



# **ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ, ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ &  
ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ**

**Μελέτη των υδρομετεωρολογικών συνθηκών που επικράτησαν στην  
πλημμύρα του Ευρώτα στις 7 Σεπτεμβρίου 2016**

**Δημητριάδου Σταυρούλα**

**Αθήνα, 2017**



# **ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ, ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ &  
ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ**

## **Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή**

**Κατσαφάδος Πέτρος (επιβλέπων καθηγητής)**

**Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο**

**Καρύμπαλης Ευθύμιος**

**Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο**

**Χαλκιάς Χρίστος**

**Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο**

Η Δημητριάδου Σταυρούλα

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.

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

|                                |        |
|--------------------------------|--------|
| Περίληψη .....                 | σελ.6  |
| Abstract .....                 | σελ.7  |
| Κατάλογος Εικόνων.....         | σελ.8  |
| Κατάλογος Πινάκων.....         | σελ.9  |
| Κατάλογος Χαρτών.....          | σελ.10 |
| Κατάλογος Διαγραμμάτων.....    | σελ.12 |
| Κατάλογος Ιστογραμμάτων.....   | σελ.12 |
| Κατάλογος Υδρογραφημάτων ..... | σελ.13 |

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή

|                                                                                     |         |
|-------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| 1.1. Φυσικές καταστροφές – Πλημμύρες .....                                          | σελ. 14 |
| 1.2. Παγκόσμια πλημμυρικά επεισόδια .....                                           | σελ. 16 |
| 1.3. Πλημμυρικά επεισόδια στην Ευρώπη .....                                         | σελ. 18 |
| 1.4. Σύγχρονα συστήματα πρόγνωσης και προσομοίωσης των πλημμυρικών φαινομένων ..... | σελ. 19 |

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Περιοχή Μελέτης

|                                                          |        |
|----------------------------------------------------------|--------|
| 2.1. Λεκάνη απορροής του Ευρώτα .....                    | σελ.23 |
| 2.2. Ο ποταμός Ευρώτας και οι παραπόταμοί του.....       | σελ.24 |
| 2.3. Μορφολογία του εδάφους.....                         | σελ.26 |
| 2.4. Καταγραφικοί σταθμοί.....                           | σελ.28 |
| 2.5. Κατανομή βροχοπτώσεων.....                          | σελ.30 |
| 2.6. Περιγραφή μοντέλων προσομοίωσης για τον Ευρώτα..... | σελ.32 |

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Αναλυτική προσέγγιση του πλημμυρικού επεισοδίου στις 7 Σεπτεμβρίου 2016

|                                |        |
|--------------------------------|--------|
| 3.1. Περιγραφή γεγονότος ..... | σελ.35 |
|--------------------------------|--------|

|                                                                                      |        |
|--------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| 3.2. Συνοπτική κατάσταση της ατμόσφαιρας.....                                        | σελ.41 |
| 3.3. Προσομοίωση πλημμύρας του Ευρώτα μέσα από τα μοντέλα WRF-ARW και WRF-Hydro..... | σελ.45 |
| 3.4 Υδρογραφήματα.....                                                               | σελ.57 |
| 3.5. Αξιολόγηση του Μοντέλου.....                                                    | σελ.63 |
| Συμπεράσματα.....                                                                    | σελ.68 |
| Βιβλιογραφία.....                                                                    | σελ.69 |

## Περίληψη

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η υδρομετεωρολογική μελέτη ενός πλημμυρικού γεγονότος που έλαβε χώρα στον ποταμό Ευρώτα της Λακωνίας στις 7 Σεπτεμβρίου 2016 καθώς και η προσομοίωση του συγκεκριμένου πλημμυρικού γεγονότος από ένα σύγχρονο υδρομετεωρολογικό μοντέλο. Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση είναι το WRF-Hydro το οποίο υπολόγισε το ύψος υετού (mm) και την επιφανειακή απορροή ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) για την λεκάνη απορροής του Ευρώτα. Τα αποτελέσματα του μοντέλου αξιολογήθηκαν αφενός σε σύγκριση με τις πραγματικές τιμές ύψους βροχής (mm) του μετεωρολογικού σταθμού που έχει τοποθετήσει το Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο στο Γεράκι και αφετέρου με το πραγματικό βάθος του ποταμού (m) των μετρητικών σταθμών που έχει τοποθετήσει σε δυο σημεία της κεντρικής κοίτης του ποταμού Ευρώτα το Ελληνικό Κέντρο Θαλάσσιων Ερευνών (ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε). Το μοντέλο αποδείχθηκε αρκετά ικανοποιητικό και στις δυο περιπτώσεις εφόσον οι προσομοιωμένες τιμές ακολουθούσαν τις πραγματικές σχεδόν καθ' όλη την διάρκεια των γεγονότων από τις 6 έως 8 Σεπτεμβρίου με διαφοροποιημένες τις μέγιστες τιμές. Εν τέλει μέσα από την προσομοίωση αυτή διαπιστώθηκε και η απόκριση της λεκάνης απορροής η οποία είναι πολύ σημαντική για μελλοντική πρόγνωση και προειδοποίηση των πλημμύρων του Ευρώτα ποταμού.

**Λέξεις κλειδιά:** Πλημμύρα, υδρομετεωρολογικό μοντέλο, ποταμός, επιφανειακή απορροή, ύψος βροχής

## Abstract

The purpose of this project is the hydrometeorological research of a flooding event that happened at Evrota's river in Lakonia, Greece, on the 7<sup>th</sup> September 2016 and the simulation of this event using a modern hydrological model. The model that was used for this simulation is WRF-Hydro, which calculated the height of the rain (mm) and the surface run-off ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) for Evrota's drainage basin. The results of the simulation were evaluated in two ways. First and foremost, in comparison with the real rainfall (mm) data recorded at the weather station of Geraki that Harokopeio University has placed. Secondly, the results of simulation were compared with the real river depth (m) data collected from the gaging station, which were placed in to different parts of Evrotas's central river bed by the Hellenic Center for Marine research (hcmr). WRF-Hydro presented rainfall and river depth data that were satisfactorily approaching the real ones recorded from the 6<sup>th</sup> to the 8<sup>th</sup> of September 2016. Finally, it is important to mention that WRF-Hydro simulation lead to the evaluation of river Evrota's basin responds, a result which is very important for the forecast of future flooding events of this river and hence for better preparation for these events.

**Keywords:** Flood, hydrometeorological model, river, surface run-off, rainfall

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

- Εικόνα 2.6.1.** Οι 4 τομείς με οριζόντια ανάλυση 36,12,4 και 1 km και τα 38 κατακόρυφα επίπεδα που εκτείνονται από την επιφάνεια έως 50 hPa του μοντέλου WRF .....σελ.33
- Εικόνα 3.1.1.** Αυτοκίνητα που παρασύρθηκαν λόγω βροχής στην περιοχή της Μάνης στη Στούπα .....σελ.39
- Εικόνα 3.1.2.** Η φυσιολογική ροή του ποταμού κάτω από την γέφυρα της Σκάλας.....σελ.40
- Εικόνα 3.1.3.** Η υπερβολικά αυξημένη στάθμη του ποταμού στην περιοχή της Σκάλας έπειτα από την κακοκαιρία στις 7 Σεπτεμβρίου 2016.....σελ.40



## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

|                                                                                                                                                  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Πίνακας 2.2.1. Μήκος υγρής επιφάνειας παραποτάμων του Ευρώτα κατά την άνοιξη και το τέλος της ξηρής περιόδου του 2007.....σελ.26</i>          |
| <i>Πίνακας 2.4.1. Μέσο ετήσιο ύψος βροχής των βροχομετρικών σταθμών εντός της λεκάνης απορροής για τα έτη 2000 έως 2008.....σελ.28</i>           |
| <i>Πίνακας 2.6.1. Συνοπτικός πίνακας με τα στοιχεία της προσομοίωσης του μοντέλου WRF V.3.8 για την περιοχή του Ευρώτα.....σελ.34.</i>           |
| <i>Πίνακας 3.1.1. Δεκάλεπτες καταγραφές κατακρημνισμάτων (mm) του βροχομετρικού σταθμού Γερακίου για τις 6 και 7 Σεπτεμβρίου 2016.....σελ.36</i> |

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΧΑΡΤΩΝ

|                                                                                                                                                                                                                      |         |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| <b>Χάρτης 2.1.1.</b> Δήμοι του Νομού Λακωνίας που βρίσκονται μέσα στα όρια της λεκάνης απορροής του ποταμού Ευρώτα .....                                                                                             | σελ.24  |
| <b>Χάρτης 2.3.1.</b> Υψομετρικό ανάγλυφο της λεκάνης απορροής του Ευρώτα ποταμού.....                                                                                                                                | σελ.27  |
| <b>Χάρτης 2.4.1.</b> Μετεωρολογικοί και βροχομετρικοί σταθμοί της λεκάνης απορροής του Ευρώτα.....                                                                                                                   | σελ.29  |
| <b>Χάρτης 2.5.1.</b> Κλιματικός χάρτης που απεικονίζει το μέσο ετήσιο ύψος υετού .....                                                                                                                               | σελ.31  |
| <b>Χάρτης 2.5.2.</b> Κλιματικός χάρτης που απεικονίζει το μέσο μηνιαίο ύψος υετού για τον μήνα Σεπτέμβρη από το 1971 έως το 2000.....                                                                                | σελ.32  |
| <b>Χάρτης 3.1.1.</b> Κυκλοφοριακές οδοί της Νότιας Πελοποννήσου, των νομών Λακωνίας και Μεσσηνίας που αντιμετώπισαν προβλήματα λόγω της πλημμύρας.....                                                               | σελ.38  |
| <b>Χάρτης 3.2.1.</b> Χάρτης μέσης θερμοκρασίας με ισοπαχείς μεταξύ 500 και 1000 hPa.....                                                                                                                             | σελ.42  |
| <b>Χάρτης 3.2.2.</b> Παγκόσμιος χάρτης καιρού στις 6 Σεπτεμβρίου 2016 και ώρα 18 UTC όπου αποτυπώνονται συστήματα πίεσης στην επιφάνεια, αέριες μάζες και μέτωπα. Το ψυχρό μέτωπο κατευθύνεται προς την Ελλάδα ..... | σελ.43  |
| <b>Χάρτης 3.2.3.</b> Παγκόσμιος χάρτης καιρού στις 7 Σεπτεμβρίου 2016 και ώρα 00 UTC με το ψυχρό μέτωπο να έχει φτάσει πλέον πάνω από την Πελοπόννησο.....                                                           | σελ.43  |
| <b>Χάρτης 3.2.4.</b> Παγκόσμιος χάρτης καιρού στις 7 Σεπτεμβρίου 2016 και ώρα 06 UTC με την Δυτική Ελλάδα στο επίκεντρο της κακοκαιρίας.....                                                                         | σελ.44  |
| <b>Χάρτης 3.3.1.</b> Χωρική κατανομή 3ωρης αθροιστικής βροχόπτωσης σε mm (κάτω μπάρα χρωμάτων) και απορροής σε m <sup>3</sup> /s (δεξιά μπάρα χρωμάτων).....                                                         | σελ.45. |
| <b>Χάρτης 3.3.2.</b> Χωρική κατανομή 3ωρης αθροιστικής βροχόπτωσης (12-15 UTC) σε mm (κάτω μπάρα χρωμάτων) και απορροής σε m <sup>3</sup> /s (δεξιά μπάρα χρωμάτων) για τις 6/9/2016 στις 15 UTC.....                | σελ.46  |
| <b>Χάρτης 3.3.3.</b> Χωρική κατανομή 3ωρης αθροιστικής βροχόπτωσης (15-18 UTC) σε mm (κάτω μπάρα χρωμάτων) και απορροής σε m <sup>3</sup> /s (δεξιά μπάρα χρωμάτων) για τις 6/9/2016 στις 18 UTC.....                | σελ.47  |
| <b>Χάρτης 3.3.4.</b> Χωρική κατανομή 3ωρης αθροιστικής βροχόπτωσης (18-21 UTC) σε mm (κάτω μπάρα χρωμάτων) και απορροής σε m <sup>3</sup> /s (δεξιά μπάρα χρωμάτων) για τις 6/9/2016 στις 21 UTC.....                | σελ.48  |

|                                                                                                                                                                                                        |         |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| <b>Χάρτης 3.3.5.</b> Χωρική κατανομή 3ωρης αθροιστικής βροχόπτωσης (21-00 UTC) σε mm (κάτω μπάρα χρωμάτων) και απορροής σε m <sup>3</sup> /s (δεξιά μπάρα χρωμάτων) για τις 7/9/2016 στις 00 UTC.....  | σελ.49  |
| <b>Χάρτης 3.3.6.</b> Χωρική κατανομή 3ωρης αθροιστικής βροχόπτωσης (00-03 UTC) σε mm (κάτω μπάρα χρωμάτων) και απορροής σε m <sup>3</sup> /s (δεξιά μπάρα χρωμάτων) για τις 7/9/2016 στις 03 UTC.....  | σελ.49  |
| <b>Χάρτης 3.3.7.</b> Χωρική κατανομή 3ωρης αθροιστικής βροχόπτωσης (03-06 UTC) σε mm (κάτω μπάρα χρωμάτων) και απορροής σε m <sup>3</sup> /s (δεξιά μπάρα χρωμάτων) για τις 7/9/2016 στις 06 UTC.....  | σελ.50  |
| <b>Χάρτης 3.3.8.</b> Χωρική κατανομή 3ωρης αθροιστικής βροχόπτωσης (06-09 UTC) σε mm (κάτω μπάρα χρωμάτων) και απορροής σε m <sup>3</sup> /s (δεξιά μπάρα χρωμάτων) για τις 7/9/2016 στις 09 UTC.....  | σελ.51  |
| <b>Χάρτης 3.3.9.</b> Χωρική κατανομή 3ωρης αθροιστικής βροχόπτωσης (09-12 UTC) σε mm (κάτω μπάρα χρωμάτων) και απορροής σε m <sup>3</sup> /s (δεξιά μπάρα χρωμάτων) για τις 7/9/2016 στις 12 UTC.....  | σελ.51  |
| <b>χάρτης 3.3.10.</b> Χωρική κατανομή 3ωρης αθροιστικής βροχόπτωσης (12-15 UTC) σε mm (κάτω μπάρα χρωμάτων) και απορροής σε m <sup>3</sup> /s (δεξιά μπάρα χρωμάτων) για τις 7/9/2016 στις 15 UTC..... | σελ.52  |
| <b>3.3.11.</b> Χωρική κατανομή 3ωρης αθροιστικής βροχόπτωσης (15-18 UTC) σε mm (κάτω μπάρα χρωμάτων) και απορροής σε m <sup>3</sup> /s (δεξιά μπάρα χρωμάτων) για τις 7/9/2016 στις 18 UTC.....        | σελ.53  |
| <b>3.3.12</b> Χωρική κατανομή 3ωρης αθροιστικής βροχόπτωσης (21-00 UTC) σε mm (κάτω μπάρα χρωμάτων) και απορροής σε m <sup>3</sup> /s (δεξιά μπάρα χρωμάτων) για τις 8/9/2016 στις 00 UTC.....         | σελ.53. |
| <b>3.3.13.</b> Χωρική κατανομή 3ωρης αθροιστικής βροχόπτωσης (00-03 UTC) σε mm (κάτω μπάρα χρωμάτων) και απορροής σε m <sup>3</sup> /s (δεξιά μπάρα χρωμάτων) για τις 8/9/2016 στις 10 UTC.....        | σελ.54  |
| <b>3.3.14.</b> Χωρική κατανομή 3ωρης αθροιστικής βροχόπτωσης (03-06 UTC) σε mm (κάτω μπάρα χρωμάτων) και απορροής σε m <sup>3</sup> /s (δεξιά μπάρα χρωμάτων) για τις 8/9/2016 στις 06 UTC.....        | σελ.54  |
| <b>3.3.15.</b> Χωρική κατανομή 3ωρης αθροιστικής βροχόπτωσης (06-09 UTC) σε mm (κάτω μπάρα χρωμάτων) και απορροής σε m <sup>3</sup> /s (δεξιά μπάρα χρωμάτων) για τις 8/9/2016 στις 09 UTC.....        | σελ.55  |

**3.3.16.** Χωρική κατανομή 3ωρης αθροιστικής βροχόπτωσης (09-12 UTC) σε mm (κάτω μπάρα χρωμάτων) και απορροής σε m<sup>3</sup>/s (δεξιά μπάρα χρωμάτων) για τις 8/9/2016 στις 12 UTC.....σελ.55

**Χάρτης 3.5.1.** Χωρική κατανομή 3ωρης αθροιστικής βροχόπτωσης σε mm (κάτω μπάρα χρωμάτων) και απορροής σε m<sup>3</sup>/s (δεξιά μπάρα χρωμάτων). .....σελ.63.

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

**Διάγραμμα 3.5.1.** Σύγκριση της επιφανειακής απορροής του μετρητικού σταθμού Σενετικός, που βρίσκεται στον Ευρώτα και έχει τοποθετήσει το ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε., με την αντίστοιχη καταγραφή της προσομοίωσης του σταθμού αυτού ως προς την ώρα (UTC) για τις ημερομηνίες 6,7 και 8 Σεπτεμβρίου 2016 .....σελ.66

**Διάγραμμα 3.5.2.** Σύγκριση της επιφανειακής απορροής του μετρητικού σταθμού Σκούρα, που βρίσκεται στον Ευρώτα και έχει τοποθετήσει το ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε., με την αντίστοιχη καταγραφή της προσομοίωσης του σταθμού αυτού ως προς την ώρα (UTC) για τις ημερομηνίες 6,7 και 8 Σεπτεμβρίου 2016 .....σελ.67

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΙΣΤΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

**Ιστόγραμμα 3.1.1.** Δεκάλεπτες καταγραφές κατακρημνισμάτων (mm) του βροχομετρικού σταθμού Γερακίου για τις 6 και 7 Σεπτεμβρίου 2016.....σελ.37

**Ιστόγραμμα 3.5.1.** Καταγραφή ύψους βροχής του μετεωρολογικού σταθμού Γερακίου και του μοντέλου προσομοίωσης ως προς την Ώρα (UTC) για τις ημερομηνίες 6 και 7 Σεπτεμβρίου 2016.....σελ.64

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΥΔΡΟΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ

- Υδατογράφημα 3.4.1.** Καταγραφή του ύψους νετού και της επιφανειακής απορροής του Ευρώτα για το σημείο Σ1 της προσομοίωσης ως προς τον χρόνο (UTC) για τις 6, 7 και 8 Σεπτεμβρίου.....σελ.58
- Υδατογράφημα 3.4.2.** Καταγραφή του ύψους νετού και της επιφανειακής απορροής του Ευρώτα για το σημείο Σ2 της προσομοίωσης ως προς τον χρόνο (UTC) για τις 6, 7 και 8 Σεπτεμβρίου.....σελ.59
- Υδατογράφημα 3.4.3.** Καταγραφή του ύψους νετού και της επιφανειακής απορροής του Ευρώτα για το σημείο Σ3 της προσομοίωσης ως προς τον χρόνο (UTC) για τις 6, 7 και 8 Σεπτεμβρίου.....σελ.60
- Υδατογράφημα 3.4.4.** Καταγραφή του ύψους νετού και της επιφανειακής απορροής του Ευρώτα για το σημείο Σ4 της προσομοίωσης ως προς τον χρόνο (UTC) για τις 6, 7 και 8 Σεπτεμβρίου.....σελ.61

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή

## 1.1. Φυσικές καταστροφές – Πλημμύρες

Πλημμύρα είναι η κατάσταση κατά την οποία μια άνυδρη περιοχή καλύπτεται για κάποιο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα από νερό.

Μια πλημμύρα συμβαίνει όταν το σύστημα αποστράγγισης δεν έχει την δυνατότητα να διαχειριστεί την υπερβολική ποσότητα νερού. Μπορεί να προέρχεται από υπερχειλίση ποταμού που είναι το πιο συνηθισμένο ή από τοπική βροχόπτωση, εισροή της θάλασσας σε παράκτιες περιοχές λόγω τσουνάμι, από την θραύση ενός φράγματος ή από το λιώσιμο των πάγων στα βουνά. Όλα τα παραπάνω μπορούν να προκαλέσουν υπερβολικά αυξημένη στάθμη του νερού στους ποταμούς και να πλημμυρίσουν μια γειτονική περιοχή (πλημμυρική πεδιάδα) (national geographic, 2017). Υπάρχουν 3 κατηγορίες πλημμύρας που κατηγοριοποιούν τα παραπάνω: παράκτια πλημμύρα, ποτάμια πλημμύρα και επιφανειακή πλημμύρα.

1. Η παράκτια πλημμύρα δημιουργείται σε παράκτιες περιοχές (συνήθως θάλασσας ή ωκεανού). Μπορεί να είναι αποτέλεσμα παλίρροιας που προκαλείται λόγω επιδεινωμένου καιρού. Όμως η κύρια αιτία αυτού του είδους πλημμύρας είναι οι ισχυροί άνεμοι από τυφώνες και άλλες θύελλες που ωθούν το νερό προς την ακτή. Πολύ συχνά προκαλεί απώλειες ανθρώπινων ζωών αλλά και υλικών ιδιοκτησιών.
2. Η ποτάμια πλημμύρα δημιουργείται λόγω υπερβολικής βροχόπτωσης για εκτεταμένη χρονική περίοδο, με αποτέλεσμα ένας ποταμός να υπερβεί την χωρητικότητα του σε νερό και να ξεχειλίζει. Επιπλέον η πλημμύρα του ποταμού μπορεί να οφείλεται και σε λιώσιμο των πάγων. Όποιο και αν είναι το αίτιο υπερχειλίσης του ποταμού υπάρχει κίνδυνος να σπάσει κάποιο φράγμα ή ανάχωμα και να πλημμυρίσουν οι γύρω περιοχές. Η ποτάμια πλημμύρα διαχωρίζεται σε 2 επιπλέον τύπους: 1) αυτόν της παράκτιας όπου ο ποταμός φουσκώνει και υπερχειλίζει στις όχθες του και 2) αυτόν της αιφνίδιας πλημμύρας (flash flood) που δημιουργεί χείμαρρους έντονης και ψηλής ταχύτητας και μπορεί να ξεσπάσει σε περίπτωση ακραίων μετεωρολογικών φαινομένων χωρίς οι άνθρωποι να προλάβουν να παρέμβουν. Οι στιγμιαίες πλημμύρες μπορούν να δημιουργήσουν μεγάλες καταστροφές (π.χ. κατολισθήσεις) αφού δεν είναι προβλέψιμες και είναι ιδιαίτερα επικίνδυνες για τους ανθρώπους.

3. Τέλος η επιφανειακή πλημμύρα που προκύπτει και αυτή από έντονες βροχοπτώσεις, μας υπενθυμίζει ότι ο κίνδυνος πλημμύρας δεν εξαφανίζεται αν βρίσκεται κανείς μακριά από σώμα νερού. Χωρίζεται και αυτή σε 2 τύπους: 1) πλημμύρα αποχετευτικών συστημάτων με αποτέλεσμα το νερό να ξεχειλίζει και να πλημμυρίζει τους δρόμους και 2) πλημμύρα λόγω βουνοπλαγιών οι οποίες είναι ανίκανες να απορροφήσουν το νερό, πόσο μάλλον όταν έχει προκύψει κάποια πυρκαγιά και δεν υπάρχει βλάστηση να απορροφήσει σημαντικά ποσά νερού (Maddox, 2014).

Επιπλέον οι πλημμύρες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν εκτός από τους παραπάνω τύπους και ανάλογα με την πιθανότητα που μπορούν να συμβούν. Το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η πλημμύρα που μπορεί να συμβεί μια φορά στα 100 χρόνια (hundred-year flood). Όμως λόγω κλιματικής αλλαγής η συγκεκριμένη πλημμύρα συμβαίνει αρκετά συχνά τα τελευταία χρόνια. (National geographic,2017)

## 1.2. Παγκόσμια πλημμυρικά επεισόδια

Οι μεγαλύτερες πλημμύρες που έχουν συμβεί ποτέ στην ιστορία έχουν λάβει χώρα στην Κίνα με σημαντικότερες εκείνες του κίτρινου ποταμού. Ο κίτρινος ποταμός θεωρείται εξαιρετικά επιρρεπής στις πλημμύρες και έχει πλημμυρίσει πάνω από 1.500 φορές με την πιο καταστροφική πλημμύρα να έχει λάβει χώρα το 1887. Το 1887 λόγω μεγάλης βροχής το νερό ξεχείλισε και έπνιξε πάνω από 900.000 ανθρώπους ενώ άφησε εκατομμύρια ανθρώπους άστεγους λόγω των τεράστιων υλικών καταστροφών που προκάλεσε (Crawford and Kozlowski, 1985). Ένας ακόμα ποταμός της Κίνας με μεγάλη συχνότητα πλημμυρικών επεισοδίων είναι ο Yangtze. Ο ποταμός αυτός θεωρείται ο μεγαλύτερος της Ασίας, τρίτος μεγαλύτερος στον κόσμο και είναι ένα από τα πιο ορμητικά ποτάμια που υπάρχουν. Η κοιλάδα του Yangtze πλημμυρίζει κάθε καλοκαίρι λόγω φυσικών αιτιών. Από το 1368 έως το 1911 είχε πλημμυρίσει 54 φορές και κατά την διάρκεια του 20<sup>ου</sup> αιώνα έχουν συμβεί 18 σοβαρές πλημμύρες με πιο σημαντικές αυτές του 1911, 1931 και 1945. Το 1998 πλημμύρησε ξανά με την συμβολή της πλημμύρας άλλων τριών ποταμών και έτσι προκλήθηκαν σοβαρές ζημιές, 223 εκατομμύρια άνθρωποι επηρεάστηκαν, 4.970.000 σπίτια καταστράφηκαν και 1320 άνθρωποι έχασαν την ζωή τους. Οι άνθρωποι που σκοτώθηκαν ήταν πολύ λιγότεροι σε σχέση με αυτούς του 1954 (33.169 θάνατοι) και ακόμα λιγότεροι από αυτούς του 1931 (145.000 θάνατοι) (Zong and Chen, 2000).

Εκτός από τις πλημμύρες τις Κίνας, έχουν συμβεί σε όλο τον κόσμο φοβερές και καταστροφικές πλημμύρες και συμβαίνουν ακόμα και σήμερα. Κατά την πάροδο των τριάντα τελευταίων χρόνων καταστροφικές πλημμύρες είναι αυτές του Πακιστάν και της Νότιας Ινδίας (2010), της Βενεζουέλας (1999), του Μπαγκλαντές (1998 και 2004), του Myanmar (Burma) το 2008 και του Chennai στην Ινδία το 2015. Όσον αφορά το Πακιστάν και την Νότια Ινδία, το 2010 ξέσπασε μουςώνας με ασυνήθιστα πολύ δυνατή βροχόπτωση η οποία κατέληξε σε πλημμύρες. Στις πλημμύρες συνέβαλε έντονα το φαινόμενο La Nina. Στην συνέχεια προκλήθηκαν εκτεταμένες κατολισθήσεις οι οποίες οδήγησαν τελικά σε μεγάλες καταστροφές και απώλειες. Είκοσι εκατομμύρια άνθρωποι επηρεάστηκαν και τρις χιλιάδες έχασαν την ζωή τους (Hong et al., 2011). Το 1999, στην περιοχή Vargas, βόρεια του Καρακάς (πρωτεύουσα της Βενεζουέλας), είχε ξεσπάσει μια βροχή διάρκειας δέκα ολόκληρων ημερών και ταυτόχρονα συνέβη μεγάλη κατολίσθηση λάσπης. Η πλημμύρα που δημιουργήθηκε θεωρείται η μεγαλύτερη που έχει συμβεί ποτέ στην Βενεζουέλα επηρεάζοντας εννιά βόρειες πόλεις βόρεια



του Καράκας με μεγαλύτερες απώλειες στην Miranda και στο Vargas. Το αποτέλεσμα ήταν να χαθούν 30.000 ανθρώπινες ζωές και εκατομμύρια άνθρωποι να μείνουν χωρίς σπίτια (Cross, 2001). Έπειτα, το 1998 στο Μπαγκλαντές ξέσπασε μια από τις χειρότερες πλημμύρες που έχουν λάβει χώρα εκεί, με τουλάχιστον 1000 νεκρούς και 30 εκατομμύρια άστεγους. Γενικότερα το Μπαγκλαντές πλημμυρίζει συχνά λόγω της γεωμορφολογίας του, αφού αποτελείται κατά 80% από πλημμυρικές πεδιάδες και λόγω του κλίματός του (μουσωνικό). Στην συγκεκριμένη χώρα υπάρχουν δύο κύριας ροής ποταμοί με μεγάλους όγκους νερού που κυλάνε σε μεγάλες λεκάνες απορροής και αυξάνουν τον κίνδυνο πλημμύρας. Επιπλέον κατά την άνοιξη λιώνουν τα χιόνια από τα Ιμαλάια και αυτό ενισχύει το φαινόμενο της πλημμύρας. Η πλημμύρα του 2004 στο Μπαγκλαντές που έγινε τον Ιούλιο ήταν εξαιτίας μουσώνα και ήταν αρκετά καταστροφική, εφόσον πραγματοποιήθηκε μετά από άλλη πλημμύρα που έλαβε χώρα τον Απρίλιο του ίδιου χρόνου. Στην πλημμύρα του Απριλίου καταστράφηκε μεγάλο μέρος της ετήσιας σοδιάς ρυζιού στο βορειοδυτικό Μπαγκλαντές. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα όταν συνέβη η δεύτερη πλημμύρα, η ήδη πλημμυρισμένη περιοχή να πλήξει ακόμα περισσότερο τις βόρειες περιοχές και στις δύο πλευρές του ποταμού Βραχμαπούτρα. Το νερό παρέμεινε στις περιοχές τρεις με τέσσερις μήνες και σταδιακά άρχισε να απομακρύνεται προς τα νότια, πλημμυρίζοντας σιγά σιγά την μεγαλύτερη περιοχή του κεντρικού Μπαγκλαντές και την Ντάκα αλλά και τις γειτονικές περιοχές στα δύο σημεία συμπλοκής των τριών μεγάλων ποταμών. Οι νεκροί ήταν σχεδόν 800 και 36 εκατομμύρια άνθρωποι επηρεάστηκαν από τα αποτελέσματα της πλημμύρας (Dewan and Yamaguchi, 2008). Το 2008 έχασαν την ζωή τους 150.000 άνθρωποι εξαιτίας καταστροφικών κυκλώνων και τυφώνων που συνέβησαν, και από αυτούς οι 140.000 σκοτώθηκαν λόγω του κυκλώνα Nargis που χτύπησε την περιοχή του Myanmar (Burna) (Andrews and Quintana, 2015). Τέλος, οι πλημμύρες που έγιναν το Νοέμβριο του 2015 στο Chennai της Ινδίας το 2015 αναφέρθηκαν ως οι χειρότερες πλημμύρες που έλαβαν χώρα τα τελευταία χρόνια, γι' αυτό χαρακτηρίστηκαν ως οι πλημμύρες του αιώνα. Οι καταστροφές ήταν μεγάλες εφόσον οι γεωργικές εκτάσεις καταστράφηκαν και βιομηχανικές δραστηριότητες διακόπηκαν σε μεγάλο βαθμό. Τουλάχιστον 379 άνθρωποι πέθαναν στην πλημμύρα αυτή (Háša and Brunet-Thornton, 2017).

