

2015



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ ΥΔΡΟΜΕΤΕΡΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΠΡΟΓΝΩΣΗΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ

Μάντση Κωνσταντίνα

Επιβλέπων: Δ. Κουτσογιάννης, Καθηγητής ΕΜΠ

Εικόνα εξωφύλλου: το παλιό πετρόχτιστο γεφύρι του Ατσιχόλου επί του Λουσίου ποταμού στην Αρκαδία

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος

Διερεύνηση σεναρίων υδρομετεωρολογικής πρόγνωσης
στην περιοχή της Πελοποννήσου

Μάντση Κωνσταντίνα

Επιβλέπων: Δ. Κουτσογιάννης, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2015

Ευχαριστίες

Η συγκεκριμένη ενότητα είναι αυτή που συνήθως γράφεται τελευταία σε κάθε διπλωματική εργασία, αλλά επειδή αφορά πρόσωπα που συνέβαλαν με διάφορους τρόπους σε όλη τη διάρκεια εκπόνησής της είναι πολύ σημαντική.

Πρώτα και κύρια, θέλω να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της εργασίας Δημήτρη Κουτσογιάννη, γιατί ο τρόπος διδασκαλίας του και η προσέγγισή του στην εκπαιδευτική διαδικασία συνολικότερα αποτελούν κίνητρο και έμπνευση για μένα στις σπουδές μου.

Πολλά «ευχαριστώ» αξίζουν και στον Ανδρέα Ευστρατιάδη Δρ. Πολιτικό Μηχανικό και μέλος της ομάδας «Ιτιά» για τη συνεχή και κρίσιμη στήριξή του σε όλη αυτή την προσπάθεια. Η επαφή και η ανταλλαγή απόψεων αποτέλεσαν το σημείο-κλειδί για όλη την έκβαση της εργασίας και το ευρύτερο περιεχόμενό της. Η θετική και άμεση ανταπόκρισή του σε οποιαδήποτε απορία δικιά μου ή άλλων συναδέλφων είναι πραγματικά αξιοσημείωτη. Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης τον Αντώνη Κουκοβίνο για τη σημαντική συμβολή του σε όλη τη διάρκεια της εργασίας αλλά κυρίως σε ότι αφορούσε τα γεωγραφικά δεδομένα και επεξεργασίες.

Θέλω να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον φίλο μου Άκη Ζαρκαδούλα, Πολιτικό Μηχανικό ΕΜΠ, για το κίνητρο που μου έδωσε να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα, αλλά και για την συνεχή του βοήθεια όποτε τον χρειαζόμουν. Επίσης ιδιαίτερη αναφορά στον Παναγιώτη Κοσσιέρη, Πολιτικό Μηχανικό ΕΜΠ, για την απαραίτητη βοήθειά του στο σκέλος της υδρολογικής προσομοίωσης των μοντέλων

Πέραν αυτής της εργασίας, κλείνοντας ένα κύκλο στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, θέλω να ευχαριστήσω τους φίλους και συντρόφους μου από τον Εγκέλαδο, γιατί μου έμαθαν τις έννοιες της συλλογικότητας και της αλληλεγγύης, τόσο μέσα από τους αγώνες, όσο και μέσα από τις όμορφες στιγμές που περάσαμε όλα αυτά τα χρόνια. Ιδιαίτερα «ευχαριστώ» στον Παναγιώτη Δήμα για την βοήθεια του καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Κλείνοντας, θέλω να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στους γονείς μου Γιώργο και Μαρία, αλλά και τον αδερφό μου Νίκο για την υπομονή τους και τη συνεχή τους στήριξη.

Μάντση Κωνσταντίνα, 14/7/2015

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	1
1.1. Αντικείμενο της εργασίας	1
1.2. Οργάνωση της εργασίας	1
Κεφάλαιο 2: Περιοχή μελέτης και συλλογή δεδομένων	3
2.1. Λεκάνη απορροής Νέδοντα	3
2.2. Λεκάνη απορροής Λούσιου	7
2.3 Συλλογή Δεδομένων	10
2.3.1 Υδρομετεωρολογικά δεδομένα στην λεκάνη απορροής του Νέδοντα	10
2.3.2 Υδρομετεωρολογικά δεδομένα στην λεκάνη απορροής του Λούσιου	12
2.4. Τεχνικά χαρακτηριστικά των σταθμών μέτρησης.....	13
2.4.1. Λεκάνη απορροής του Νέδοντα	13
2.4.2. Λεκάνη απορροής του Λούσιου	16
2.5 Μετεωρολογικές προγνώσεις.....	18
2.5.1 Αριθμητικά μοντέλα πρόγνωσης καιρού και μέθοδοι πρόγνωσης τύπου Ensemble.....	18
2.5.2 Αριθμητικό μοντέλο WRF	19
Κεφάλαιο 3: Ανάλυση μετεωρολογικών προγνώσεων	22
3.1. Περιγραφή επεισοδίων βροχής	22
3.1.1. Λεκάνη Νέδοντα.....	22
3.1.2. Λεκάνη Λούσιου	25
3.2. Σημειακή ανάλυση των προγνώσεων βροχόπτωσης με βάση τους μετεωρολογικούς σταθμούς.....	27
3.2.1. Εισαγωγή	27
3.2.2. Ανάλυση με βελτιστοποίηση της συμμετοχής των γειτονικών διακριτών σημείων.....	29

3.2.3. Συμπεράσματα σημειακών αναλύσεων στη λεκάνη του Νέδοντα	31
3.2.4. Συμπεράσματα σημειακών αναλύσεων στη λεκάνη του Λούσιου.....	34
3.3 Επιφανειακή αναγωγή προγνώσεων βροχόπτωσης με βάση όλα τα σημειακά δειγματα	36
3.3.1 Λεκάνη απορροής Νέδοντα.....	37
3.3.2 Λεκάνη απορροής Λούσιου.....	39
Κεφάλαιο 4: Υδρολογική προσομοίωση λεκανών Νέδοντα και Λούσιου.....	41
4.1. Βασικές έννοιες υδρολογικών μοντέλων.....	41
4.2. Γενικά χαρακτηριστικά μοντέλου προσομοίωσης λεκανών ενδιαφέροντος....	43
4.3. Θεωρητικό υπόβαθρο μοντέλου προσομοίωσης.....	44
4.4 Διαμόρφωση χρονοσειρών εισόδου.....	52
4.4.1 Χρονοσειρές βροχόπτωσης	52
4.4.2 Χρονοσειρές δυνητικής εξατμοδιαπνοής.....	55
4.4.3 Χρονοσειρές παροχής.....	58
Κεφάλαιο 5: Βαθμονόμηση υδρολογικού μοντέλου.....	60
5.1. Η έννοια της βαθμονόμησης.....	60
5.2 Τοποθέτηση του προβλήματος βαθμονόμησης.....	61
5.3 Κριτήρια καλής προσαρμογής.....	62
5.3.1 Αποτελεσματικότητα - Αποτελεσματικότητα υψηλών παροχών.....	62
5.4 Διαδικασία Βαθμονόμησης.....	64
5.4.1. Ορισμός χρονικών περιόδων.....	64
5.4.2. Παράμετροι- Όρια παραμέτρων.....	65
5.4.3 Ορισμός στοχικής συνάρτησης	66
5.4.4 Βαθμονόμηση παραμέτρων	66
5.5 Παρουσίαση αποτελεσμάτων.....	67
5.5.1 Λεκάνη Νέδοντα.....	67
5.5.2 Λεκάνη Λούσιου	70
5.5.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων των δυο λεκανών	73

Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα πλημμυρικής πρόγνωσης.....	76
6.1 Δημιουργία χρονοσειρών πρόγνωσης.....	76
6.2 Λεκάνη απορροής Νέδοντα	76
6.3 Λεκάνη απορροής Λούσιου	80
6.3.1 Πλημμυρική πρόγνωση επεισοδίου βροχής 170113	80
6.3.2 Πλημμυρική πρόγνωση επεισοδίου βροχής 131113.....	84
Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα και προτάσεις.....	89
7.1 Συμπεράσματα	89
7.2 Προτάσεις επιχειρησιακής αξιοποίησης μεθοδολογίας.....	89
7.3 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	89
Κεφάλαιο 8: Βιβλιογραφία.....	92
Παράρτημα Α: Διαγράμματα από αναλύσεις μετεωρολογικής πρόγνωσης	95

Περίληψη

Η συνδυασμένη μέθοδος της υδρομετεωρολογικής πρόγνωσης στην εκτίμηση του πλυμμηρικού κινδύνου είναι μια εδραιωμένη μέθοδος, με πολλές εφαρμογές σε διεθνές επίπεδο. Όμως, οι περισσότερες από αυτές τις εφαρμογές αφορούν μεγάλες λεκάνες απορροής ποταμών, που χαρακτηρίζονται από συνεχή ροή. Στην Ελλάδα, οι λεκάνες απορροής είναι συνήθως μικρές σε έκταση και με ποταμούς μεταβλητής ροής, οι οποίες πλήττονται και από στιγμιαίες πλημμύρες (flash floods). Στην παρούσα εργασία, γίνεται μια προσπάθεια υδρομετεωρολογικής πρόγνωσης σε τέτοιου είδους λεκάνες, δίνοντας έμφαση στην απάντηση δύο κύριων ερωτημάτων: i) ποια μέθοδος μοντελοποίησης είναι η καταλληλότερη για την αναπαράσταση των πολύπλοκων διεργασιών, που χαρακτηρίζουν λεκάνες με μεταβλητή απορροή και ii) ποια χωρική ανάλυση των προγνώσεων της βροχόπτωσης, οι οποίες είναι σε σημειακή μορφή (grid points), δίνει αξιόπιστες εκτιμήσεις των χωρικά ανηγμένων δεδομένων. Οι λεκάνες απορροής που μελετώνται είναι αυτές του Νέδοντα και του Λούσιου στην περιοχή της Πελοποννήσου και τα δυο επεισόδια βροχής που προσομοιώνονται είναι αυτά που συνέβησαν στις 17/1/13 και στις 13/11/13. Το υδρολογικό μοντέλο κάθε λεκάνης απαιτεί συνδυασμένη μοντελοποίηση των επιφανειακών και υπόγειων διεργασιών και της αλληλεπίδρασής τους (διήθηση, κατείσδυση, υπόγειες απώλειες), οι οποίες είναι και οι κύριες διεργασίες σε λεκάνες απορροής ποταμών μεταβλητής ροής. Το μοντέλο βαθμονομήθηκε με ωριαία δεδομένα βροχής από τους υδρομετρικούς σταθμούς εξόδου των δύο λεκάνων για περίοδο περίπου 3 χρόνων (2011-2014). Οι προγνώσεις των δύο μελετώμενων επεισοδίων, έχουν χρονικό βήμα 6 ωρών και παράχθηκαν από το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών με το μοντέλο αριθμητικής πρόγνωσης καιρού WRF. Αυτές οι προγνώσεις ανάγονται χωρικά με δύο μεθόδους: α) με βελτιστοποίηση της συμμετοχής των τεσσάρων γειτονικών διακριτών σημείων (grid points) των σταθμών των λεκάνων και β) με χρήση του μέσου όρου όλων των διακριτών σημείων, που βρίσκονται εντός των δύο λεκανών (επιφανειακή ανάλυση). Τα σενάρια πρόγνωσης της βροχόπτωσης, τα οποία προκύπτουν από την παραπάνω αναγωγή χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου στα υδρολογικά μοντέλα, ώστε να παραχθούν οι χρονοσειρές απορροής στις εξόδους των δύο λεκάνων. Οι χρονοσειρές απορροής που παράγονται από το μοντέλο συγκρίνονται μεταξύ τους και με τις αντίστοιχες παρατηρημένες, ώστε να υποδειχθεί ποιά μέθοδος είναι πιο αποτελεσματική για την πρόγνωση της απορροής.

