής της πλημμύρας ήταν ο ήδη υπάρχων κορεσμός της βλάστησης και κατα συνέπεια του εδάφους.



Σχήμα 5.15: Οπτικοποίηση της χωρικής κατανομής του δείκτη $NDWI_G$ για την ευρύτερη περιοχή της δυτικής Αττικής στις 02/11/2017 (Ιδία επεξεργασία).

5.4 Προσομοίωση του πλημμυρικού φαινομένου

Η πλημμύρα της δυτικής Αττικής που πραγματοποιήθηκε στις 15/11/2017, προσομοιώθηκε μέσα από το ολοκληρωμένο σύστημα μοντελοποίησης CHAOS. Αυτό καθιστά την ύπαρξη μιας πλήρους εικόνας των διεργασιών που συνέβησαν από τις 14/11/2017 και ώρα 13:00 UTC (16:00 τοπική) μέχρι τις 15/11/2017 και ώρα 12:00 UTC (15:00 τοπική), με αποτελέσματα επιφανειακής απορροής κάθε μία ώρα. Εστιάζοντας στην περιοχή της δυτικής Αττικής από μοντέλα υψηλής ανάλυσης, οι προσομοιώσεις εμφάνισαν υψηλά ποσά υετού.

Οι πρώτες έξι ώρες της καταιγίδας χαρακτηρίζονται από μικρή ένταση και μικρά ποσά υετού. Στο Σχήμα 5.16 εμφανίζεται η βροχόπτωση και η επιφανειακή απορροή για την περίοδο 13:00-18:00 UTC. Τις ώρες 13:00-14:00 UTC δεν παρατηρείται καθόλου βροχόπτωση και επιφανειακή απορροή. Τις επόμενες δύο ώρες (15:00-16:00 UTC) ξεκινάει σποραδικά να βρέχει στις βόρειες και βορειο-δυτικές περιοχές της δυτικής Αττικής, έχοντας μέγιστο ύψος υετού τα 5mm. Στις 17:00 UTC, παρουσιάζεται μέγιστο ύψος υετού στα βορειο-δυτικά της δυτικής Αττικής ενώ την ώρα 18:00 UTC εμφανίζει ένα τοπικό μέγιστο στους ορεινούς όγκους δυτικά της Μάνδρας, φτάνοντας τα 15mm. Αυτές τις δύο τελευταίες ώρες φαίνεται να υπήρχε μικρή ε-

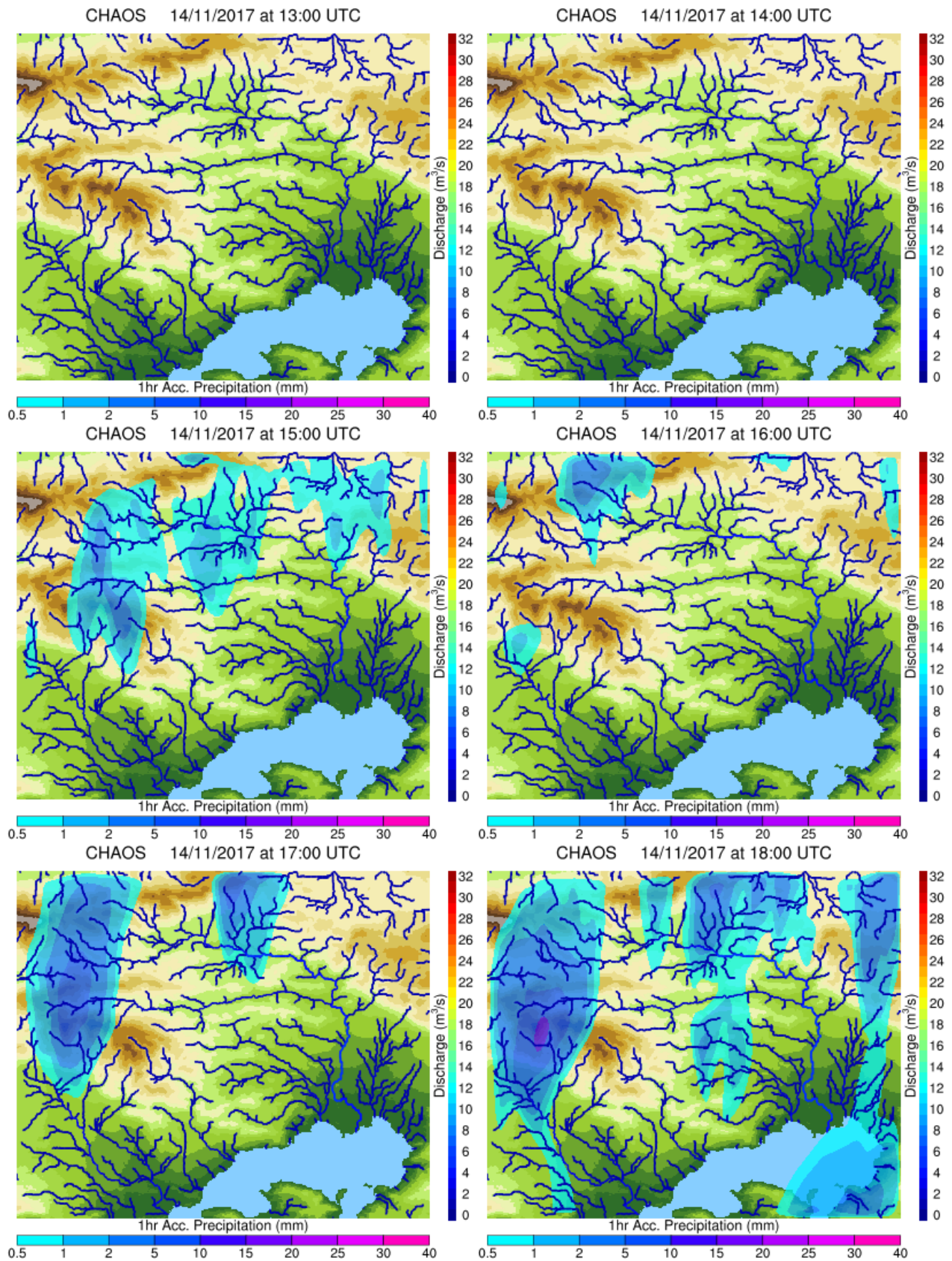
νεργητικότητα του υδρογραφικού δικτύου και κυρίως του Σαρανταπόταμου ποταμού, φτάνοντας τιμή επιφανειακής απορροής τα $6m^3s^{-1}$.

Την χρονική περίοδο 19:00-00:00 UTC αρχίζει να αυξάνεται η ένταση της καταιγίδας, παρόλο που ακόμη δεν υπάρχει έντονη επιφανειακή απορροή. Πιο συγκεκριμένα, στο Σχήμα 5.17 και για το χρονικό διάστημα 19:00-20:00 UTC, υπάρχουν μέγιστα ύψη υετού τα $10mm$ δυτικά και ανατολικά της δυτικής Αττικής. Τις ώρες 21:00-22:00 UTC φτάνει το πρώτο μεγάλο κύμα καταιγίδας, σχετικά ομοιόμορφα κατανεμημένο πάνω από την περιοχή της Μάνδρας, με μέγιστη τιμή υετού την ώρα 22:00 UTC, τα $40mm$ στα νοτιο-δυτικά (Νέα Πέραμος). Μέχρι στιγμής δεν παρατηρείται επιφανειακή απορροή άνω των $6m^3s^{-1}$. Στις 23:00 UTC, το κύμα βροχόπτωσης κινήθηκε προς τα δυτικά, χαμηλώνοντας το μέγιστο ύψος υετού σε $25mm$, ενώ στις 00:00 UTC έχει σχεδόν εξαφανιστεί στα ανατολικά με μέγιστο ύψος υετού τα $10mm$. Την ίδια ώρα εμφανίζεται η πρώτη σημαντική τιμή επιφανειακής απορροής στο νοτιο-δυτικό τμήμα της Νέας Περάμου με μέγιστη τιμή απορροής τα $10m^3s^{-1}$.