### 1.3. Πλημμυρικά επεισόδια στην Ευρώπη

Εστιάζοντας σε έναν μικρότερο γεωγραφικό χώρο, αυτόν της Ευρώπης, γίνεται αναφορά σε κάποια μεγάλης σημασίας πλημμυρικά επεισόδια που έχουν συμβεί στην ιστορία και έχουν αναστατώσει πολλές ανθρώπινες ζωές. Η πιο καταστροφική πλημμύρα που έχει συμβεί ποτέ στον Ευρωπαϊκό χώρο, η οποία θεωρείται και 5<sup>η</sup> μεγαλύτερη στον κόσμο, συνέβη στην Ολλανδία το 1530 και είναι επιπλέον η χειρότερη φυσική καταστροφή στην χώρα αυτή. Μια δυνατή βροχή πλημμύρισε την περιοχή και παρέσυρε σχεδόν ολόκληρη την πόλη της Reimerswall της Ολλανδίας. Οι νεκροί ξεπέρασαν τους 100.000 (Renfrew and Gray, 2011). Ένα άλλο παράδειγμα αποτελεί το χωριό Jaronnice στην περιοχή Sabinov της βορειοανατολικής Σλοβακίας όπου το 1998 προκλήθηκαν έντονες βροχές και προκάλεσαν τις χειρότερες πλημμύρες στην ιστορία της Σλοβακίας. Τα τραγικά αποτελέσματα αυτών των καταστρεπτικών πλημμυρών ήταν 63 νεκροί, πάνω από 3.000 άνθρωποι να εγκαταλείψουν τα σπίτια τους και 2.000 σπίτια να καταστραφούν ολοκληρωτικά. Στη συνέχεια σημαντικές είναι οι ευρωπαϊκές πλημμύρες του 2009 που δημιουργήθηκαν λόγω μια σειράς φυσικών καταστροφών που έλαβαν χώρα στην Κεντρική Ευρώπη και επηρέασαν την Αυστρία, την Τσεχία, την Γερμανία, την Ουγγαρία, την Πολωνία, την Ρουμανία, την Σερβία, τη Σλοβακία και την Τουρκία. Οι έντονες βροχές προκάλεσαν την υπερχειλίση των ποταμών Όντερ, Βιρτούλα, Έλβα και Δούναβη. Τουλάχιστον 33 άνθρωποι σκοτώθηκαν στις πλημμύρες αυτές. Έπειτα από ένα χρόνο (2010) πλημμύρισε ξανά η Κεντρική Ευρώπη λόγω συνεχόμενων και έντονων μετεωρολογικών γεγονότων που σημειώθηκαν σε αρκετές χώρες. Η Πολωνία ήταν εκείνη με τις μεγαλύτερες επιπτώσεις αλλά και η Αυστρία, η Τσεχία, η Γερμανία, η Ουγγαρία, η Σλοβακία είχαν επίσης σημαντικές επιπτώσεις λόγω των έντονων αυτών φαινομένων. Τουλάχιστον 37 άνθρωποι πέθαναν στις πλημμύρες και περίπου 23.000 άνθρωποι χρειάστηκε να εκκενώσουν τα σπίτια τους. Επιπρόσθετα σημαντικές είναι οι πλημμύρες του Krasnodar Krai το 2012 που σημειώθηκαν κοντά στην ακτή της Μαύρης Θάλασσας, στη νοτιοδυτική Ρωσία. Τουλάχιστον 171 άνθρωποι έχασαν τη ζωή τους λόγω των πλημμυρών και σχεδόν 13.000 κατοικίες καταστράφηκαν. Οι πλημμύρες δημιουργήθηκαν λόγω μιας έντονης καταιγίδας με 2 μέρες συνεχόμενης βροχής που έπληξε το Κρασνοντάρ. Τέλος, το 2014 ένας κυκλώνας επηρέασε μια μεγάλη περιοχή της Νοτιοανατολικής και Κεντρικής Ευρώπης, προκαλώντας πλημμύρες και κατολισθήσεις. Η Σερβία και η Βοσνία-Ερζεγοβίνη υπέστησαν τις μεγαλύτερες ζημιές.

Τουλάχιστον 86 άνθρωποι πέθαναν και χιλιάδες αναγκάστηκαν να εγκαταλείψουν τα σπίτια τους (Saleem, 2016).

#### **1.4. Σύγχρονα συστήματα πρόγνωσης και προσομοίωσης των πλημμυρικών φαινομένων**

Είναι γνωστό ότι το νερό είναι πρωταρχικός παράγοντας για την ύπαρξη ζωής και γι αυτό το λόγο σκοπός είναι να επιτευχθεί η σωστή διαχείριση του γλυκού νερού, ώστε να είναι καλής ποιότητας και επαρκούς ποσότητας και έτσι να μην προκύπτουν προβλήματα στην γεωργία, στη βιομηχανία, στη βιοποικιλότητα και στην ίδια τη ζωή. Δύο σημαντικά προβλήματα που απασχολούν την ανθρωπότητα είναι η διαθεσιμότητα γλυκού νερού και η υπερβολική αύξηση της στάθμης των νερών των επιφανειακών υδάτων που οδηγεί σε πλημμύρες. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητος ο υπολογισμός των διαθέσιμων υδάτων που είναι αποθηκευμένα σε διαφορετικές δεξαμενές (ατμόσφαιρα, έδαφος, υπέδαφος), τα οποία θα χρησιμοποιηθούν σε άρδευση, ύδρευση, παραγωγή ενέργειας, αστική χρήση κλπ. Ο υπολογισμός αυτός πραγματοποιείται με την βοήθεια μοντέλων, μέσα από τα οποία γίνεται προσπάθεια για προσομοίωση πραγματικών συνθηκών.

Παρόλο που υπάρχουν διάφορα μοντέλα προσομοίωσης, στην συγκεκριμένη εργασία θα γίνει αναφορά σε εκείνα που εστιάζουν στις πλημμύρες. Τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για να γίνει όσο το δυνατό πιο ακριβής πρόβλεψη και προειδοποίηση για πλημμύρες είναι κυρίως υδρολογικά και υδρομετεωρολογικά. Αρχικά, τα υδρολογικά μοντέλα είναι ένα σύνολο μαθηματικών τύπων που επεξεργάζονται δεδομένα πεδίου και τελικά εκτιμούν ποσοτικά τις υδρολογικές μεταβλητές της λεκάνης απορροής ή του υδροφορέα ανάλογα με την περίπτωση μελέτης. Οι μαθηματικοί τύποι είναι της μορφής:

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

όπου

y: υδρολογικές μεταβλητές εξόδου (π.χ. απορροή, εξατμισοδιαπνοή, εκφόρτιση υπόγειων νερών)

x<sub>0</sub>: οι αρχικές συνθήκες του φυσικού συστήματος στην έναρξη της προσομοίωσης (π.χ. ύψη εδαφικής υγρασίας, στάθμες υπόγειου νερού)

χ: οι υδρολογικές μεταβλητές εισόδου (π.χ. βροχόπτωση, δυνητική εξατμισοδιαπνοή)

θ: τα χαρακτηριστικά μμεγέθη του συστήματος (π.χ. έκταση λεκάνης)

(Ευστρατιάδης et al, 2009)

Κάποια από τα πιο γνωστά υδρολογικά μοντέλα που έχουν χρησιμοποιηθεί είναι: το Hydrological Modeling System (HEC-HMS), το Soil and Water assessment tool (SWAT), το Système Hydrologique Européenne (SHE), κ.α.

- Το HEC-HMS έχει σχεδιαστεί για να προσομοιώνει τις πλήρεις υδρολογικές διαδικασίες των συστημάτων δενδριτικών λεκανών απορροής. Το λογισμικό περιλαμβάνει πολλές διαδικασίες υδρολογικής ανάλυσης όπως διήθηση, υδρολογική δρομολόγηση κ.α. Το μοντέλο αυτό επίσης περιλαμβάνει διαδικασίες απαραίτητες για συνεχή προσομοίωση όπως η εξατμισοδιαπνοή, το λιώσιμο του χιονιού και η μέτρηση της υγρασίας του εδάφους. Επιπλέον διαθέτει εργαλεία ανάλυσης για την βελτιστοποίηση του μοντέλου, την πρόγνωση της ροής ποταμού, την διάβρωση, την μεταφορά ιζημάτων και την ποιότητα του νερού. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αποθηκεύονται σε HEC-DSS (Data Storage System), δηλαδή σε ένα σύστημα αποθήκευσης δεδομένων, και μπορούν να χρησιμοποιηθούν με άλλα λογισμικά για μελέτη της διαθεσιμότητας του νερού, πρόβλεψη ροής, επίδραση μελλοντικής αστικοποίησης, μείωση καταστροφών από πλημμύρες, ρύθμιση πλημμυρικών περιοχών κλπ ("HEC-HMS", 2017)
- Το SWAT είναι ένα μοντέλο που αφορά λεκάνες απορροής ποταμών και εφαρμόζεται σε πολιτικές διαχείρισης εδαφών όταν τα υδροσυστήματα είναι πολύπλοκα. Τα δεδομένα που επεξεργάζεται το SWAT είναι ο καιρός, η επιφανειακή απορροή, η διήθηση, η εξατμισοδιαπνοή, η αποθήκευση δεξαμενών, η ροή υπόγειων υδάτων κλπ. Το μοντέλο αυτό συνεργάζεται με συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών (GIS) και εφαρμόζεται στην Ευρώπη, την Κίνα, την Κένυα, το Πακιστάν κ.α. (Arnold et.al, 1998)
- Το SHE είναι ένα τυπικό μοντέλο υδρολογικής ανάλυσης υλοποιημένο στα πλαίσια των πακέτων MIKE-SHE και SHETRAN, το οποίο χρησιμοποιείται σε πολλά ευρωπαϊκά κράτη (στην Γαλλία, Δανία και Αγγλία) και υποστηρίζεται από την εταιρεία DHI (Danish Hydrological Institute). Ανήκει στην κατηγορία των μοντέλων συνεχούς προσομοίωσης, δηλαδή τα δεδομένα εισόδου του περιλαμβάνουν χρονοσειρές παρατηρήσεων

μετεωρολογικών μεταβλητών και δεδομένα εξόδου ένα υδρογράφημα της αντίστοιχης περιόδου. (Abbott et al.,1986). Το υδρολογικό μοντέλο MIKE-SHE μαζί με το εξίσου υδρολογικό μοντέλο DMI-HIRHAM RCM έχουν χρησιμοποιηθεί για προσομοίωση του υδρολογικού κύκλου. (Larsen et al,2014)

Για να ληφθεί υπόψη η επίδραση άλλων παραγόντων στον υδρολογικό κύκλο όπως είναι οι αλλαγές στο κλίμα ή η γεωμορφολογία έχουν δημιουργηθεί συζευγμένα μοντέλα που χρησιμοποιούνται ευρέως π.χ. υδρομετεωρολογικά μοντέλα που προσομοιώνουν αποτελεσματικότερα την αλληλεπίδραση υδρολογίας, ατμόσφαιρας και εδάφους. Επειδή είναι πιο ολοκληρωμένα τα μοντέλα αυτά μπορούν να προσφέρουν πρόβλεψη, ακόμα και έγκαιρη προειδοποίηση σε περίπτωση πλημμύρας ή κάποιου άλλου ακραίου καιρικού φαινομένου. Η ανάπτυξη για πρόβλεψη και προειδοποίηση για τις πλημμύρες είναι πολύ σημαντικό στοιχείο στρατηγικής τόσο σε τοπικό όσο και σε παγκόσμιο επίπεδο. Μέσα από δίκτυα μετρητικών σταθμών, τα μοντέλα αυτά λαμβάνουν υπόψη ανάλογα με την περίπτωση, κάποιους καθοριστικούς 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, η ακτινοβολία κλπ. Ένα παράδειγμα υδρομετεωρολογικού μοντέλου είναι το WRF-Hydro το οποίο είναι έκδοση του Weather Research Forecast (WRF) και διαφέρει από αυτό στο ότι γίνεται ανάλυση ροών επιφανειακών υδάτων που επηρεάζουν την υγρασία, την εξατμισοδιαπνοή, την βροχόπτωση και την επιφανειακή θερμοκρασία. Για να λειτουργήσει χρειάζεται γεωλογικά και ατμοσφαιρικά δεδομένα εισόδου. Για τα γεωλογικά δεδομένα συμβάλλει το πρόγραμμα Geographic Information System (GIS) ενώ για τα ατμοσφαιρικά το εδαφικό μοντέλο NOAH (Hiatt, 2015). Το συγκεκριμένο μοντέλο έχει χρησιμοποιηθεί για πρόγνωση πλημμύρων στο Ισραήλ (Givati et al, 2014), στην λεκάνη απορροής που περικλείει τα Ιμαλάια, τον κόλπο της Βεγγάλης και τον Ινδικό Ωκεανό (Li et al, 2014), ακόμα και στην Μαύρη θάλασσα στην Τουρκία (Yucel and Onen, 2014). Το μοντέλο αποδείχθηκε ικανοποιητικό στην ανάλυση του εδάφους μετά από πολλαπλές χρήσεις όπως στις παραπάνω εφαρμογές. Από το 1990 και μετά η πρόγνωση για πλημμύρες έχει εξελιχθεί αρκετά, εφόσον χρησιμοποιήθηκε ο συνδυασμός ατμοσφαιρικού και υδρολογικού μοντέλου, με κύριο δεδομένο εισόδου την βροχόπτωση. Μάλιστα αν τα δεδομένα βροχόπτωσης προέρχονται από ραντάρ το αποτέλεσμα της πρόγνωσης θα είναι πιο ακριβές. Τα τελευταία χρόνια γίνεται

επιπλέον εκτίμηση της βροχόπτωσης σε πραγματικό χρόνο. Τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται κυρίως είναι το BF5, το MM5-WEYH και το European Flood Alert System (EFAS) .

Στην Ελλάδα δεν υπάρχει ακόμα ένα αξιόπιστο προγνωστικό σύστημα πλημμυρικού κινδύνου βασιζόμενο σε παρατηρήσεις και υδρολογικές προσομοιώσεις που να καλύπτει ολόκληρη την επικράτεια. Δεν υπάρχει επίσης αντίστοιχο σύστημα διαχείρισης της ποσότητας των υδάτων της χώρας. Κάποιες επιμέρους προσπάθειες έχουν γίνει από το Ελληνικό Κέντρο Θαλάσσιων Ερευνών (ΕΛΚΕΘΕ) και το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών (ΕΑΑ) (Κοτρώνη and Λαγουβάρδος,2015).

Με βάση τα παραπάνω οι στόχοι της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι :

- Η υδρομετεωρολογική μελέτη ενός πλημμυρικού γεγονότος που έλαβε χώρα στον ποταμό Ευρώτα της Λακωνίας στις 7 Σεπτεμβρίου 2016.
- Η προσομοίωση του συγκεκριμένου πλημμυρικού γεγονότος από ένα σύγχρονο υδρομετεωρολογικό μοντέλο

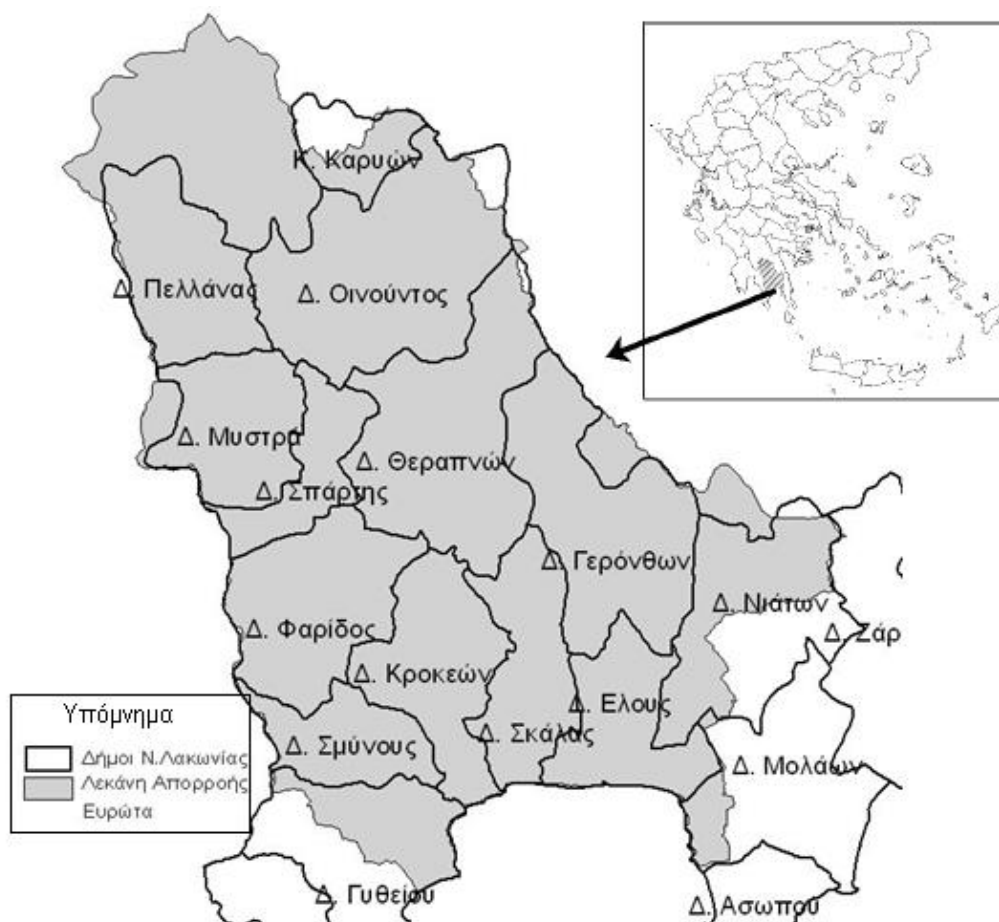
Η υλοποίηση των στόχων αυτών, θα πραγματοποιηθεί σταδιακά μέσα από τα κεφάλαια που ακολουθούν. Αρχικά γίνεται αναφορά στα ιδιαίτερα διοικητικά, γεωμορφολογικά, γεωφυσικά, και υδρολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής του Ευρώτα έτσι ώστε να γίνει όσο το δυνατό πιο αναλυτική η παρουσίαση της περιοχής μελέτης. Έπειτα, απαριθμούνται οι μετεωρολογικοί και βροχομετρικοί σταθμοί που υπάρχουν στην συγκεκριμένη λεκάνη οι οποίοι καταγράφουν τις βροχοπτώσεις ανά δεκάλεπτο έτσι ώστε να γίνεται ετήσια αλλά και μηνιαία σύγκριση τιμών, με ιδιαίτερη έμφαση στο μήνα Σεπτέμβρη. Ακολουθεί αναλυτική προσέγγιση του πλημμυρικού επεισοδίου της 7<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου τόσο από μετεωρολογική άποψη (δυναμική της ατμόσφαιρας), όσο και από την περιγραφή των γεγονότων όπως συνέβησαν, καθώς και τις συνέπειές τους. Τα γεγονότα αυτά προσομοιώθηκαν μέσα από το μοντέλο WRF έκδοσης 3, του οποίου τα χαρακτηριστικά περιγράφονται αναλυτικά. Το μοντέλο αυτό προσομοίωσε την πλημμύρα του Ευρώτα καταγράφοντας το ύψος υετού καθώς και την επιφανειακή απορροή του ποταμού σε τέσσερα περιμετρικά σημεία, στα οποία παρουσιάζονται και τα αντίστοιχα υδρογραφήματα. Τελικά γίνεται μια σύγκριση της προσομοίωσης αυτής με τα πραγματικά γεγονότα, για να φανεί η αξιοπιστία του μοντέλου.

## Κεφάλαιο 2: Περιοχή Μελέτης

### 2.1. Λεκάνη απορροής του Ευρώτα

Η λεκάνη απορροής του ποταμού Ευρώτα εντάσσεται γεωγραφικά στην νοτιανατολική Πελοπόννησο και έχει έκταση 2420 km<sup>2</sup>. Την μεγαλύτερη έκταση της λεκάνης περιλαμβάνει ο νομός Λακωνίας ενώ μερικά τμήματα περιλαμβάνονται και στον νομό Αρκαδίας. Η λεκάνη απορροής του ποταμού συνορεύει βόρεια και βορειοανατολικά με το νομό Αρκαδίας, δυτικά με τον νομό Μεσσηνίας και νότια βρίσκεται ο λακωνικός κόλπος. Οι κύριοι ορεινοί όγκοι της λεκάνης είναι ο Ταΰγετος και ο Πάρνωνας, ενώ ο Ευρώτας αποτελεί τον δεύτερο μεγαλύτερο ποταμό της Πελοποννήσου, μετά τον Αλφειό. (Νικολαΐδης et. al, 2009 ; Βοζινάκη, 2009)

Πρωτεύουσα του νομού Λακωνίας είναι η Σπάρτη, η οποία αποτελεί το μεγαλύτερο αστικό κέντρο του νομού αλλά και της λεκάνης απορροής με πληθυσμό περίπου 16.239 (απογραφή 2011). Ο συνολικός πληθυσμός του νομού Λακωνίας ανέρχεται σε 89.138 κατοίκους (απογραφή 2011). Στην λεκάνη απορροής του ποταμού Ευρώτα ανήκουν οι δήμοι: Πελλάνας, Οινούντος, Μυστρά, Σπάρτης, Θεραπνών, Φάριδος, Σμύνους, Κροκεών, Σκάλας, Γερωνθών και Έλους, του νομού Λακωνίας. Επιπλέον υπάρχουν και κάποιοι δήμοι που μόνο ένα μέρος τους είναι ενσωματωμένο στην λεκάνη απορροής και αυτοί είναι: Γυθείου, Νιάτων και Μολάων και της κοινότητας Καρυών του Ν. Λακωνίας ενώ οι δήμοι του νομού Αρκαδίας: Σκυριτίδας και Φαλαισίας (χάρτης 2.1.1). Συνολικά η λεκάνη αποτελείται από 95 δημοτικά διαμερίσματα εκ των οποίων τα 90 βρίσκονται στον νομό Λακωνίας, ενώ τα υπόλοιπα 5 στον νομό Αρκαδίας. (Νικολαΐδης et. al, 2009; Βοζινάκη, 2009)



**Χάρτης 2.1.1.** Δήμοι του Νομού Λακωνίας που βρίσκονται μέσα στα όρια της λεκάνης απορροής του ποταμού Ευρώτα (πηγή: Νικολαΐδης et. al, 2009)

## 2.2. Ο ποταμός Ευρώτας και οι παραπόταμοί του

Ο Ευρώτας πηγάζει νότια της Μαντινείας, στην νοτιοανατολική περιοχή της Μεγαλόπολης, στο αρκαδικό οροπέδιο, σε υψόμετρο 500μ. Ο ποταμός με κατεύθυνση από βορά προς νότο, αρχικά διασχίζει τον νομό Αρκαδίας, στην συνέχεια τον νομό Λακωνίας περνώντας μέσα από την πεδιάδα της Σπάρτης και καταλήγει στην δελταϊκή περιοχή όπου εκβάλει στον λακωνικό κόλπο. Το Δέλτα του Ευρώτα είναι πολύ μεγάλης σημασίας καθώς αποτελεί έναν από τους τελευταίους σημαντικούς υδροβιότοπους στη Νότια Ελλάδα και αποτελεί παράλληλα περιοχή Natura 2000 με χιλιάδες υδρόβια και παρυδατικά πουλιά να βρίσκουν καταφύγιο εκεί. Το μήκος του ποταμού ξεπερνάει τα 82 km.

Στην περιοχή της Σπάρτης βρίσκεται η κύρια κοιλάδα της λεκάνης απορροής του Ευρώτα η οποία έχει διεύθυνση βορειοδυτικά- νοτιοανατολικά. Ανατολικά και δυτικά της βρίσκονται



δύο μεγάλες οροσειρές, του Ταϋγέτου και του Πάρνωνα, οι οποίες καλύπτουν το μεγαλύτερο μέρος της λεκάνης απορροής.