Abstract

The combined use of weather forecasting and hydrological models in flood risk estimations is an established technique, with many successful applications worldwide. However, most known flood forecasting systems have been established in large rivers with perpetual flow. In Greece there are mostly small basins with variable river flow, which are often affected by flash floods. In this paper we investigate the use of hydrometeorological forecasting in these basins by emphasizing in two issues: (a) which modelling approach can credibly represent the complex dynamics of basins with highly variable runoff; and (b) which transformation of point-precipitation forecasts provides the most reliable estimations of spatially aggregated data, to be used as inputs to semi-distributed hydrological models. The basins we investigate are Nedontas and Lousios basins, in the region of Peloponnese and the two simulated episodes of rainfall take place in 17/1/13 and 13/11/13. This employs conjunctive modelling of surface and groundwater flows and their interactions (percolation, infiltration, underground losses), which are key processes in river basins with significant variability of runoff. The model was calibrated against hourly flow data by the hydrometric stations of the basins for a 3-year period (2011-2014). The forecast scenarios of the two studied episodes of rainfall are produced with 6-hour time step and provided by the National Observatory of Athens with the numerical weather prediction model WRF. The forecast scenarios are spatially aggregated with two methods: a) through the optimization of the participation of the four nearest grid points to the stations of the basins and b) through the use of the average of all the grid points within the area of the two basins (surface approach). The above aggregated data are used as inputs in the hydrological model, in order to produce the runoff time series in the output of the basins. These time series of the runoff are compared with the observed values and this comparison is used to indicate the best method of runoff forecast.

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1. Αντικείμενο της εργασίας

Στην παρούσα εργασία διερευνούνται σενάρια υδρομετεωρολογικής πρόγνωσης στην περιοχή της Πελοποννήσου. Συγκεκριμένα οι δυο περιοχές εφαρμογής είναι η λεκάνη απορροής του Νέδοντα ποταμού και η λεκάνη απορροής του Λούσιου ποταμού. Για την επεξεργασία των προγνώσεων των βροχοπτώσεων και την παραγωγή χρονοσειρών χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Microsoft Excel. Η επεξεργασία των βροχοπτώσεων για τα επιλεγμένα επεισόδια βροχής έγινε με δυο μεθόδους ανάλυσης: με σημειακή και με επιφανειακή.

Οι παραπάνω χρονοσειρές εισάγονται σε δυο υδρολογικά μοντέλα, ένα για κάθε λεκάνη απορροής που μελετήθηκε. Για την μοντελοποίηση των λεκάνων και την εύρεση των βέλτιστων παραμέτρων χρησιμοποιήθηκε η γλώσσα προγραμματισμού R. Τα αποτελέσματα των υδρολογικών μοντέλων, που αποτελούν τις προγνώσεις απορροής συγκρίνονται με τις παρατηρημένες χρονοσειρές απορροής και γίνεται μια προσπάθεια για να υποδειχθεί η καταλληλότερη μέθοδος υδρομετεωρολογικής πρόγνωσης.

1.2. Οργάνωση της εργασίας

Στο Κεφάλαιο 1 της παρούσας εργασίας περιλαμβάνεται η εισαγωγή.

Στο Κεφάλαιο 2 δίνονται οι απαραίτητες πληροφορίες για τις δυο περιοχές μελέτης, τις λεκάνες του Νέδοντα και του Λούσιου στην περιοχή της Πελοποννήσου. Επίσης περιγράφεται η συλλογή των υδρολογικών και μετεωρολογικών δεδομένων, καθώς και κάποια στοιχεία για τα μοντέλα μετεωρολογικής πρόγνωσης.

Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφονται τα δυο επεισόδια βροχής, που επιλέχθηκαν για την πρόγνωση της απορροής και οι μεθοδολογίες επεξεργασίας των σεναρίων πρόγνωσης τους με σημειακή και επιφανειακή ανάλυση.

Στο Κεφάλαιο 4 δίνονται κάποιες θεωρητικές πληροφορίες για τα υδρολογικά μοντέλα και περιγράφεται το θεωρητικό υπόβαθρο του υδρολογικού μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία.

Στο Κεφάλαιο 5 δίνεται η έννοια της βαθμονόμησης ενός υδρολογικού μοντέλου και περιγράφεται η διαδικασία βαθμονόμησης των παραμέτρων των υδρολογικών μοντέλων των δυο λεκάνων, καθώς και τα αποτελέσματά της.

Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα τελικά αποτελέσματα της παρούσας εργασίας από την προσομοίωση των προγνώσεων και συγκρίνονται με τις παρατηρημένες χρονοσειρές απορροής.

Στο Κεφάλαιο 7 παρουσιάζονται τα βασικά συμπεράσματα της εργασίας και προτείνονται ορισμένες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

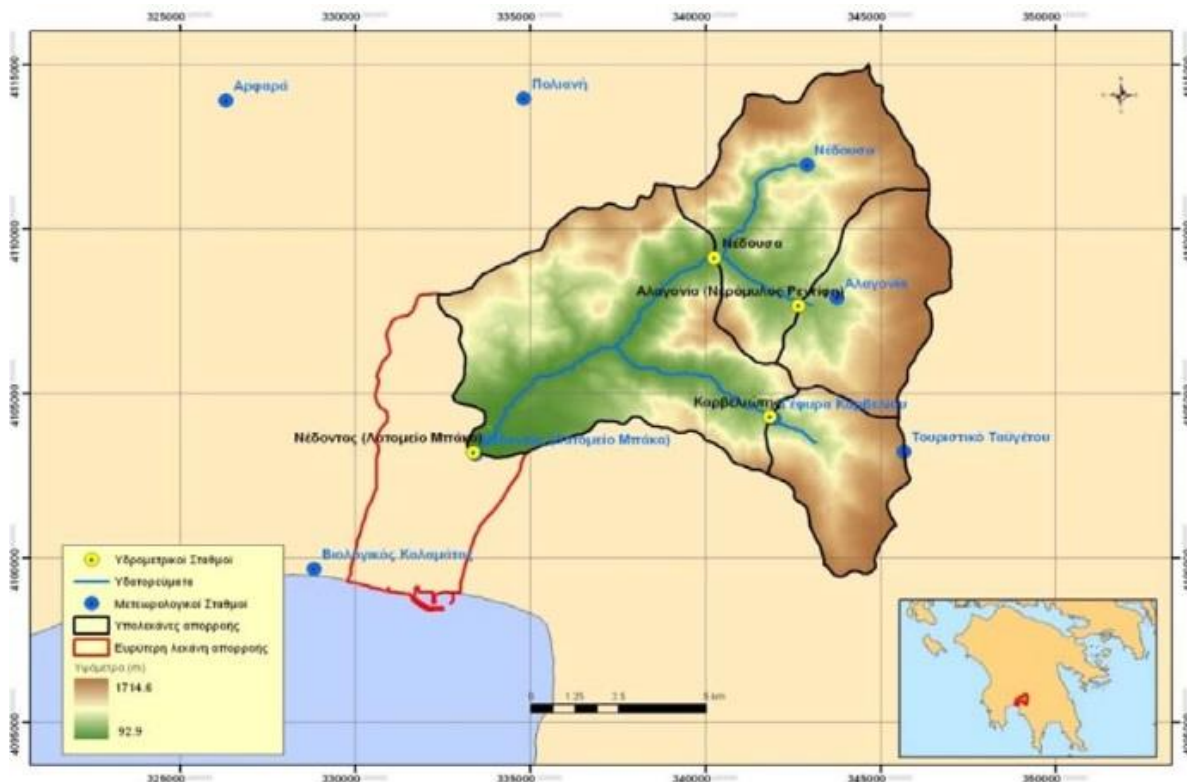
Στο Παράρτημα Α περιλαμβάνονται αναλυτικά όλα τα διαγράμματα από τις αναλύσεις των προγνώσεων, σημειακή και επιφανειακή, των δυο μελετούμενων επεισοδίων βροχόπτωσης.

Κεφάλαιο 2: Περιοχή μελέτης και συλλογή δεδομένων

Στην εργασία διερευνώνται δυο λεκάνες απορροής, που βρίσκονται στην Πελοπόννησο και ανήκουν στο Υδατικό Διαμέρισμα της Δυτικής Πελοποννήσου (ΥΔ01). Η πρώτη είναι υπολεκάνη του Νέδοντα ποταμού, στο νομό Μεσσηνίας, και η δεύτερη είναι υπολεκάνη του Λούσιου ποταμού, στο νομό Αρκαδίας. Παρακάτω δίνονται πιο λεπτομερή χαρακτηριστικά των δυο λεκάνων απορροής.

2.1. Λεκάνη απορροής Νέδοντα

Η λεκάνη απορροής του Νέδοντα ποταμού (Σχήμα 2.1) βρίσκεται στη νοτιοανατολική πλευρά του Υδατικού Διαμερίσματος Δυτικής Πελοποννήσου (ΥΔ01) και ανήκει στην Λεκάνη Απορροής Ποταμών Παμισού-Νέδοντος- Νέδα (GR32). Όλη η ανατολική πλευρά της υπό μελέτη λεκάνης συνορεύει με το υδατικό διαμέρισμα της Ανατολικής Πελοποννήσου (ΥΔ03). Ο Νέδοντας πηγάζει από τον Ταΰγετο και αφού διευθετηθεί διασχίζει την πόλη της Καλαμάτας και εκβάλλει στον Μεσσηνιακό κόλπο, δυτικά της πόλης. Στον κύριο ρου του ποταμού συμβάλλουν τρεις κύριοι παραπόταμοι στις περιοχές της Νέδουσας, της Αλαγονίας και του Καρβελίου. Ο άνω ρου του Νέδοντα σχηματίζεται από την ένωση της απορροής της Νέδουσας και της Αλαγονίας, αλλά και από πηγές των περιοχών αυτών και ενώνεται με τον κάτω ρου που προέρχεται από την περιοχή Καρβέλι. Στο κατάντη τμήμα της λεκάνης απορροής λίγο πριν την εκβολή του ποταμού παρατηρείται έντονα το φαινόμενο της αστικοποίησης . Είναι μια σχετικά ορεινή λεκάνη και περικλείεται από την οροσειρά του Ταΰγετου. Έχει μέσο υψόμετρο 770 m και συνολική έκταση 120 km². Οι μετεωρολογικοί σταθμοί είναι τοποθετημένοι στις θέσεις Αλαγονία (765 m), Αρφαρά (96 m), Καλαμάτα-Νησάκι (27 m), Καλαμάτα-Μπάκας (75 m), Καρβελιώτης (598 m), Νέδουσα (712 m), Πολιανή (650 m) και Τουριστικό Ταΰγέτου (1310 m).



Σχήμα 2.1: Λεκάνη απορροής Νέδοντα (Μαρκόνης, 2014)

Το κλίμα της ευρύτερης περιοχής χαρακτηρίζεται ως εύκρατο. Η ατμοσφαιρική θερμοκρασία κυμαίνεται μεταξύ 18 °C και 21 °C. Ο θερμότερος μήνας είναι ο Ιούλιος με μέση θερμοκρασία 26.4 °C και ο ψυχρότερος ο Ιανουάριος με 10.2 °C, αντίστοιχα. Η βροχόπτωση παρουσιάζει τη χαρακτηριστική εποχικότητα της ανατολικής Μεσογείου, με σχεδόν άνυδρα καλοκαίρια και μια υγρή περίοδο μεταξύ Οκτωβρίου και Απριλίου. Οι ετήσιες βροχοπτώσεις στα νότια του Νομού (Φοινικούντα, Μεθώνη) κυμαίνονται από 150 mm έως 600 mm, ενώ στις κεντρικές και βόρειες πεδινές και ημιορεινές περιοχές από 800 mm έως 1200 mm.