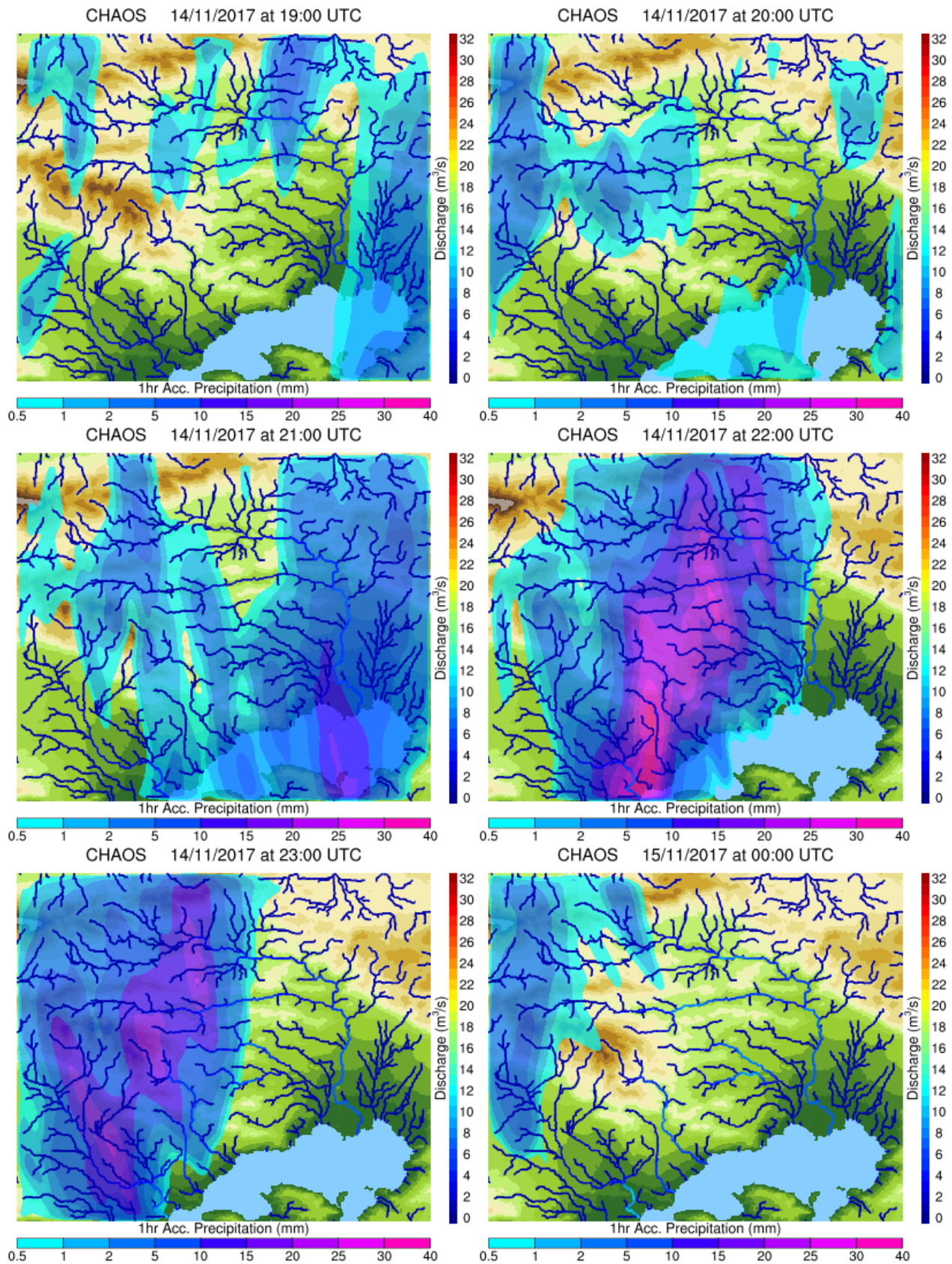
Η επόμενη εξάωρη χρονική περίοδο χαρακτηρίζεται από το ολικό μέγιστο ύψος υετού, καθώς και από την ολική μέγιστη επιφανειακή απορροή. Στο Σχήμα 5.18, την ώρα 01:00 UTC, υπάρχει βροχόπτωση χαμηλής έντασης στα νοτιο-δυτικά της δυτικής Αττικής, με την επιφανειακή απορροή να παραμένει ως έχει από πριν. Την επόμενη ώρα (02:00 UTC) το ολικό μέγιστο ύψος υετού σε όλο το πλημμυρικό φαινόμενο φτάνει τα $48mm$ στα βορειο-δυτικά της Μάνδρας. Την ίδια στιγμή, τμήματα των ανάντη του Σαρανταπόταμου ενεργοποιούνται και παράγουν όλο και περισσότερη απορροή, φτάνοντας σε κάποια μέρη του υδρογραφικού τα $22m^3s^{-1}$. Στις 03:00 UTC, ακριβώς πάνω από το υδρογραφικό δίκτυο (Σαρανταπόταμος, Σούρες και Αγ. Αικατερίνης/Κατσημίδα), εμφανίζεται ύψος υετού έως και $44mm$, με επιφανειακή απορροή να σημειώνει νέα μέγιστα. Συγκεκριμένα, στα κατάντη τμήματα του Σούρες και της Αγ. Αικατερίνης/Κατσημίδα εμφανίζονται τιμές απορροής $16m^3s^{-1}$, στα ανάντη του Σαρανταπόταμου παρατηρούνται τιμές απορροής έως και $28m^3s^{-1}$, ενώ έντονα δραστηριοποιημένα φαίνονται να είναι και τα ανάντη του υδρογραφικού δικτύου, νοτιο-δυτικά της Νέας Περάμου όπου η απορροή είναι $14m^3s^{-1}$. Στις 04:00 UTC, ενώ υπάρχει ακόμη έντονη βροχόπτωση κυρίως στα βορειο-ανατολικά της αστικής περιοχής της Μάνδρας, η επιφανειακή απορροή είναι αυτή που αυξάνεται δραματικά. Τα ανάντη του Σαρανταπόταμου κατεβάζουν ορμητικά νερά με τιμές επιφανειακής απορροής έως και $78m^3s^{-1}$, ενώ στα κατάντη οι τιμές κυμαίνονται από $16 - 20m^3s^{-1}$. Το ίδιο πρότυπο εμφανίζεται και στα κατάντη των Σούρες και Αγ. Αικατερίνης/Κατσημίδα με αντίστοιχες τιμές απορροής. Η κεντρική κοίτη δυτικά της Νέας Περάμου, συνεχίζει να αυξάνει σε ποσότητα ύδατος, φτάνοντας επιφανειακή απορροή $24m^3s^{-1}$. Την επόμενη ώρα (05:00 UTC) δεν καταγράφηκε καθόλου βροχόπτωση στην περιοχή, αλλά η επιφανειακή απορροή αγγίζει ολι-

κό μέγιστο στο μεγαλύτερο τμήμα του Σαρανταπόταμου, έχοντας τιμή $101m^3s^{-1}$. Επίσης, στα κατάντη των Σούρες και Αγ. Αικατερίνης/Κατσημίδα παρατηρείται τιμή απορροής $30m^3s^{-1}$. Στην Νέα Πέραμο, ο παλμός ορμητικού νερού που είχε δημιουργηθεί τις προηγούμενες ώρες συνεχίζει να κατευθύνεται προς τα κατάντη, φτάνοντας νέο μέγιστο επιφανειακής απορροής στα $24m^3s^{-1}$. Την τελευταία ώρα αυτής της περιόδου (06:00 UTC) εμφανίζεται τοπική βροχόπτωση πάνω από την Νέα Πέραμο με μέγιστο ύψος υετού τα $25mm$, ενισχύοντας τον παλμό ύδατος σε τιμή απορροής $26m^3s^{-1}$.