Από τις δύο οροσειρές που περιβάλλουν τον Ευρώτα ποταμό κατεβαίνουν αρκετοί παραπόταμοι 2<sup>ης</sup>, 3<sup>ης</sup> και 4<sup>ης</sup> τάξης καθώς και χείμαρροι κυρίως εφήμερου και διακοπτόμενου χαρακτήρα. Οι σημαντικότεροι από τους παραπόταμους είναι ο Γερακάρης και το Αρδελολάγκαδο από τον Ταϋγέτο, ενώ από τον Πάρνωνα ο Οινούντας, το Μεγάλο Ρέμα και το Μαριόρεμα. Μεγαλύτερος και σημαντικότερος παραπόταμος θεωρείται αυτός του Οινούντα ή Κελεφίνα, ο οποίος πηγάζει από τον Πάρνωνα στα βορειοανατολικά της Σπάρτης και αποτελείται από μικρότερα ρέματα (Κακόρεμα, Σωφρώνης, Δόξνια). Ο συγκεκριμένος παραπόταμος ενώ παλαιότερα ήταν μόνιμης ροής, σήμερα κατά τους καλοκαιρινούς μήνες ξηραίνεται στα κατώτερα τμήματά του καθώς τα νερά του χρησιμοποιούνται για ανάγκες ύδρευσης και άρδευσης. Ένας ακόμα μικρός αλλά σημαντικός σε παροχή παραπόταμος, είναι αυτός της Μαγουλίτσας ο οποίος πηγάζει από τον Ταϋγέτο, βορειοδυτικά της Σπάρτης. Όπως και ο παραπόταμος του Οινούντα, έτσι και αυτός αντιμετωπίζει προβλήματα ξηρασίας τους καλοκαιρινούς μήνες στα κατώτερα τμήματά του λόγω υδροαρδευτικών αναγκών. Επιπλέον παραπόταμοι σημαντικοί για την περιοχή της Σπάρτης είναι : Κάκαρης και Ρασίνας αν και το νερό τους δεν φτάνει στον Ευρώτα τους ξηρούς μήνες. (Tzoraki et al.,2013; Νικολαΐδης et. al, 2009)

**Πίνακας 2.2.1.** Μήκος υγρής επιφάνειας παραποτάμων του Ευρώτα κατά την άνοιξη και το τέλος της ξηρής περιόδου του 2007.(ΕΛΚΕΘΕ, 2009)

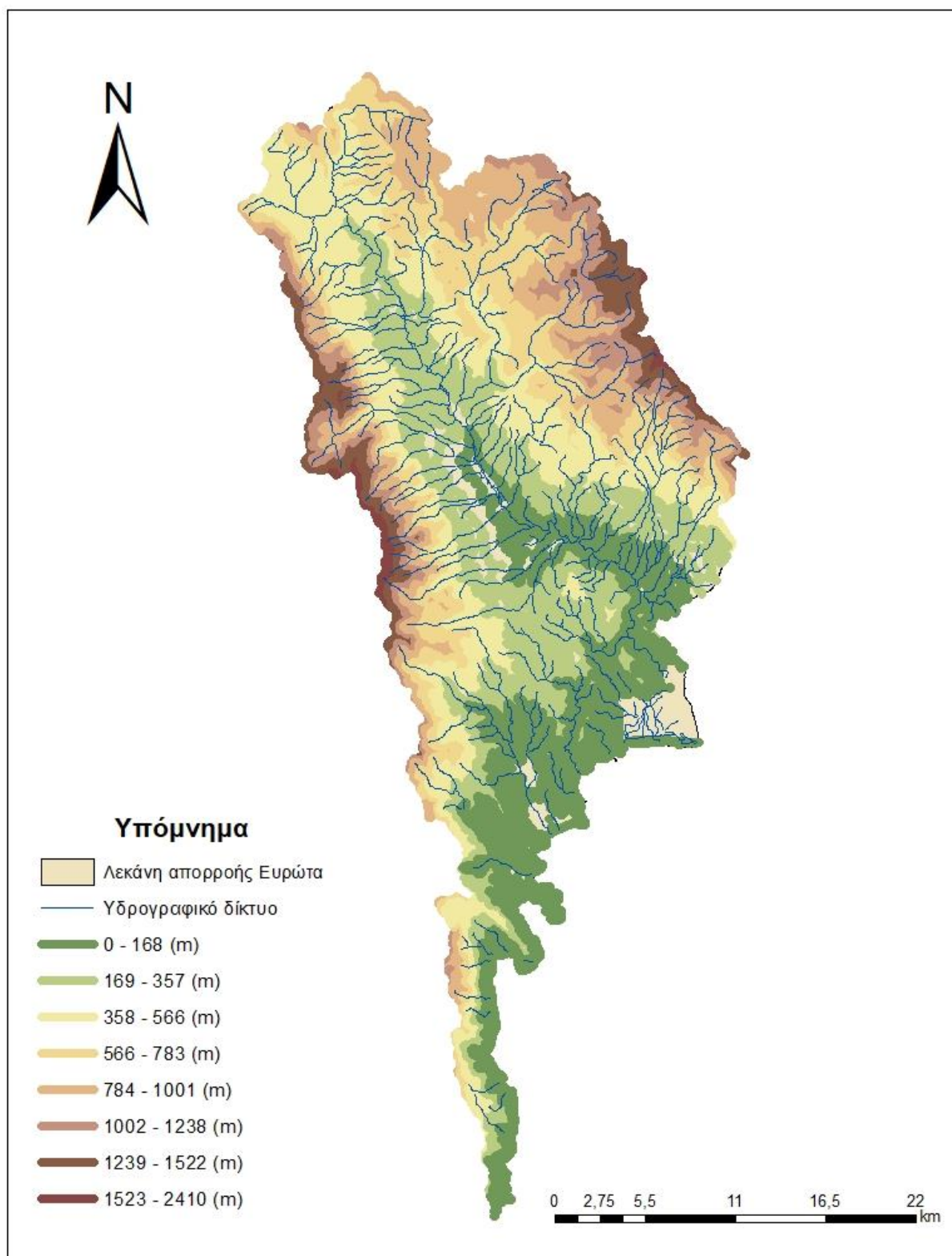
| Όνομα παραπόταμου | Άνοιξη 2007 | Τέλος ξηρής περιόδου 2007  |
|-------------------|-------------|----------------------------|
| Μήκος             | [μέτρα]     | [μέτρα]                    |
| Βαθύρεμα          | 1,416       | ο (στάσιμο νερό για 570 μ) |
| Βουτικιότης       | 2,850       | ο                          |
| Γερακάρης         | 7,247       | 800 (στάσιμα νερά)         |
| Κάκαρης           | 4,665       | ---                        |
| Κοκόρεμα          | 1,014       | ο                          |
| Καστανιότης       | 2,518       | 2,518                      |
| Βρυσιώτικο        | 2,682       | 2,641                      |
| Κερασιώτικο       | 6,014       | ---                        |
| Κάρδαρης          | 2,868       | 2,542 (ρέοντα νερά)        |
| Κοττσάνης         | 4,185       | 600 (στάσιμα νερά)         |
| Μαγουλίτσα        | 11,780      | 2,795                      |
| Μυλοπόταμος       | 3,011       | 600                        |
| Νίκοβα            | 4,136       | ο                          |
| Ξερίλας           | 6,521       | ο                          |
| Οινούς            | 17,032      | 8,398                      |
| Παρορίτης         | 3,803       | ο                          |
| Βεριάς            | 368         | ---                        |
| Σκατιάς           | 7,468       | ο                          |
| Τζιτζινιώτικο     | 2,731       | ---                        |
| Τυφλό             | 2,005       | 700                        |
| Φτερωτή           | 2,942       | 200                        |

## 2.3. Γεωμορφολογία του εδάφους και υδρογεωλογική συμπεριφορά

Το 41,1% της περιοχής έχει υψόμετρο μεγαλύτερο από 600m, το 46,2% έχει υψόμετρο 150-600m, ενώ μόλις το 12,7% έχει υψόμετρο κάτω από 150m. Από τα ποσοστά αυτά συμπεραίνεται ότι το μεγαλύτερο τμήμα της λεκάνης είναι ορεινό και ημιορεινό (βλέπε χάρτη 2.3.1.). Ψηλότερη κορυφή της οροσειράς του Ταυγέτου θεωρείται ο Προφήτης Ηλίας με υψόμετρο 2404μ, που βρίσκεται στα όρια της Λεκάνης, ενώ ψηλότερη κορυφή του Πάρνωνα είναι η Μεγάλη Τούρλα, 1936μ ύψους, η οποία τοποθετείται βορειότερα της λεκάνης σε σχέση με τον Ταΰγετο. (Tzoraki et al., 2013)

Ως προς την υδρογεωλογική συμπεριφορά στη λεκάνη απορροής του Ευρώτα, τα πετρώματα διακρίνονται σε καρστικούς υδροφορείς, αλλουβιακούς υδροφορείς και διαπερατά πετρώματα. Μάλιστα το μεγαλύτερο ποσοστό της λεκάνης αποτελείται από μακροπερατά και

μικροπερατά πετρώματα, δηλαδή από καρστικά και ρωγμώδη πετρώματα αντίστοιχα. (Tzoraki et al., 2013)



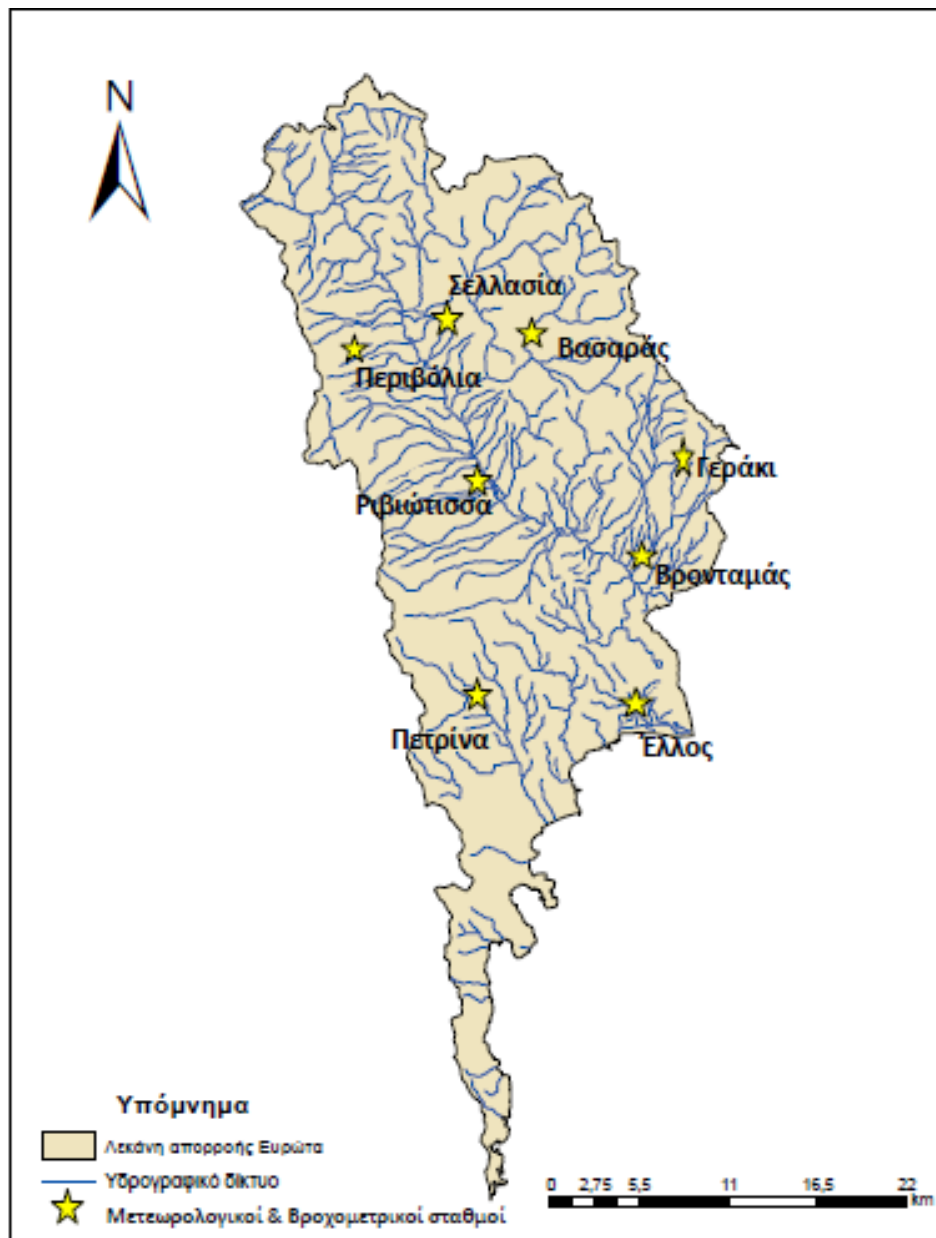
**Χάρτης 2.3.1.** Υψομετρικό ανάγλυφο της λεκάνης απορροής του Ευρώτα ποταμού (ιδία επεξεργασία, χρήση dem -Astergdem)

## 2.4. Καταγραφικοί σταθμοί

Οι σταθμοί που υπολογίζουν το υψόμετρο βροχής και υετού για την λεκάνη απορροής του Ευρώτα και που παρέχουν ημερήσια δεδομένα είναι 7, εκ των οποίων οι 3 είναι μετεωρολογικοί : ο σταθμός του Έλους που βρίσκεται σε υψόμετρο 4μ, της Ριβιώτισσας σε υψόμετρο 163,5μ και της Σελλασίας σε υψόμετρο 590μ, ενώ οι υπόλοιποι 4 καταγράφουν μόνο την βροχόπτωση και αυτοί είναι : του Βρονταμά σε υψόμετρο 280μ (λειτουργεί από το 1953), των Περιβολιών σε υψόμετρο 490μ, του Βασαρά σε υψόμετρο 646μ και της Πετρίνας 240μ. Επιπλέον, τελευταίος σταθμός που προστέθηκε είναι αυτός του Γερακίου ο οποίος λειτουργεί από το 2013 και ανήκει στο Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο. Αυτόματα καταγραφικά της στάθμης έχουν τοποθετηθεί και λειτουργούν από το 2007 καταγράφοντας τη στάθμη του ποταμού ανά 10 λεπτά στις ακόλουθες θέσεις: Σκάλα, Βιβάρι, Σκορτσινό, Σπάρτη, Βρονταμά, Κελεφίνα. (Tzoraki et al., 2013; Νικολαΐδης et. al, 2009)

**Πίνακας 2.4.1.** Μέσο ετήσιο ύψος βροχής των βροχομετρικών σταθμών εντός της λεκάνης απορροής για τα έτη 2000 έως 2008 (πηγή: Envifriendly, 2009)

| Χρονικό διάστημα 2000-2008 |                       |
|----------------------------|-----------------------|
| Βροχομετρικοί Σταθμοί      | Μέσο Ύψος Βροχής (mm) |
| Περιβόλια                  | 1382                  |
| Βασαράς                    | 776                   |
| Έλους                      | 539                   |
| Ριβιώτισσα                 | 878                   |
| Σελλασία                   | 727                   |
| Βρονταμάς                  | 618                   |
| Πετρίνα                    | 782                   |



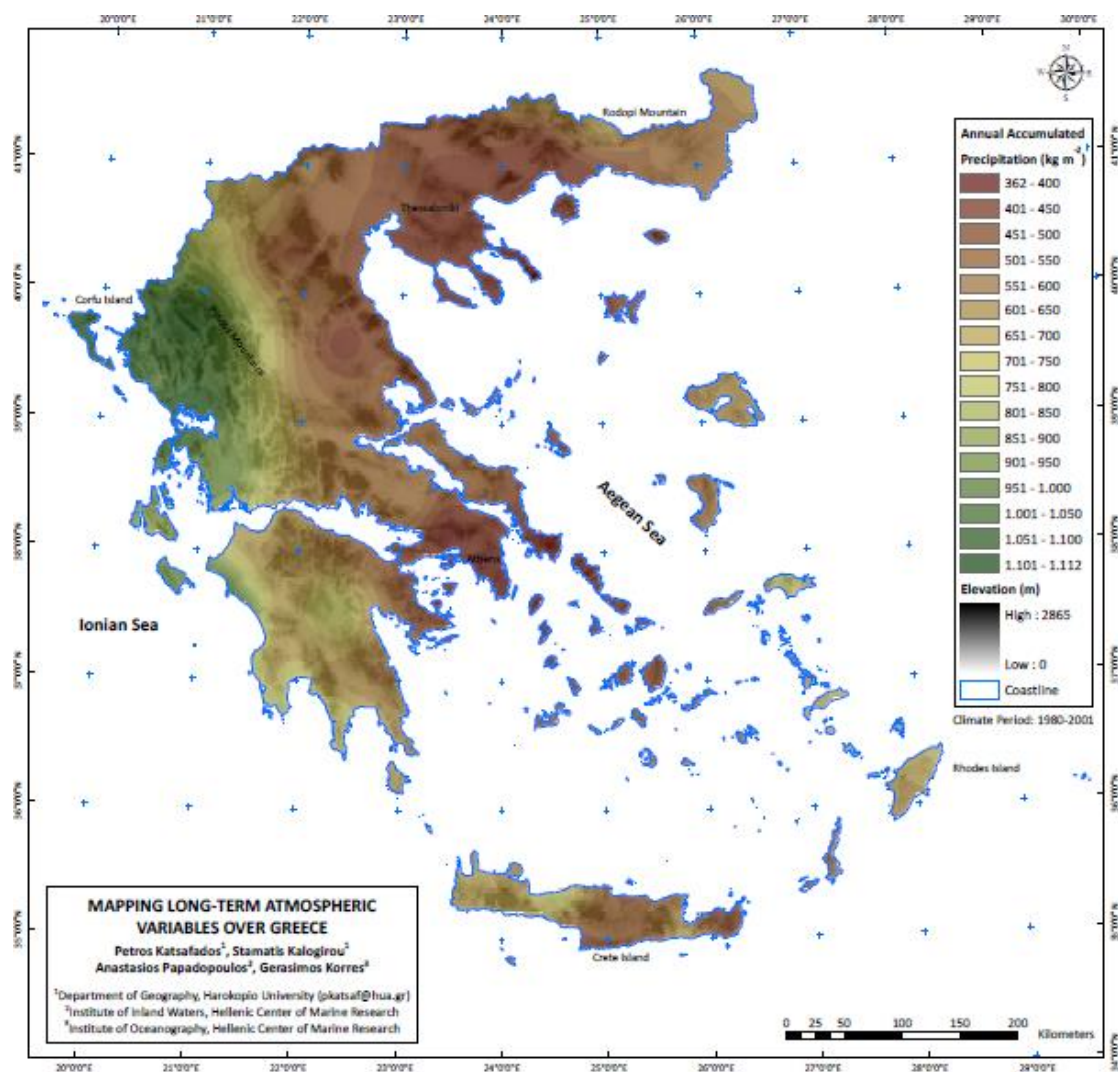
**Χάρτης 2.4.1.** Μετεωρολογικοί και βροχομετρικοί σταθμοί της λεκάνης απορροής του Ευρώτα.

*Ιδία επεξεργασία, χρήση dem- Astergdem)*

Από τα παραπάνω στοιχεία μπορεί κανείς να διακρίνει ότι ο σταθμός Περιβόλια συγκέντρωνε την περισσότερη βροχή σχεδόν μια δεκαετία από το 2000 έως το 2008. Το γεγονός αυτό δεν είναι τυχαίο αν σκεφτεί κάποιος ότι ο συγκεκριμένος σταθμός βρίσκεται τοποθετημένος κοντά στον Ταΰγετο, που είναι η ψηλότερη οροσειρά στην λεκάνη απορροής. Αντίθετα ο σταθμός Έλος φαίνεται είχε συγκεντρώσει για το ίδιο χρονικό διάστημα την λιγότερη μέση ετήσια βροχόπτωση και αυτό δικαιολογείται στο χαμηλό υψόμετρο του σταθμού (4μ).

## 2.5. Κατανομή Βροχοπτώσεων

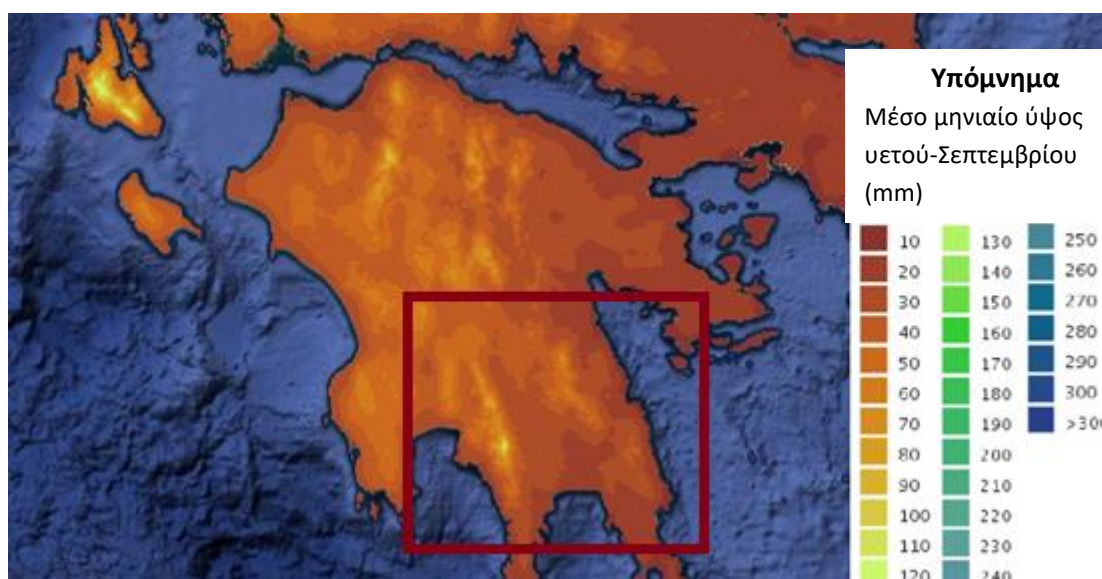
Στο Νομό Λακωνίας (όπως και στο μεγαλύτερο μέρος του Ελλαδικού χώρου) έχουμε ανισομερή κατανομή των βροχοπτώσεων τόσο στο χώρο όσο και στο χρόνο. Το μεγαλύτερο μέσο ετήσιο ύψος βροχής παρουσιάζεται στον ορεινό όγκο του Ταΰγétου και κυρίως στο βόρειο τμήμα του (1300-1600mm), ενώ στον Πάρνωνα έχουμε (1000-1200mm). Στο πεδινό τμήμα του Λεκανοπεδίου έχουμε (700-800mm) και στα παράλια (500-550mm) ενώ στις δύο χερσονήσους το μέσο ετήσιο ύψος βροχής δεν ξεπερνά τα (450-500mm). Το μεγαλύτερο ποσοστό των βροχών πέφτει το Φθινόπωρο -Χειμώνα (70-75% ) και την Άνοιξη (20%) ενώ το Καλοκαίρι κυμαίνεται από (5-10%). Η περιοχή χαρακτηρίζεται από μια μέση ετήσια βροχόπτωση της τάξεως των 802mm. (Νικολαΐδης et. al, 2009)





**Χάρτης 2.5.1.** Κλιματικός χάρτης που απεικονίζει το μέσο ετήσιο ύψος υετού (πηγή: Katsafados P., S. Kalogirou, A. Papadopoulos, and G. Korres, 2012: "Mapping long-term atmospheric variables over Greece", *Journal of Maps* 8 (2), pp. 181-184.)

Όσον αφορά την λεκάνη απορροής του Ευρώτα η μέση ετήσια βροχόπτωση υπολογίζεται να είναι 78 mm. Πληθώρα βροχόπτωσης πέφτει κατά την περίοδο Οκτωβρίου-Μαρτίου, ενώ πιο υγρός μήνας χαρακτηρίζεται ο Δεκέμβρης και πιο ξηρός ο Ιούνιος. Βροχοπτώσεις παρατηρούνται καθ' όλη την διάρκεια του έτους και παγετοί είναι εμφανείς από τον Οκτώβριο μέχρι και τον μήνα Απρίλιο. (Βοζινάκη Α, 2009)



**Χάρτης 2.5.2.** Κλιματικός χάρτης που απεικονίζει το μέσο μηνιαίο ύψος υετού για τον μήνα Σεπτέμβρη από το 1971 έως το 2000. Στο κόκκινο πλαίσιο περικλείεται η λεκάνη απορροής του Ευρώτα. (πηγή: ΕΜΥ, κλιματικός Άτλαντας Ελλάδας, <http://climatlas.hnms.gr/sdi/>)

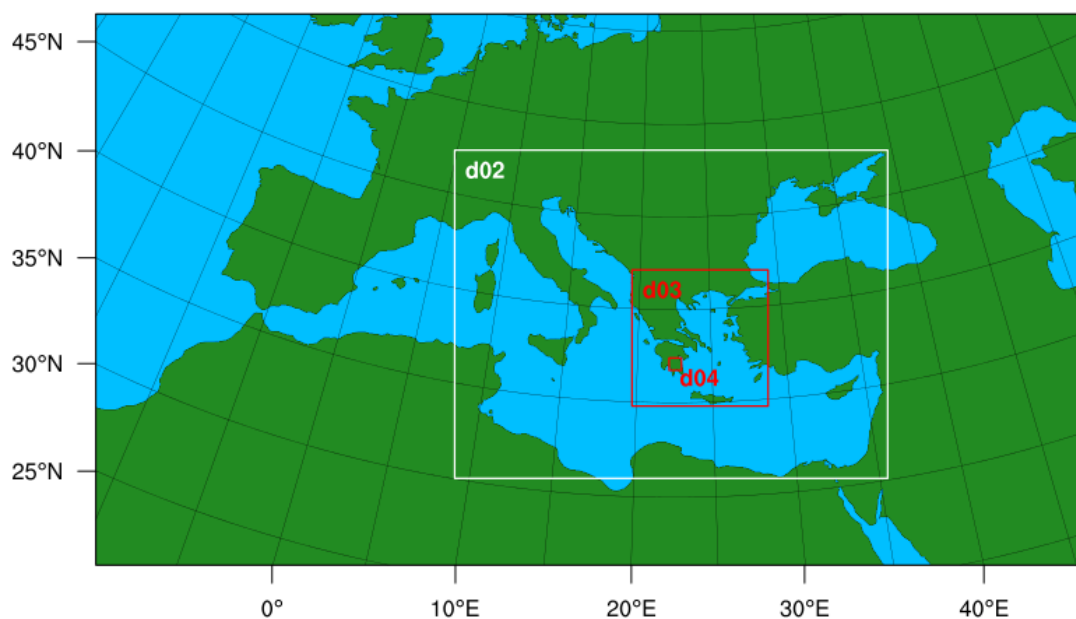
Μέσα από δεδομένα του παραπάνω χάρτη της ΕΜΥ (για το χρονικό διάστημα 1971 έως 2000) όσον αφορά το μέσο μηνιαίο ύψος υετού γίνεται εστίαση στον μήνα Σεπτέμβρη. Η τιμή για το μέσο μηνιαίο ύψος υετού Σεπτεμβρίου κυμαίνεται μεταξύ 20 και 40 mm (ΕΜΥ, κλιματικός Άτλαντας Ελλάδας). Παρόλα αυτά ο Σεπτέμβρης του 2016 φαίνεται να διαφοροποιείται αρκετά από τους προηγούμενους εφόσον συγκέντρωσε το μεγαλύτερο ύψος βροχής που έχει μετρηθεί στην λεκάνη απορροής. Παρατηρήθηκε ότι το μέσο μηνιαίο ύψος υετού ήταν 3 φορές μεγαλύτερο από τις κανονικές τιμές και το μέσο μηνιαίο ύψος βροχής 1,5 φορά μεγαλύτερο. Πιο συγκεκριμένα στο Γεράκι τον Σεπτέμβρη του 2016 το ύψος υετού έφτασε 254,2 mm (Atmosphere and Climate Dynamics Group, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο). Σύμφωνα με

τα στοιχεία του μετεωρολογικού σταθμού Γερακίου από το 2013 που τέθηκε σε εφαρμογή για πρώτη φορά, ο Σεπτέμβριος του 2016 ήταν ο πιο βροχερός με 254,2 τόνους νερό ανά στρέμμα. Ακολουθούν ο Σεπτέμβριος του 2015 με 114,4, ο Σεπτέμβριος του 2013 με 46,6 και τέλος ο σχετικά άνυδρος Σεπτέμβριος του 2014 με 16,4. Αρκετά αξιοπερίεργο είναι ότι ενώ ο μήνας Σεπτεμβρίου είναι σχετικά άνυδρος για την περιοχή, το 2016 ξεπέρασε ακόμα και την ποσότητα βροχής κατά τη διάρκεια των πιο βροχερών μηνών, όπως είναι ο Νοέμβριος και ο Δεκέμβριος. (Βάρλας Γ, προσωπική επικοινωνία )

## **2.6. Περιγραφή μοντέλων προσομοίωσης για τον Ευρώτα**

Στην περιοχή μελέτης του Ευρώτα χρησιμοποιήθηκαν μοντέλα συζευγμένα που συνδυάζουν μεταβλητές ατμόσφαιρας, εδάφους και υδρολογίας. Αρχικά έτρεξε το ατμοσφαιρικό μοντέλο WRF. Η έκδοση 3.8. του μοντέλου WRF (Skamarock et al, 2008) διαμορφώνεται σε 4 εμφωλιασμένα πεδία ολοκλήρωσης με οριζόντια ανάλυση 36,12,4 και 1 km και σε 38 κατακόρυφα επίπεδα που εκτείνονται από την επιφάνεια έως 50 hPa χρησιμοποιώντας τη συντεταγμένη υδροστατικής πίεσης που ακολουθεί το έδαφος. Για τη δημιουργία αρχικών και οριακών συνθηκών χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα πρόβλεψης από το Διεθνές σύστημα πρόβλεψης (GFS) με οριζόντια ανάλυση 0.5 x 0.5 . Η χρονική διακριτοποίηση των αποτελεσμάτων είναι ανά 3 ώρες, με ώρα έναρξης 12 UTC στις 6 Σεπτεμβρίου 2016. Επιπλέον, κατά την διάρκεια της προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκε ανάλυση της επιφανειακής θαλάσσιας θερμοκρασίας (SST) για την 5<sup>η</sup> Σεπτεμβρίου και ώρα 00:00 UTC από τα Εθνικά Κέντρα Περιβαλλοντικής Πρόγνωσης (NCEP). Τα δεδομένα στατικής εισόδου που απαιτήθηκαν κατά την φάση προεπεξεργασίας του μοντέλου WRF ανακτήθηκαν από τα δεδομένα παγκόσμιας ανάλυσης εδάφους πολλαπλών αναλύσεων (3a- arc-sec USGS GMTED, 2010), τα δεδομένα βλάστησης MODIS FPAR και τα στοιχεία χρήσης γης 21 κλάσεων IGBP MODIS.