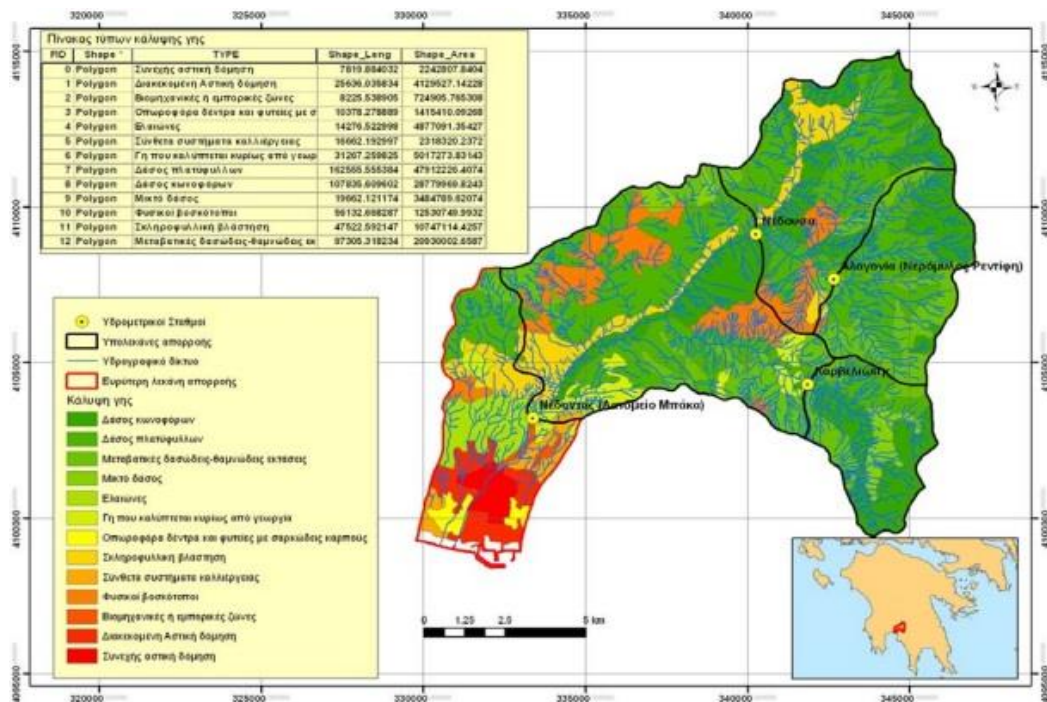
	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ
Ελάχιστη μηνιαία θερμοκρασία (°C)	5.7	5.7	6.8	8.9	12.4	16.0
Μέση μηνιαία θερμοκρασία (°C)	10.2	10.6	12.3	15.2	19.7	24.1
Μέγιστη μηνιαία θερμοκρασία (°C)	15.3	15.5	17.1	19.9	24.3	28.8
	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
Ελάχιστη μηνιαία θερμοκρασία (°C)	18.1	18.4	16.2	13.2	9.9	7.2
Μέση μηνιαία θερμοκρασία (°C)	26.4	26.3	23.2	18.9	14.8	11.7
Μέγιστη μηνιαία θερμοκρασία (°C)	31.1	31.3	28.7	24.7	20.5	16.7

Πίνακας 2.1: Μηνιαία διακύμανση της θερμοκρασίας στον σταθμό της Καλαμάτας (1956-1997) (Μαρκόνης, 2014)

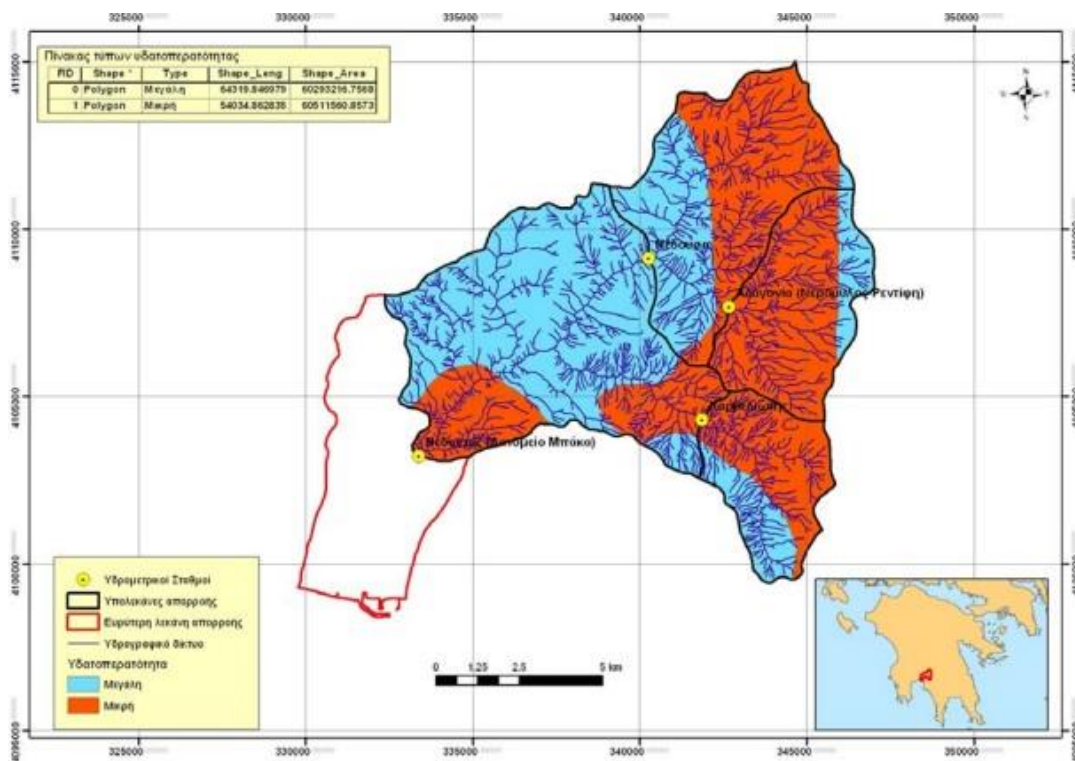
	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ
Μέση μηνιαία βροχόπτωση (mm)	111.7	94.1	73	48.5	25.6	7.5
Μέσος αριθμός ημερών βροχής	9.3	10.9	10.3	6.1	5.1	1.9
	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
Μέση μηνιαία βροχόπτωση (mm)	4.2	11.3	29.1	85.3	137.4	152.6
Μέσος αριθμός ημερών βροχής	1.3	1.4	1.9	6.9	10.0	11.6

Πίνακας 2.2: Μηνιαία διακύμανση βροχόπτωσης στον σταθμό της Καλαμάτας (1956-1997)
(Μαρκόνης, 2014)

Η υδραυλική απόκριση της λεκάνης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το είδος κάλυψης του εδάφους της και από τους εδαφικούς σχηματισμούς της περιοχής. Γενικά η φυτοκάλυψη δρα προς την κατεύθυνση της μείωσης του όγκου άμεσης απορροής και της επιβράδυνσης και εξομάλυνσης των ρυθμών της, με τελική συνέπεια τη μείωση των αιχμών των πλημμυρικών υδρογραφημάτων. Επιπλέον η χλωρίδα μεταβάλλει τα χαρακτηριστικά του επιφανειακού εδαφικού στρώματος (από τη δράση των ριζών αλλά και των φυλλωμάτων που πέφτουν), με τρόπο τέτοιο ώστε να αυξάνεται η διηθητική ικανότητα του εδάφους και συνακόλουθα να μειώνεται η απορροή (Ευστρατιάδης κ.ά., 2012). Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2 το μεγαλύτερο ανάντη τμήμα της λεκάνης καλύπτεται από δάσος (κωνοφόρα, πλατύφυλλα) και ένα σημαντικό τμήμα απο φυσικούς βοσκότοπους και καλλιέργειες. Στο κατάντη τμήμα, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η γη καλύπτεται κυρίως από αστική δόμηση. Ο εδαφικός σχηματισμός της λεκάνης του Νέδοντα, αποτελείται κατά το 1/3 από φλύσχη και κατά τα 2/3 από καρστικοποιημένους ασβεστόλιθους, οι οποίοι δεν συμβάλλουν ιδιαίτερα στην παραγωγή απορροής. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.3, η λεκάνη παρουσιάζει σημαντική ανομοιογένεια στην υδατοπερατότητά της, με το ανατολικό κυρίως τμήμα να παρουσιάζει μικρή υδατοπερατότητα, ενώ το δυτικό μεγαλύτερη.



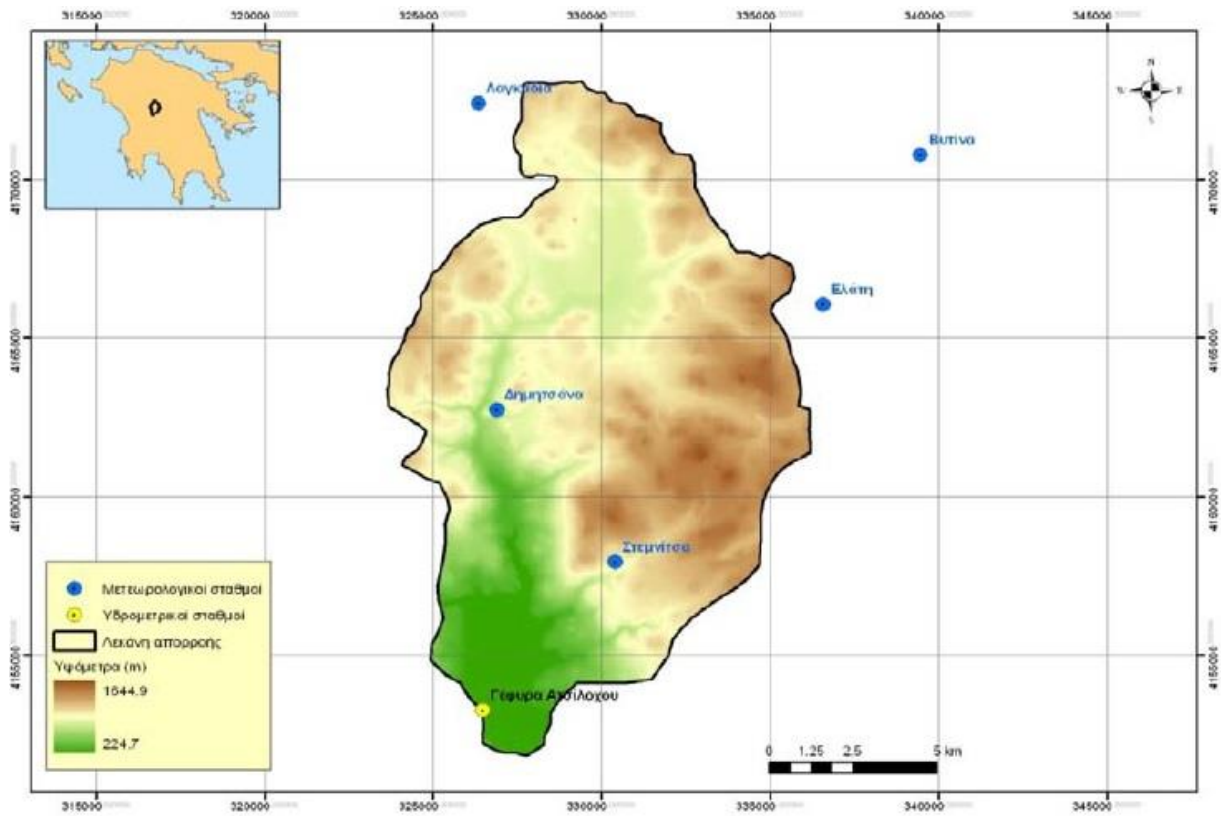
Σχήμα 2.2: Κάλυψη γης στη λεκάνη Νέδοντα (Κουκουβίνος, 2012)



Σχήμα 2.3: Υδατοπερατότητα στη λεκάνη Νέδοντα (Κουκουβίνος, 2012)

2.2. Λεκάνη απορροής Λούσιου

Η λεκάνη απορροής του ποταμού Λούσιου (Σχήμα 2.4) βρίσκεται στην κεντρική Πελοπόννησο και ανήκει στη Λεκάνη Απορροής του Ποταμού Αλφειού (GR29). Στην παρούσα εργασία μελετάται το ορεινό τμήμα της λεκάνης απορροής του Λούσιου, ανάντη του υδρομετρικού σταθμού στη Γέφυρα Ατσίχολου, ως μια ενιαία λεκάνη με έκταση 166.3 km² και μέσο υψόμετρο 1081 m. Ο Λούσιος ποταμός είναι ένας από τους παραποτάμους του Αλφειού ποταμού και έχει μήκος περίπου 23 km. Αφού περάσει δυτικά της Δημητσάνας, διασχίζει ένα εντυπωσιακό φαράγγι μήκους 15 km και πλάτους 2 km και καταλήγει στον Αλφειό κόντα στην περιοχή της Καρύταινας. Στην περιοχή είναι τοποθετημένοι τέσσερις μετεωρολογικοί σταθμοί στις θέσεις Δημητσάνα (951 m), Ελάτη (1207 m), Λαγκάδια (970 m) και Στεμνίτσα (1074 m).