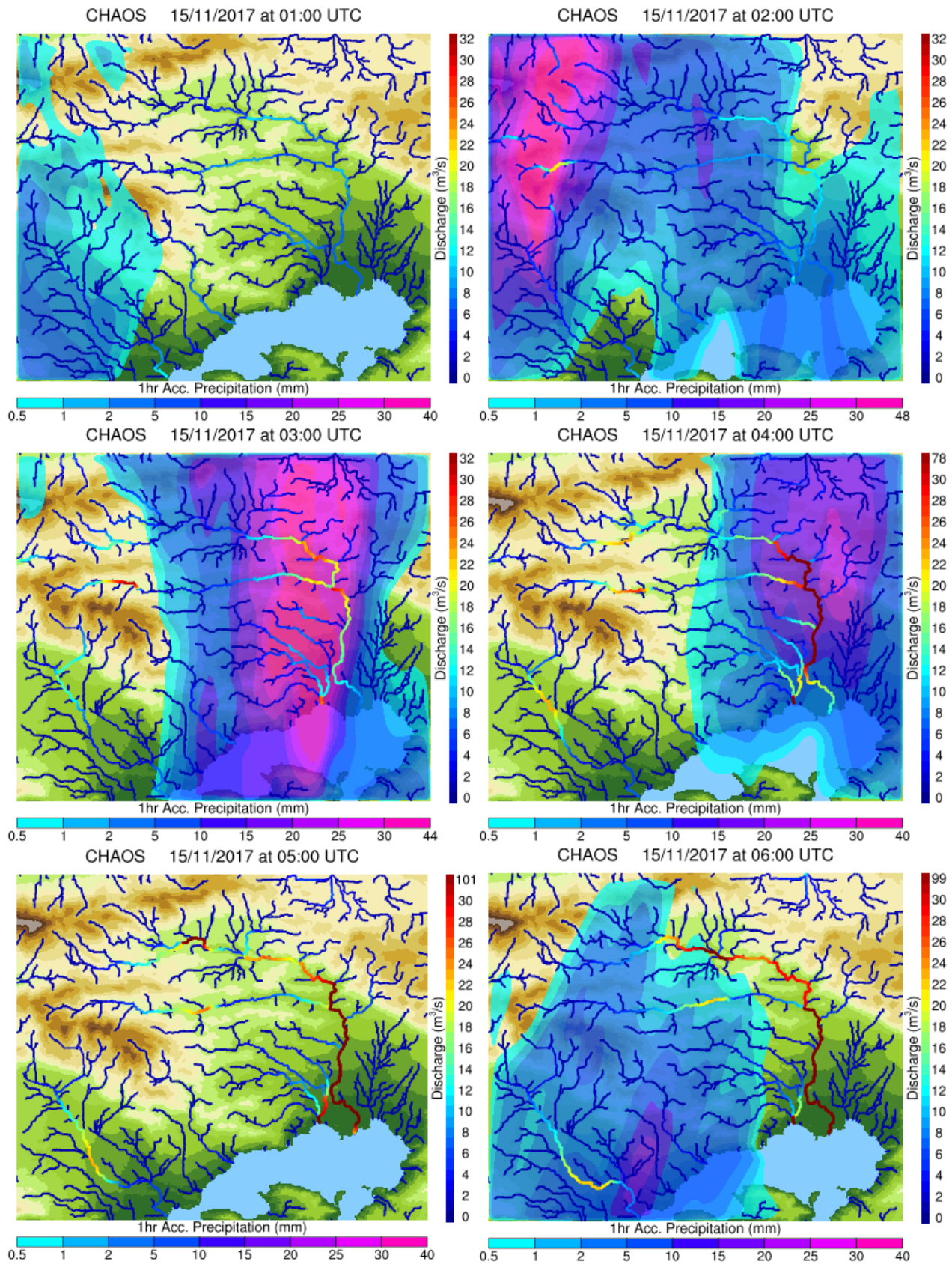
Στην τελευταία χρονική περίοδο, πριν ολοκληρωθεί το πλημμυρικό φαινόμενο, ένα κύμα καταιγίδας ξαναχτυπά ολόκληρο το ανατολικό μέρος της Μάνδρας, δημιουργώντας υψηλές τιμές απορροής. Τέλος, εξασθενεί η βροχόπτωση και η επιφανειακή απορροή αφήνοντας το ήδη υπάρχον νερό στις κοίτες των ποταμών να καταλήξει στα κατάντη. Πιο αναλυτικά, στις 07:00 UTC έρχεται ένα κύμα βροχόπτωσης από τα βορειο-δυτικά, δίνοντας τιμές υετού έως και $40mm$. Η απορροή ενώ σημειώνει μικρότερες τιμές ($79m^3s^{-1}$), είναι εμφανής στα ανάντη και κατάντη του Σαρανταπόταμου και στα κατάντη του Σούρες. Στην Νέα Πέραμο η μάζα νερού κατευθύνεται προς τα κατάντη, παραμένοντας σε τιμές απορροής περίπου στα $24m^3s^{-1}$. Την επόμενη ώρα (08:00 UTC) το ύψος υετού μειώνεται δραματικά, εκτός των περιοχών νοτιο-ανατολικά της δυτικής Αττικής, κοντά στην Αθήνα, έχοντας μέγιστο ύψος υετού τα $25mm$. Η απορροή συνεχίζει την μείωση της σε όλες τις περιοχές του υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης απορροής της Μάνδρας. Την περίοδο 09:00-10:00 UTC, υπάρχει σχετικά μικρή ποσότητα υδροσταγόνων που καταφθάνουν στην επιφάνεια, καθώς ο υετός κυμαίνεται σε τιμές $10 - 15mm$. Αντίθετα η επιφανειακή απορροή φτάνει τις τελευταίες υψηλές τιμές της ($77m^3s^{-1}$). Να σημειωθεί πως μόνο ο Σαρανταπόταμος είναι αυτός που συγκεντρώνει τις μεγαλύτερες ποσότητες ύδατος, με το Σούρες και Αγ. Αικατερίνης/Κατσημίδα να εξασθενούν με την πάροδο του χρόνου. Τις τελευταίες ώρες της προσομοίωσης (11:00-12:00 UTC), βροχόπτωση και επιφανειακή απορροή αρχίζουν σταδιακά να ολισθαίνουν προς την λήξη του φαινομένου, έχοντας τιμές απορροής $68m^3s^{-1}$ και $50m^3s^{-1}$ αντίστοιχα.



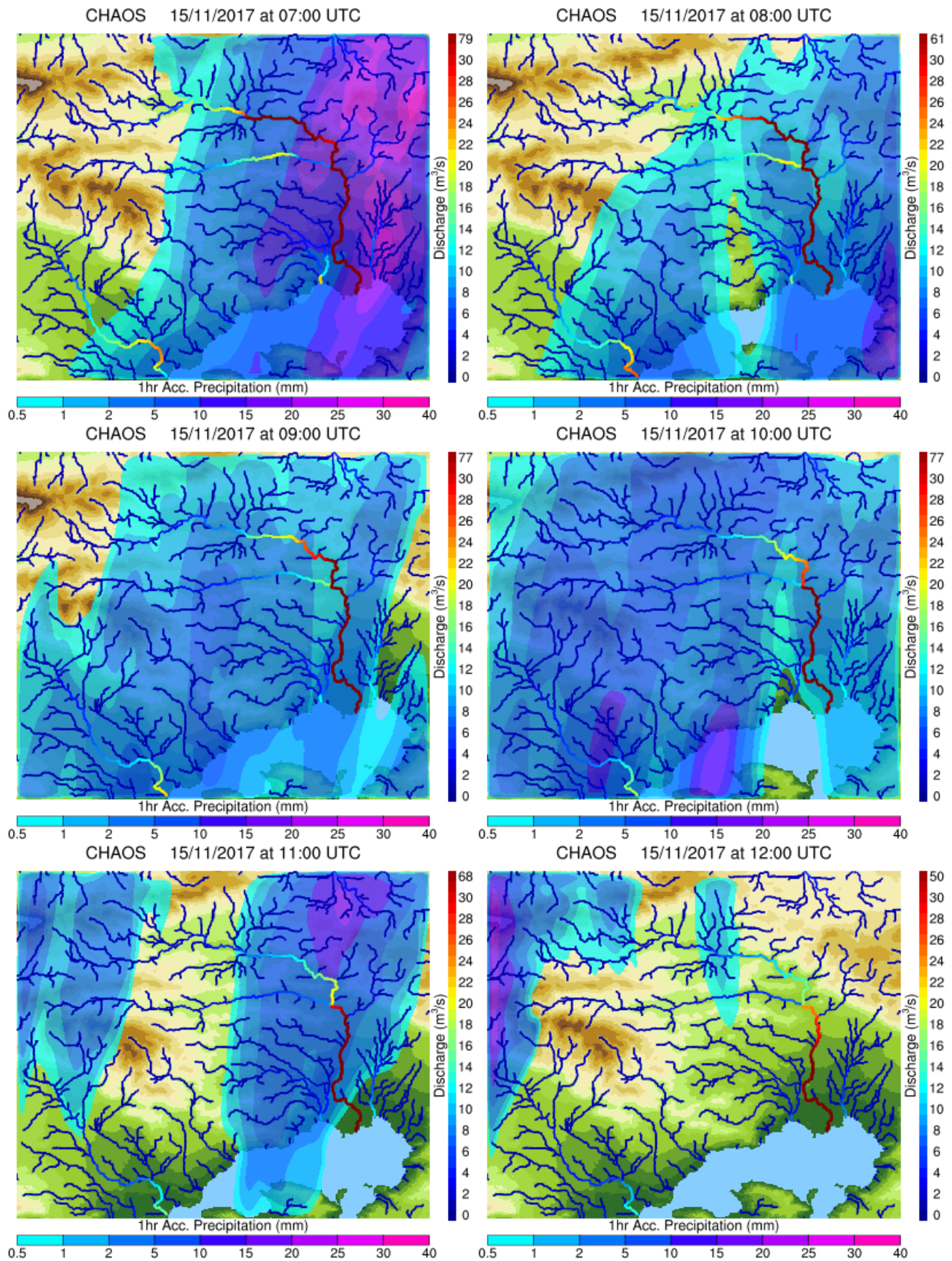
Σχήμα 5.16: Χωρική κατανομή μονώρης αθροιστικής βροχόπτωσης (mm) και επιφανειακής απορροής (m^3s^{-1}) για τις 14/11/2017 και ώρες 13:00-18:00 UTC.



Σχήμα 5.17: Χωρική κατανομή μονώρης αθροιστικής βροχόπτωσης (mm) και επιφανειακής απορροής (m^3s^{-1}) για τις 14/11/2017-15/11/2017 και ώρες 19:00-00:00 UTC.



Σχήμα 5.18: Χωρική κατανομή μονώρης αθροιστικής βροχόπτωσης (mm) και επιφανειακής απορροής (m^3s^{-1}) για τις 15/11/2017 και ώρες 01:00-06:00 UTC.