**Εικόνα 2.6.1.** Οι 4 τομείς με οριζόντια ανάλυση 36,12,4 και 1 km και τα 38 κατακόρυφα επίπεδα που εκτείνονται από την επιφάνεια έως 50 hPa του μοντέλου WRF

Το αναθεωρημένο σχέδιο Monin-Obukhov (Jimenez et al., 2012) χρησιμοποιείται για την προσομοίωση των διεργασιών στο επιφανειακό στρώμα. Για την προσομοίωση των διεργασιών της Πλανητικής Οριακής Στρώσης (PBL) χρησιμοποιείται το πρόγραμμα του Πανεπιστημίου Yonsei (Hong et al., 2006, YSU). Οι διαδικασίες εδάφους έχουν προσομοιωθεί με το ενιαίο μοντέλο επιφάνειας εδάφους (Tewari et al., 2004, Unified NOAH). Για την επίλυση των διεργασιών ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος και βραχέων κυμάτων χρησιμοποιείται το σχήμα RRTMG (Iacono et al., 2008). Το μοντέλο WRF Single-moment 6-class (Hong and Lim, 2006) χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της μικροφυσικής. Τέλος, το σχήμα Kain-Fritsch (Kain, 2004) χρησιμοποιείται έτσι ώστε να αντιπροσωπεύει τις μεταφορικές διεργασίες.

Το μοντέλο WRF-Hydro έκδοσης 3 (Gochis et al., 2015) είναι διαμορφωμένο έτσι ώστε να προσομοιώνει τις υδρολογικές διεργασίες στην περιοχή του ποταμού Ευρώτα σε ένα τομέα με οριζόντια ανάλυση 100 m. Δεδομένα από τον 4ο τομέα (1 χλμ.) του μοντέλου WRF παρεμβάλλονται στον τομέα WRF-Hydro για να ωθούν τις υδρολογικές εξισώσεις με μετεωρολογικές πληροφορίες κάθε 1 ώρα.

**Πίνακας 2.6.1.** Συνοπτικός πίνακας με τα στοιχεία της προσομοίωσης του μοντέλου WRF V.3.8 για την περιοχή του Ευρώτα.

| Στοιχεία μοντέλου                | Ατμοσφαιρικά στοιχεία                                                           |
|----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| Μοντέλο                          | WRF V 3.8.                                                                      |
| Οριζόντια ανάλυση                | 36kmx 12kmx4kmx1km                                                              |
| Φασματική ανάλυση                | -                                                                               |
| Κατακόρυφη συνάρτηση             | επιφάνεια έως 50hPa με συντεταγμένη υδροστατικής πίεσης που ακολουθεί το έδαφος |
| Κατακόρυφα επίπεδα               | 38                                                                              |
| Χρονικά βήματα                   | χρονική διακριτικοποίηση ανα 3 ώρες                                             |
| Αρχικές και οριακές συνθήκες     | GFS 0.5x0.5                                                                     |
| SST                              | NCEP ανα 3 ώρες                                                                 |
| Επιφανειακό στρώμα               | αναθεωρημένο σχέδιο Monin-Obukhov                                               |
| PBL                              | YSU                                                                             |
| Μικροφυσική                      | WRF Single-moment-6-class                                                       |
| Μεταφορικές Διεργασίες (Cumulus) | Kain-Fritsch                                                                    |
| Επιφανειακό έδαφος               | ενιαίο μοντέλο NOAH                                                             |
| Ακτινοβολία                      | RRTMG                                                                           |
| συζευγμένο με WRF-Hydro          | Ενεργοποιημένο                                                                  |
| Τοπογραφία                       | 3a-arc-sec USGS GMTED 2010                                                      |
| Βλάστηση                         | MODIS FPAR                                                                      |
| Χρήσεις γης                      | 21 κλάσεις IGBP MODIS                                                           |

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Αναλυτική προσέγγιση του πλημμυρικού επεισοδίου στις 7 Σεπτεμβρίου 2016**

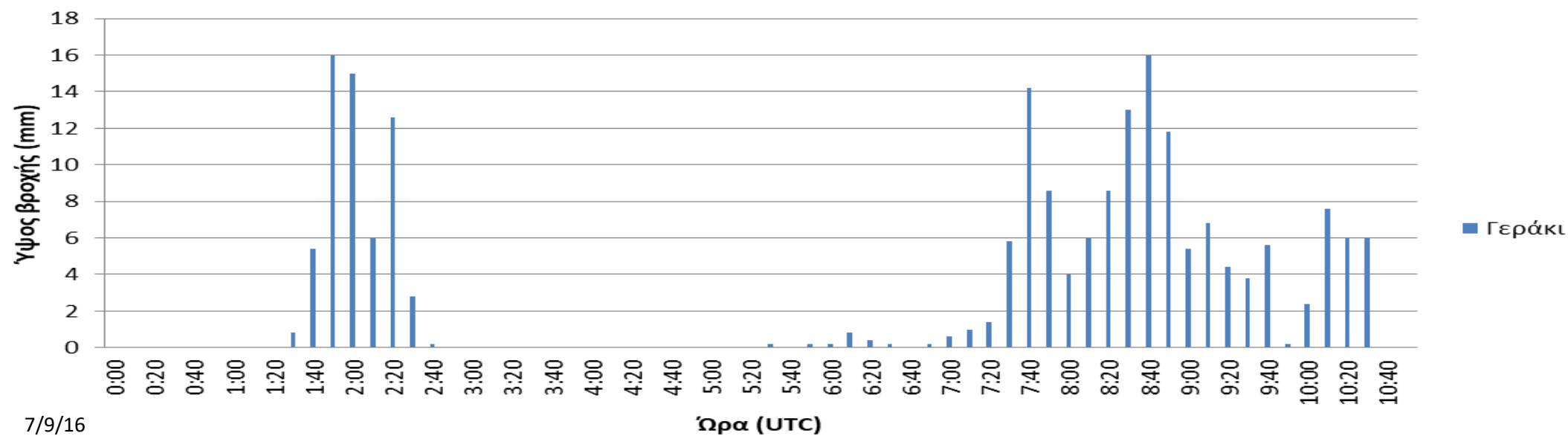
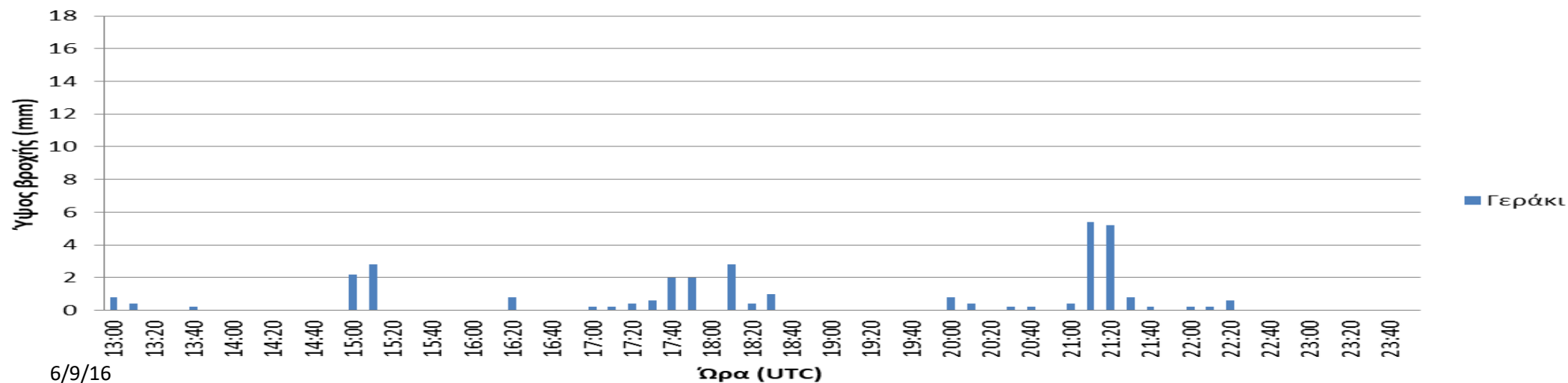
### **3.1. Περιγραφή γεγονότος**

Τις ημέρες πριν την 7<sup>η</sup> Σεπτεμβρίου σε πολλές περιοχές του Ευρώτα επικρατούσε ξηρασία, έχοντας διακοπεί τοπικά η ροή του ποταμού. Επομένως, το γεγονός ότι ένα σχεδόν ξηρό ποτάμι δέχεται ξαφνικά τόσο μεγάλες ποσότητες νερού λόγω των ακραίων καιρικών φαινομένων και πλημμυρίζει μέσα σε λίγες ώρες, καθιστά το φαινόμενο εξαιρετικά σπάνιο. Πιο συγκεκριμένα στις 7 Σεπτεμβρίου 2016 ο μετεωρολογικός σταθμός στη Σπάρτη κατέγραψε βροχόπτωση ίση με 67mm. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι στο Γεράκι μέσα σε 5 ώρες σημειώθηκε βροχόπτωση ίση με 200,2 mm (40,04 mm/h), περίπου ίση με το 1/3 της ποσότητας του νερού που δέχεται γενικά ο σταθμός της περιοχής όλο το χρόνο. Επιπλέον ρόλο έπαιξε και η βροχόπτωση που σημειώθηκε την προηγούμενη ημέρα (32,4 τόνους νερό ανά στρέμμα), επειδή συνετέλεσε στον κορεσμό του εδάφους που πλέον κατά τη διάρκεια της ραγδαίας πρωινής καταιγίδας δε μπορούσε να απορροφήσει πολύ μεγάλες ποσότητες νερού. (Βάρλας Γ, προσωπική επικοινωνία )

**Πίνακας 3.1.1.** Δεκάλεπτες καταγραφές κατακρημνισμάτων (mm) του βροχομετρικού σταθμού Γερακίου για τις 6 και 7 Σεπτεμβρίου 2016.

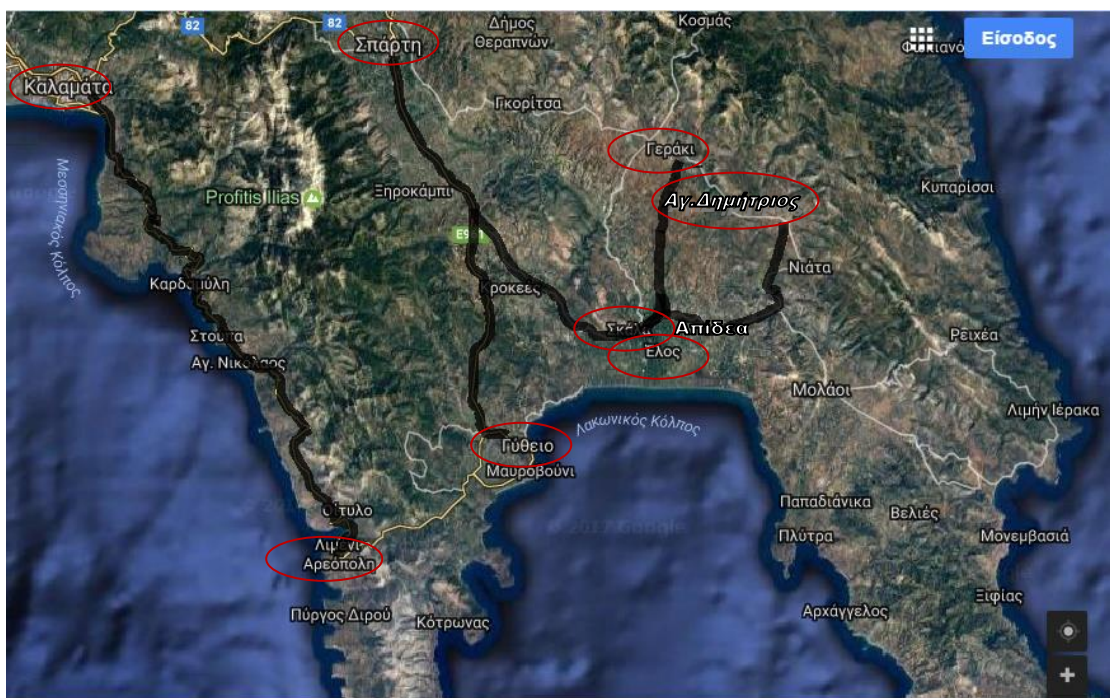
| Ημερομηνία | Ωρα   | Ύψος<br>βροχής(mm) | Ημερομηνία | Ωρα  | Ύψος βροχής<br>(mm) |
|------------|-------|--------------------|------------|------|---------------------|
| 6/9/2016   | 13:00 | 0.80               | 7/9/2016   | 0:00 | 0.00                |
|            | 13:10 | 0.40               |            | 0:10 | 0.00                |
|            | 13:20 | 0.00               |            | 0:20 | 0.00                |
|            | 13:30 | 0.00               |            | 0:30 | 0.00                |
|            | 13:40 | 0.20               |            | 0:40 | 0.00                |
|            | 13:50 | 0.00               |            | 0:50 | 0.00                |
|            | 14:00 | 0.00               |            | 1:00 | 0.00                |
|            | 14:10 | 0.00               |            | 1:10 | 0.00                |
|            | 14:20 | 0.00               |            | 1:20 | 0.00                |
|            | 14:30 | 0.00               |            | 1:30 | 0.80                |
|            | 14:40 | 0.00               |            | 1:40 | 5.40                |
|            | 14:50 | 0.00               |            | 1:50 | 16.00               |
|            | 15:00 | 2.20               |            | 2:00 | 15.00               |
|            | 15:10 | 2.80               |            | 2:10 | 6.00                |
|            | 15:20 | 0.00               |            | 2:20 | 12.60               |
|            | 15:30 | 0.00               |            | 2:30 | 2.80                |
|            | 15:40 | 0.00               |            | 2:40 | 0.20                |
|            | 15:50 | 0.00               |            | 2:50 | 0.00                |
|            | 16:00 | 0.00               |            | 3:00 | 0.00                |
|            | 16:10 | 0.00               |            | 3:10 | 0.00                |
|            | 16:20 | 0.80               |            | 3:20 | 0.00                |
|            | 16:30 | 0.00               |            | 3:30 | 0.00                |
|            | 16:40 | 0.00               |            | 3:40 | 0.00                |
|            | 16:50 | 0.00               |            | 3:50 | 0.00                |
|            | 17:00 | 0.20               |            | 4:00 | 0.00                |
|            | 17:10 | 0.20               |            | 4:10 | 0.00                |
|            | 17:20 | 0.40               |            | 4:20 | 0.00                |
|            | 17:30 | 0.60               |            | 4:30 | 0.00                |
|            | 17:40 | 2.00               |            | 4:40 | 0.00                |
|            | 17:50 | 2.00               |            | 4:50 | 0.00                |
|            | 18:00 | 0.00               |            | 5:00 | 0.00                |
|            | 18:10 | 2.80               |            | 5:10 | 0.00                |

| Ημερομηνία | Ωρα   | Ύψος<br>βροχής(mm) | Ημερομηνία | Ωρα   | Ύψος βροχής<br>(mm) |
|------------|-------|--------------------|------------|-------|---------------------|
| 6/9/2016   | 18:20 | 0.40               | 7/9/2016   | 5:20  | 0.00                |
|            | 18:30 | 1.00               |            | 5:30  | 0.20                |
|            | 18:40 | 0.00               |            | 5:40  | 0.00                |
|            | 18:50 | 0.00               |            | 5:50  | 0.20                |
|            | 19:00 | 0.00               |            | 6:00  | 0.20                |
|            | 19:10 | 0.00               |            | 6:10  | 0.80                |
|            | 19:20 | 0.00               |            | 6:20  | 0.40                |
|            | 19:30 | 0.00               |            | 6:30  | 0.20                |
|            | 19:40 | 0.00               |            | 6:40  | 0.00                |
|            | 19:50 | 0.00               |            | 6:50  | 0.20                |
|            | 20:00 | 0.80               |            | 7:00  | 0.60                |
|            | 20:10 | 0.40               |            | 7:10  | 1.00                |
|            | 20:20 | 0.00               |            | 7:20  | 1.40                |
|            | 20:30 | 0.20               |            | 7:30  | 5.80                |
|            | 20:40 | 0.20               |            | 7:40  | 14.20               |
|            | 20:50 | 0.00               |            | 7:50  | 8.60                |
|            | 21:00 | 0.40               |            | 8:00  | 4.00                |
|            | 21:10 | 5.40               |            | 8:10  | 6.00                |
|            | 21:20 | 5.20               |            | 8:20  | 8.60                |
|            | 21:30 | 0.80               |            | 8:30  | 13.00               |
|            | 21:40 | 0.20               |            | 8:40  | 16.00               |
|            | 21:50 | 0.00               |            | 8:50  | 11.80               |
|            | 22:00 | 0.20               |            | 9:00  | 5.40                |
|            | 22:10 | 0.20               |            | 9:10  | 6.80                |
|            | 22:20 | 0.60               |            | 9:20  | 4.40                |
|            | 22:30 | 0.00               |            | 9:30  | 3.80                |
|            | 22:40 | 0.00               |            | 9:40  | 5.60                |
|            | 22:50 | 0.00               |            | 9:50  | 0.20                |
|            | 23:00 | 0.00               |            | 10:00 | 2.40                |
|            | 23:10 | 0.00               |            | 10:10 | 7.60                |
|            | 23:20 | 0.00               |            | 10:20 | 6.00                |
|            | 23:30 | 0.00               |            | 10:30 | 6.00                |
|            | 23:40 | 0.00               |            | 10:40 | 0.00                |
|            | 23:50 | 0.00               |            | 10:50 | 0.00                |



**Ιστογράμμο 3.1.1.** Δεκάλεπτες καταγραφές κατακρημνισμάτων (mm) του βροχομετρικού σταθμού Γερακίου για τις 6 και 7 Σεπτεμβρίου 2016.

Ο υγρός Σεπτέμβρης του 2016 εξέπληξε την Ελλάδα (κυρίως την Δυτική) με τα έντονα καιρικά φαινόμενα που διαδραματίστηκαν, τα οποία προκάλεσαν ανυπολόγιστες ζημιές. Ένα χαμηλό βαρομετρικό νοτιοδυτικά της χώρας προκάλεσε τετραήμερο ακραίων καιρικών φαινομένων, από τις 6 έως 9 Σεπτεμβρίου του 2016, που χαρακτηρίστηκαν μάλιστα και τα σημαντικότερα καιρικά φαινόμενα για το έτος εκείνο. Οι ισχυρές καταιγίδες και οι σφοδρές βροχοπτώσεις λόγω της αργής μετακίνησής τους, τη μεγάλη διάρκεια και τις συνεχείς ανατροφοδοτήσεις με θερμότητα και υγρασία είχαν ως αποτέλεσμα την δημιουργία πλημμυρικών επεισοδίων και κατολισθήσεων. Στην Καλαμάτα, στην Σπάρτη, στην Στούπα καθώς και σε άλλες περιοχές οι δυνατές βροχές σε συνδυασμό με τους ισχυρούς ανέμους όλη την νύχτα της 6<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου προκάλεσαν ζημιές: καταστήματα και σπίτια πλημμύρισαν, άνθρωποι εγκλωβίστηκαν σε κτήρια και γενικότερα υπήρξαν προβλήματα και απώλειες σε έργα υποδομής και περιουσίες. Ακόμα, η κυκλοφορία διακόπηκε στην εθνική οδό Καλαμάτας – Αρεόπολης, από τη Στούπα έως τον Άγιο Νικόλαο, λόγω κατολισθήσεων. Επιπλέον η κυκλοφορία διακόπηκε και στις Εθνικές οδούς: Σπάρτης- Γυθείου, Τάραψας-Μονεμβασίας (Δ.Κ. Σκάλας), Σκάλας- Γερακίου, Απιδέας- Αγ. Δημητρίου Ζάρακος, Βλαχιώτη- Γούβες και η επαρχιακή οδός Σπάρτης- Αγ. Δημητρίου. Ακόμα και αυτοκίνητα παρασύρθηκαν μέσα στη θάλασσα στην περιοχή της Στούπας, στην Μάνη (εικόνα 3.1.2.)



**Χάρτης 3.1.1.** Κυκλοφοριακές οδοί της Νότιας Πελοποννήσου, των νομών Λακωνίας και Μεσσηνίας που αντιμετώπισαν προβλήματα λόγω της πλημμύρας. (Ιδία επεξεργασία)





*Εικόνα 3.1.1. Αυτοκίνητα που παρασύρθηκαν λόγω βροχής στην περιοχή της Μάνης στη Στούπα (πηγή: Εφημερίδα NotosPress, 2016)*

Στις 7 Σεπτεμβρίου ο ποταμός Ευρώτας ξεχείλισε και οι περιοχές Μολάοι, Σκάλα, Μάνη, Αγ. Ανάργυροι, Γεράκι, Πάκια, Βούρκος και Στούπα αντιμετώπισαν σοβαρά προβλήματα. Λίγες ώρες αργότερα, στο διάστημα μεταξύ 11:00 και 14:00 πλημμύρισε ο ποταμός κοντά στις εκβολές του, καθώς έσπασε ένα από τα φράγματα λόγω του τεράστιου όγκου του νερού το οποίο έφθασε σε σημείο να περνάει πάνω από τη γέφυρα της Σκάλας παρασύροντας κορμούς δέντρων και σκορπώντας την καταστροφή. Τους κατοίκους προβλημάτισε αρκετά το γεγονός αφού η γέφυρα είναι η μοναδική διέλευση για να περάσει κανείς από την κεντρική προς νότια αλλά και ανατολική προς δυτική Λακωνία. Υπήρχε μεγάλη ανησυχία διότι η κατασκευή της γέφυρας δεν αντέχει μεγάλα ποσά νερού. Επιπλέον στην περιοχή Βλαχιώτη της Σκάλας ο ποταμός παρέσυρε έναν 77χρονο βοσκό προκαλώντας τον θάνατο του (Εφημερίδα NotosPress, 2016).

Να σημειωθεί ότι κάποια από τα ρέματα στα βόρεια του δήμου ξεκινούν από περιοχές του Πάρνωνα που είχαν καεί στο παρελθόν και πιθανόν δε μπόρεσαν να συγκρατήσουν τον τεράστιο όγκο του νερού, παράγοντας που ενίσχυσε το μέγεθος της καταστροφής. Στην λεκάνη απορροής του Ευρώτα οι φωτιές που έλαβαν χώρα τον Αύγουστο του 2007 ήταν υπεύθυνες για τις πλημμύρες των επόμενων χρόνων που έπληξαν την περιοχή. Πριν τις πυρκαγιές η λεκάνη αποτελούνταν από δάση και χορτολιβαδικές εκτάσεις κατά 61,25%, από καλλιεργήσιμες εκτάσεις κατά 97,8% και από αστικές κατά 0,7%. Οι πυρκαγιές έπληξαν κυρίως την οροσειρά του Πάρνωνα έκαψαν 216 km<sup>2</sup> δάσους, χορτολιβαδικών εκτάσεων και

ελαιόδεντρων στον Πάρνωνα. Ως αποτέλεσμα οι καλλιεργήσιμες εκτάσεις μειώθηκαν κατά 4,5% και οι δασικές κατά 11,8%(Βοζινάκη Α, 2009). Συμπερασματικά κατά την περίοδο βροχοπτώσεων προκύπτει ότι μετά το 2007 ο υετός που πέφτει στην καμένη έκταση απορροφάται πολύ λιγότερο και αυτό γιατί η βλάστηση είναι μειωμένη. Έτσι το νερό που δεν απορροφάται κυλάει κατάντη της λεκάνης απορροής και ενισχύει την ροή του ποταμού Ευρώτα. Γενικά όλα τα ρέματα της περιοχής όπου σημειώθηκαν τα ισχυρά φαινόμενα καταλήγουν στον Ευρώτα.



**Εικόνα 3.1.2.** Η φυσιολογική ροή του ποταμού κάτω από την γέφυρα της Σκάλας  
(Λειμωνίτης Μ, 2013)

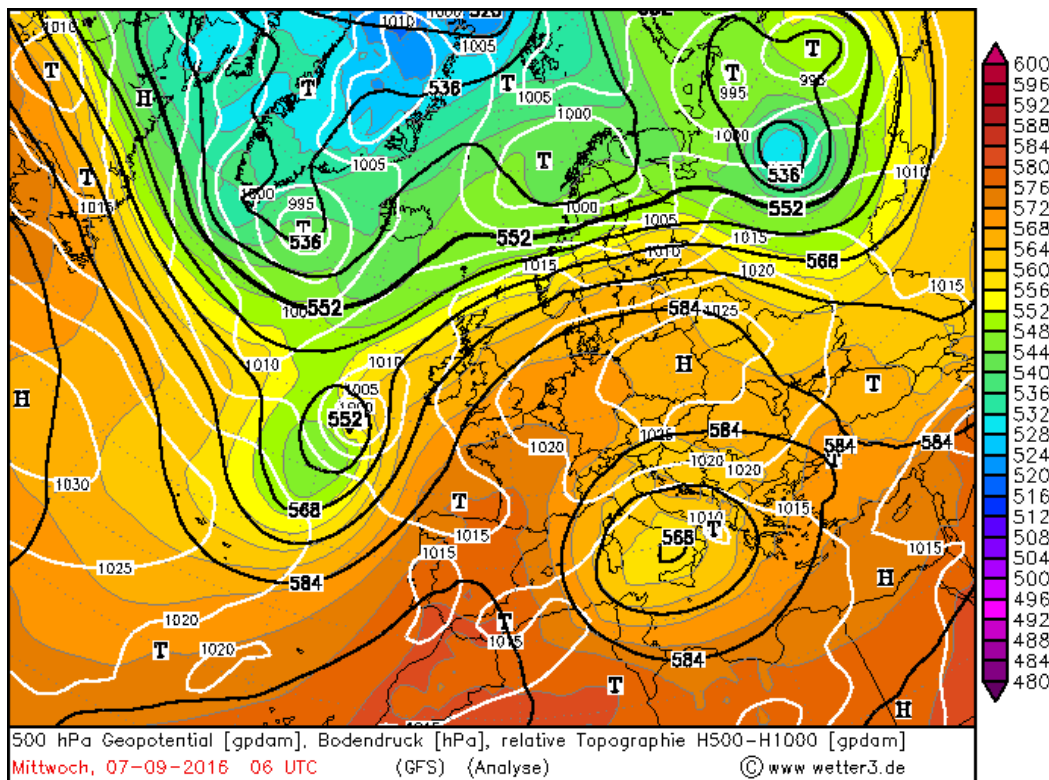


**Εικόνα 3.1.3.** Η υπερβολικά αυξημένη στάθμη του ποταμού στην περιοχή της Σκάλας  
έπειτα από την κακοκαιρία στις 7 Σεπτεμβρίου 2016. (Εφημερίδα NotosPress, 2016)



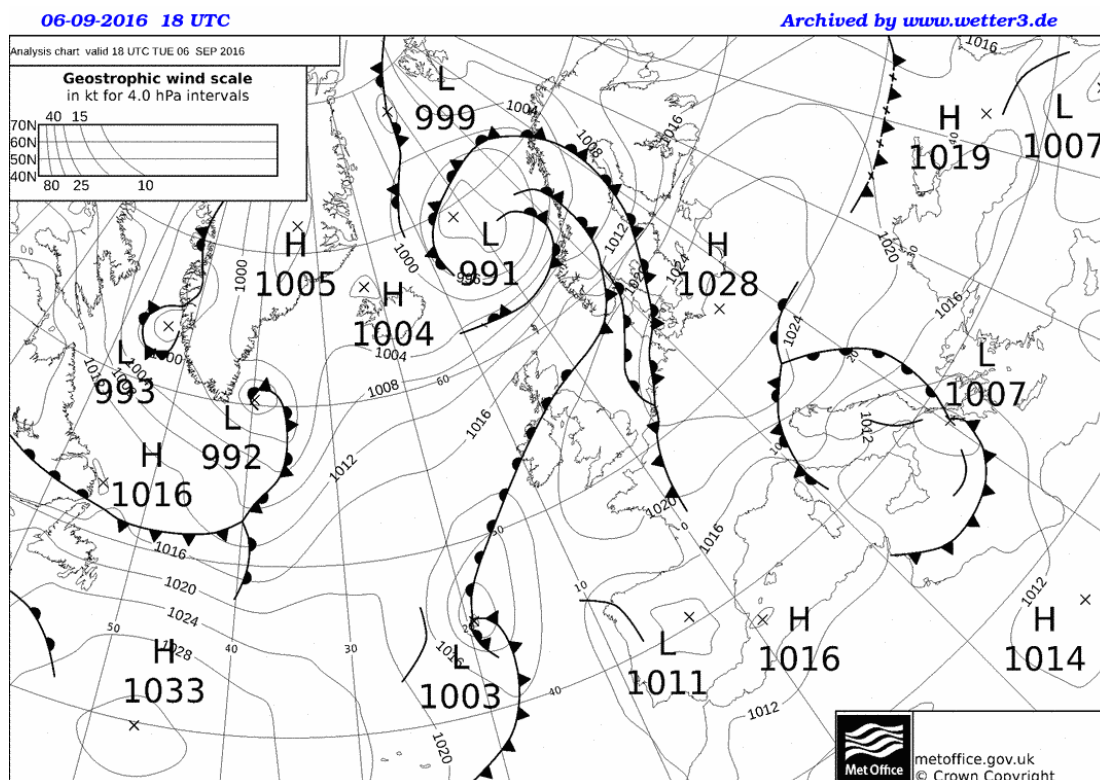
### 3.2. Συνοπτική κατάσταση της ατμόσφαιρας

Από μετεωρολογικής άποψης η ισχυρή καταιγίδα που σημειώθηκε σε πολλές περιοχές του νομού τις πρωινές ώρες της 7<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου μπορεί να χαρακτηριστεί ως εξαιρετικά σπάνιο φαινόμενο. Πιο αναλυτικά, ήδη από τις προηγούμενες μέρες λόγω καθόδου σφήνας υφέσεων 500hPa δημιουργήθηκε ένα βαρομετρικό χαμηλό με ψυχρό πυρήνα και έντονη μετωπική δραστηριότητα μεταξύ Ιταλίας και Ελλάδας το οποίο προκαλούσε κατά περιόδους ισχυρά φαινόμενα στα νησιά του Ιονίου, την Ήπειρο, τη δυτική Στερεά και σε περιοχές της Μακεδονίας και της Πελοποννήσου. Το ψυχρό μέτωπο συνδυασμένο με το βαρομετρικό χαμηλό κατευθυνόταν προς την Ελλάδα. Στην Πελοπόννησο το μέτωπο ήταν τόσο ψυχρό και σε συνδυασμό με την έντονη ανύψωση θερμών και υγρών θαλάσσιων αερίων μαζών, το αποτέλεσμα ήταν ο σχηματισμός καταιγίδων, αρχικά δυτικά-νοτιοδυτικά της Μεσσηνίας και στην συνέχεια στη Λακωνία. Το μέτωπο υπήρξε πολύ ισχυρό και μετακινούταν αργά για μεγάλη διάρκεια, γεγονός που δείχνει την επιβάρυνση του φαινομένου. Ταυτόχρονα μετέφερε υγρασία και ζέστη από την θάλασσα. Σημαντική λεπτομέρεια είναι η χρονική περίοδος (Σεπτέμβρης) όπου η θάλασσα είναι πιο ζεστή από κάθε άλλο μήνα του χρόνου. Οπότε οι ισχυρές καταιγίδες δημιουργήθηκαν από τον συνδυασμό της αργής μετακίνησης του μετώπου, οπότε και μεγάλης διάρκειας του πάνω από την περιοχή, και από τις συνεχείς ανατροφοδοτήσεις με θερμότητα και υγρασία εξαιτίας του υγρού Σεπτέμβρη, της πολύ θερμής θάλασσας και του νοτιά που φυσούσε.