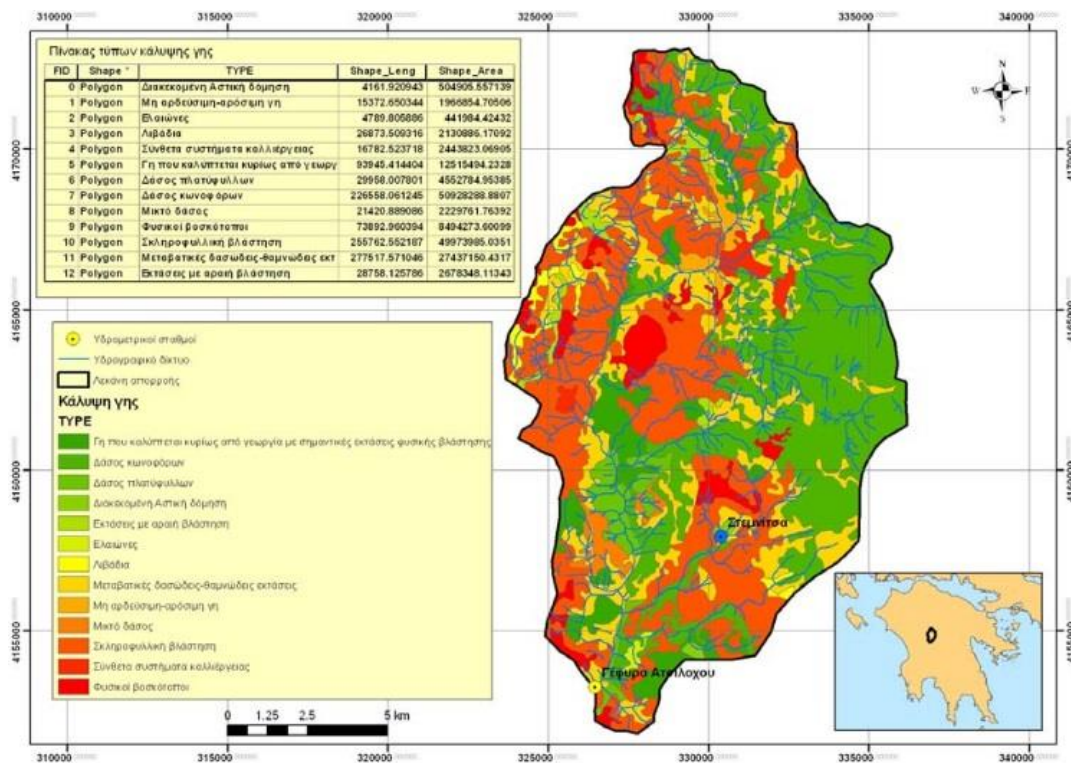


Σχήμα 2.4: Λεκάνη απορροής Λούσιου (Μαρκόνης, 2014)

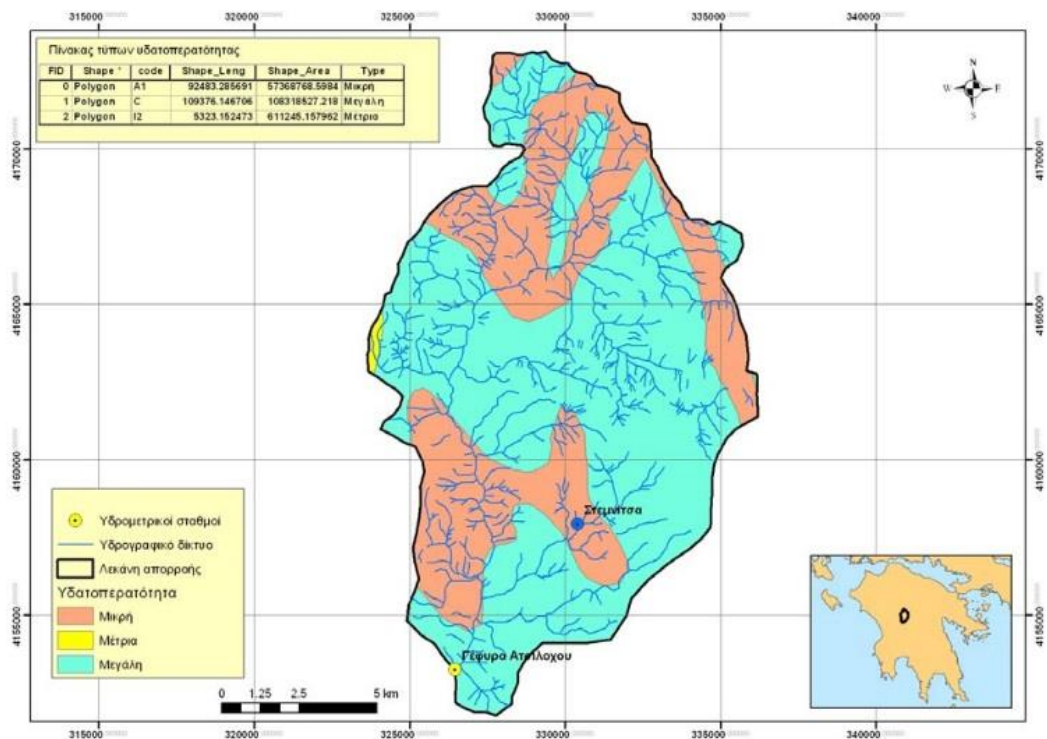
Πίνακας 2.3: Χαρακτηριστικά μεγέθη λεκάνης Λούσιου (Μαρκόνης, 2014)

Υπολεκάνη – υδρομετρικός σταθμός	Γέφυρα Ατσίγολου
Έκταση λεκάνης (km ²)	166.3
Μήκος κύριου υδατορέματος (km)	28.3
Μέσου υψόμετρο λεκάνης (m)	1081.3
Υψόμετρο στην έξοδο (m)	224.8
Διαφορά μέσου υψομέτρου και υψομέτρου στην έξοδο (m)	856.5
Χρόνος συγκέντρωσης κατά Giandotti (h)	4.02

Η κάλυψη της γης της λεκάνης του Λούσιου και η υδατοπερατότητά της φαίνονται παρακάτω στο Σχήμα 2.5 και Σχήμα 2.6, αντίστοιχα. Παρατηρούμε ότι το ¼ περίπου της λεκάνης στα ανατολικά καλύπτεται από γεωρική γη και από δάση κωνοφόρων και πλατύφυλλων. Επίσης, ένα σημαντικό τμήμα της λεκάνης καλύπτεται από σκληροφυλλική βλάστηση, η οποία είναι θαμνώδης πυκνή βλάστηση σε άγονο και ξηρό κυρίως έδαφος. Το έδαφος της λεκάνης αποτελείται σε μεγάλο βαθμό από ασβεστολιθικούς σχηματισμούς, με συνέπεια τα ¾ της λεκάνης να χαρακτηρίζονται από μεγάλη υδατοπερατότητα. Στον Πίνακα 2.3 παρουσιάζονται ορισμένα χαρακτηριστικά μεγέθη της λεκάνης του Λούσιου.



Σχήμα 2.5: Κάλυψη γης λεκάνης Λούσιου (Κουκουβίνος, 2012)



Σχήμα 2.6: Υδατοπερατότητα στη λεκάνη Λούσιου (Κουκουβίνος, 2012)

2.3 Συλλογή Δεδομένων

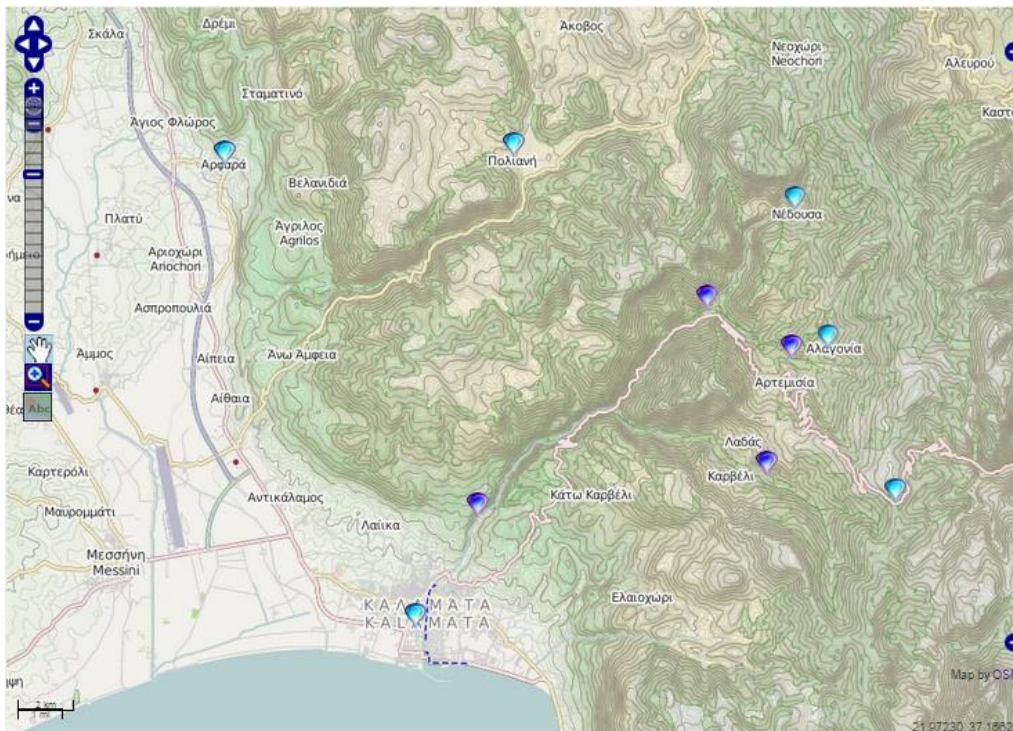
Για την υλοποίηση της παρούσας εργασίας συλλέχθηκαν υδρολογικά δεδομένα απορροής και βροχόπτωσης για την υδρολογική μοντελοποίηση των δυο περιοχών μελέτης, καθώς και μετεωρολογικά δεδομένα πρόγνωσης βροχής για την υλοποίηση της πλημμυρικής πρόγνωσης.

2.3.1 Υδρομετεωρολογικά δεδομένα στην λεκάνη απορροής του Νέδοντα

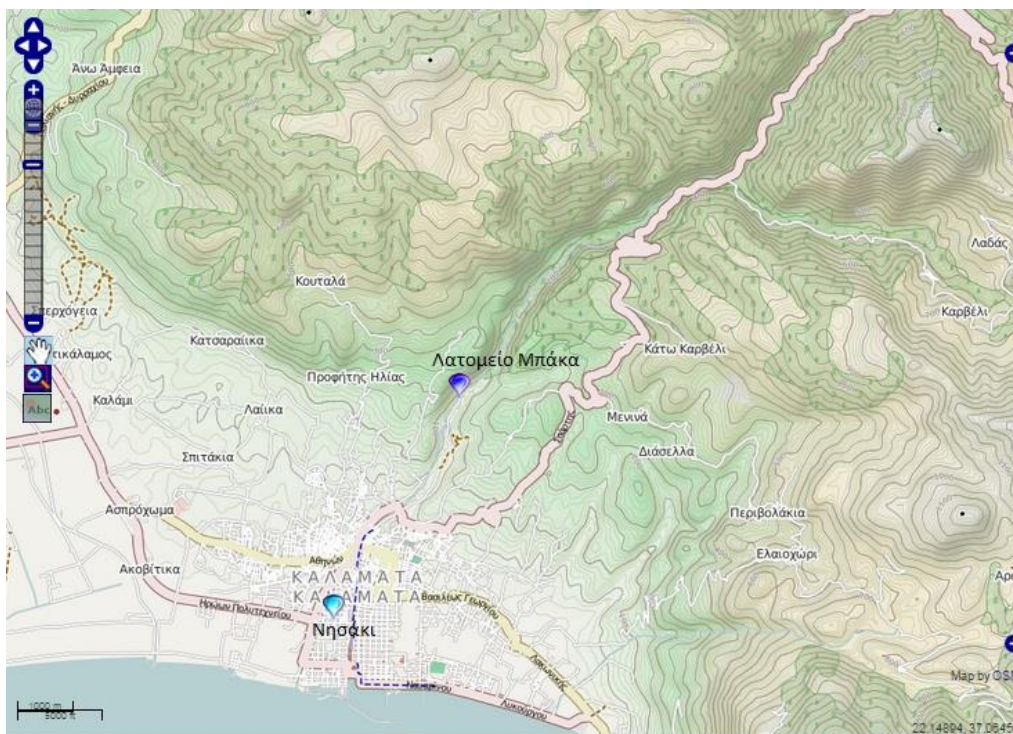
Τα υδρολογικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τη μοντελοποίηση της λεκάνης του Νέδοντα συλλέχθηκαν κυρίως από το δίκτυο δεδομένων «Δευκαλίων» (<http://deucalionproject.gr/>). Πιο αναλυτικά συλλέχθηκαν:

- Πρωτογενή δεδομένα βροχής (σε mm με 10-λεπτο βήμα) στο μετεωρολογικό σταθμό στην Αλαγονία ($\varphi = 22.24400$, $\lambda = 37.10674$). Ο σταθμός λειτουργεί από τις 25/10/2012.
- Πρωτογενή δεδομένα βροχής (σε mm με 15-λεπτο βήμα) στο μετεωρολογικό σταθμό στο Λατομείο Μπάκα ($\varphi = 22.12798$, $\lambda = 37.06251$). Ο σταθμός λειτουργεί από τις 17/12/2011.
- Πρωτογενή δεδομένα βροχής (σε mm με 10-λεπτο βήμα) στο μετεωρολογικό σταθμό στο Νησάκι ($\varphi = 22.10710$, $\lambda = 37.03330$). Διατίθενται δεδομένα από την 01/09/2011.
- Πρωτογενή δεδομένα βροχής (σε mm με 15-λεπτο βήμα) στο μετεωρολογικό σταθμό στον Καρβελιώτη ($\varphi = 22.22361$, $\lambda = 37.07348$). Ο σταθμός λειτουργεί από τις 15/03/2012.
- Πρωτογενή δεδομένα βροχής (σε mm με 10-λεπτο βήμα) στο μετεωρολογικό σταθμό στη Νέδουσα ($\varphi = 22.23297$, $\lambda = 37.14324$). Ο σταθμός λειτουργεί από τις 03/12/2011.
- Πρωτογενή δεδομένα βροχής (σε mm με 10-λεπτο βήμα) στο μετεωρολογικό σταθμό στην Πολιανή ($\varphi = 22.13976$, $\lambda = 37.15760$). Ο σταθμός λειτουργεί από τις 25/10/2012.
- Πρωτογενή δεδομένα βροχής (σε mm με 15-λεπτο βήμα) στο μετεωρολογικό σταθμό στο Τουριστικό Ταϋγέτου ($\varphi = 22.26609$, $\lambda = 37.06623$). Διατίθενται δεδομένα από την 01/09/2011.
- Επεξεργασμένα δεδομένα παροχής (σε m^3/s με 15-λεπτο βήμα) στον υδρομετρικό σταθμό στο Λατομείο Μπάκα ($\varphi = 22.12798$, $\lambda = 37.06251$). Ο σταθμός λειτουργεί από τις 17/12/2011.

Για την επεξεργασία των δεδομένων έγινε αναγωγή των πρωτογενών χρονοσειρών βροχόπτωσης και απορροής από 10-λεπτό και 15-λεπτό χρονικό βήμα σε ωριαία κλίμακα με χρήση του λογισμικού Υδρογνώμονα. Στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 2.7, Σχήμα 2.8) φαίνονται οι μετεωρολογικοί σταθμοί και ο υδρομετρικός σταθμός της λεκάνης του Νέδοντα.



Σχήμα 2.7: Χάρτης των μετεωρολογικών σταθμών στην Αλαγονία, στην Πολιανή, στο Νησάκι, στον Καρβελιώτη, στη Νέδουσα και στο Τουριστικό Ταύγετο (deucalionproject.gr)



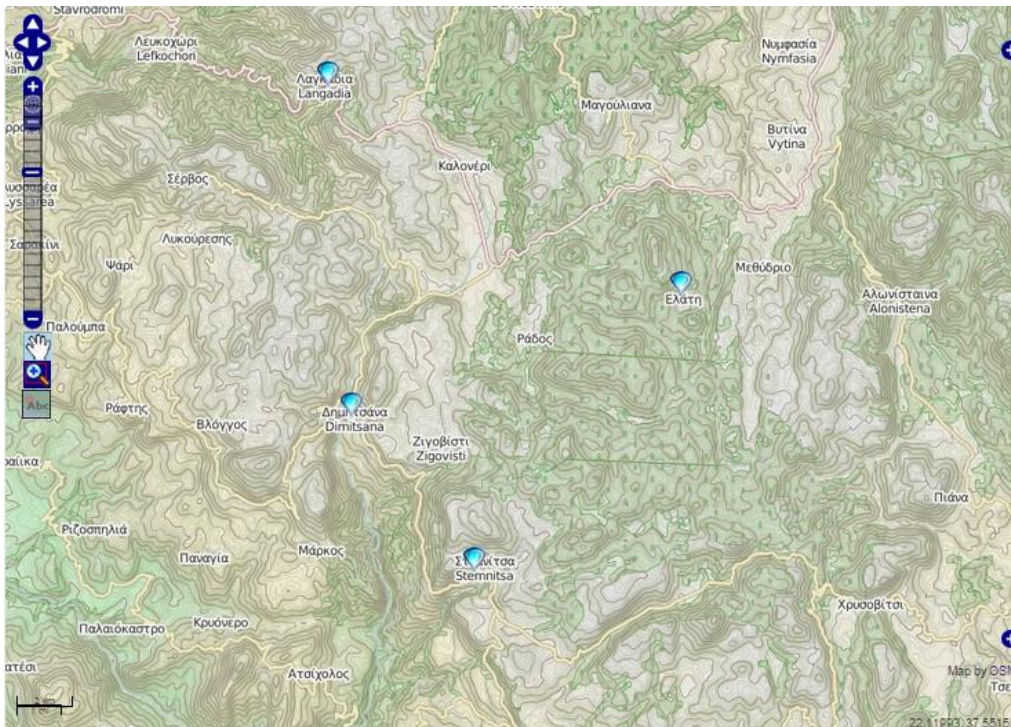
Σχήμα 2.8: Χάρτης του υδρομετρικού σταθμού στο Λατομείο Μπάκα (deucalionproject.gr)

2.3.2 Υδρομετεωρολογικά δεδομένα στην λεκάνη απορροής του Λούσιου

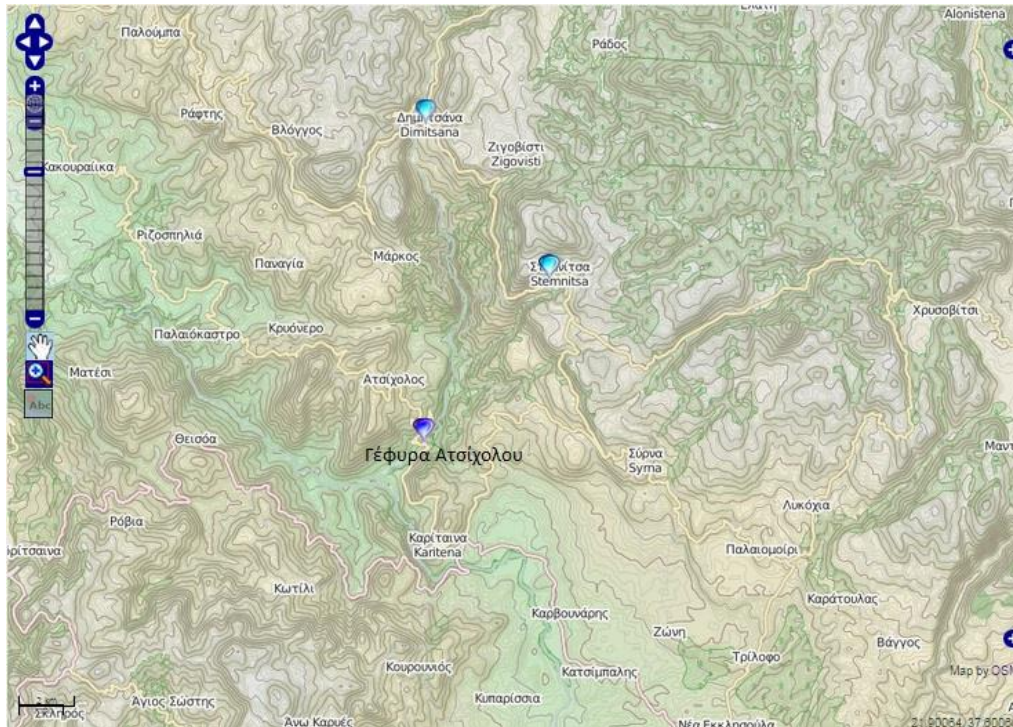
Για την μελέτη και αυτής της περιοχής τα δεδομένα συλλέχθηκαν από το δίκτυο δεδομένων «Δευκαλίων» (<http://deucalionproject.gr/>). Πιο αναλυτικά συλλέχθηκαν:

- Πρωτογενή δεδομένα βροχής (σε mm με 15-λεπτο βήμα) στο μετεωρολογικό σταθμό στην Δημητσάνα ($\varphi = 22.03902$, $\lambda = 37.59533$). Ο σταθμός λειτουργεί από τις 08/11/2012.
- Πρωτογενή δεδομένα βροχής (σε mm με 10-λεπτο βήμα) στο μετεωρολογικό σταθμό στην Ελάτη ($\varphi = 22.14833$, $\lambda = 37.62706$). Ο σταθμός λειτουργεί από την 01/09/2011.
- Πρωτογενή δεδομένα βροχής (σε mm με 10-λεπτο βήμα) στο μετεωρολογικό σταθμό στα Λαγκάδια ($\varphi = 22.03093$, $\lambda = 37.68246$). Ο σταθμός λειτουργεί από τις 27/10/2012.
- Πρωτογενή δεδομένα βροχής (σε mm με 10-λεπτο βήμα) στο μετεωρολογικό σταθμό στη Στεμνίτσα ($\varphi = 22.07978$, $\lambda = 37.55453$). Ο σταθμός λειτουργεί από τις 16/03/2012.
- Επεξεργασμένα δεδομένα παροχής (σε m^3/s με 15-λεπτο βήμα) στον υδρομετρικό σταθμό στη Γέφυρα Ατσίχολου ($\varphi = 22.03822$, $\lambda = 37.51140$). Ο σταθμός λειτουργεί από τις 30/04/2012.

Για την επεξεργασία των δεδομένων έγινε αναγωγή των πρωτογενών χρονοσειρών βροχόπτωσης και απορροής από 10-λεπτό και 15-λεπτό χρονικό βήμα σε ωριαία κλίμακα, με χρήση του λογισμικού Υδρογνώμων. Στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 2.9, Σχήμα 2.10) φαίνονται οι μετεωρολογικοί σταθμοί και ο υδρομετρικός σταθμός της λεκάνης του Λούσιου.



Σχήμα 2.9: Χάρτης μετεωρολογικών σταθμών στην Δημητσάνα, στη Στεμνίτσα, στην Ελάτη και στα Λαγκάδια (deucalionproject.gr)



Σχήμα 2.10: Χάρτης του υδρομετρικού σταθμού στη Γέφυρα Ατσίχολου (deukalionproject.gr)

2.4. Τεχνικά χαρακτηριστικά των σταθμών μέτρησης

2.4.1. Λεκάνη απορροής του Νέδοντα

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται οι μετεωρολογικοί σταθμοί και αισθητήρες στο χωριό Αλαγονία (πλήρης σταθμός, ιδιοκτησία ΔΕΥΑΚ, φιλοξενία Ξενώνας Ορεινή Φιλοξενία), στην Γέφυρα Καρβελίου (βροχόμετρο, ΕΑΑ), στο Τουριστικό Ταυγέτου (πλήρης σταθμός, ιδιοκτησία Ι. Καραμήτσου), στο χωριό Νέδουσα (πλήρης σταθμός, ιδιοκτησία Ι. Καραμήτσου, φιλοξενία στο Κοινοτικό Κατάστημα), πλησίον του υδρομετρικού σταθμού Καλαμάτας στο λατομείο Μπάκα (βροχόμετρο, ΕΑΑ) και στο Νησάκι Καλαμάτας (πλήρης σταθμός, ιδιοκτησία ΔΕΥΑΚ).