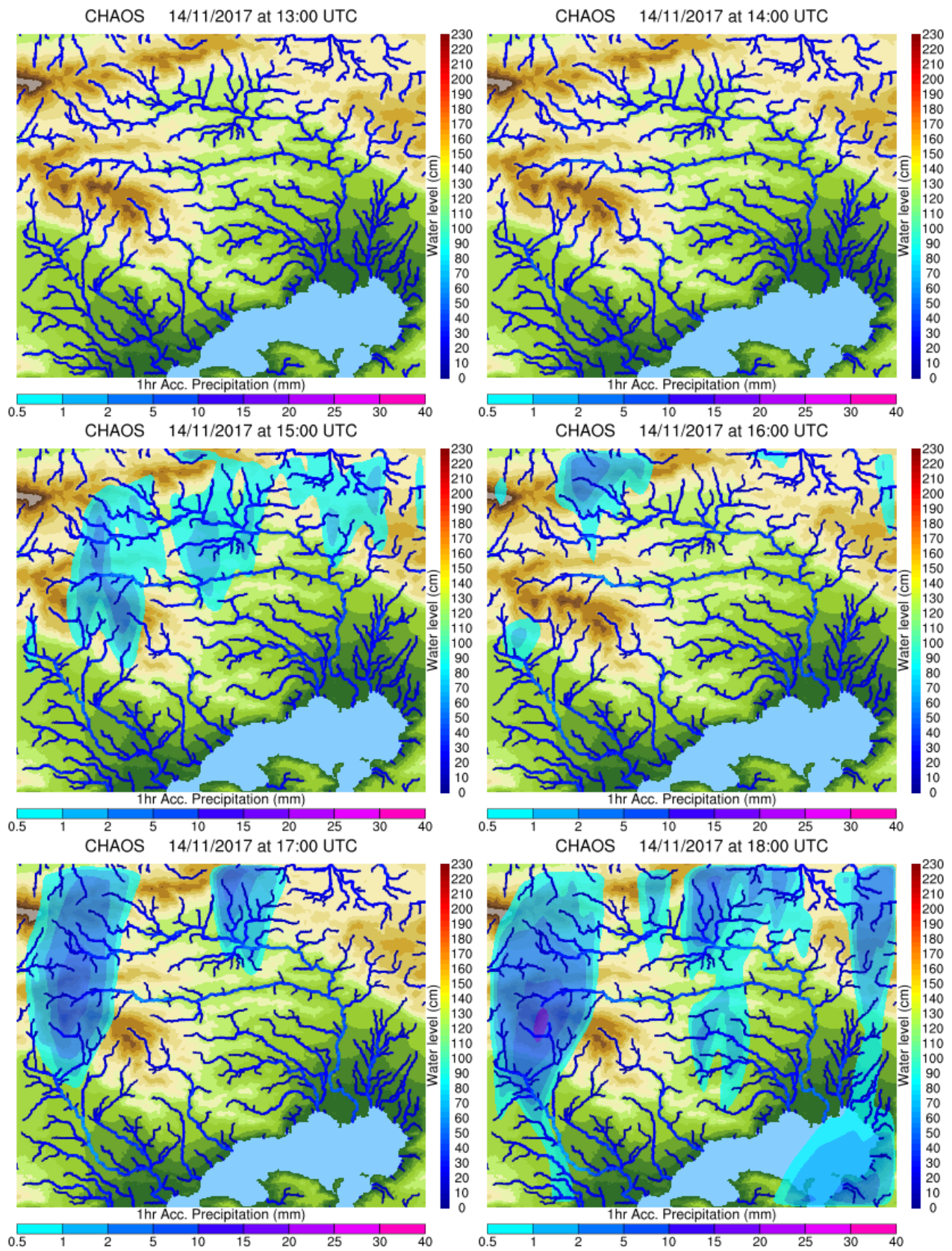
Σχήμα 5.19: Χωρική κατανομή μονώρης αθροιστικής βροχόπτωσης (mm) και επιφανειακής απορροής (m^3s^{-1}) για τις 15/11/2017 και ώρες 07:00-00:00 UTC.

Οι διακυμάνσεις του βάθους νερού (water depth) στις κοίτες των παραπάνω ρεμάτων, φαίνονται από τα παρακάτω σχήματα. Πιο συγκεκριμένα, την χρονική περίοδο 13:00-18:00 UTC (βλέπε Σχήμα 5.20), η ανύψωση της στάθμης νερού σε όλο το υδρογραφικό δίκτυο της δυτικής Αττικής είχε παραμείνει σε χαμηλά ποσοστά ($\leq 40cm$).

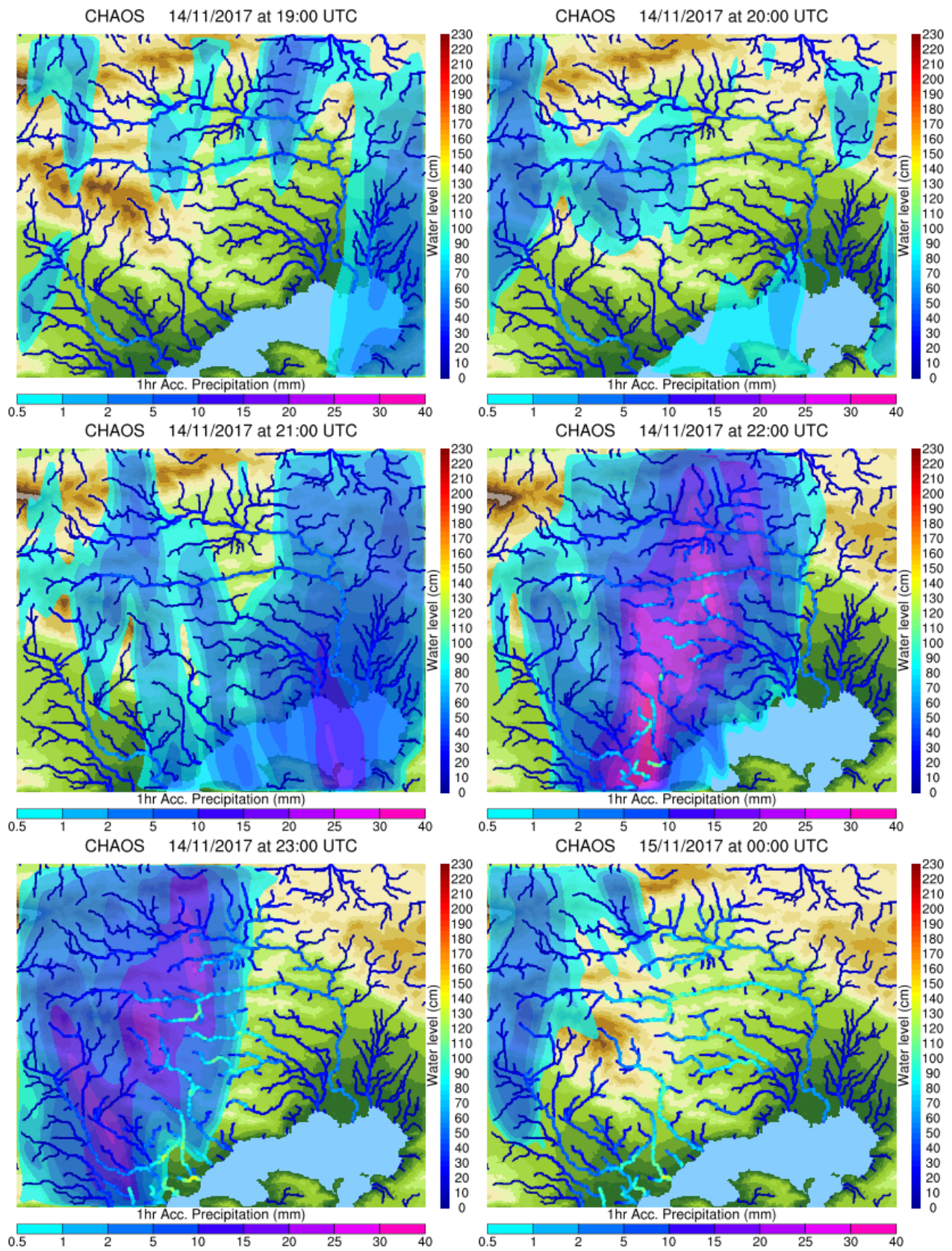
Την χρονική περίοδο 19:00-00:00 UTC παρουσιάζονται οι πρώτες σοβαρές ανυψώσεις της στάθμης νερού, κυρίως στα ανάντη του υδρογραφικού της δυτικής Αττικής. Από τις 19:00-21:00 UTC τα επίπεδα στάθμης παρέμειναν στα ίδια επίπεδα που ήταν πριν. Τις επόμενες τρεις ώρες 22:00-00:00 UTC, εφόσον η ένταση της βροχόπτωσης αυξήθηκε, αυξήθηκε και η στάθμη της κοίτης στα ανάντη των Σούρες, Αγ. Αικατερίνη/Κατσημίδα, Σαρανταπόταμου και στα κατάντη του ρέματος της Νέας Περάμου, έχοντας τιμή ανύψωσης 100 – 140cm.