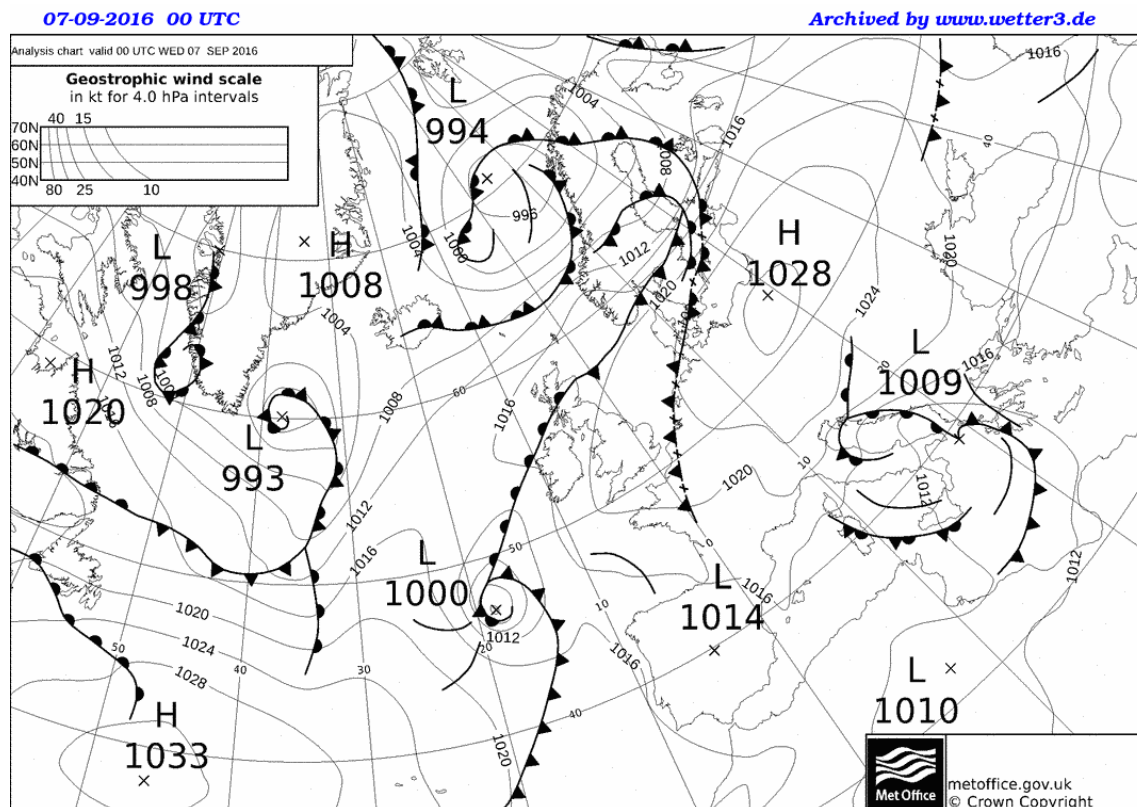


**Χάρτης 3.2.1.** Χάρτης μέσης θερμοκρασίας με ισοπαχείς μεταξύ 500 και 1000 hPa. Με άσπρο χρώμα απεικονίζονται οι ισοβαρείς καμπύλες, με μαύρο οι ισοϋψείς 500hPa (www.wetter3.de)

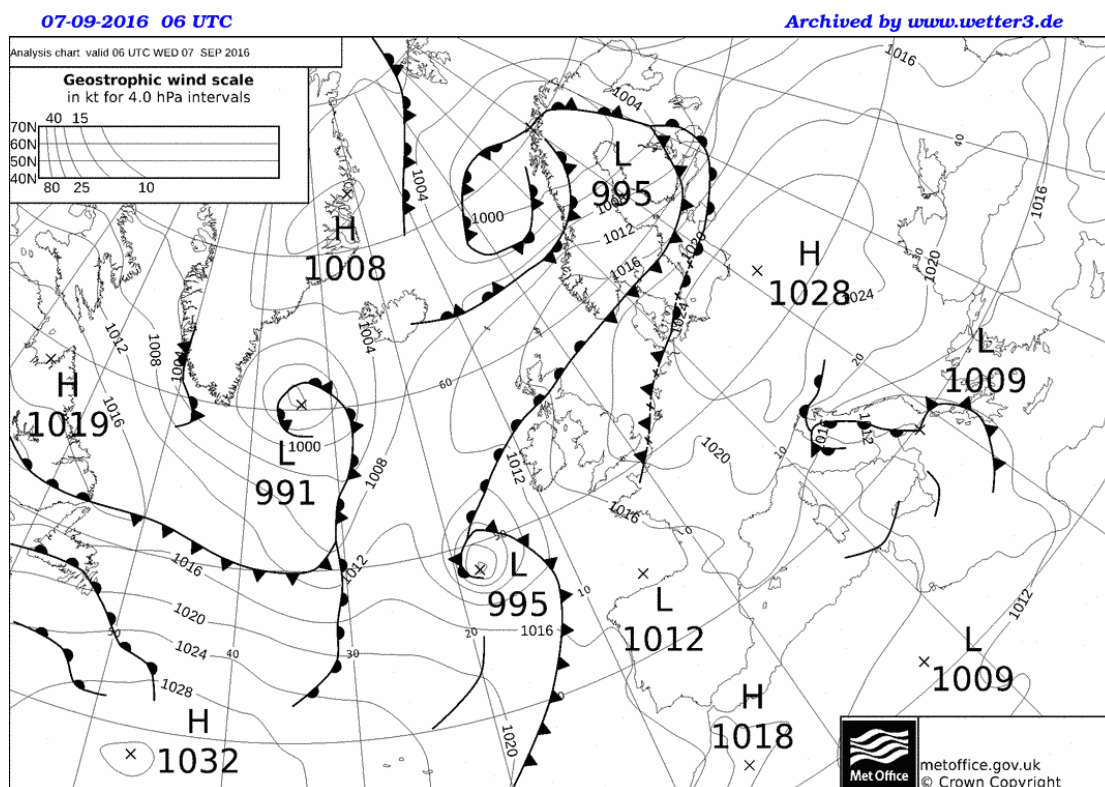
Ήδη από τις 6 Σεπτεμβρίου ένα βαρομετρικό χαμηλό είχε δημιουργηθεί στην Ιταλία το οποίο επηρεάστηκε από την χαμηλή ατμόσφαιρα και είχε αρχίσει να κατευθύνεται ένα κύμα κακοκαιρίας προς την Ελλάδα. Ψυχρός, πολικός και ευσταθής αέρας αρχίζει να αντικαθιστά τον θερμό, υγρό και ασταθή, ο οποίος κατευθυνόταν προς την Ελλάδα λόγω του ψυχρού μετώπου που είχε δημιουργηθεί στην περιοχή. Λόγω του μετώπου αυτού οι ανοδικές τάσεις ήταν πιο ισχυρές και η πίεση μειωνόταν. Σιγά σιγά τα νέφη περιορίζονται μπροστά στο μέτωπο και έτσι δημιουργείται η ζώνη κακοκαιρίας. Δημιουργείται καταιγίδα, η οποία χτυπά στις 7 Σεπτεμβρίου με το ψυχρό μέτωπο να βρίσκεται ακριβώς πάνω από την περιοχή της Πελοποννήσου. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι εκείνη την μέρα υπήρχε νοτιάς με αποτέλεσμα να εφοδιάζει διαρκώς την βροχή και γι αυτόν το λόγο η βροχή έπεφτε ασταμάτητα για 5 μέρες.



**Χάρτης 3.2.2.** Παγκόσμιος χάρτης καιρού στις 6 Σεπτεμβρίου 2016 και ώρα 18 UTC όπου αποτυπώνονται συστήματα πίεσης στην επιφάνεια, αέριες μάζες και μέτωπα. Το ψυχρό μέτωπο κατευθύνεται προς την Ελλάδα.  
(πηγή: [www.wetter3.de](http://www.wetter3.de))



**Χάρτης 3.2.3.** Παγκόσμιος χάρτης καιρού στις 7 Σεπτεμβρίου 2016 και ώρα 00 UTC με το ψυχρό μέτωπο να έχει φτάσει πλέον πάνω από την Πελοπόννησο. (πηγή: [www.wetter3.de](http://www.wetter3.de))

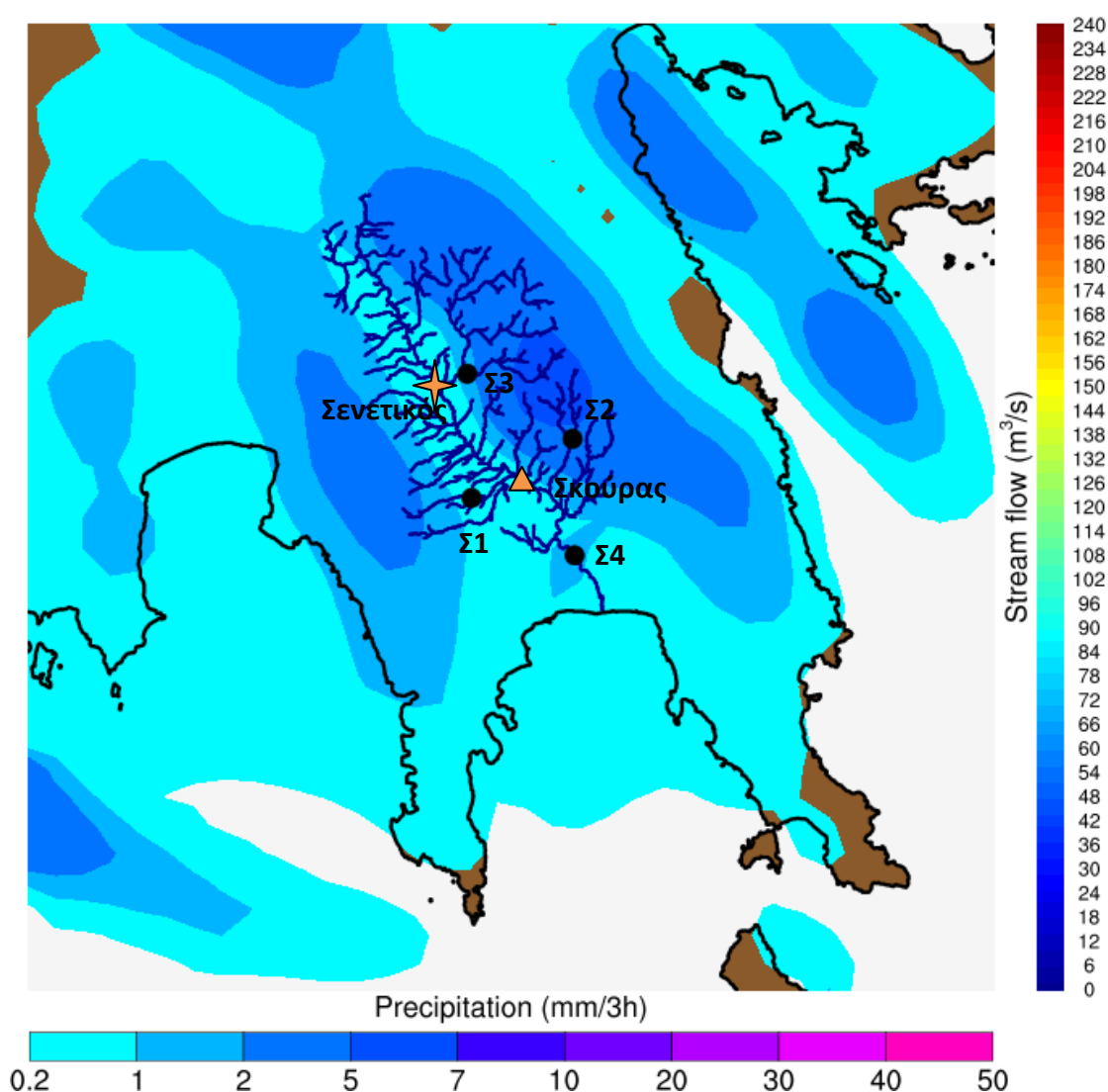


**Χάρτης 3.2.4.** Παγκόσμιος χάρτης καιρού στις 7 Σεπτεμβρίου 2016 και ώρα 06 UTC με την Δυτική Ελλάδα στο επίκεντρο της κακοκαιρίας. (πηγή: [www.wetter3.de](http://www.wetter3.de))

Σε πολλά μέρη της Ελλάδας υπήρξαν καταιγίδες στις 6 και κυρίως στις 7 Σεπτεμβρίου, αλλά η Δυτική Ελλάδα ήταν αυτή που αντιμετώπισε τις σοβαρότερες επιπτώσεις. Αυτό μπορεί να το αιτιολογήσει κανείς στο ότι η Δυτική Ελλάδα απαρτίζεται από πολλές οροσειρές κυρίως αυτή της Πίνδου, με αποτέλεσμα να εμποδίζουν τα περισσότερα σύννεφα να συνεχίσουν και έτσι να υπάρχουν πολλές βροχοπτώσεις σε εκείνες τις περιοχές. Όμως στην Πελοπόννησο το κύμα κακοκαιρίας χτύπησε περισσότερο, εφόσον όπως ειπώθηκε και παραπάνω το ψυχρό μέτωπο βρέθηκε ακριβώς πάνω από το συγκεκριμένο δημοτικό διαμέρισμα.

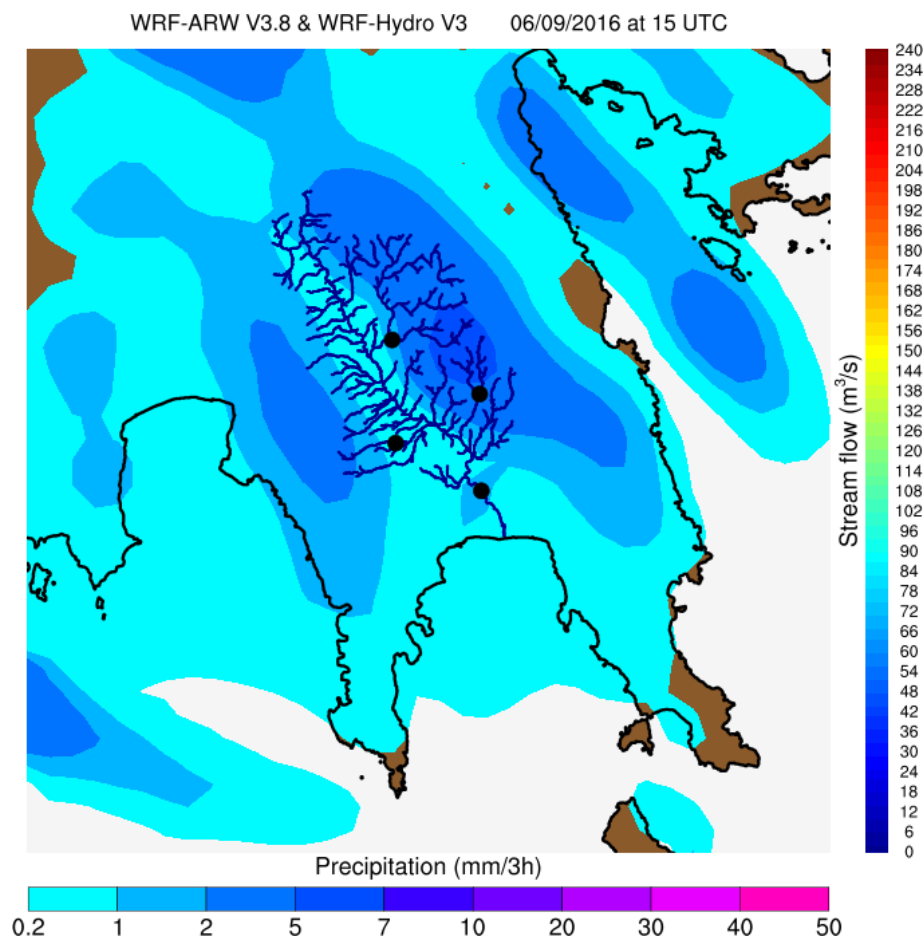
### 3.3. Προσομοίωση πλημμύρας του Ευρώτα μέσα από τα μοντέλα WRF-ARW και WRF-Hydro

Η μελέτη της πλημμύρας του Ευρώτα που συνέβη στις 7 Σεπτεμβρίου 2016, προσομοιώθηκε μέσα από τα μετεωρολογικά και υδρομετεωρολογικά μοντέλα WRF-ARW και WRF-Hydro αντίστοιχα. Μέσα λοιπόν από τα μοντέλα αυτά υπάρχει μια πλήρης εικόνα του τι συνέβη από τις 6 μέχρι 8 Σεπτεμβρίου, με αποτελέσματα κάθε 3 ώρες. Εστιάζοντας στην λεκάνη απορροής του Ευρώτα μέσα από τα μοντέλα υψηλής ανάλυσης που έτρεξαν, οι προσομοιώσεις εμφάνισαν μεγάλα ύψη υετού.



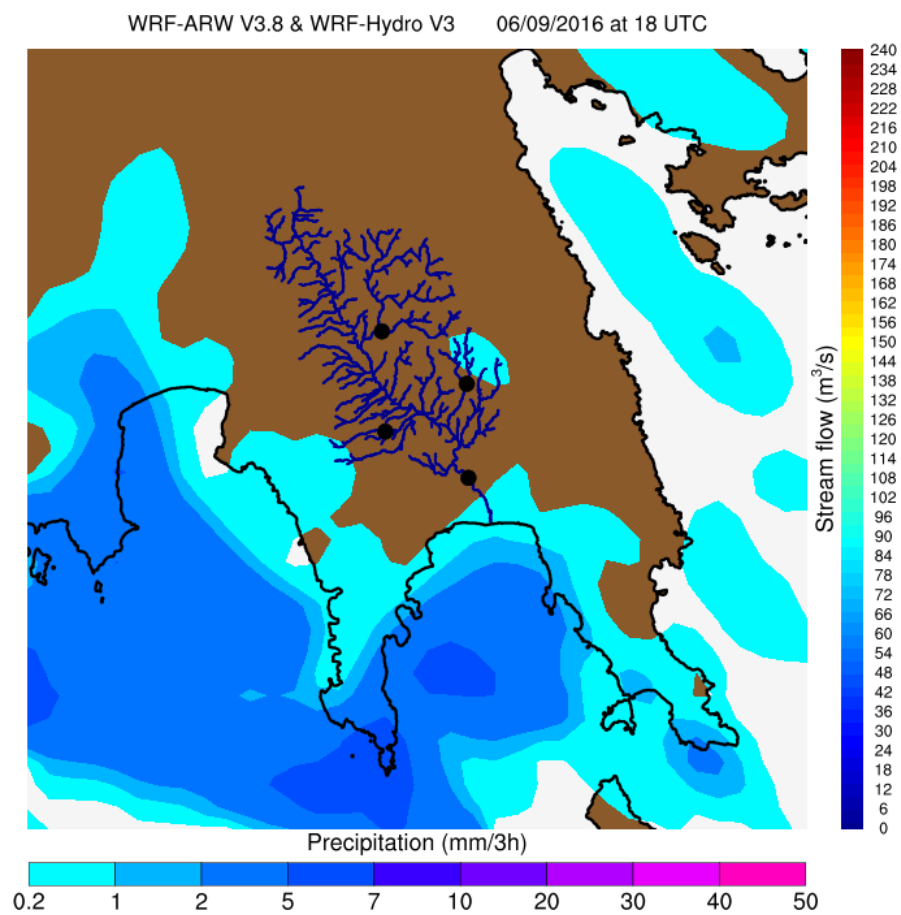
**Χάρτης 3.3.1.** Χωρική κατανομή 3ωρης αθροιστικής βροχόπτωσης σε mm (κάτω μπάρα χρωμάτων) και απορροής σε m<sup>3</sup>/s (δεξιά μπάρα χρωμάτων). Τα τέσσερα σημεία Σ1, Σ2, Σ3, Σ4 απεικονίζουν τα σημεία εκείνα που χρησιμοποιήθηκαν για την παροχή δεδομένων του μοντέλου προσομοίωσης. Στον ίδιο χάρτη απεικονίζονται επιπλέον δυο μετρητικοί σταθμοί του ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε., Σενετικός (✦) και Σκούρας (▲).

Στις 6 Σεπτεμβρίου 12-15 UTC προσομοιώθηκε το πρώτο κύμα της κακοκαιρίας με βροχόπτωση έως 6mm εντοπιζόμενη κυρίως στην ανατολική λεκάνη απορροής του Ευρώτα. (Χάρτης 3.3.2) Μέχρι τις 21:00 ( 18UTC) όμως τα φαινόμενα εξασθενούν ( Χάρτης 3.3.3.).



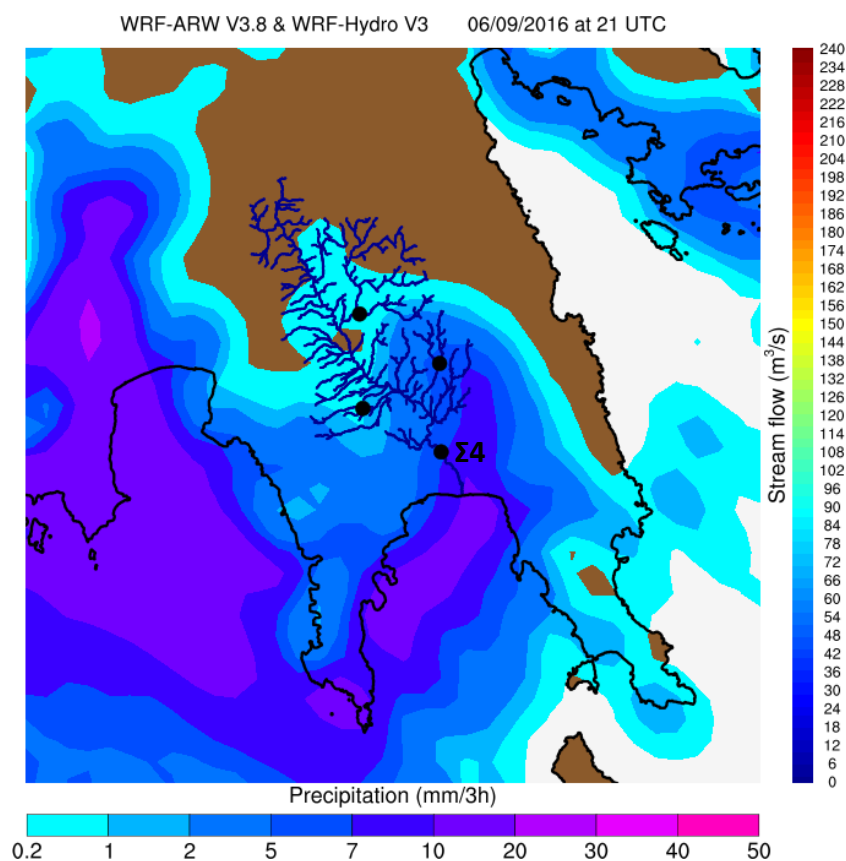
**Χάρτης 3.3.2.** Χωρική κατανομή 3ωρης αθροιστικής βροχόπτωσης (12-15 UTC) σε mm (κάτω μπάρα χρωμάτων) και απορροής σε  $\text{m}^3/\text{s}$  (δεξιά μπάρα χρωμάτων) για τις 6/9/2016 στις 15 UTC.





**Χάρτης 3.3.3.** Χωρική κατανομή 3ωρης αθροιστικής βροχόπτωσης (15-18 UTC) σε mm (κάτω μπάρα χρωμάτων) και απορροής σε m³/s (δεξιά μπάρα χρωμάτων) για τις 6/9/2016 στις 18 UTC.

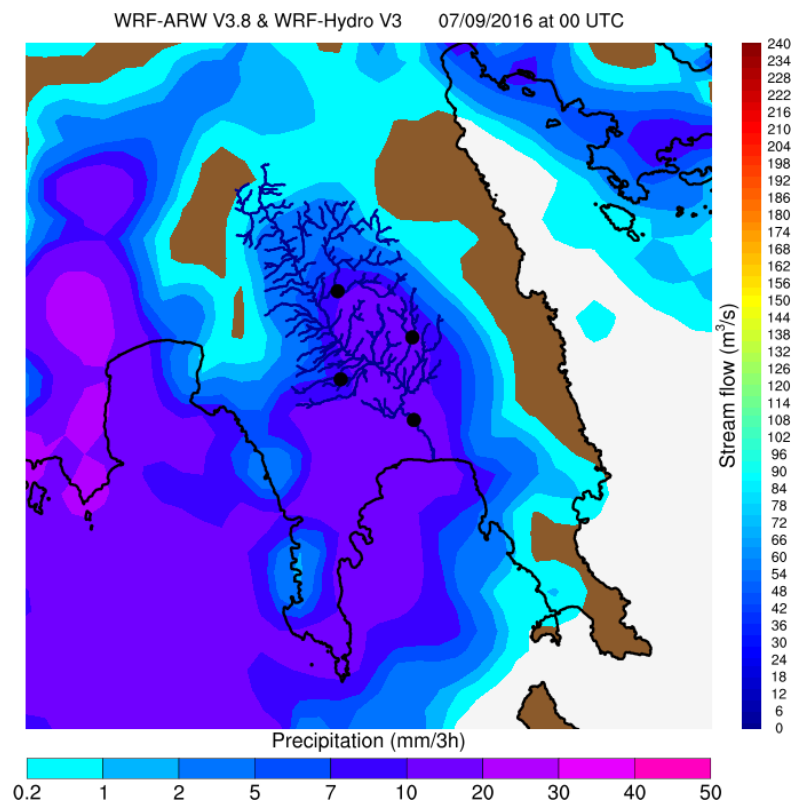
00:00 (21UTC): Το κύμα επέστρεψε πολύ πιο δυνατό, με μεγαλύτερο ύψος υετού να εμφανίζεται νότια και κυρίως στην περιοχή της Σκάλας, κοντά στο σημείο Σ4. (χάρτης 3.3.4.)