Ο μετεωρολογικός σταθμός της Νέδουσας (Εικόνα 2.11) είναι τοποθετημένος σε χαμηλό ιστό (έως 2 m) πάνω στη στέγη του κοινοτικού καταστήματος του χωριού. Η μετάδοση των δεδομένων γίνεται ανα 10 λεπτά μέσω υπολογιστή με σύνδεση κινητής τηλεφωνίας στο διαδίκτυο.



Εικόνα 2.11: Μετεωρολογικός σταθμός Νέδουσσας (Κούσης, 2012)

Ο μετεωρολογικός σταθμός στο Τουριστικό Ταϋγέτου (Εικόνα 2.12) είναι και αυτός τοποθετημένος σε χαμηλό ιστό σε στέγη οικίας. Η μετάδοση των δεδομένων του γίνεται μέσω του διαδικτύου ανά 10 λεπτά.



Εικόνα 2.12: Μετεωρολογικός σταθμός στο Τουριστικό Ταϋγέτου (Κούσης, 2012)

Ο σταθμοί της Αλαγονίας (Εικόνα 2.13) και στο Νησάκι Καλαμάτας είναι εγκατεστημένοι στο έδαφος σε ιστούς ύψους 5 m. Η μετάδοση των δεδομένων τους γίνεται με χρήση προσαρμογέα RS232- Ethernet με σύνδεση στο διαδίκτυο με χρονικό βήμα 10 λεπτών.



Εικόνα 2.13: Μετεωρολογικός σταθμός στην Αλαγονία (Κούσης, 2012)

Το βροχόμετρο της Καλαμάτας στην περιοχή του λατομείου Μπάκα (Εικόνα 2.14) είναι εγκατεστημένο σε χαμηλό ιστό έως 2 m και τα δεδομένα του συλλέγονται και καταγράφονται μαζί με αυτά του αντίστοιχου σταθμημετρικού σταθμού. Με τον ίδιο τρόπο συλλέγονται και τα δεδομένα του βροχομέτρου του Καρβελιώτη (Εικόνα 2.15), το οποίο είναι τοποθετημένο στην Γέφυρα του Καρβελίου σε ιστό 2,5 m.

Τέλος ο υδρομετρικός σταθμός του λατομείου Μπάκα (Εικόνα 2.14) είναι τοποθετημένος στον κάτω ρου του Νέδοντα, σε κατασκευασμένο επί τούτου αναβαθμό. Η στάθμη μετράται με αισθητήρες υπερήχων και η θερμοκρασία με θερμομέτρα type 107, καθώς η μετάδοση των δεδομένων γίνεται μέσω κινητής τηλεφωνίας.



Εικόνα 2.14: Σταθμημετρικός σταθμός και βροχόμετρο στην περιοχή λατομείο Μπάκα στην Καλαμάτα (Κούσης, 2012)



Εικόνα 2.15: Βροχόμετρο στην γέφυρα του Καρβελίου (Κούσης, 2012)

2.4.2. Λεκάνη απορροής του Λούσιου

Στη λεκάνη απορροής του Λούσιου ποταμού έχουμε τέσσερις μετεωρολογικού σταθμούς και συγκεκριμένα στην Δημητσάνα, στην Ελάτη, στη Στεμνίτσα και στα Λαγκάδια.

Ο μετεωρολογικός σταθμός της Στεμνίτσας (Εικόνα 2.16) έχει τοποθετηθεί δίπλα στο ΚΕΠ Τρικολώνων σε αυλή οικίας και σε ύψος σχεδόν 3 m από το έδαφος. Στο βροχόμετρο έχει εγκατασταθεί θερμαντικό στοιχείο, το οποίο λιώνει το χιόνι και διασφαλίζει την ακρίβεια των μετρήσεων.



Εικόνα 2.16: Μετεωρολογικός σταθμός στη Στεμνίτσα (Κούσης, 2012)

Ο υδρομετρικός σταθμός του Λούσιου (Εικόνα 2.17) εγκαταστάθηκε στο παλαιό γεφύρι του Ατσίχολου, που βρίσκεται περίπου 4 χλμ. ανάντη της συμβολής του Λούσιου με τον Αλφειό. Στην περιοχή του γεφυριού, η κοίτη είναι σταθερή, αποτελούμενη από κροκάλες, και η ροή γενικά ευθύγραμμη μεταξύ των βάθρων. Το ακουστικό ροόμετρο radar τοποθετήθηκε στην δυτική όχθη εντός ειδικού κλωβού προστασίας από τυχόν φερτά υλικά, ο οποίος επιτρέπει την αυξομείωση της απόστασης του αισθητήρα από τον πυθμένα καθώς και την περιστροφή του γύρω από την κατακόρυφο. Ο πιεζομετρικός αισθητήρας στάθμης τοποθετήθηκε κατάντη και δίπλα στον κλωβό, ώστε να είναι επίσης προστατευμένος από φερτά υλικά. Η μετάδοση των δεδομένων γίνεται τηλεμετρικά.



Εικόνα 2.17: Ροομετρικός σταθμός στη Γέφυρα Ατσίχολου (Κόυσης, 2012)

2.5 Μετεωρολογικές προγνώσεις

2.5.1 Αριθμητικά μοντέλα πρόγνωσης καιρού και μέθοδοι πρόγνωσης τύπου Ensemble

Τα αριθμητικά μοντέλα πρόγνωσης καιρού αξιοποιούν δεδομένα μετρήσεων σε παγκόσμια κλίμακα, επιλύουν τις διαφορικές εξισώσεις που προκύπτουν από τις φυσικές συνθήκες και τις ανάγουν σε τοπικό επίπεδο. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται εξισώσεις που διέπουν την εξέλιξη της ατμόσφαιρας, που είναι οι παρακάτω:

1. ο 2^ο νόμος του Νεύτωνα για διατήρηση της ορμής
2. ο 1^{ος} νόμος της θερμοδυναμικής για την διατήρηση της ενέργειας
3. η εξίσωση συνέχειας για την διατήρηση της μάζας
4. η εξίσωση διατήρησης της υγρασίας και
5. η καταστατική εξίσωση των αερίων

Λόγω της μη γραμμικότητας αυτών των διαφορικών εξισώσεων γίνεται αδύνατη η άμεση επίλυσή τους, καθώς μεταπίπτουν σε πολύπλοκες μερικές διαφορικές εξισώσεις. Γι' αυτό έχουν βρεθεί απλοποιημένες μέθοδοι ανάλυσης τους, με εύλογες παραδοχές, οι οποίες είναι οι εξής:

- Εύρεση ακριβούς αναλυτικής λύσης μιας απλοποιημένης μορφής των εξισώσεων.
- Δημιουργία ενός απλοποιημένου φυσικού μοντέλου για το οποίο μπορούν να επιλυθούν οι εξισώσεις. Συγκεκριμένα, η ατμόσφαιρα περιγράφεται ως ένα στρώμα ρευστού που περιβάλλει τη γη.
- Αριθμητική επίλυση των βασικών μερικών διαφορικών εξισώσεων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων σε διακριτά σημεία (grid points).

Σήμερα χρησιμοποιείται, κυρίως, η τελευταία μέθοδος, κατά την οποία η ατμόσφαιρα θεωρείται ως ένα μη συνεχές μέσο, που αποτελείται από πολλά διακριτά σημεία (grid points). Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται ένα τρισδιάστατο πλέγμα σημείων πάνω στο οποίο πραγματοποιούνται όλοι οι απαιτούμενοι υπολογισμοί. Ταυτόχρονα, γίνεται και η παραδοχή ότι ο χρόνος δεν είναι συνεχής και τα πάντα συμβαίνουν σε διακριτές χρονικές στιγμές, θεωρώντας έτσι ότι κάθε ατμοσφαιρική μεταβλητή μεταβάλλεται με τρόπο πεπερασμένο και διακριτό, τόσο χωρικά όσο και χρονικά.

Τα αριθμητικά μοντέλα πρόγνωσης καιρού, λόγω της χαοτικής φύσης της ατμόσφαιρας, δηλαδή τις μεγάλες αποκλίσεις (αριθμητική αστάθεια) σε μελλοντικές προγνώσεις που μπορούν να προκύψουν από απειροελάχιστα σφάλματα στα δεδομένα εισόδου, φτιάχνουν ένα σύνολο περιορισμών ως προς την μακροπρόθεσμη πρόγνωση της κατάστασης της ατμόσφαιρας.

Οι μέθοδοι πρόγνωσης ensemble, είναι αριθμητικές μέθοδοι πρόγνωσης του καιρού, που βασίζονται στην ανάλυση πολλαπλών προβλέψεων, που δημιουργήθηκαν με επιμέρους αριθμητικά μοντέλα πρόβλεψης καιρού, αλλάζοντας τις παραμέτρους ή τις αρχικές συνθήκες.

Έρχονται να καλύψουν τα κενά των αριθμητικών μοντέλων, αφού μπορούν να προσδιορίσουν και να ποσοτικοποιήσουν την αβεβαιότητα στην πρόγνωση του καιρού.

Σήμερα, οι μέθοδοι ensemble χρησιμοποιούνται από τα μεγαλύτερα ερευνητικά και μετεωρολογικά ινστιτούτα παγκοσμίως, αξιολογώντας και βελτιώνοντας συνεχώς την αξιοπιστία των προγνώσεων. Τα αποτελέσματα των μεθόδων αυτών εφαρμόζονται κυρίως για προγνώσεις μέσης κλίμακας (5-6 ημερών), σε συνδυασμό με τα αριθμητικά μοντέλα πρόγνωσης καιρού που χρησιμοποιούνται κατά κόρον για μικρότερη κλίμακα (2-3 ημερών). Η ευρεία χρήση των μεθόδων Ensemble έχει αποδειχθεί ότι έχει αυξήσει το διάστημα ακριβούς πρόγνωσης κατά 2 ημέρες τουλάχιστον.

2.5.2 Αριθμητικό μοντέλο WRF

Για την προσομοίωση των δυο επεισοδίων βροχής προς επεξεργασία στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιείται το αριθμητικό μοντέλο καιρού WRF. Το αριθμητικό μοντέλο WRF (Weather Research and Forecasting model), σχεδιάστηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1990 από πολλά ερευνητικά ινστιτούτα στις ΗΠΑ και είναι ένα σύγχρονο αριθμητικό μοντέλο πρόγνωσης καιρού μέσης κλίμακας με σκοπό να εξυπηρετεί τις ανάγκες τόσο του τομέα έρευνας της ατμόσφαιρας, όσο και της επιχειρησιακής πρόγνωσης καιρού (Κούσης κ.α., 2014). Το WRF χρησιμοποιείται για αυτούς τους σκοπούς και από το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών από όπου και ελήφθησαν οι προσομοιώσεις του επεισοδίου, δηλαδή οι μετεωρολογικές προγνώσεις βροχόπτωσης για τα δυο επιλεγμένα επεισόδια βροχής.

Για τις αρχικές και οριακές συνθήκες των προσομοιώσεων, χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα FNL (Final Operational Global Analyses) των Εθνικών Κέντρων Περιβαλλοντολογικής Πρόγνωσης (NCEP / National Centers for Environmental Prediction) των Η.Π.Α., τα οποία παρέχονται σε χωρική ανάλυση μίας μοίρας και χρονικού βήματος 6 ωρών. Τα δεδομένα αυτά, προέρχονται από Παγκόσμιο Σύστημα Αφομοίωσης (GDAS, Global Data Assimilation System), στο οποίο συλλέγονται διαρκώς δεδομένα παρατηρήσεων μέσω του Παγκόσμιου Τηλεπικοινωνιακού Συστήματος (GTS, Global Telecommunications System) και άλλων πηγαίων μέσων. Τα δεδομένα αναλύσεων περιλαμβάνουν όλες τις απαραίτητες μετεωρολογικές παραμέτρους για την πρόγνωση στην επιφάνεια και σε άλλα ατμοσφαιρικά επίπεδα.