Στις 01:00 UTC η ανύψωση παραμένει στα ίδια επίπεδα με τα προηγούμενα καθώς ποσά νερού πέφτουν μόνο στα δυτικά της Μάνδρας κοντά στο όρος Πατέρα. Την ώρα 02:00 UTC υπάρχει μεγάλη ανύψωση της στάθμης του νερού στα ανάντη του όρους Πατέρα, με το ύψος να φτάνει τα 160cm. Τις επόμενες δύο ώρες 03:00-04:00 UTC τα ρέματα του Σούρες και Αγ. Αικατερίνης/Κατσημίδα φουσκώνουν σε όλο το μήκος και πλάτος τους, αγγίζοντας τιμές ανύψωσης τα 140 – 160cm, ενώ ο Σαρανταπόταμος φτάνει τα 180 – 200cm. Την ίδια στιγμή στην Νέα Πέραμο εμφανίζονται παρόμοιες τιμές ανύψωσης, κυρίως στα ανάντη. Τις τελευταίες ώρες της 6ωρης χρονικής περιόδου 05:00-06:00 UTC, οι τιμές ανύψωσης στα ανάντη των παραπάνω ρεμάτων σημειώνουν μείωση, ενώ τα κατάντη σημειώνουν αύξηση, φτάνοντας τιμές 190 – 210cm.

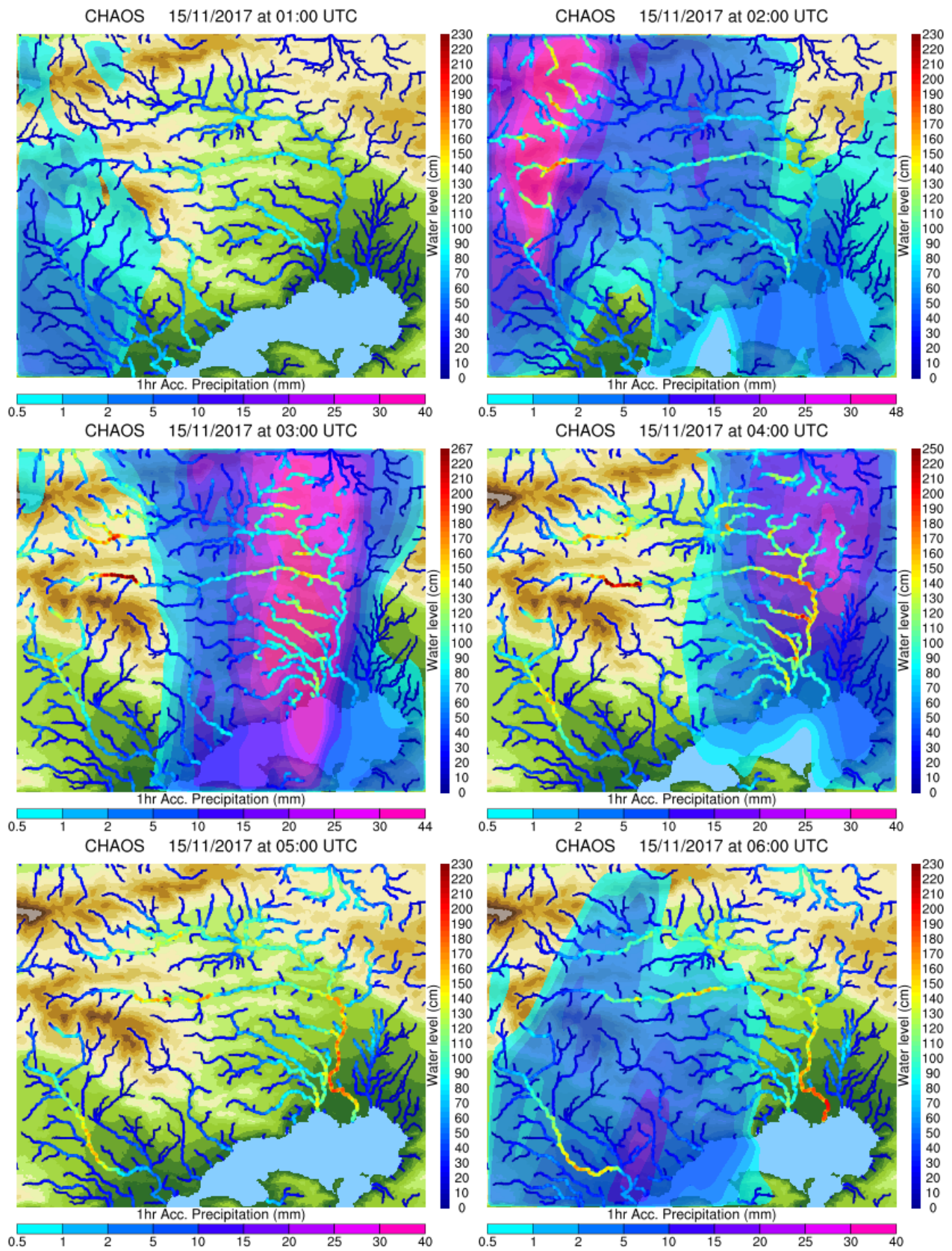
Από τις 07:00-09:00 UTC, το πιο ενεργό ρέμα είναι αυτό του Σαρανταπόταμου όπου υπάρχουν τιμές ανύψωσης της στάθμης του νερού από 90 – 140cm στα ανάντη και από 150 – 170cm στα κατάντη, κοντά στην Ελευσίνα. Τέλος, από την χρονική περίοδο 10:00-12:00 UTC, ενώ συνεχίζει η βροχόπτωση, αλλά με μειωμένη ένταση, στα ρέματα ώρα με την ώρα πέφτει το ύψος της στάθμης νερού στα ανάντη και κατάντη της περιοχής, έχοντας μια μέση τιμή ανύψωσης τα 90cm.



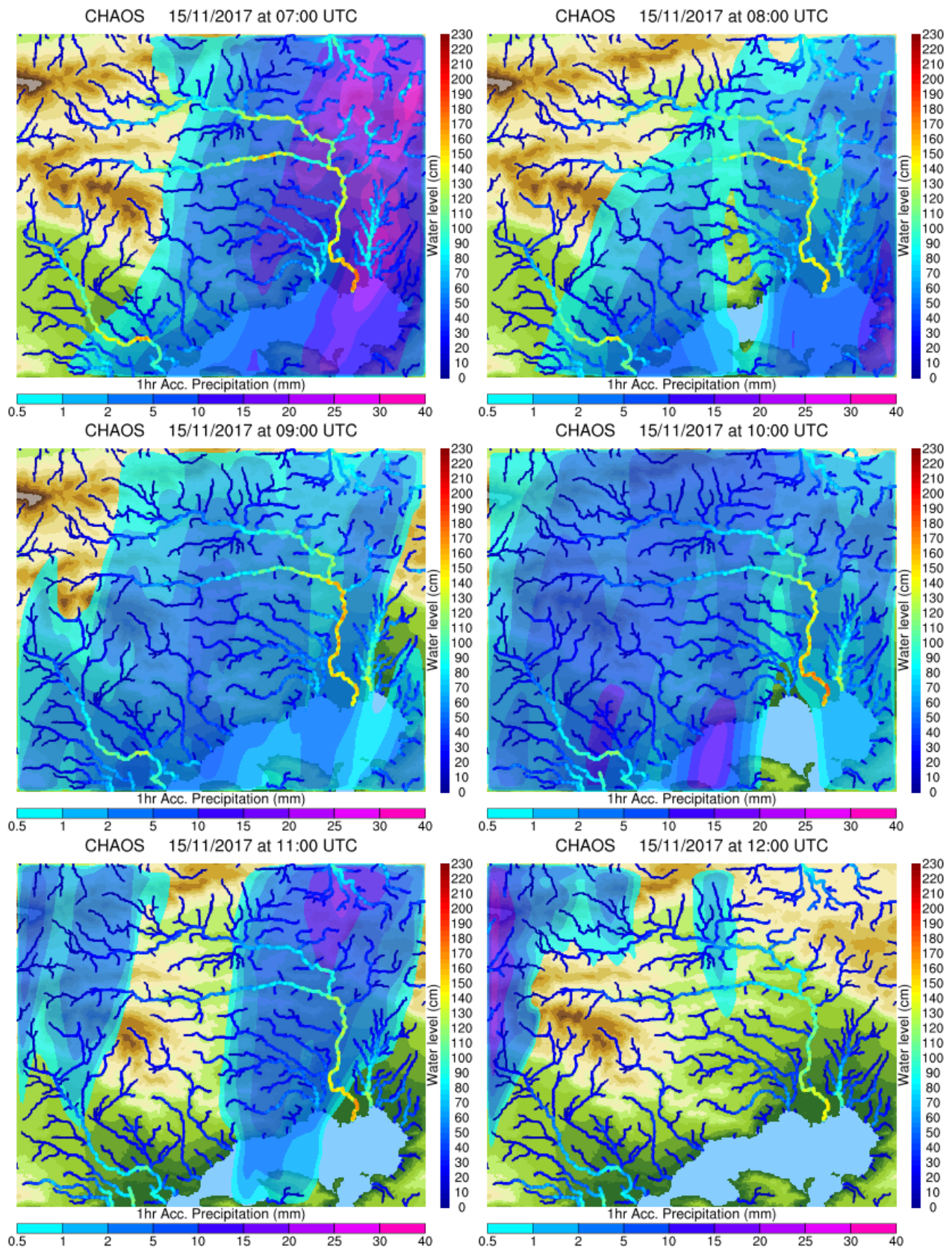
Σχήμα 5.20: Χωρική κατανομή μονώρης αθροιστικής βροχόπτωσης (mm) και βάθος νερού κοίτης (cm) για τις 14/11/2017 και ώρες 13:00-18:00 UTC.