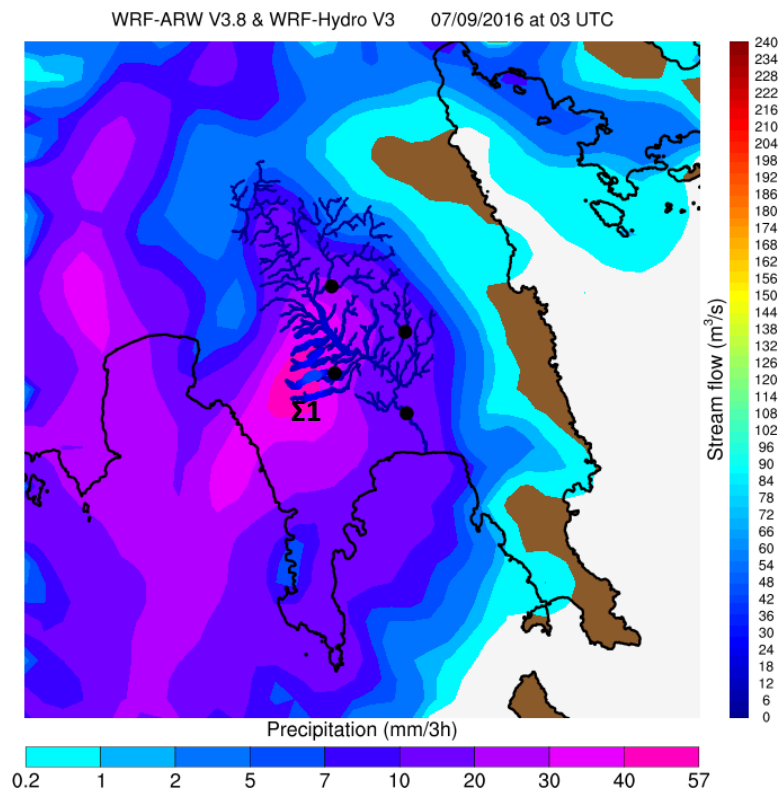
**Χάρτης 3.3.4.** Χωρική κατανομή 3ωρης αθροιστικής βροχόπτωσης (18-21 UTC) σε mm (κάτω μπάρα χρωμάτων) και απορροής σε m<sup>3</sup>/s (δεξιά μπάρα χρωμάτων) για τις 6/9/2016 στις 21 UTC.

Ξημερώνοντας η 7<sup>η</sup> Σεπτεμβρίου, κατά τις 03:00 (00 UTC) η καταιγίδα είχε επιδεινωθεί και στις 06:00 (03 UTC) το πρωί οι παραπόταμοι του Ευρώτα 1<sup>ης</sup> και 2<sup>ης</sup> τάξης στο σημείο Σ1 άρχισαν να φουσκώνουν αφού ο υετός έφτασε το μέγιστο του. Αυτό δικαιολογείται στο γεγονός ότι ο Ταΰγετος είναι η πρώτη και ψηλότερη οροσειρά που συνάντησε το μέτωπο, οπότε δέχτηκε και το μεγαλύτερο ποσό βροχής. (χάρτες 3.3.5 και 3.3.6.)



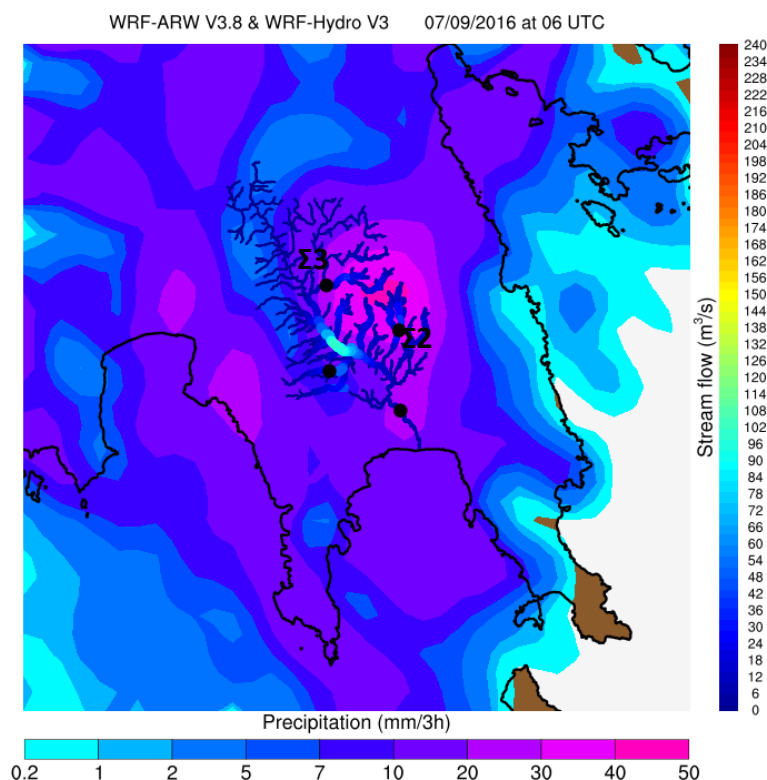


**Χάρτης 3.3.5.** Χωρική κατανομή 3ωρης αθροιστικής βροχόπτωσης (21-00 UTC) σε mm (κάτω μπάρα χρωμάτων) και απορροής σε  $\text{m}^3/\text{s}$  (δεξιά μπάρα χρωμάτων) για τις 7/9/2016 στις 00 UTC.



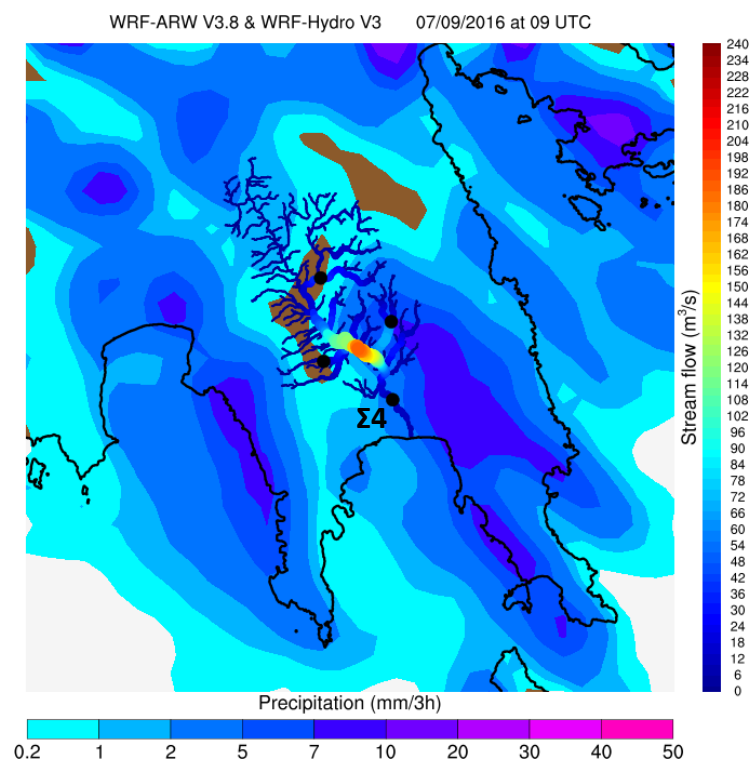
**Χάρτης 3.3.6.** Χωρική κατανομή 3ωρης αθροιστικής βροχόπτωσης (00-03 UTC) σε mm (κάτω μπάρα χρωμάτων) και απορροής σε  $\text{m}^3/\text{s}$  (δεξιά μπάρα χρωμάτων) για τις 7/9/2016 στις 03 UTC.

Μέχρι τις 09:00 (06 UTC) στους ήδη φουσκωμένους παραποτάμους του Ευρώτα, το νερό συνέχισε να τους τροφοδοτεί. Παράλληλα οι παραπόταμοι 2<sup>ης</sup> και 3<sup>ης</sup> τάξης κυρίως, στα σημεία Σ2 και Σ3 άρχισαν εξίσου να ενισχύονται λόγω της βροχής και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο υετός έφτασε στο μέγιστό του και σε εκείνη την περιοχή. Το αποτέλεσμα ήταν όλα τα νερά από τους παραποτάμους να κυλήσουν κατάντη, αυξάνοντας την κύρια ροή του ποταμού Ευρώτα που είναι 4<sup>ης</sup> τάξης. Στην κεντρική περιοχή της λεκάνης απορροής παρατηρούνται απορροές που υπερβαίνουν τα 100 m<sup>3</sup>/s. (χάρτης 3.3.7)

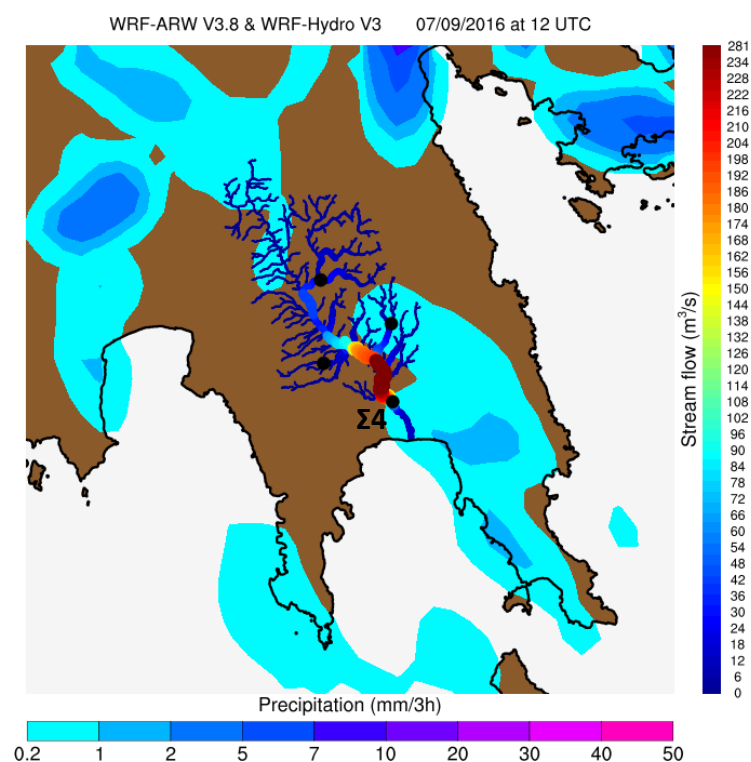


**Χάρτης 3.3.7.** Χωρική κατανομή 3ωρης αθροιστικής βροχόπτωσης (03-06 UTC) σε mm (κάτω μπάρα χρωμάτων) και απορροής σε m<sup>3</sup>/s (δεξιά μπάρα χρωμάτων) για τις 7/9/2016 στις 06 UTC.

Όσο περνούσε η ώρα, ο υετός απομακρυνόταν ενώ η ροή του ποταμού αυξανόταν όλο και περισσότερο. Τα ορμητικά νερά των παραποτάμων συνέχισαν να διοχετεύονται στο κανάλι κύριας ροής του ποταμού, η οποία λίγο πριν το Σ4 άρχισε να αυξάνεται απότομα όσο ο ποταμός κατευθυνόταν προς τις εκβολές του. Στην κεντρική κοίτη παρατηρείται απορροή που προσεγγίζει τα 200 m<sup>3</sup>/s. (χάρτες 3.3.8. και 3.3.9.)

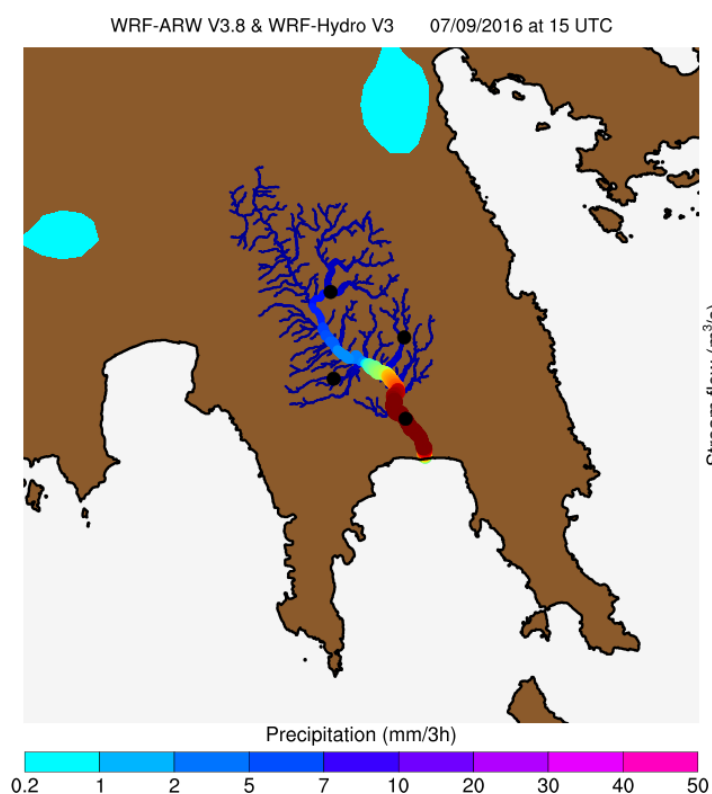


**Χάρτης 3.3.8.** Χωρική κατανομή 3ωρης αθροιστικής βροχόπτωσης (06-09 UTC) σε mm (κάτω μπάρα χρωμάτων) και απορροής σε  $\text{m}^3/\text{s}$  (δεξιά μπάρα χρωμάτων) για τις 7/9/2016 στις 09 UTC.



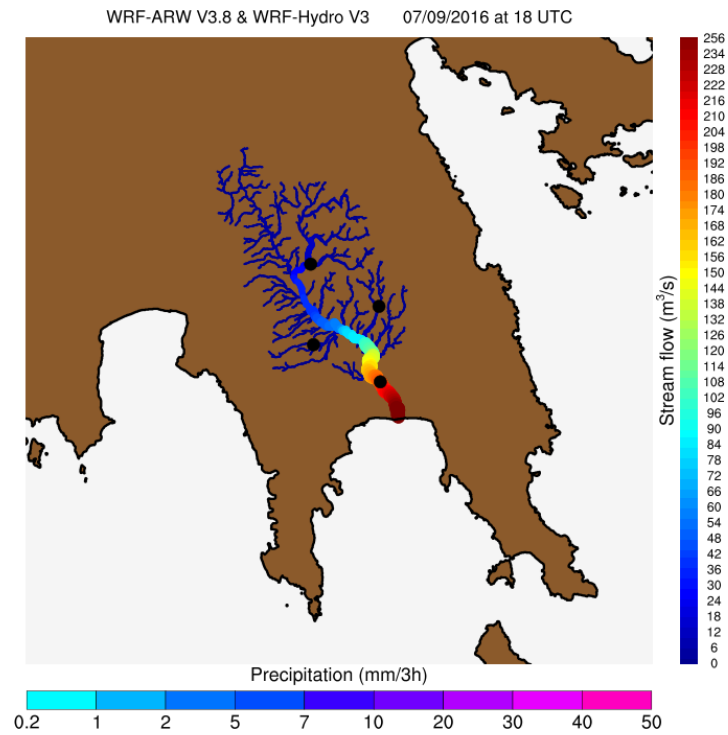
**Χάρτης 3.3.9.** Χωρική κατανομή 3ωρης αθροιστικής βροχόπτωσης (09-12 UTC) σε mm (κάτω μπάρα χρωμάτων) και απορροής σε  $\text{m}^3/\text{s}$  (δεξιά μπάρα χρωμάτων) για τις 7/9/2016 στις 12 UTC.

Ο υετός σταμάτησε αλλά η ροή αυξήθηκε υπερβολικά με αποτέλεσμα μέχρι τις 18:00 (15 UTC) να φτάσει σε ποσά περίπου  $284 \text{ m}^3/\text{s}$  κοντά στην περιοχή της Σκάλας (χάρτης 3.3.10.). Η προσομοίωση φαίνεται να συμβαδίζει με τα πραγματικά γεγονότα, αφού περίπου εκείνη την ώρα η γέφυρα της Σκάλας είχε πλημμυρίσει και η κυκλοφορία της είχε διακοπεί. Γενικότερα ο Ευρώτας πλημμύρισε στο κομμάτι κατάντη της Σπάρτης εφόσον ανάντη αυτής το ποτάμι είναι πιο φαρδύ και πιο βαθύ και αντέχει περισσότερα ποσά νερού .

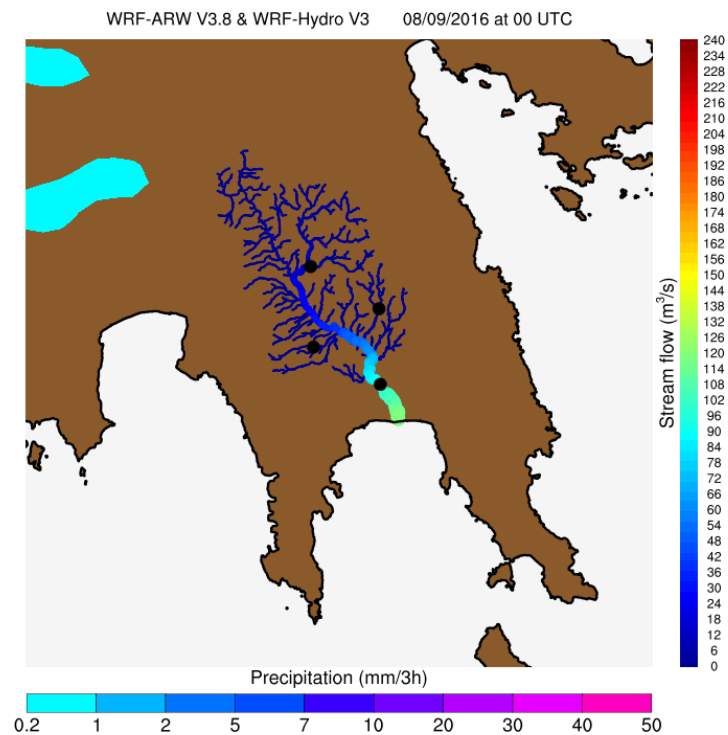


**χάρτης 3.3.10.** Χωρική κατανομή 3ωρης αθροιστικής βροχόπτωσης (12-15 UTC) σε mm (κάτω μπάρα χρωμάτων) και απορροής σε  $\text{m}^3/\text{s}$  (δεξιά μπάρα χρωμάτων) για τις 7/9/2016 στις 15 UTC.

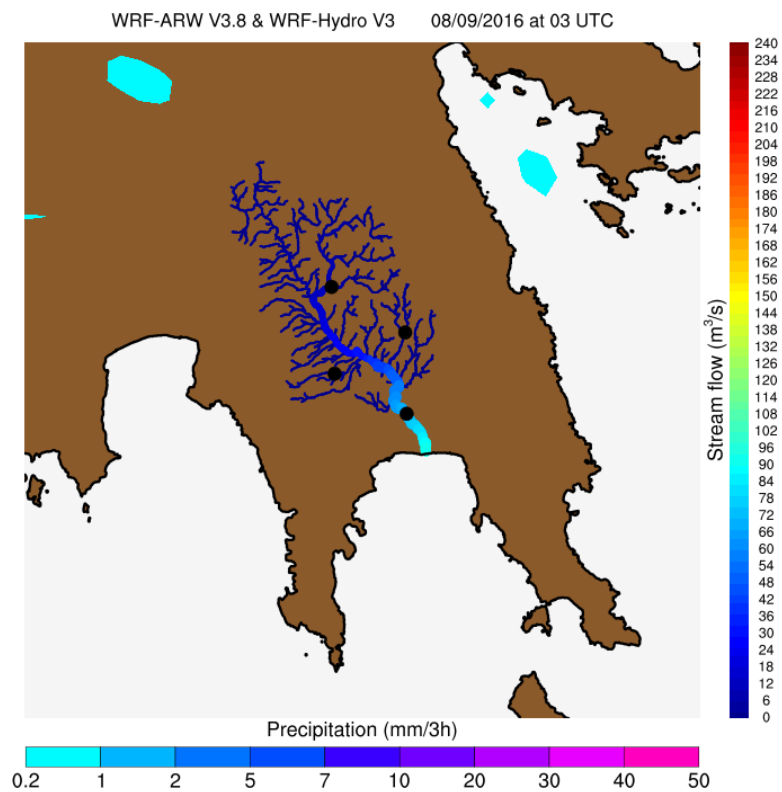
Από τις 21:00 (18 UTC) και μετά η ροή του ποταμού άρχισε να επανέρχεται με αργούς ρυθμούς στα φυσιολογικά επίπεδα. Η ροή ήταν τόσο μεγάλη που ακόμα και στις 8 Σεπτεμβρίου δεν αποκαταστάθηκε πλήρως. (χάρτες 3.3.11 έως 3.3.16)



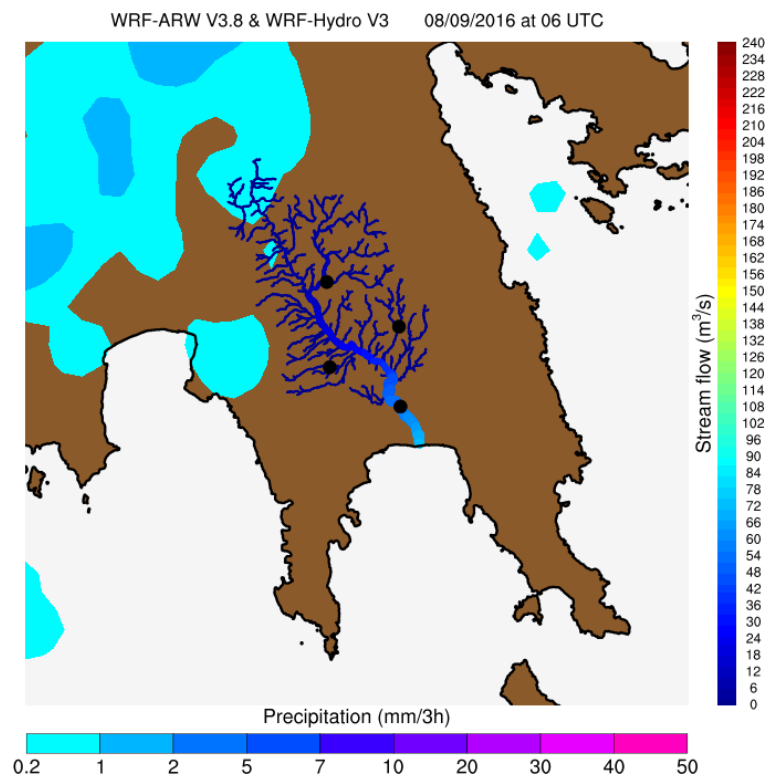
**3.3.11.** Χωρική κατανομή 3ωρης αθροιστικής βροχόπτωσης (15-18 UTC) σε mm (κάτω μπάρα χρωμάτων) και απορροής σε  $\text{m}^3/\text{s}$  (δεξιά μπάρα χρωμάτων) για τις 7/9/2016 στις 18 UTC.



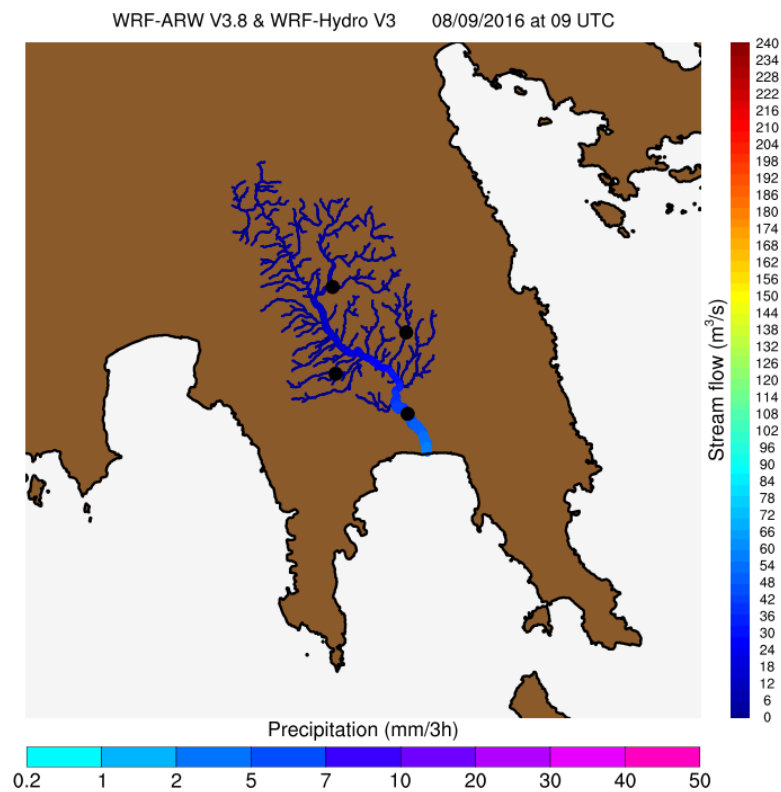
**3.3.12** Χωρική κατανομή 3ωρης αθροιστικής βροχόπτωσης (21-00 UTC) σε mm (κάτω μπάρα χρωμάτων) και απορροής σε  $\text{m}^3/\text{s}$  (δεξιά μπάρα χρωμάτων) για τις 8/9/2016 στις 00 UTC.



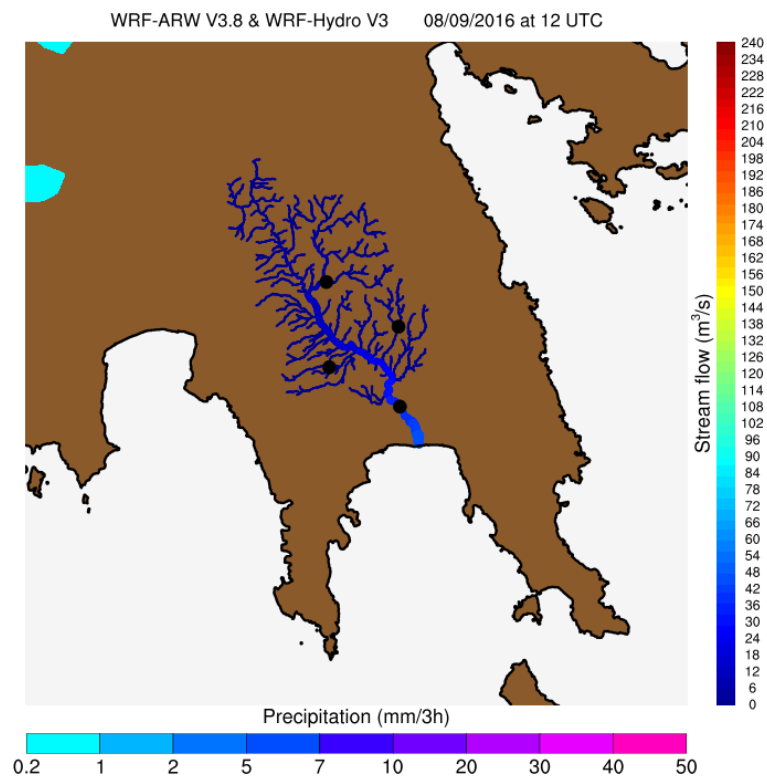
**3.3.13.** Χωρική κατανομή 3ωρης αθροιστικής βροχόπτωσης (00-03 UTC) σε mm (κάτω μπάρα χρωμάτων) και απορροής σε  $\text{m}^3/\text{s}$  (δεξιά μπάρα χρωμάτων) για τις 8/9/2016 στις 10 UTC.



**3.3.14.** Χωρική κατανομή 3ωρης αθροιστικής βροχόπτωσης (03-06 UTC) σε mm (κάτω μπάρα χρωμάτων) και απορροής σε  $\text{m}^3/\text{s}$  (δεξιά μπάρα χρωμάτων) για τις 8/9/2016 στις 06 UTC.



**3.3.15.** Χωρική κατανομή 3ωρης αθροιστικής βροχόπτωσης (06-09 UTC) σε mm (κάτω μπάρα χρωμάτων) και απορροής σε  $\text{m}^3/\text{s}$  (δεξιά μπάρα χρωμάτων) για τις 8/9/2016 στις 09 UTC.



**3.3.16.** Χωρική κατανομή 3ωρης αθροιστικής βροχόπτωσης (09-12 UTC) σε mm (κάτω μπάρα χρωμάτων) και απορροής σε  $\text{m}^3/\text{s}$  (δεξιά μπάρα χρωμάτων) για τις 8/9/2016 στις 12 UTC.