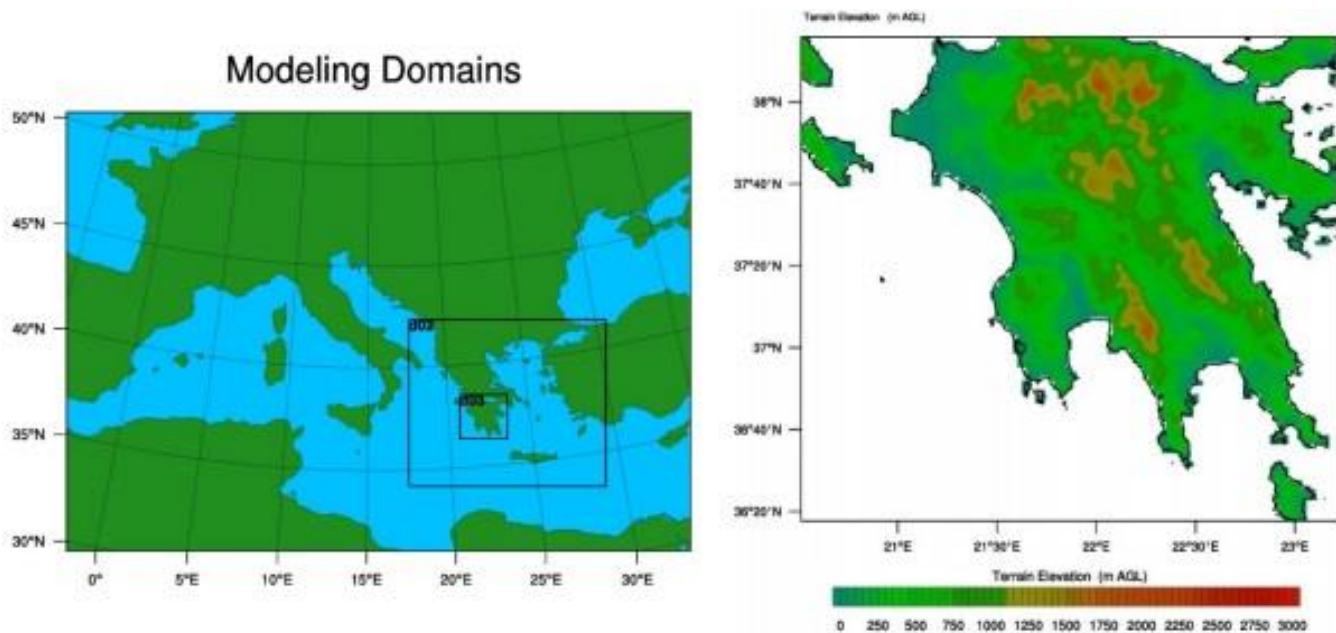
Με βάση τα δεδομένα αυτά καθορίστηκαν τρία πλέγματα με αυξανόμενη χωρική ανάλυση τα οποία επιλύθηκαν διαδοχικά για την εξαγωγή των μετεωρολογικών παραμέτρων στην περιοχή ενδιαφέροντος. Πιο αναλυτικά:

- το **πλέγμα 1** αποτελείται από 184×129 σημεία πλέγματος (σύνολο 23 736 σημεία), με οριζόντια χωρική ανάλυση 18 km. Το πλέγμα καλύπτει το μεγαλύτερο τμήμα της Ευρώπης, των ακτών της Βόρειας Αφρικής, καθώς επίσης και το μεγαλύτερο τμήμα της Μεσογείου και της Μαύρης Θάλασσας,

- το **πλέγμα 2** αποτελείται από 174×147 σημεία πλέγματος (σύνολο 25 578 σημεία), με οριζόντια χωρική ανάλυση 6 km. Το πλέγμα καλύπτει τον Ελλαδικό χώρο και τις ακτές της Δυτικής Τουρκίας,
- το **πλέγμα 3** αποτελείται από 120×108 σημεία πλέγματος (σύνολο 12 960 σημεία), με οριζόντια χωρική ανάλυση 2 km, και καλύπτει το μεγαλύτερο τμήμα της Πελοποννήσου, καθώς επίσης οριακά τα νησιά των Κυθήρων και της Ζακύνθου.

Οι θέσεις των τριών πλεγμάτων παρουσιάζονται στην Σχήμα 2.18(α), ενώ ολόκληρο το πλέγμα καθώς επίσης και η τοπογραφία του, όπως υπολογίζεται από το μοντέλο εμφανίζονται στην Σχήμα 2.18(β).

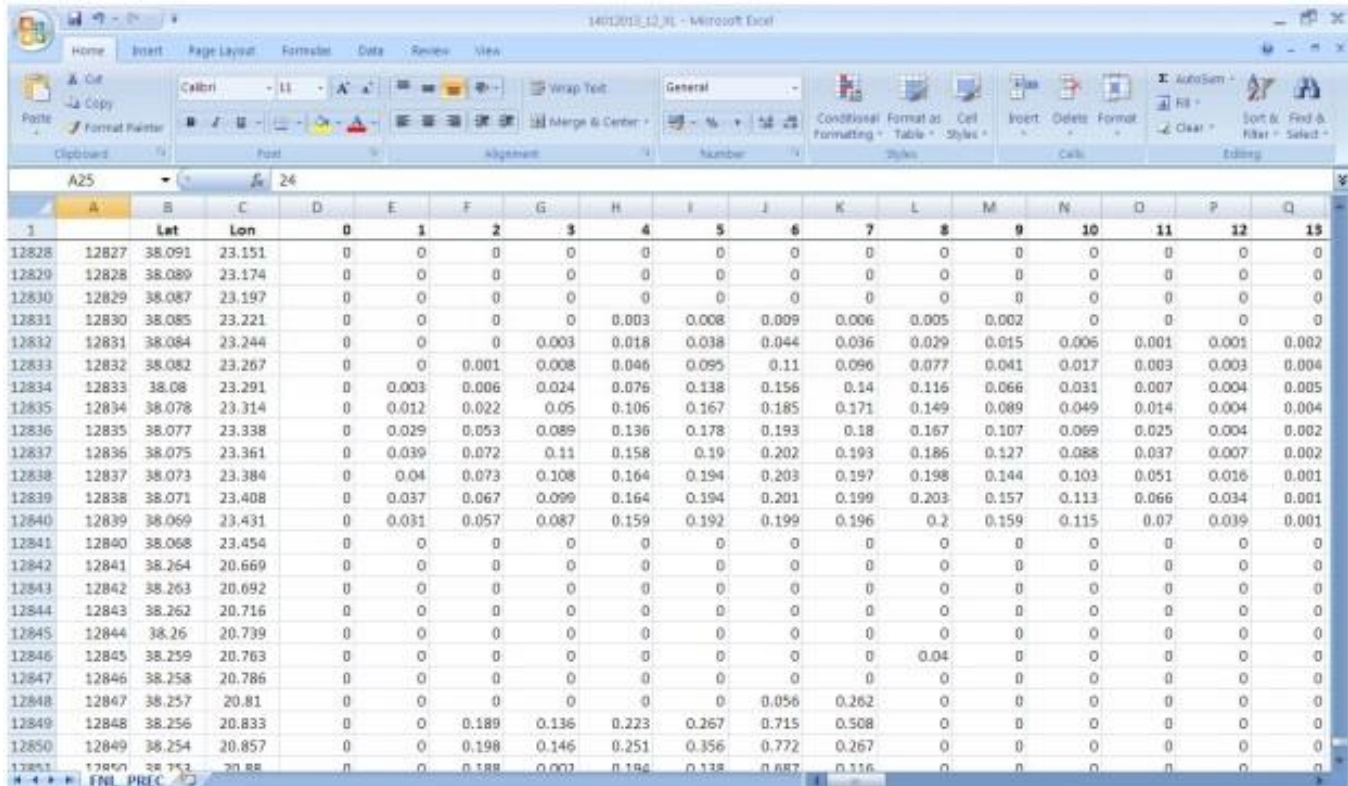
Για τα δυο επεισόδια βροχής που επιλέχθηκαν προς επεξεργασία, για να εισαχθούν έπειτα στο υδρολογικό μοντέλο, παρήχθησαν πολλαπλά σενάρια πρόγνωσης με μια διαδικασία ensemble πρόγνωσης, στην οποία χρησιμοποιούνται διαφορετικές αρχικές συνθήκες για κάθε σενάριο. Στην παρούσα εργασία οι αρχικές συνθήκες διαφέρουν ως προς την χρονική απόσταση από το παρατηρημένο επεισόδιο καταιγίδας, καθώς το κάθε σενάριο έχει διαφορετικό χρόνο έναρξης (προσομοίωση ανά 6 ώρες) και ίδιο χρόνο λήξης (άρα διαφορετική διάρκεια). Τα ωριαία σενάρια πρόγνωσης της βροχόπτωσης, ύστερα από την επεξεργασία τους με σημειακή και επιφανειακή ανάλυση, αποτέλεσαν είσοδο των υδρολογικών μοντέλων των δυο υπό μελέτη λεκανών.



Σχήμα 2.18: (α) Απεικόνιση των επιλεγμένων τριών πλεγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για τις διαδοχικές προσομοιώσεις του επεισοδίου ισχυρής βροχόπτωσης στην Πελοπόννησο από το αριθμητικό μοντέλο καιρού WRF, (β) το ενδότερο εσωτερικό πλέγμα 3, με την τοπογραφία της περιοχής, όπως υπολογίζεται από το μοντέλο WRF.

Διερεύνηση σεναρίων υδρομετεωρολογικής πρόγνωσης στην περιοχή της Πελοποννήσου

Για την αναλυτική παρουσίαση των ωριαίων υψών βροχόπτωσης, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης επεξεργάστηκαν εκ νέου, δίνοντας πληροφορίες για κάθε σημείο του ενδότερου πλέγματος 3. Έτσι λοιπόν, για κάθε προσομοίωση δημιουργείται ένα αρχείο σε μορφή .txt, ώστε να μπορεί να επεξεργαστεί εύκολα από οποιοδήποτε λογισμικό ή πρόγραμμα επεξεργασίας δεδομένων, το οποίο αποτελείται από 12 960 γραμμές (120×108 σημεία του πλέγματος 3) και n στήλες, όπου n ο αριθμός των ωρών από την πρώτη ώρα της προσομοίωσης έως την τελευταία. Ένα παράδειγμα παρουσίασης των αποτελεσμάτων δίνεται στην Σχήμα 2.19.