Σχήμα 5.21: Χωρική κατανομή μονώρης αθροιστικής βροχόπτωσης (mm) και βάθος νερού κοίτης (cm) για τις 14/11/2017-15/11/2017 και ώρες 19:00-00:00 UTC.



Σχήμα 5.22: Χωρική κατανομή μονώρης αθροιστικής βροχόπτωσης (mm) και βάθος νερού κοίτης (cm) για τις 15/11/2017 και ώρες 01:00-06:00 UTC.



Σχήμα 5.23: Χωρική κατανομή μονώρης αθροιστικής βροχόπτωσης (mm) και βάθος νερού κοίτης (cm) για τις 15/11/2017 και ώρες 07:00-12:00 UTC.

5.5 Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων

Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του μοντέλου, χρειάζεται η σύγκριση των προσομοιωμένων τιμών με τις πραγματικές. Όσον αφορά την ένταση της βροχόπτωσης (mmh^{-1}), επειδή δεν υπήρχε επίγειος σταθμός μέτρησης, δεν ήταν εφικτή η σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις πραγματικές τιμές. Όμως, μπορεί να υπάρξει σύγκριση με σημεία της αστικής περιοχής της Μάνδρας που φαίνεται η ανύψωση του νερού στα τοιχώματα των σπιτιών και υπηρεσιών με τα αποτελέσματα του βάθους νερού της κοίτης.



Σχήμα 5.24: Μέγιστη στάθμη πλημμύρας στον οικισμό της Μάνδρας στις 16/11/2017 (Lekkas et al. 2017).

Στις εικόνες των Σχημάτων 5.24, 5.25, 5.26, 5.27 και 5.28 διακρίνεται η μέγιστη στάθμη πλημμύρας στον οικισμό της Μάνδρας, από εικόνες που πάρθηκαν στις 16/11/2017 από Lekkas et al. (2017). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του μοντέλου, η μέγιστη ανύψωση του νερού στο ρέμα Αγ. Αικατερίνης/Κατσημίδα ανέρχεται στα 140 – 160cm στις 03:00-04:00 UTC. Το ίχνος που είχε αφήσει το νερό στα τοιχώματα του οικισμού, κυρίως στην οδό Στρατηγού Δεληγιάννη (βλέπε Σχήμα 5.24), φαίνεται η ανύψωση της στάθμης του νερού να είναι μεγαλύτερη από τα 200cm. Τα αποτελέσματα του μοντέλου, ενώ είναι σχετικά αξιόλογα, τείνουν να υποεκτιμούν

την πραγματικότητα εντός της αστικής έκτασης της Μάνδρας.

Εκτός απο στοιχεία του Lekkas et al. (2017), οι περισσότερες αναφορές δηλώνουν ύψος στάθμης νερού στα 150–160cm (Χανιώτικα νέα 2017; Μπακούλης 2017) ενώ στην Νέα Πέραμο έξω απο την σχολή Πυροβολικού σημειώθηκαν τιμές κοντά στα 150cm.



Σχήμα 5.25: Φωτό 1: Μέγιστη στάθμη πλημμύρας στον οικισμό της Μάνδρας στις 16/11/2017 (Lekkas et al. 2017).



Σχήμα 5.26: Φωτό 2: Μέγιστη στάθμη πλημμύρας στον οικισμό της Μάνδρας στις 16/11/2017 (Lekkas et al. 2017).



Σχήμα 5.27: Φωτό 3: Μέγιστη στάθμη πλημμύρας στον οικισμό της Μάνδρας στις 16/11/2017 (Lekkas et al. 2017).



Σχήμα 5.28: Φωτό 4: Μέγιστη στάθμη πλημμύρας στον οικισμό της Μάνδρας στις 16/11/2017 (Lekkas et al. 2017).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας, διαπιστώνουμε πως υπήρχαν αρκετοί παράγοντες που επηρέασαν το πλημμυρικό γεγονός της Μάνδρας. Φαινόμενα σαν αυτό, προβλέπεται να εμφανίζονται συχνότερα, κυρίως λόγω κλιματικής αλλαγής. Συνεπώς, ένα αξιόπιστο σύστημα πρόγνωσης πλημμυρών βασιζόμενο σε παρατηρήσεις και υδρομετεωρολογικές προσομοιώσεις που να καλύπτουν ολόκληρη την επικράτεια καθίσταται αναγκαίο. Συνοπτικά, τα αποτελέσματα της διπλωματικής έδειξαν πως:

- I. Στις 14 Νοεμβρίου συγχωνεύτηκαν δυο χαμηλά βαρομετρικά συστήματα σε ένα κύτταρο ισχυρής βροχόπτωσης πάνω από το Τυρρηνικό πέλαγος, συνοδευόμενο από ψυχρή αέρια μάζα ανώτερης ατμόσφαιρας η οποία ενίσχυσε την αστάθεια του κυττάρου. Το σύστημα αυτό παρέμεινε σχεδόν στάσιμο κατά τη διάρκεια της περιόδου από τις 14/11 έως και τις 19/11, λόγω εμποδισμού της ροής στην ανώτερη ατμόσφαιρα που σχηματίστηκε στην ανατολική Μεσόγειο στα $500hPa$
- II. Οι αναλύσεις δορυφορικών εικόνων Sentinel-2A, φανερώνουν ύπαρξη υγιής βλάστησης στα δυτικά της αστικής περιοχής της Μάνδρας, καθώς και μέτριο κορεσμό βλάστησης, άρα και εδάφους. Αυτό δηλώνει πως είχε θετική συνεισφορά στην πλημμύρα
- III. Η προσομοίωση του φαινομένου από το μοντέλο CHAOS, δείχνει πως το μέγιστο ύψος υετού έγινε στις 02:00 UTC με τιμή $48mm$ στα βορειο-δυτικά της δυτικής Αττικής, ενώ η μέγιστη τιμή επιφανειακής απορροής έγινε στις 05:00 UTC με τιμή $101m^3s^{-1}$ στην μεγαλύτερη έκταση του Σαρανταπόταμου
- IV. Σύμφωνα με το CHAOS, η μεγαλύτερη επιφανειακή απορροή υπήρξε στον Σαρανταπόταμο, όμως η αστική περιοχή της Μάνδρας ήταν αυτή που υπέστη τις μεγαλύτερες ανθρώπινες

και υλικές απώλειες, καθώς τα ρέματα Σούρες και Αγ. Αικατερίνη/Κατσημίδα μετέφεραν μεγάλα ποσά νερού

- V. Όσον αφορά την ανύψωση της στάθμης του νερού μέσα στα πλημμυρικά ρέματα, το μοντέλο φανερώνει πως η μέγιστη τιμή ανύψωσης της στάθμης σημειώθηκε στις 03:00 UTC με τιμή 267cm στα ανάντη του Σαρανταπόταμου, ενώ εντός της αστικής περιοχής της Μάνδρας στις 04:00 UTC με τιμή ανύψωσης τα 140cm
- VI. Τα αποτελέσματα του μοντέλου αποδείχθηκαν σχετικά αξιόλογα, καθώς δεν ήταν ακριβώς συμβατά με την πραγματικότητα. Η μέγιστη ανύψωση της στάθμης του νερού ήταν πάνω από τα 200cm στο ρέμα Αγ. Αικατερίνης/Κατσημίδα, με το μοντέλο να δείχνει πως ήταν στα $140 - 160\text{cm}$
- VII. Οι αυθαίρετες ανθρώπινες παρεμβάσεις εντός της κοίτης των ποταμών και η ανεπάρκεια των υφιστάμενων τεχνικών έργων ή και πλήρης ανυπαρξία μέτρων αντιπλημμυρικής προστασίας, θεωρήθηκαν βασικοί ενισχυτικοί παράγοντες της πλημμύρας
- VIII. Παρά τις αυθαίρετες ανθρώπινες παρεμβάσεις εντός της κοίτης των ποταμών, φαίνεται να υπήρχαν και τεχνικά έργα που να λειτουργήσαν με επάρκεια στην εξομάλυνση της πλημμύρας

Ανάπτυξη συστημάτων έγκαιρης προειδοποίησης τέτοιων φαινομένων είναι αναγκαία για την αποτροπή μιας επαναληπτικής καταστροφής, αφού υπάρχουν κοινωνικά και οικονομικά πλεονεκτήματα στην επένδυση τέτοιων συστημάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνόγλωσση

Εδαφολογικός χάρτης της ΕΓΥ για το Υδατικό Διαμέρισμα της Αττικής: http://thyamis.itia.ntua.gr/egyfloods/gr06/gr06_maps_jpg_p01/GR06_P01_S6_soil.jpg

Ευστρατιάδης Α, Ρόζος Ε, Κουκουβίνος Α, “Υδρόγειος-Μοντέλο υδρολογικής προσομοίωσης”. Τομέας υδατικών πόρων και περιβάλλοντος ΕΜΠ, 2009.