Συμπερασματικά, υπήρξαν δυο κύματα κακοκαιρίας στα οποία η λεκάνη απορροής αποκρίθηκε διαφορετικά. Στο πρώτο κύμα, το χρονικό διάστημα που μεσολάβησε από την κορυφή της πρώτης βροχόπτωσης ως την κορυφή της επιφανειακής απορροής ποικίλει ανάλογα με το σημείο, από 12 ώρες (Σ1, Σ2) έως 18 ώρες (Σ4) με μέγιστη απορροή να φτάνει τα  $2 \text{ m}^3/\text{s}$ . Στο δεύτερο κύμα, το χρονικό διάστημα απόκρισης είναι μικρότερο, με χρονική διαφορά από 0 ώρες στο Σ2 έως 9 ώρες στο Σ4, όπου και παρουσιάζεται η μέγιστη απορροή,  $280 \text{ m}^3/\text{s}$  περίπου. Η απόκριση της λεκάνης λοιπόν είναι πιο αργή στο πρώτο κύμα. Επιπλέον, αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι όταν η βροχόπτωση έφτανε την μέγιστη τιμή της, τότε ξεκινούσε η επιφανειακή απορροή του ποταμού. Αυτό παρατηρείται στις 3 UTC της 7<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου όταν το ύψος της βροχής στο σημείο Σ1 φτάνει το μέγιστό του, τα 57 mm (χάρτης 3.3.6) και στις 06 UTC στα σημεία Σ2 και Σ3 που φτάνουν αντίστοιχα την μέγιστη τιμή τους, 50 mm (χάρτης 3.3.7). Η απορροή στην κεντρική κοίτη έφτασε τα  $100 \text{ m}^3/\text{s}$  3 ώρες μετά τη δυνατή βροχή στο Σ1. Ομοίως η απορροή στην κεντρική κοίτη έφτασε τα  $200 \text{ m}^3/\text{s}$  στις 9 UTC, δηλαδή 3 ώρες μετά την δυνατή βροχή στα Σ2, Σ3. Επιπλέον στις 15 UTC, στην έξοδο της λεκάνης απορροής, που βρίσκεται το σημείο Σ4, η απορροή φτάνει στο αποκορύφωμά της ( $284 \text{ m}^3/\text{s}$ ), περίπου 12 ώρες μετά την εμφάνιση της έντονης βροχόπτωσης στο Σ1. Εκεί βρίσκεται η περιοχή της Σκάλας η οποία πλημμύρησε και αυτό οφείλεται στην πολύ υψηλή επιφανειακή απορροή του ποταμού. Παρατηρείται γενικότερα μια σχετικά αργή απόκριση της λεκάνης απορροής στις ισχυρές βροχοπτώσεις.

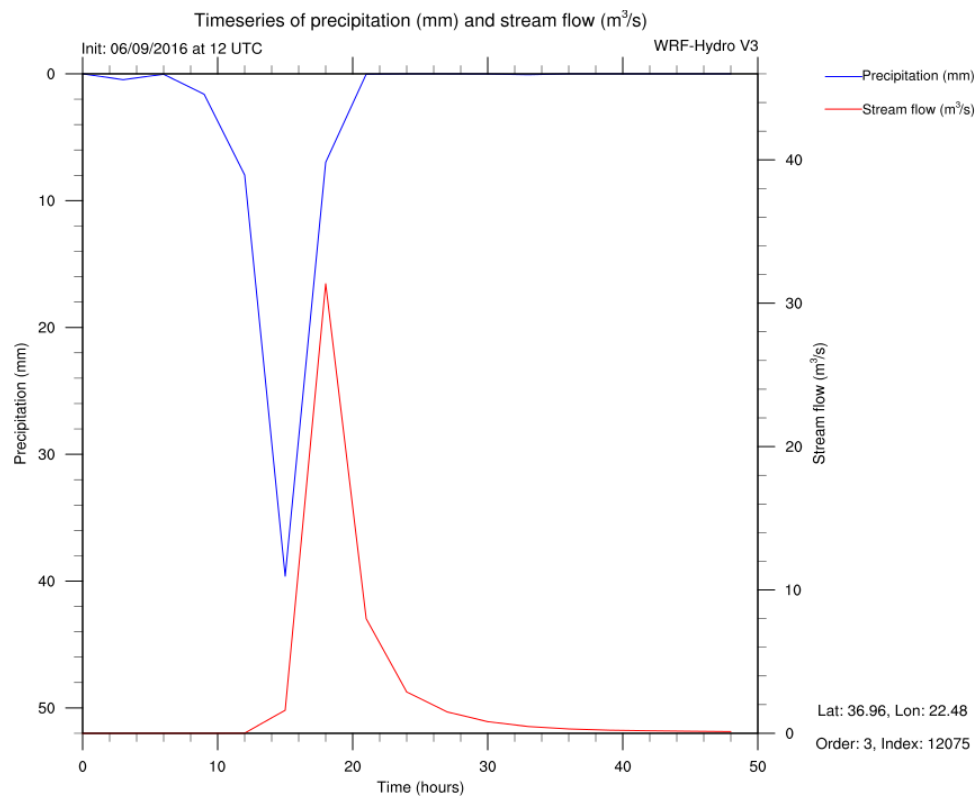


### 3.4 Υδρογραφήματα

Οι αποκρίσεις των μοντέλων προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα υδρογραφήματα που απεικονίζουν το ύψος υετού (mm) και την απορροή ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) συναρτήσει του χρόνου. Τα υδρογραφήματα αναφέρονται στα τέσσερα σημεία Σ1, Σ2, Σ3 και Σ4 που βρίσκονται δυτικά, ανατολικά, βόρεια και νότια αντίστοιχα, περιμετρικά του Ευρώτα. Τα σημεία αυτά είναι αντιπροσωπευτικά της χωρικής κατανομής της βροχόπτωσης επειδή έχουν τοποθετηθεί σε τέτοια σημεία, σε παραπόταμους του Ευρώτα, στον Ταΰγετο το Σ1, στον Πάρνωνα βόρεια το Σ2 και νότια το Σ3 και στην κύρια κοίτη του ποταμού, κοντά στις εκβολές το Σ4.

#### ▪ Δυτικό σημείο - Σ1

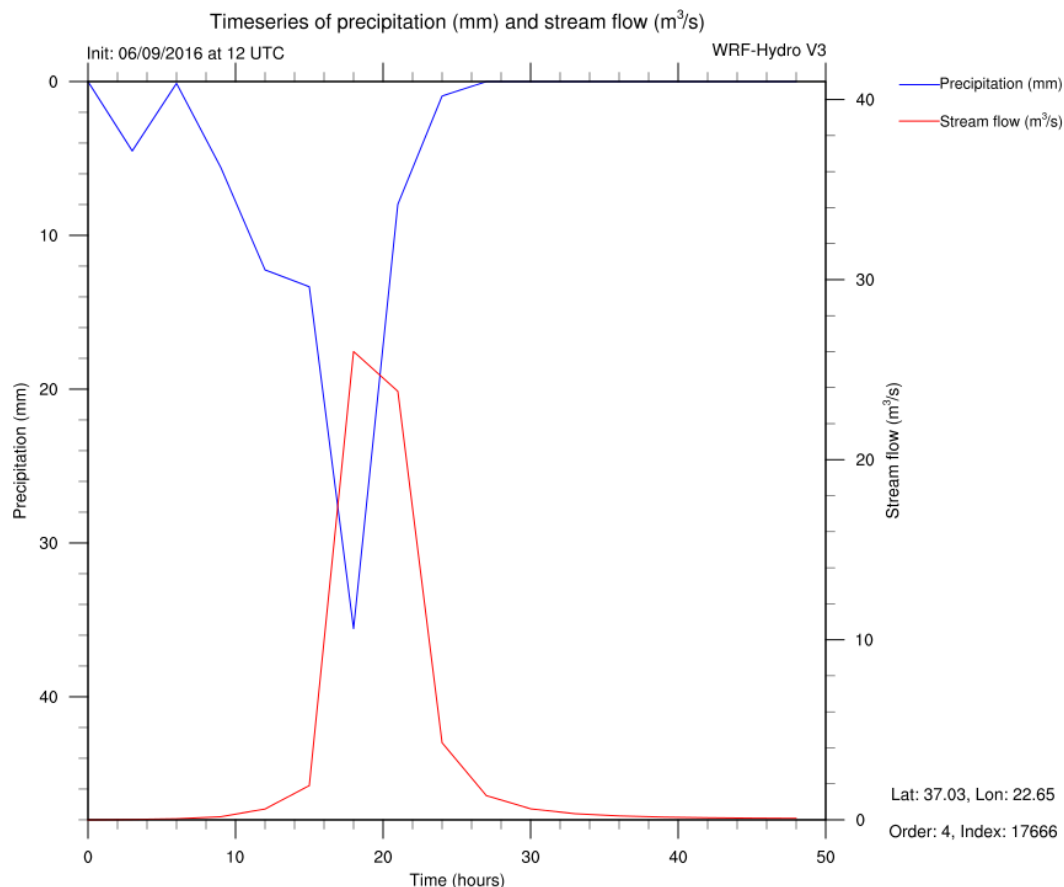
Όπως διαπιστώνεται στο υδρογράφημα του Σ1, σύμφωνα με το μοντέλο προσομοίωσης ο υετός σε εκείνο το σημείο, το οποίο βρίσκεται στον Ταΰγετο, είχε αρχίσει να εμφανίζεται από τις 6 Σεπτεμβρίου περίπου 15:00 η ώρα, αλλά για πολύ λίγο εφόσον μέσα σε 3 ώρες είχε σταματήσει τελείως. Δεν είναι ανησυχητικό το γεγονός ότι εμφανίστηκε για δεύτερη φορά στις 21:00, αλλά ότι άρχισε να δυναμώνει αρκετά απότομα κυρίως στις 00:00, ξημερώνοντας η επόμενη μέρα. Η κατακόρυφη και ραγδαία αύξηση του υετού έφτασε στα ψηλότερα επίπεδά του (40 mm) στις 06:00. Το νερό αυτό διοχετεύτηκε στα κανάλια 2<sup>ης</sup> και 3<sup>ης</sup> τάξης του ποταμού και μέσα σε 3 ώρες, στις 09:00, η ροή του ποταμού έφτασε την ανώτερη τιμή της ( $32 \text{ m}^3/\text{s}$ ) μετά από εξίσου κατακόρυφη άνοδο. Να σημειωθεί ότι οι παραπόταμοι, μέχρι τις 7 Σεπτεμβρίου και ώρα 03:00 το πρωί, ήταν μηδενικής ροής αφού ο μήνας Σεπτεμβρίου είναι ξηρός. Η αύξηση της ροής άρχισε να παρατηρείται λίγο πριν την απότομη άνοδο της ποσότητας του υετού. Τελικά, ο υετός και η ροή του ποταμού μειώθηκαν μέσα σε 3 ώρες, ακριβώς όσο χρειάστηκε για να αυξηθούν. Εν τέλει, στις 12:00 ο υετός μηδενίστηκε ενώ η ροή του ποταμού διένυσε περισσότερο χρόνο για να μηδενιστεί (στις 10:00 της 8<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου).



**Υδατογράφημα 3.4.1.** Καταγραφή του ύψους νετού και της επιφανειακής απορροής του Ευρώτα για το σημείο Σ1 της προσομοίωσης ως προς τον χρόνο (UTC) για τις 6, 7 και 8 Σεπτεμβρίου.

■ Ανατολικό σημείο - Σ2

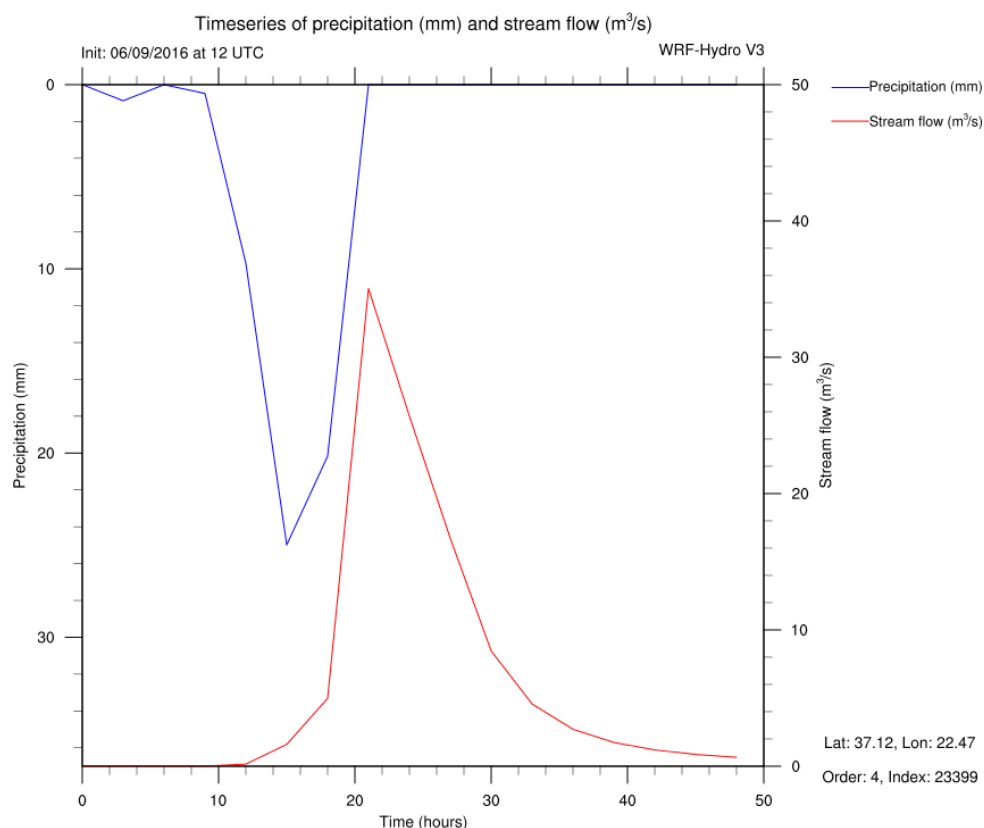
Ενώ στο σημείο Σ1 ο υετός ξεκίνησε λίγο πιο ομαλά, στο Σ2 το οποίο βρίσκεται στον Πάρνωνα, φαίνεται να έκανε την εμφάνισή του πιο έντονη. Στις 15:00 (12 UTC) της 6<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου ξεκίνησε η αύξηση του υετού που διήρκησε μέχρι τις 18:00 (15 UTC). Σε αντίθεση με το Σ1 ο υετός εκείνη την ώρα ήταν περίπου 3mm ψηλότερος. Βέβαια στις 21:00 (18 UTC), όπως έχει φανεί και στις προσομοιώσεις, υετός απότομα αυξανόμενης έντασης εμφανίζεται και πάλι, με μια μικρή ύφεση ενδιάμεσα. Η βροχή έπεφτε ασταμάτητα μέχρι και την επόμενη μέρα και το μεγαλύτερο ύψος υετού υπολογίζεται να συνέβη στις 08:00 (05 UTC) (35 mm). Μάλιστα είναι αξιοσημείωτο ότι μέσα σε μια ώρα (09:00, 06UTC) η καμπύλη της ροής των παραποτάμων σε εκείνο το σημείο του Ευρώτα 2<sup>ης</sup> και 3<sup>ης</sup> τάξης έφτασε και αυτή στην κορυφή της (22 m<sup>3</sup>/s), παρόλο που άρχισαν να φουσκώνουν 3 ώρες μετά την έναρξη της δυνατής καταιγίδας. Τελικά ο υετός αποδυναμώνεται και σταματά στις 17:00(14 UTC) της 7<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου ενώ το νερό των παραποτάμων επανέρχεται στα αρχικά του επίπεδα στις 03:00 (00 UTC) της 8<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου.



**Υδατογράφημα 3.4.2.** Καταγραφή του ύψους υετού και της επιφανειακής απορροής του Ευρώτα για το σημείο Σ2 της προσομοίωσης ως προς τον χρόνο (UTC) για τις 6, 7 και 8 Σεπτεμβρίου.

■ Βόρειο σημείο - Σ3

Το σημείο Σ3 βρίσκεται εξίσου στο Πάρνωννα απλά βορειότερα και δυτικότερα από το Σ2. Επιπλέον το υδρογράφημα αυτό θυμίζει εκείνο του Σ1, διότι οι καμπύλες υετού και ροής ποταμού ακολουθούν περίπου την ίδια πορεία. Σε αυτό το υδρογράφημα ο αρχικός υετός που ξέσπασε στην περιοχή στις 6 Σεπτεμβρίου και ώρα 15:00(12 UTC) είναι λιγότερο αιφνίδιος και απότομος απ ότι στο Σ2 αλλά περισσότερο απ ότι στο Σ1. Στην δεύτερη καταιγίδα που ξέσπασε στις 21:00(18 UTC), για 3 ώρες η βροχή έπεφτε με σχετικά ομαλή αύξηση και στις 06:00(03 UTC) η μέγιστη τιμή υετού έφτασε τα 25 mm. Στην συνέχεια το ύψος βροχής μειώνεται αρκετά γρήγορα για 3 ώρες και μετά τις 09:00 (06 UTC) ακόμα πιο γρήγορα, μέχρι που στις 12:00 (09 UTC) μηδενίζεται. Από την άλλη, οι ξηροί παραπόταμοι του Ευρώτα 2<sup>ης</sup> και 3<sup>ης</sup> τάξης αρχίζουν να τροφοδοτούνται αρχικά ομαλά στις 03:00 (00 UTC) της 7<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου έως στις 09:00(06 UTC) και από εκεί φτάνουν σε μικρό χρονικό διάστημα στο αποκορύφωμά τους ( $35 \text{ m}^3/\text{s}$ ) στις 13:00(10 UTC). Τέλος, η ροή του ποταμού δεν επανέρχεται στα φυσιολογικά επίπεδα πριν τις 9 Σεπτεμβρίου. Να σημειωθεί ότι το χρονικό διάστημα που μεσολάβησε ανάμεσα στις κορυφές των δυο καμπύλων ήταν 6 ώρες.

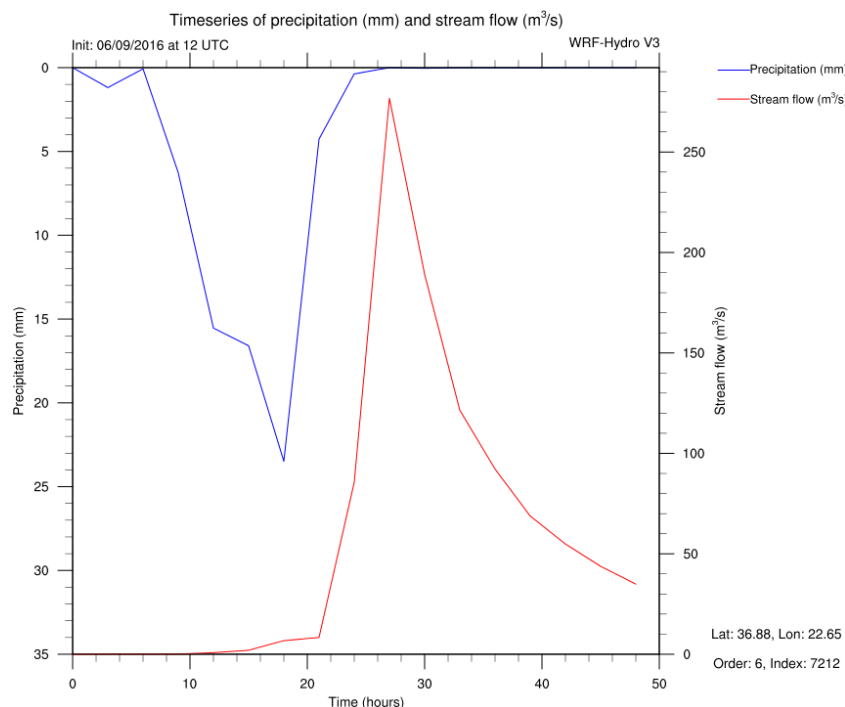


**Υδατογράφημα 3.4.3.** Καταγραφή του ύψους υετού και της επιφανειακής απορροής του Ευρώτα για το σημείο Σ3 της προσομοίωσης ως προς τον χρόνο (UTC) για τις 6, 7 και 8 Σεπτεμβρίου.

#### ■ Νότιο σημείο – Σ4

Το σημείο Σ4 βρίσκεται κοντά στις εκβολές του ποταμού Ευρώτα. Ο υετός σε εκείνο το σημείο δεν διαφέρει τόσο με τα υπόλοιπα, αλλά αυτό που διαφοροποιείται έντονα είναι η ροή του ποταμού, η οποία έφτασε  $256 \text{ m}^3/\text{s}$  στο μέγιστό της, όταν στα υπόλοιπα σημεία το μέγιστο ήταν κοντά στα  $30 \text{ m}^3/\text{s}$ . Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι το σημείο είναι κοντά στις εκβολές, ότι εκεί είναι στενό το πέρασμα του ποταμού και επιπλέον ο ποταμός είναι κύριας ροής (4<sup>ης</sup> τάξης). Οπότε όπως είναι λογικό όλα τα νερά από τους παραπόταμους του Ταϋγέτου και του Πάρνωννα μαζί διοχετεύτηκαν εκεί και πλημμύρησαν την περιοχή.

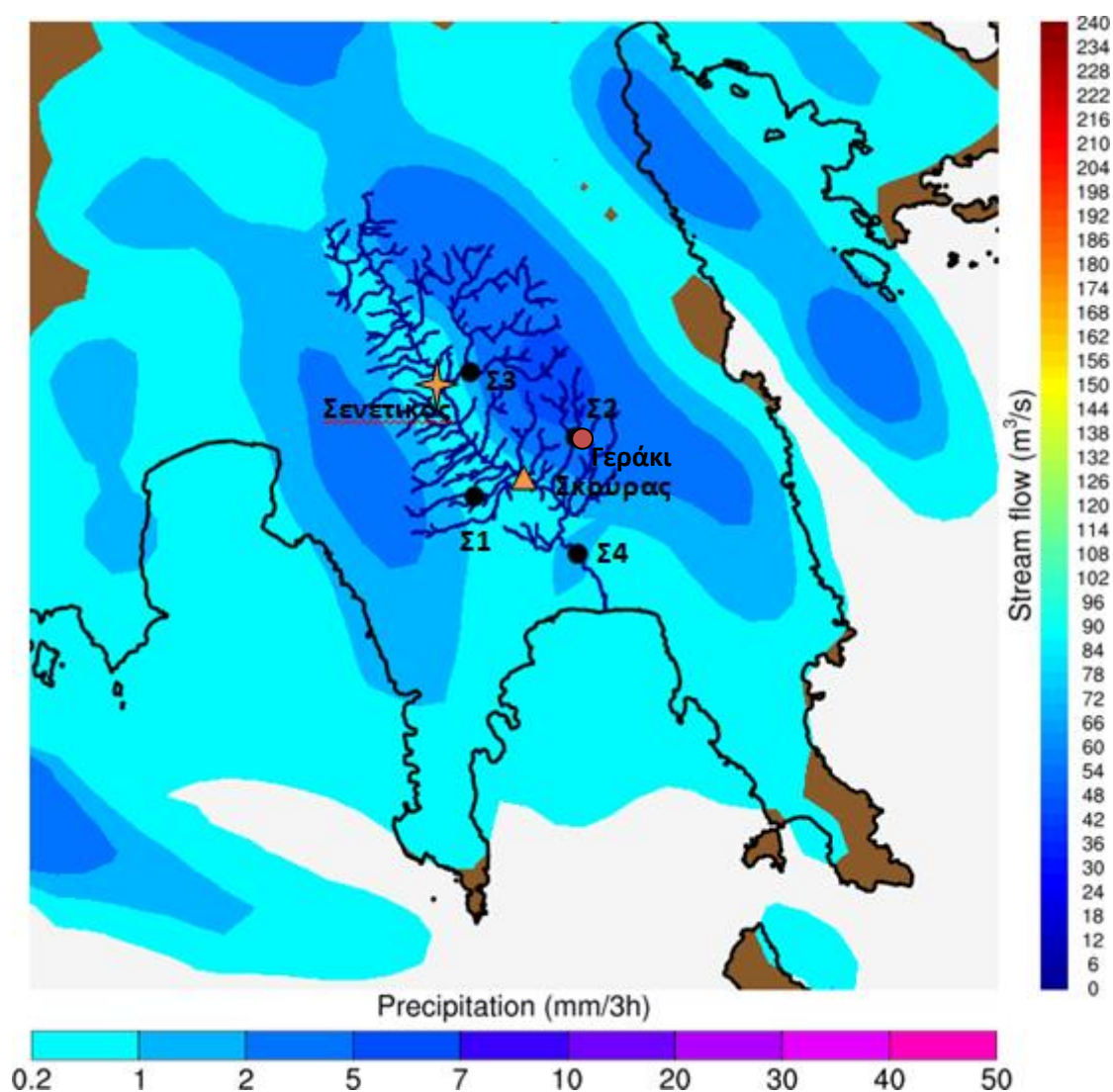
Η πρώτη βροχή ξέσπασε από τις 15:00 (12 UTC) έως τις 21:00 (18 UTC) στις 6 Σεπτεμβρίου με μικρή αύξηση στην ένταση. Η επόμενη και δυνατότερη βροχή ξεκίνησε με συνεχώς αυξανόμενο ύψος για 6 ώρες καθώς η αύξηση άρχισε να γίνεται πιο ομαλή, όμως για λίγο. Τελικά στις 08:00 (05 UTC) κορυφώθηκε (24mm). Στην συνέχεια, ο ρυθμός μείωσης ήταν μεγαλύτερος από τον ρυθμό αύξησης. Τελικά ο υετός σταμάτησε στις 17:00 (14 UTC), στις 7 του μήνα. Από την άλλη η ροή του ποταμού όπως προαναφέρθηκε έφτασε απότομα στην μέγιστη τιμή της (19:00(16 UTC) στις 7 Σεπτεμβρη) ενώ η μείωση παρόλο που ήταν απότομη, θεωρείται πιο ομαλή από την αύξηση. Επειδή η περιοχή πλημμύρισε ο ποταμός χρειάστηκε μέρες για να φτάσει στα φυσιολογικά επίπεδά του.



**Υδατογράφημα 3.4.4.** Καταγραφή του ύψους υετού και της επιφανειακής απορροής του Ευρώτα για το σημείο Σ4 της προσομοίωσης ως προς τον χρόνο (UTC) για τις 6, 7 και 8 Σεπτεμβρίου.

Όπως φαίνεται στα παραπάνω υδρογραφήματα, για το ύψος υετού τα σημεία Σ1-Σ3 και Σ2-Σ4 συμβαδίζουν μεταξύ τους αντίστοιχα. Μπορεί η βροχή να ξεκίνησε σε όλα τα σημεία την ίδια ώρα, όμως δεν έφτασε και την κορυφαία τιμή της σε αυτά ταυτόχρονα. Συγκεκριμένα τα Σ1 και Σ3 έφτασαν το μέγιστό τους στις 03 UTC της 7<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου ενώ το Σ2 και Σ4 στις 05 UTC της ίδιας ημέρας. Το γεγονός αυτό δεν είναι τυχαίο αν παρατηρήσει κανείς τους παγκόσμιους χάρτες καιρού (κεφάλαιο 3.2) στους οποίους φαίνεται ότι το ψυχρό μέτωπο είχε νοτιοδυτική κατεύθυνση καθώς κατευθυνόταν προς την Δυτική Ελλάδα, καλύπτοντας πρώτα την περιοχή των Σ1, Σ3 και έπειτα αυτή των Σ2, Σ4. Επιπλέον επειδή ο Ταϋγέτος είναι η πρώτη και ψηλότερη οροσειρά που συνάντησε το νέφος, αυτό αναγκάστηκε να ανέβει ψηλότερα καθώς προχωρούσε προς την λεκάνη απορροής του Ευρώτα, επομένως και να ψυχθεί γρηγορότερα με αποτέλεσμα να οδηγήσει σε υετό. Επιπλέον, εφόσον ο άνεμος ήταν νοτιοδυτικός και υγρός διότι ερχόταν από την θάλασσα, κινούνταν προς την ενδοχώρα εναποθέτοντας τεράστια ποσά βροχής στα προσήνεμα των ορεινών όγκων που συνάντησε στην πορεία του, δηλαδή στον Ταϋγέτο. Έτσι δικαιολογείται ότι στο Σ1 παρατηρήθηκε το μεγαλύτερο ύψος υετού (40mm). Καθώς η βροχή δυνάμωνε οι παραπόταμοι του Ταϋγέτου 1<sup>ης</sup> και 2<sup>ης</sup> τάξης άρχισαν πρώτοι να κυλάνε ενώ υπό φυσιολογικές συνθήκες είναι ξηροί, τους καλοκαιρινούς μήνες, λόγω κλίματος και λόγω άρδευσης. Στην συνέχεια το κύμα κακοκαιρίας που βρισκόταν πάνω από το Σ3 δημιούργησε μέγιστο ύψος υετού 25mm και έτσι ο παραπόταμος του Πάρνωνα 3<sup>ης</sup> τάξης για το σημείο εκείνο άρχισε να κυλάει παρόλο που και αυτός ήταν ξηρός. Το Σ2 που βρέθηκε στην συνέχεια υπό τον υετό, είχε μεγαλύτερο ύψος βροχής (35mm) από το Σ3 και αυτό γιατί είναι πιο ορεινό. Έτσι ξεκίνησαν και οι παραπόταμοι του Πάρνωνα 2<sup>ης</sup> και 3<sup>ης</sup> τάξης γύρω από το σημείο εκείνο να κυλάνε. Όλοι οι παραπόταμοι του Ταϋγέτου και του Πάρνωνα, ενώ πλέον είχαν φτάσει μέχρι τις 10UTC στο αποκορύφωμα της ροής τους (το Σ1 32 m<sup>3</sup>/s το Σ2 22 m<sup>3</sup>/s και το Σ3 35 m<sup>3</sup>/s) διοχετεύτηκαν στο κανάλι 4<sup>ης</sup> και κύριας τάξης. Παράλληλα με το Σ2, συνέβη και η κορύφωση του ύψους υετού στο Σ4 (24mm). Σε εκείνο το σημείο όμως κυλούσε ήδη ο κύριας ροής ποταμός, ο οποίος είναι στενότερος και ρηχότερος από τα υπόλοιπα σημεία και σε συνδυασμό με τα ορμητικά νερά που κατευθύνονταν από την ένωση των παραποτάμιων νερών, η ροή στις 16UTC έφτασε τα 256 m<sup>3</sup>/s (όταν όλα τα άλλα σημεία στο μέγιστό τους ήταν κοντά στα 30 m<sup>3</sup>/s).