Καρτάλης, Κωνσταντίνος και Φεΐδας Χαράλαμπος. *Αρχές και Εφαρμογές Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης*. Τζιόλα, 2015.

Καρύμπαλης, Ευθύμιος, Κατσαφάδος Πέτρος, Καλογερόπουλος Κλεομένης, Καράλης Σωτήρης και Χαλκίας Χρίστος. “Εκτίμηση πλημμυρικού κινδύνου σε μικρές χειμαρρικές λεκάνες.” Στο *Η Γεωγραφία του Παράκτιου και Νησιωτικού Χώρου*, ΑΘ Σταμούλης, 2014.

Κατσαφάδος, Πέτρος και Μαυροματίδης, Ηλίας. *Εισαγωγή στη Φυσική της Ατμόσφαιρας και τη Κλιματική Αλλαγή*. Ψηφιακό σύγγραμμα στο πλαίσιο της χρηματοδοτούμενης δράσης Κάλλιπος, 2015.

Κοτρώνη Β, Λαγουβάρδος Κ, “Προειδοποιήσεις πλημμυρών από μετεωρολογικές παρατηρήσεις και προγνώσεις”. Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, 2015.

Κλιματολογικό Δελτίο Νοεμβρίου (ΚΔΝ) 2017, Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία.

Παρχαρίδης, Ισαάκ. *Αρχές δορυφορικής τηλεπισκόπησης: Θεωρία και Εφαρμογές*. Ψηφιακό σύγγραμμα στο πλαίσιο της χρηματοδοτούμενης δράσης Κάλλιπος, 2015.

Παπαδόπουλος Γ., “Μάνδρα Αττικής: Κάθε σπίτι μια ιστορία καταστροφής”, Η καθημερινή, 2017. <http://www.kathimerini.gr/935301/gallery/epikairothta/ellada/mandra-attikhs-ka8e-spiti-mia-istoria-katastrofhs>

Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕ). “1η αναθεώρηση σχεδίου διαχείρισης των λεκανών απορροής ποταμών του υδατικού διαμερίσματος Αττικής (EL06)”, (2017).

Κέντρο αριστείας διαχείρισης φυσικών καταστροφών (BEYOND). “Ανάλυση της πλημμύρας της 15/11/2017 στη δυτική Αττική με αξιοποίηση δορυφορικής τηλεπισκόπησης”. (2018).

Κουτσογιάννης, Δημήτριος, και Ξανθόπουλος, Θεμιστοκλής. *Τεχνική υδρολογία*, 1999.

Σταυρούλα, Δημητριάδου. “Μελέτη των υδρομετεωρολογικών συνθηκών που επικράτησαν στην πλημμύρα του Ευρώτα στις 7 Σεπτεμβρίου 2016”, πτυχιακή εργασία, 2017.

Υδρολιθολογικός χάρτης της ΕΓΥ για το Υδατικό Διαμέρισμα της Αττικής: http://thyamis.itia.ntua.gr/egyffloods/gr06/gr06_maps_jpg_p01/GR06_P01_S5_hydrolithology.jpg

Χανιώτικα νέα, “Τραγωδία στη Μάνδρα: Τέσσερις νεκροί από τις πλημμύρες”, 2017. <http://www.haniotika-nea.gr/tragodia-sti-mandra-tesseris-nekri-apo-tis-plimmires/>

NewsIT, “Έτσι πνίγηκε η Μάνδρα – Πως έγινε η τρίτη μεγαλύτερη καταστροφή από πλημμύρες στην Αττική”, 2017a. <https://www.newsit.gr/ellada/etsi-pnigike-mandra-pos-egine-triti-megalyteri-katastrofi-apo-plimmiyes-stin-attiki/2293548/>

NewsIT, “Μάνδρα: Η φονική κακοκαιρία ισούται με σεισμό”, 2017b. <https://www.newsit.gr/ellada/mandra-foniki-kakokairia-isoutai-seismo/2305285/>

Ξενογλώσση

Abbott, Michael B., James C. Bathurst, Jean A. Cunge, Patrick E. O’Connell, and Jorn Rasmussen. “An introduction to the European Hydrological System—Systeme Hydrologique Europeen, “SHE”, 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system.” *Journal of hydrology* 87, no. 1-2 (1986a): 45-59.

- Abbott, M. B., J. C. Bathurst, J. A. Cunge, P. E. O'connell, and J. Rasmussen. "An introduction to the European Hydrological System—Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 2: Structure of a physically-based, distributed modelling system." *Journal of hydrology* 87, no. 1-2 (1986b): 61-77.
- Aguado, Edward, and James E. Burt. "Precipitation Processes." In *Understanding weather and climate*, pp. 146-161. NY: Prentice Hall, 2010.
- Archer, D. R., and H. J. Fowler. "Characterising flash flood response to intense rainfall and impacts using historical information and gauged data in Britain." *Journal of Flood Risk Management* 11 (2018): S121-S133.
- Ashley, Sharon T., and Walker S. Ashley. "Flood fatalities in the United States." *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 47, no. 3 (2008): 805-818.
- Bathrellos, G. D., E. Karymbalis, H. D. Skilodimou, K. Gaki-Papanastassiou, and E. A. Baltas. "Urban flood hazard assessment in the basin of Athens Metropolitan city, Greece." *Environmental Earth Sciences* 75, no. 4 (2016): 319.
- Crawford, R., and Kozlowski, T., "Flooding and Plant Growth." *The Journal of Ecology* 73, no. 3 (1985).
- Dawson, Christian W., Robert J. Abrahart, Asaad Y. Shamseldin, and Robert L. Wilby. "Flood estimation at ungauged sites using artificial neural networks." *Journal of hydrology* 319, no. 1-4 (2006): 391-409.
- Davie, Tim. "Runoff." In *Fundamentals of hydrology*, pp. 69-89. Taylor & Francis, 2008.
- Delrieu, Guy, John Nicol, Eddy Yates, Pierre-Emmanuel Kirstetter, Jean-Dominique Creutin, Sandrine Anquetin, Charles Obled et al. "The catastrophic flash-flood event of 8–9 September 2002 in the Gard Region, France: a first case study for the Cévennes – Vivarais Mediterranean Hydrometeorological Observatory." *Journal of Hydrometeorology* 6, no. 1 (2005): 34-52.
- Diakakis, M., and G. Deligiannakis. "Flood fatalities in Greece: 1970–2010." *Journal of Flood Risk Management* 10, no. 1 (2017): 115-123.
- Diakakis, Michalis, Spyridon Mavroulis, and Giorgos Deligiannakis. "Floods in Greece, a statistical and spatial approach." *Natural hazards* 62, no. 2 (2012): 485-500.

- Dudhia, Jimy. "Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model." *Journal of the atmospheric sciences* 46, no. 20 (1989): 3077-3107.
- ESRI, "How Fill works", 2018a, <http://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/spatial-analyst/how-fill-works.htm>
- ESRI, "How Flow Direction works", 2018b, <http://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/spatial-analyst/how-flow-direction-works.htm>
- ESRI, "How Flow Accumulation works", 2018c, <http://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/spatial-analyst/how-flow-accumulation-works.htm>
- Elkhrachy, Ismail. "Flash flood hazard mapping using satellite images and GIS tools: a case study of Najran City, Kingdom of Saudi Arabia (KSA)." *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science* 18, no. 2 (2015): 261-278.
- Fetter, C. W. "Applied Hydrogeology (4th edition)." Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall (2001): 598.
- Gao, Bo-Cai. "NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space." *Remote sensing of environment* 58, no. 3 (1996): 257-266.
- Gaume, Eric, Marco Borga, Maria Carmen Llassat, Said Maouche, Michel Lang, and Michalis Diakakis. "Mediterranean extreme floods and flash floods." (2016): 133-144.
- Gaume, Eric, Valerie Bain, Pietro Bernardara, Olivier Newinger, Mihai Barbuc, Allen Bateman, Lotta Blaškovičová et al. "A compilation of data on European flash floods." *Journal of Hydrology* 367, no. 1-2 (2009): 70-78.
- Gioti, Evangelia, Chrisoula Riga, Kleomenis Kalogeropoulos, and Christos Chalkias. "A GIS-based flash flood runoff model using high resolution DEM and meteorological data." *EARSeL eProceedings* 12, no. 1 (2013): 33-43.
- Givati, Amir, David Gochis, Thomas Rummeler, and Harald Kunstmann. "Comparing one-way and two-way coupled hydrometeorological forecasting systems for flood forecasting in the Mediterranean region." *Hydrology* 3, no. 2 (2016): 19.
- Gochis, D. J., W. Yu, and D. N. Yates. "The WRF-Hydro Model Technical Description and User's Guide, Version 3.0, NCAR Technical Document, 120 pp." (2015).