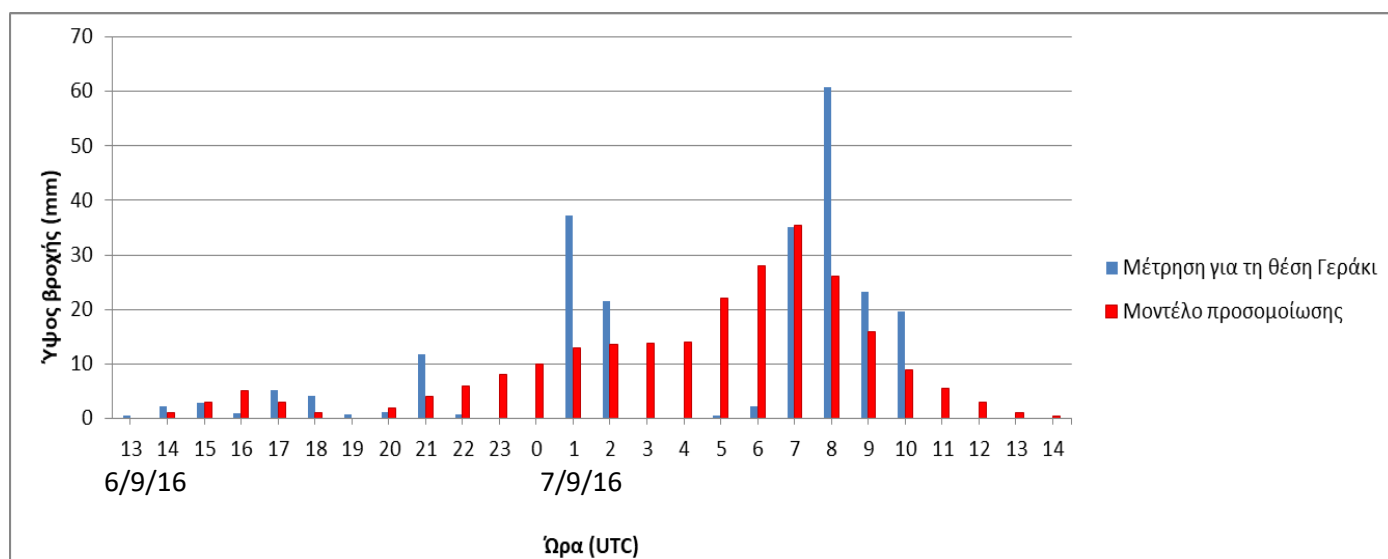
### 3.5. Αξιολόγηση μοντέλου



**Χάρτης 3.5.1.** Χωρική κατανομή 3ωρης αθροιστικής βροχόπτωσης σε mm (κάτω μπάρα χρωμάτων) και απορροής σε m<sup>3</sup>/s (δεξιά μπάρα χρωμάτων). Τα τέσσερα σημεία Σ1, Σ2, Σ3, Σ4 απεικονίζουν τα σημεία εκείνα που χρησιμοποιήθηκαν για την παροχή δεδομένων του μοντέλου προσομοίωσης. Στον ίδιο χάρτη απεικονίζονται επιπλέον δυο μετρητικοί σταθμοί του ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε., Σενετικός (✦) και Σκούρας (▲) καθώς και ο μετεωρολογικός σταθμός του Γερακίου (●).

Για την αξιολόγηση του μοντέλου που έτρεξε χρειάζεται η σύγκρισή των προσομοιωμένων τιμών με τις πραγματικές τιμές. Όσον αφορά το ύψος βροχής (mm/h) γίνεται η σύγκριση των προσομοιωμένων τιμών του σημείου Σ2 με τις αντίστοιχες πραγματικές που μέτρησε ο μετεωρολογικός σταθμός του Γερακίου για τις 6 και 7 Σεπτεμβρίου του 2016, εφόσον το Σ2 είναι το κοντινότερο σημείο στο Γεράκι. Σύμφωνα με το ιστόγραμμα 3.5.1. το μοντέλο δείχνει από τις 12 έως 20 UTC ότι πραγματοποίησε μια πολύ ρεαλιστική απεικόνιση του ύψους

βροχής αλλά από τα ξημερώματα της 7<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου που ξεκίνησαν τα πολύ έντονα καιρικά φαινόμενα, οι τιμές ύψους βροχής άρχισαν να διαφέρουν αρκετά. Οι πραγματικές μετρήσεις δείχνουν ότι λαμβάνουν χώρα 2 κύματα κακοκαιρίας στις 6 Σεπτεμβρίου, το πρώτο στις 13 UTC με μικρά ύψη βροχής και το δεύτερο και δυνατότερο στις 20 UTC κλιμακούμενης έντασης. Τέλος αξίζει να αναφερθεί ότι το μοντέλο προσομοίωσης αναπαράγει τα 2 κύματα βροχόπτωσης ικανοποιητικά αλλά υποεκτιμά τον ωριαίο υετό στο Γεράκι εφόσον οι πραγματικές τιμές ύψους βροχής (mm/h) είναι πολύ υψηλότερες από αυτές του σημείου Σ2, με μέγιστη τιμή να φτάνει τα 60mm/h.

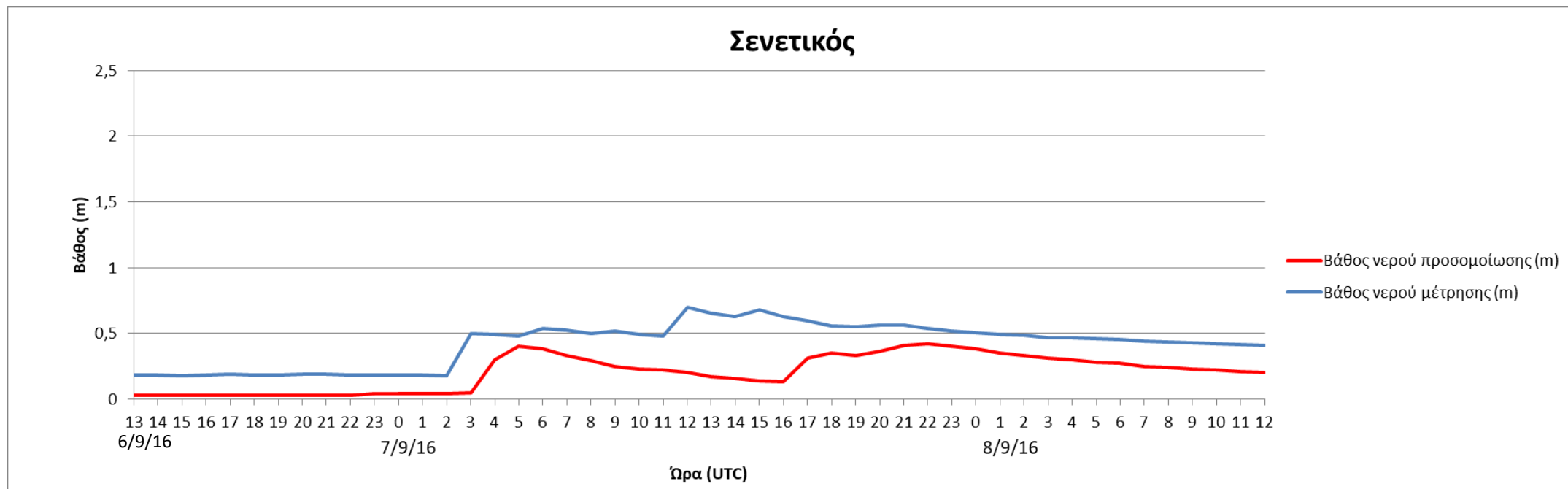


**Ιστογράμμο 3.5.1.** Καταγραφή ύψους βροχής του μετεωρολογικού σταθμού Γερακίου και του μοντέλου προσομοίωσης ως προς την Ώρα (UTC) για τις ημερομηνίες 6 και 7 Σεπτεμβρίου 2016.

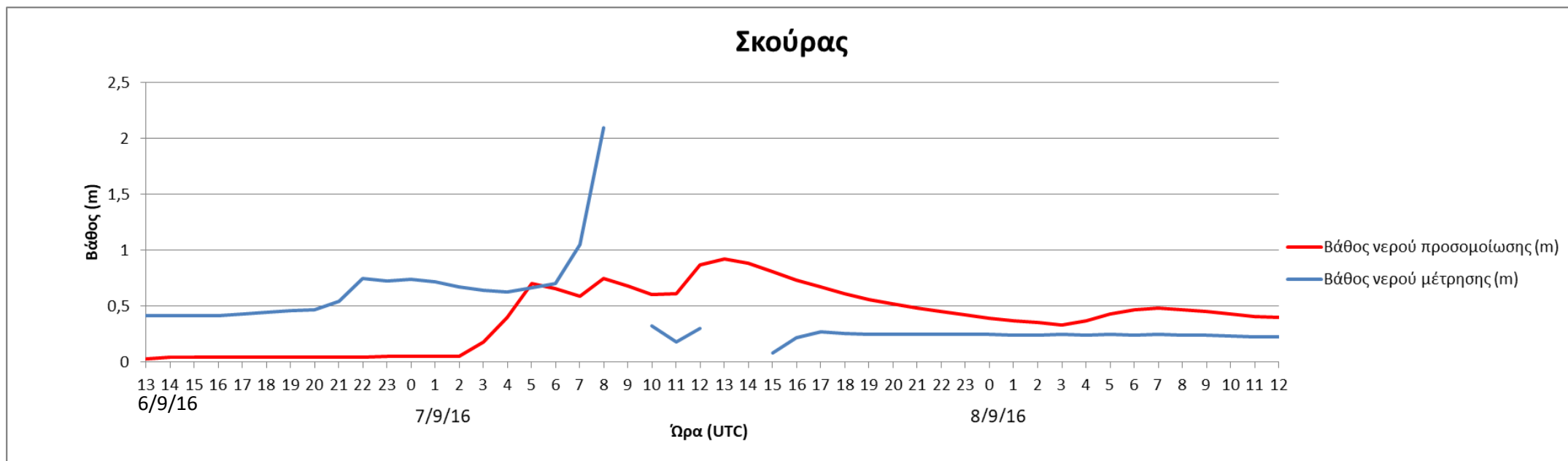
Περαιτέρω αξιολόγηση του μοντέλου έγινε μέσα από την σύγκριση του βάθους του ποταμού της προσομοίωσης με το αντίστοιχο πραγματικό βάθος για τους μετρητικούς σταθμούς Σενετικός και Σκούρας. Όσον αφορά τον Σενετικό παρατηρείται παρόμοιο μοτίβο ως προς τις μετρήσεις του βάθους στα δεδομένα της προσομοίωσης και της πραγματικότητας. Πιο συγκεκριμένα και στις δυο περιπτώσεις το βάθος παραμένει σταθερό μέχρι τις 2 UTC της 7<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου. Έπειτα το βάθος αυξάνεται απότομα διότι εκείνη την ώρα συνέβη η αποκορύφωση των έντονων βροχών. Από τις 5 UTC και μετά όμως η προσομοίωση για εκείνο το σημείο του Σενετικού δείχνει το βάθος του ποταμού να μειώνεται σιγά σιγά ενώ στην πραγματικότητα το βάθος αυξανόταν. Από τις 8 UTC της 8<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου και μετά τα μοτίβα των δυο καμπυλών αρχίζουν να ξανασυμβαδίζουν (διάγραμμα 3.5.1). Στην περίπτωση του Σκούρα (διάγραμμα 3.5.2) η προσομοίωση ακολουθεί το πραγματικό μοτίβο μέχρι τις 21 UTC. Από εκεί και πέρα το πραγματικό βάθος αυξάνεται, αρχικά λίγο, λόγω της πρώτης βροχής της



6<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου όπως φαίνεται στο διάγραμμα 4.1. και έπειτα απότομα λόγω της δεύτερης και δυνατής βροχής της 7<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου, με την διαφορά ότι η αύξηση του βάθους στο μοντέλο προηγείται χρονικά της πραγματικής. Από τις 8 UTC και έπειτα το μοντέλο παρουσιάζει σταθερή εικόνα του βάθους, με μικρές αυξομειώσεις, με πιο σημαντική αύξηση γύρω στις 12 UTC, ενώ το πραγματικό βάθος αποκλίνει τελείως από αυτή την συμπεριφορά. Αυτό οφείλεται στο ότι ο ποταμός ξεχείλισε και η κατάσταση έγινε ανεξέλεγκτη. Επιπρόσθετα, η θέση του μετρητικού σταθμού του Σκούρα είναι σε σημείο κύριας ροής του ποταμού, στο οποίο συμβάλλουν οι παραπόταμοί του και έτσι δικαιολογείται η υπερβολική αύξηση της ροής του. Από το απόγευμα της 7<sup>ης</sup> Σεπτέμβρη και μετά η ροή του ποταμού άρχισε να σταθεροποιείται.



**Διάγραμμα 3.5.1.** Σύγκριση της επιφανειακής απορροής του μετρητικού σταθμού Σενετικός, που βρίσκεται στον Ευρώτα και έχει τοποθετήσει το ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε., με την αντίστοιχη καταγραφή της προσομοίωσης του σταθμού αυτού ως προς την ώρα (UTC) για τις ημερομηνίες 6,7 και 8 Σεπτεμβρίου 2016 .



**Διάγραμμα 3.5.2.** Σύγκριση της επιφανειακής απορροής του μετρητικού σταθμού Σκούρα, που βρίσκεται στον Ευρώτα και έχει τοποθετήσει το ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε., με την αντίστοιχη καταγραφή της προσομοίωσης του σταθμού αυτού ως προς την ώρα (UTC) για τις ημερομηνίες 6,7 και 8 Σεπτεμβρίου 2016 . Οι τιμές που αντιστοιχούν στις ώρες 09UTC, 13UTC και 14UTC στις 7 Σεπτεμβρίου απουσιάζουν από το διάγραμμα λόγω αδυναμίας καταγραφής τους από τον σταθμό.

## Συμπεράσματα

Παρόλο που στην Ελλάδα δεν υπάρχει ακόμα ένα αξιόπιστο σύστημα πρόγνωσης πλημμύρων βασιζόμενο σε παρατηρήσεις και υδρολογικές προσομοιώσεις που να καλύπτει ολόκληρη την επικράτεια, έχουν γίνει αξιόλογες προσπάθειες από αναγνωρισμένους φορείς σε διάφορες περιοχές μελέτης όπως στην παρούσα εργασία για την λεκάνη απορροής του Ευρώτα. Το μοντέλο WRF-Hydro, που χρησιμοποιήθηκε, καλύπτει όλη την περιοχή της λεκάνης εφόσον προσομοιώνει το ύψος βροχής (mm) καθώς και την επιφανειακή απορροή του ποταμού ( $m^3/s$ ) σε τέσσερα σημεία, ανατολικά, δυτικά, βόρεια και νότια (Σ1,Σ2,Σ3,Σ4), καθώς και σε 2 σημεία στην κύρια κοίτη του ποταμού (Σενετικός και Σκούρας), δίνοντας έτσι μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα. Όσον αφορά τις βροχοπτώσεις, το μοντέλο αξιολογήθηκε αρκετά ικανοποιητικό αφού ακολουθούσε τις πραγματικές μετρήσεις του σταθμού στο Γεράκι, με μια υστέρηση στις μέγιστες τιμές. Το μοντέλο αξιολογήθηκε ικανοποιητικό επιπλέον και για την επιφανειακή απορροή, για τις θέσεις Σενετικός και Σκούρας, με υψηλότερες τις πραγματικές τιμές βάθους που αγγίζουν τα 0,7 m στον Σενετικό και 2,1 m στον Σκούρα ενώ οι προσομοιωμένες τα 0,43m και 0,9 m αντίστοιχα. Ειδικά για την θέση Σκούρας που βρίσκεται πιο κοντά στις εκβολές του ποταμού από τον Σενετικό, το μοντέλο ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα μέχρι τις 8 UTC της 7<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου το οποίο είναι αναμενόμενο διότι εκείνη την ώρα η απορροή του ποταμού είχε φτάσει στα μέγιστα της, με βάθος 2,1 m και έτσι άρχισε να πλημμυρίζει η περιοχή. Επιπλέον, παρατηρήθηκε στα υδρογραφήματα των σημείων Σ1,Σ2,Σ3,Σ4 ότι υπάρχει μια χρονική υστέρηση της μέγιστης τιμής της επιφανειακής απορροής σε σχέση με την μέγιστη τιμή της βροχόπτωσης, που ποικίλει από 0 ώρες (Σ2) , 3 ώρες (Σ1), 6 ώρες (Σ3) και 9 ώρες (Σ4). Παρατηρείται λοιπόν, ότι η απόκριση της συγκεκριμένης λεκάνης απορροής είναι σχετικά αργή και αυτό διευκολύνει την άμεση λήψη μέτρων προστασίας από την πλημμύρα αμέσως μετά την εκδήλωση της ισχυρής καταιγίδας. Δεδομένου ότι το Σ4 βρίσκεται στην περιοχή της Σκάλας που πλημμύρισε, το παραπάνω μοντέλο μπορεί να λειτουργήσει σε μεγάλο βαθμό για την πρόγνωση πλημμύρας στο μέλλον.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### ΞΕΝΗ

Abbott, M., Bathurst, J., Cunge, J., O'Connell, P. and Rasmussen, J. (1986). An introduction to the European Hydrological System — Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 2: Structure of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology*, 87(1-2), pp.61-77. Saleem A, "Major floods in Europe", 2016

Andrews, R., Quintana, L., 2015. Unpredictable, unpreventable and impersonal medicine: global disaster response in the 21st century. *EPMA Journal* 6(1).

Arnold, J., Srinivasan, R., Muttiah, R. and Williams, J. (1998). LARGE AREA HYDROLOGIC MODELING AND ASSESSMENT PART I: MODEL DEVELOPMENT.

Crawford, R., Kozlowski, T., 1985. Flooding and Plant Growth. *The Journal of Ecology* 73(3), 1069..

Cross, J., 2001. Megacities and small towns: different perspectives on hazard vulnerability. *Global Environmental Change Part B: Environmental Hazards* 3(2), 63-80. Maddox, I., 2014. Three Common Types of Flood Explained [WWW Document]. Intermap.com. URL <http://www.intermap.com/risks-of-hazard-blog/three-common-types-of-flood-explained> (accessed 9. 24. 17). National Geographic Society (US), "Floods: Information and facts"

Dewan, A., Yamaguchi, Y., 2008. Effect of Land Cover Changes on Flooding: Example from Greater Dhaka of Bangladesh. *Environmental Monitoring and Assessment* 4(1), 11-20p.

Givati, A., Fredj, E., Rummeler, T., Gochis, D., Yu, W., Kunstmann, H.. Using the WRF-Hydro model for flood forecasting of 100 years flood event in Israel. 1 st European Fully Coupled Atmospheric-Hydrological Modeling and WRF-Hydro Users workshop Rende (Cosenza, Italy), June 11-13, 2014.

Gochis, D. J., Yu, W., Yates, D. N., 2015. The WRF-Hydro model technical description and user's guide, version 3.0. NCAR Technical Document, Boulder, Colorado, USA. (Online: [https://ral.ucar.edu/sites/default/files/public/images/project/WRF\\_Hydro\\_User\\_Guide\\_v3.0.pdf](https://ral.ucar.edu/sites/default/files/public/images/project/WRF_Hydro_User_Guide_v3.0.pdf), accessed 08.05.2017)

Háša, S. and Brunet-Thornton, R., *Impact of Organizational Trauma on Workplace Behavior and Performance*, 2017. . *Advances in Human Resources Management and Organizational Development*.

HEC-HMS [WWW Document], 2017. [WWW Document]. Hec.usace.army.mil. URL <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/> (accessed 9. 23. 17).

Hiatt, M., 2015. *Understanding WRF-Hydro within the NFIE-Hydro Framework*. CE397 Project Report. May 8, 2015.

Hong, C., Hsu, H., Lin, N., Chiu, H., 2011. Roles of European blocking and tropical-extratropical interaction in the 2010 Pakistan flooding. *Geophysical Research Letters* 38(13).

Hong, S.-Y., and J.-O. J. Lim, 2006: The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6). *J. Korean Meteor. Soc.*, 42, 129–151.

Hong, Song-You, Yign Noh, Jimmy Dudhia, 2006: A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Mon. Wea. Rev.*, 134, 2318–2341.

Iacono, M. J., J. S. Delamere, E. J. Mlawer, M. W. Shephard, S. A. Clough, and W. D. Collins, 2008: Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. *J. Geophys. Res.*, 113, D13103.

Jimenez, Pedro A., Jimmy Dudhia, J. Fidel Gonzalez-Rouco, Jorge Navarro, Juan P. Montavez, and Elena Garcia-Bustamante, 2012: A revised scheme for the WRF surface layer formulation. *Mon. Wea. Rev.*, 140, 898–918.

Katsafados P., S. Kalogirou, A. Papadopoulos, and G. Korres, 2012: “Mapping long-term atmospheric variables over Greece”, *Journal of Maps* 8 (2), pp. 181-184.)

Larsen, M., A., D., Drews, M., Refsgaard, J., C., Jensen, K., H., Butts, M., B., Christensen, J., H., and Christensen, O., B.. *Integrated Climate and Hydrology Modelling—catchment scale coupling of the HIRHAM regional climate model and the MIKE SHE hydrological Model*. 1<sup>st</sup> European Fully Coupled Atmospheric- Hydrological Modeling and WRF Hydro Users workshop Rende (Cosenza, Italy), June 11-13, 2014.

Li, I., Gochis, D., J., Mesquita, M., D., S.. WRF-Hydro simulation of the Himalayan Beas river basin. 1 st European Fully Coupled Atmospheric-Hydrological Modeling and WRF-Hydro Users workshop Rende (Cosenza, Italy), June 11- 13, 2014.

Maddox, I. (2017). Three Common Types of Flood Explained. [online] Intermap.com. Available at: <http://www.intermap.com/risks-of-hazard-blog/three-common-types-of-flood-explained> [Accessed 30 Sep. 2017]. Renfrew K, Gray J, "DK Eyewitness travel guide: Netherlands", 2011

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.

(Online: [http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw\\_v3.pdf](http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v3.pdf), accessed 08.05.2017)

Tewari, M., F. Chen, W. Wang, J. Dudhia, M. A. LeMone, K. Mitchell, M. Ek, G. Gayno, J. Wegiel, and R. H. Cuenca, 2004: Implementation and verification of the unified NOAA land surface model in the WRF model. 20th conference on weather analysis and forecasting/16th conference on numerical weather prediction, pp. 11–15.

Tzoraki, O., Cooper, D., Kjeldsen, T., Nikolaidis, N., Gamvroudis, C., Froebrich, J., Querner, E., Gallart, F., Karalemas, N., 2013. Flood generation and classification of a semi-arid intermittent flow watershed: Evrotas river. *International Journal of River Basin Management* 11(1), 77-92.

Yucel, I. and Onen, A.. Evaluation of hydrometeorological extremes using WRF-Hydro system. 1 st European Fully Coupled Atmospheric-Hydrological Modeling and WRF-Hydro Users workshop Rende (Cosenza, Italy), June 11-13, 2014.

Zong, Y., Chen, X., 2000. . *Natural Hazards* 22(2), 165-184.

## **ΕΛΛΗΝΙΚΗ**

Βαζινάκη Α, μεταπτυχιακή εργασία, "Μοντελοποίηση της υδρολογίας της λεκάνης απορροής του ποταμού Ευρώτα" Χανιά: 2009

Ευρωπαϊκό Ερευνητικό πρόγραμμα GlobalAqua, «Περίπτωση Μελέτης Ποταμού Ευρώτα», Αθήνα: Ιανουάριος 2015

Ευστρατιάδης Α, Ρόζος Ε, Κουκουβίνος Α, « Υδρόγειος- Μοντέλο υδρολογικής προσομοίωσης», Τομέας υδατικών πόρων και περιβάλλοντος ΕΜΠ, 2009

Εφημερίδα NotosPress, «Βούρκωσαν τα πάντα! Κατακλυσμός θάβει περιουσίες», Σεπτέμβριος 2016

Εφημερίδα NotosPress, «Ένας νεκρός στο Δήμο Ευρώτα», Σεπτέμβριος 2016

Κοτρώνη Β, Λαγουβάρδος Κ, ΕΑΑ, «Προειδοποιήσεις πλημμυρών από μετεωρολογικές παρατηρήσεις και προγνώσεις», 2015

Νικολαΐδης Ν., Ν. Σκουλικίδης, Β. Παπαδουλάκης, Κ. Τσακίρης, & Ν. Καλογεράκης, 2009. Διαχειριστικά Σχέδια Πιλοτικής Αγροτικής Λεκάνης Ευρώτα Ποταμού Τεχνική έκθεση 134 σ. Στην Έκδοση: Νικολαΐδης Ν., Ν. Καλογεράκης, Ν. Σκουλικίδης, Κ. Τσακίρης, 2005-2009. Τεχνολογίες φιλικές προς το περιβάλλον για αγροτική ανάπτυξη. Πρόγραμμα Life-περιβάλλον, LIFE05ENV/Gr/000245 EE (EnviFriendly).

Νικολαΐδης Ν., Ν. Σκουλικίδης, Κ. Τσακίρης, & Ν. Καλογεράκης, 2006. Προκαταρτικό Σχέδιο Διαχείρισης της Λεκάνης Απορροής του Ποταμού Ευρώτα και της Παράκτιας Ζώνης . Τεχνική έκθεση 242σ. + Παράρτημα 79σ. Στην Έκδοση: Νικολαΐδης Ν., Ν. Καλογεράκης, Ν. Σκουλικίδης, Κ. Τσακίρης, 2005-2009. Τεχνολογίες φιλικές προς το περιβάλλον για αγροτική ανάπτυξη. Πρόγραμμα Life-περιβάλλον, LIFE05ENV/Gr/000245 EE (EnviFriendly). Βάρλας Γ, «Η καταστροφική κακοκαιρία της 7ης Σεπτεμβρίου»

ENVI friendly,ΕΛΚΕΘΕ, «Στρατηγικός Σχεδιασμός Αντιπλημμυρικής προστασίας νομού Λακωνίας», 2009

### **ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ**

ΕΜΥ, κλιματικός Άτλαντας Ελλάδας, <http://climatlas.hnms.gr/sdi/>

News messinia, Στούπα Μεσσηνίας: Αυτοκίνητα στη θάλασσα – Οι εικόνες βιβλικής καταστροφής και οι φωτογραφίες που σαρώνουν το διαδίκτυο,2016,  
<http://www.newsit.gr/topikes-eidhseis/Stoupa-Messinias-Aytokinita-sti-thalassa-Oi-eikones-vivlikis-katastrofis-kai-oi-fotografies-poy-saronoun-to-diadiktyo-pics/647339>



*Learn About How Floods Develop and the Impact They Have [WWW Document], 2017. [WWW Document].Nationalgeographic.com.URL:http://www.nationalgeographic.com/environment/natural-disasters/floods/ (accessed 9. 24. 17).*

Atmosphere and Climate Dynamics Group, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, [www.meteoclima.hua.gr](http://www.meteoclima.hua.gr)

Δίκτυο Εντοπισμού Ηλ.Εκκενώσεων & Καταιγίδων Σε Πραγματικό Χρόνο,  
[www.en.blitzortung.org](http://www.en.blitzortung.org)

[www1.wetter3.de](http://www1.wetter3.de)