- Grell, Georg A., Steven E. Peckham, Rainer Schmitz, Stuart A. McKeen, Gregory Frost, William C. Skamarock, and Brian Eder. “Fully coupled “online” chemistry within the WRF model.” *Atmospheric Environment* 39, no. 37 (2005): 6957-6975.
- Hiatt, M., “Understanding WRF-Hydro within the NFIE-Hydro Framework.” *CE397 Project Report*, 2015.
- Hong, Song-You, and Jeong-Ock Jade Lim. “The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6).” *J. Korean Meteor Soc.* 42, no. 2 (2006): 129-151.
- Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System (HEC-HMS), US Army Corps of Engineers, 2018. <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>
- Jenson, Susan K., and Julia O. Domingue. “Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis.” *Photogrammetric engineering and remote sensing* 54, no. 11 (1988): 1593-1600.
- Kain, John S. “The Kain–Fritsch convective parameterization: an update.” *Journal of applied meteorology* 43, no. 1 (2004): 170-181.
- Karymbalis, Efthimios, Petros Katsafados, Christos Chalkias, and Kaliopi Gaki - Papanastassiou. “An integrated study for the evaluation of natural and anthropogenic causes of flooding in small catchments based on geomorphological and meteorological data and modeling techniques: The case of the Xerias torrent (Corinth, Greece).” *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementary Issues* 56, no. 1 (2012): 45-67.
- Katsafados, Petros, Stamatis Kalogirou, Anastasios Papadopoulos, and Gerasimos Korres. “Mapping long-term atmospheric variables over Greece.” *Journal of Maps* 8, no. 2 (2012): 181-184. doi:10.1080/17445647.2012.694273
- Katsafados, Petros, Varlas George, Nomikou Vera-Margarita, Papadopoulos Anastasios, Karymbalis Efthymios. “A study for the dynamic interaction of the atmospheric and hydrologic environment in the drainage basin of Spercheios River”, 2018.
- Kazakis, Nerantzis, Ioannis Kougiass, and Thomas Patsialis. “Assessment of flood hazard areas at a regional scale using an index-based approach and Analytical Hierarchy Process: Application in Rhodope–Evros region, Greece.” *Science of the Total Environment* 538 (2015): 555-563.

- Kourgialas, Nektarios N., and George P. Karatzas. "A national scale flood hazard mapping methodology: The case of Greece—Protection and adaptation policy approaches." *Science of the Total Environment* 601 (2017): 441-452.
- Lekkas, Efthymios, Voulgaris Nikolaos and Lozios Stylianos. "Flash Flood in West Attica (Mandra, Nea Peramos) November 15, 2017". *Newsletter of Environmental, Disaster and Crisis Management Strategies* no. 5, 2017
- Liu, Chunlu, and Yan Li. "GIS-based dynamic modelling and analysis of flash floods considering land-use planning." *International Journal of Geographical Information Science* 31, no. 3 (2017): 481-498.
- Lin, Yuh-Lang, Richard D. Farley, and Harold D. Orville. "Bulk parameterization of the snow field in a cloud model." *Journal of Climate and Applied Meteorology* 22, no. 6 (1983): 1065-1092.
- Llasat, Maria Carmen, Montserrat Llasat-Botija, M. A. Prat, Federico Porcu, Colin Price, Alberto Mugnai, Kostas Lagouvardos et al. "High-impact floods and flash floods in Mediterranean countries: the FLASH preliminary database." *Advances in Geosciences* 23 (2010): 47-55.
- McFeeters, Stuart K. "The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features." *International journal of remote sensing* 17, no. 7 (1996): 1425-1432.
- Meyer, D., and M. Riechert 2018a. "GIS4WRF: an integrated open source QGIS toolkit for the Advanced Research WRF Framework." Manuscript submitted for publication.
- Meyer, D., and M. Riechert, 2018b. GIS4WRF. doi:10.5281/zenodo.1288569.
- Molinari, Daniela, Scira Menoni, G. T. Aronica, Francesco Ballio, N. Berni, C. Pandolfo, M. Stelluti, and Guido Minucci. "Ex post damage assessment: an Italian experience." *Natural Hazards and Earth System Sciences* 14, no. 4 (2014): 901-916.
- Powers, Jordan G., Joseph B. Klemp, William C. Skamarock, Christopher A. Davis, Jimy Dudhia, David O. Gill, Janice L. Coen et al. "The weather research and forecasting model: Overview, system efforts, and future directions." *Bulletin of the American Meteorological Society* 98, no. 8 (2017): 1717-1737.

- Jarvis, Andy, Hannes Isaak Reuter, Andrew Nelson, and Edward Guevara. “Hole-filled SRTM for the globe Version 4.” (2008).
- Jiménez, Pedro A., Jimy Dudhia, J. Fidel González-Rouco, Jorge Navarro, Juan P. Montávez, and Elena García-Bustamante. “A revised scheme for the WRF surface layer formulation.” *Monthly Weather Review* 140, no. 3 (2012): 898-918.
- Kourgialas, Nektarios N., and George P. Karatzas. “Flood management and a GIS modelling method to assess flood-hazard areas—a case study.” *Hydrological Sciences Journal—Journal des Sciences Hydrologiques* 56, no. 2 (2011): 212-225.
- Komen, G. J., Cavaleri, L., Donelan, M., Hasselmann, K., Hasselmann, S., Janssen, P. A. E. M., “Dynamics and modeling of ocean waves.” Cambridge university press, Cambridge, UK, (1994).
- Kourgialas, Nektarios N., and George P. Karatzas. “A national scale flood hazard mapping methodology: The case of Greece—Protection and adaptation policy approaches.” *Science of the Total Environment* 601 (2017): 441-452.
- Roudier, Philippe, Jafet CM Andersson, Chantal Donnelly, Luc Feyen, Wouter Greuell, and Fulco Ludwig. “Projections of future floods and hydrological droughts in Europe under a+ 2 C global warming.” *Climatic Change* 135, no. 2 (2016): 341-355.
- Sene, Kevin. “Flash Floods.” In *Hydrometeorology*, pp. 273-312. Springer International Publishing, 2016.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Dudha, M. G., Huang, X., Wang, W., Powers, Y., 2008. “A description of the advanced research WRF Ver. 3.0.” *NCAR Technical Note*, Boulder, Colorado, USA, 2008.
- Solomon, Susan, Dahe Qin, Martin Manning, Kristen Averyt, and Melinda Marquis, eds. *Climate change 2007-the physical science basis: Working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC*. Vol. 4. Cambridge university press, 2007.
- Soil and Water Assessment Tool (SWAT), <https://swat.tamu.edu/>
- Terranova, O. G., and S. L. Gariano. “Rainstorms able to induce flash floods in a Mediterranean-climate region (Calabria, southern Italy).” *Natural Hazards and Earth System Sciences* 14, no. 9 (2014): 2423-2434.

- Tewari, Mukul, F. Chen, W. Wang, J. Dudhia, M. A. LeMone, K. Mitchell, M. Ek, G. Gayno, J. Wegiel, and R. H. Cuenca. “Implementation and verification of the unified NOAH land surface model in the WRF model.” In *20th conference on weather analysis and forecasting/16th conference on numerical weather prediction*, vol. 1115. 2004.
- Trenberth, Kevin E. “Changes in precipitation with climate change.” *Climate Research* 47, no. 1/2 (2011): 123-138.
- Varlas, George, Petros Katsafados, Anastasios Papadopoulos, and Gerasimos Korres. “Implementation of a two-way coupled atmosphere-ocean wave modeling system for assessing air-sea interaction over the Mediterranean Sea.” *Atmospheric Research* 208 (2018): 201-217.
- Valcke, Sophie, Tony Craig, and Laure Coquart. “OASIS3-MCT User Guide, OASIS3-MCT 2.0.” *CERFACS/CNRS SUC URA* 1875 (2013).
- Wamdi (group). “The WAM model—A third generation ocean wave prediction model.” *Journal of Physical Oceanography* 18, no. 12 (1988): 1775-1810.
- Weiss, Steven J., J. S. Kain, J. J. Levit, M. E. Baldwin, and D. R. Bright. “17.1 Examination of several different versions of the WRF model for the prediction of severe convective weather: the SPC/NSSL spring program 2004.” (2004).