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	Lat	Lon	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
12828	12827	38.091	23.151	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12829	12828	38.089	23.174	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12830	12829	38.087	23.197	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12831	12830	38.085	23.221	0	0	0	0	0.003	0.008	0.009	0.006	0.005	0.002	0	0	0	0
12832	12831	38.084	23.244	0	0	0	0.003	0.018	0.038	0.044	0.036	0.029	0.015	0.006	0.001	0.001	0.002
12833	12832	38.082	23.267	0	0	0.001	0.008	0.046	0.095	0.11	0.096	0.077	0.041	0.017	0.003	0.003	0.004
12834	12833	38.08	23.291	0	0.003	0.006	0.024	0.076	0.138	0.156	0.14	0.116	0.066	0.031	0.007	0.004	0.005
12835	12834	38.078	23.314	0	0.012	0.022	0.05	0.106	0.167	0.185	0.171	0.149	0.089	0.049	0.014	0.004	0.004
12836	12835	38.077	23.338	0	0.029	0.053	0.089	0.136	0.178	0.193	0.18	0.167	0.107	0.069	0.025	0.004	0.002
12837	12836	38.075	23.361	0	0.039	0.072	0.11	0.158	0.19	0.202	0.193	0.186	0.127	0.088	0.037	0.007	0.002
12838	12837	38.073	23.384	0	0.04	0.073	0.108	0.164	0.194	0.203	0.197	0.198	0.144	0.103	0.051	0.016	0.001
12839	12838	38.071	23.408	0	0.037	0.067	0.099	0.164	0.194	0.201	0.199	0.203	0.157	0.113	0.066	0.034	0.001
12840	12839	38.069	23.431	0	0.031	0.057	0.087	0.159	0.192	0.199	0.196	0.2	0.159	0.115	0.07	0.039	0.001
12841	12840	38.068	23.454	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12842	12841	38.264	20.669	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12843	12842	38.263	20.692	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12844	12843	38.262	20.716	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12845	12844	38.26	20.739	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12846	12845	38.259	20.763	0	0	0	0	0	0	0	0	0.04	0	0	0	0	0
12847	12846	38.258	20.786	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12848	12847	38.257	20.81	0	0	0	0	0	0	0.056	0.262	0	0	0	0	0	0
12849	12848	38.256	20.833	0	0	0.189	0.136	0.223	0.267	0.715	0.508	0	0	0	0	0	0
12850	12849	38.254	20.857	0	0	0.198	0.146	0.251	0.356	0.772	0.267	0	0	0	0	0	0
12851	12850	38.253	20.88	0	0	0.188	0.001	0.194	0.138	0.687	0.116	0	0	0	0	0	0

Σχήμα 2.19: Αρχείο ωριαίων προγνώσεων βροχής για κάθε σημείο πλέγματος. Συγκεκριμένα στην πρώτη στήλη (A), εμφανίζεται ο αύξων αριθμός των σημείων του πλέγματος 3, στις επόμενες δύο στήλες το γεωγραφικό πλάτος και μήκος (B, C) της περιοχής μελέτης και από την τέταρτη στήλη και δεξιότερα το ωριαίο ύψος βροχής

Κεφάλαιο 3: Ανάλυση μετεωρολογικών προγνώσεων

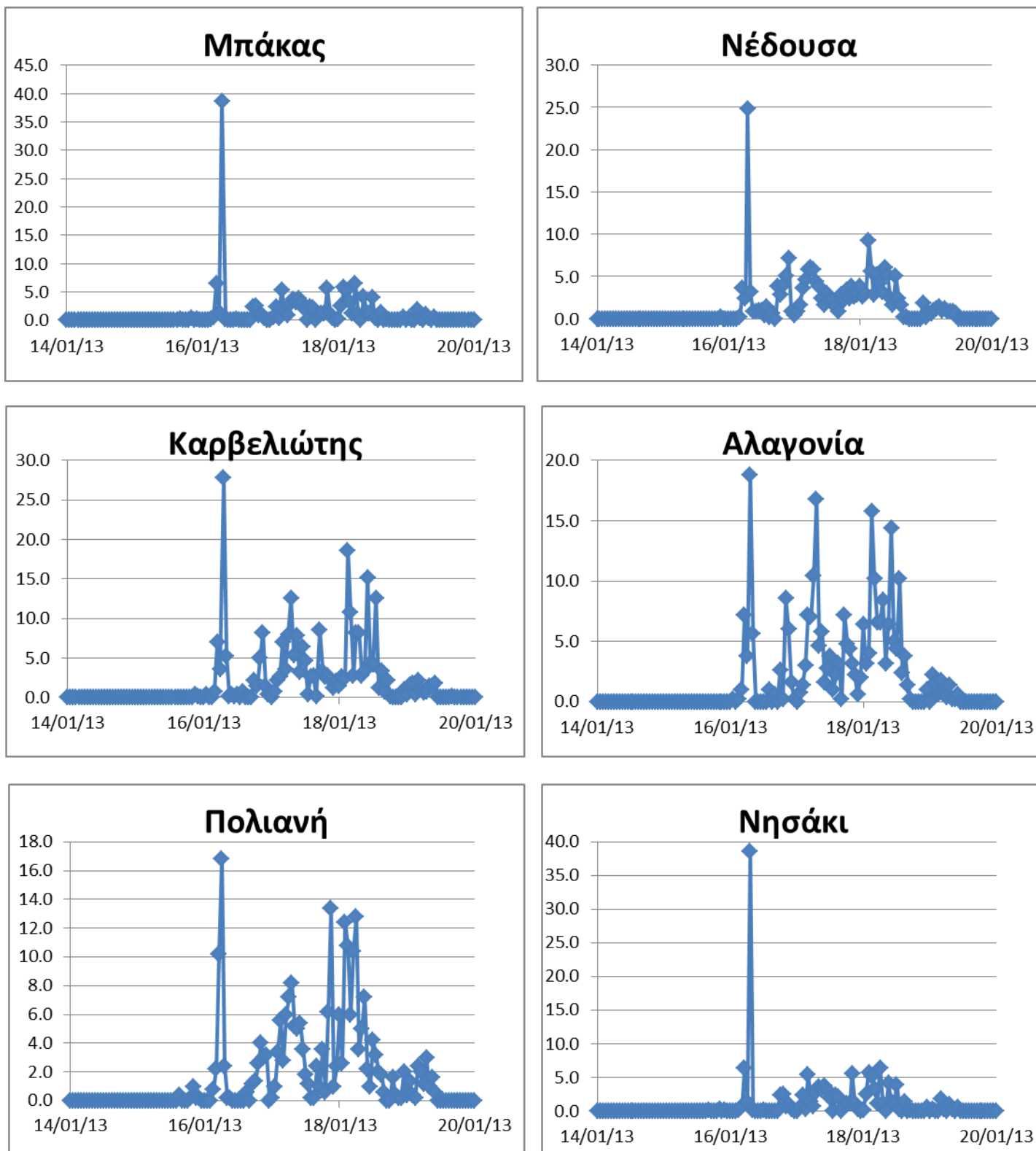
3.1. Περιγραφή επεισοδίων βροχής

Για την παρούσα εργασία επιλέχθηκαν δυο επεισόδια καταιγίδων και παράχθηκαν οι μετεωρολογικές τους προγνώσεις από το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών. Από τα καταγεγραμμένα γεγονότα βροχής που είναι καταχωρημένα στο Δίκτυο Δεδομένων ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ επιλέχθηκαν τα δυο σημαντικότερα από αυτά, για τα οποία υπάρχουν επαρκή δεδομένα για όλους τους βροχομετρικούς σταθμούς των δύο λεκανών. Ως «σημαντικό γεγονός» ορίστηκε το επεισόδιο βροχής που έχει αθροιστικό ημερήσιο ύψος βροχόπτωσης μεγαλύτερο από 50 mm. Με αυτόν τον τρόπο τελικά επιλέχθηκαν:

- Το επεισόδιο βροχής 170113, που ξεκινά στις 14/1/2013 και λήγει στις 20/1/2013
- Το επεισόδιο βροχής 131113, που ξεκινά στις 9/11/13 και λήγει στις 15/11/2013

3.1.1. Λεκάνη Νέδοντα

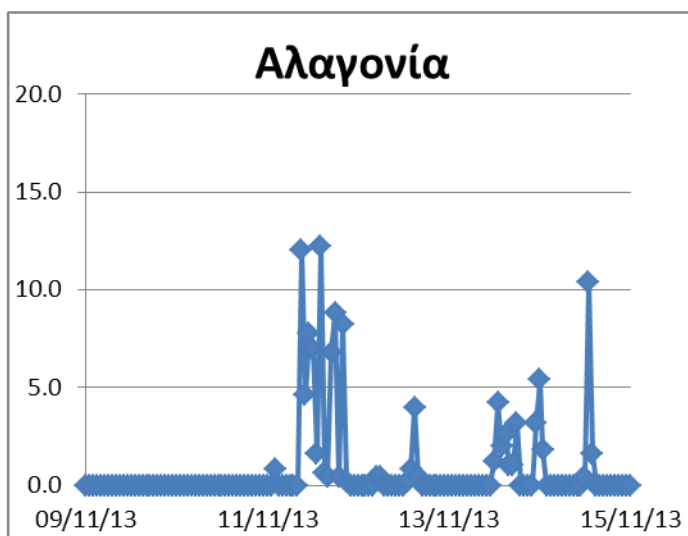
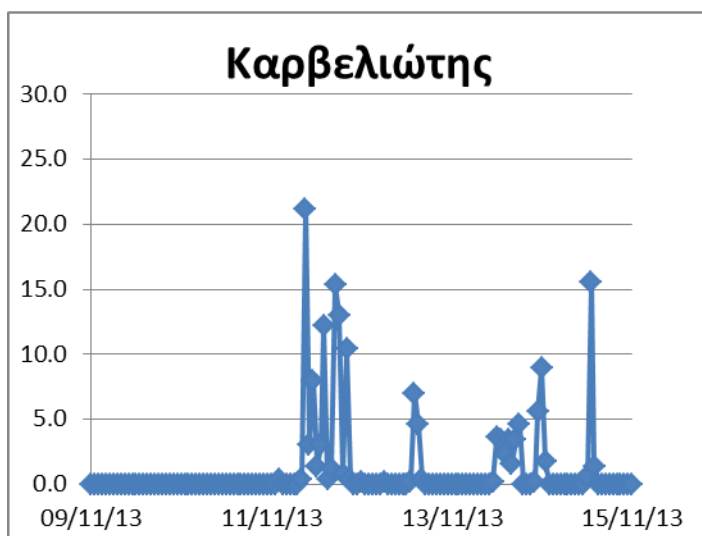
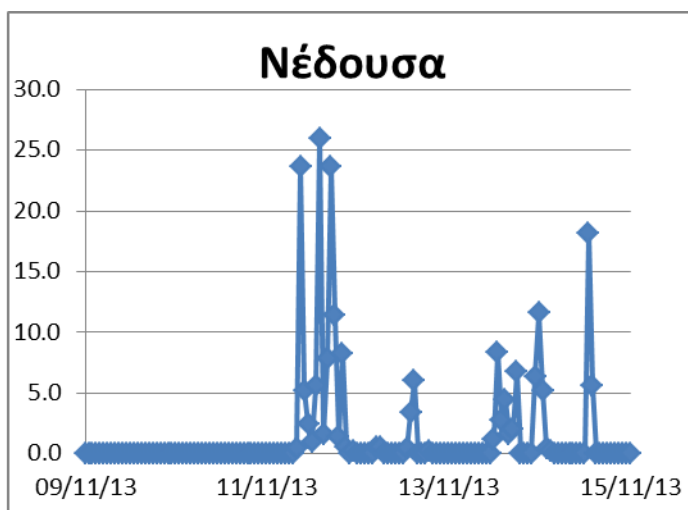
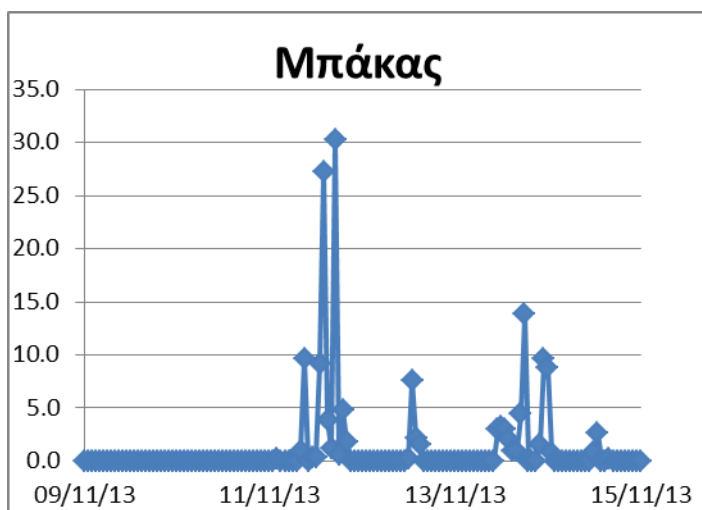
Στη λεκάνη του Νέδοντα έχουμε 7 βροχομετρικούς σταθμούς και στα παρακάτω διαγράμματα (Σχήμα 3.1 και Σχήμα 3.2) φαίνονται τα ύψη βροχόπτωσης των δυο επεισοδίων για κάθε σταθμό. Τα διάγραμματα από τον βροχομετρικό σταθμό του Ταυγέτου δεν παρουσιάζονται καθώς τα δεδομένα του σταθμού δεν είναι αξιόπιστα (λόγω πλημμελούς λειτουργίας του οργάνου), καθώς και λόγω της μη καταγραφής του δεύτερου επεισοδίου βροχής.

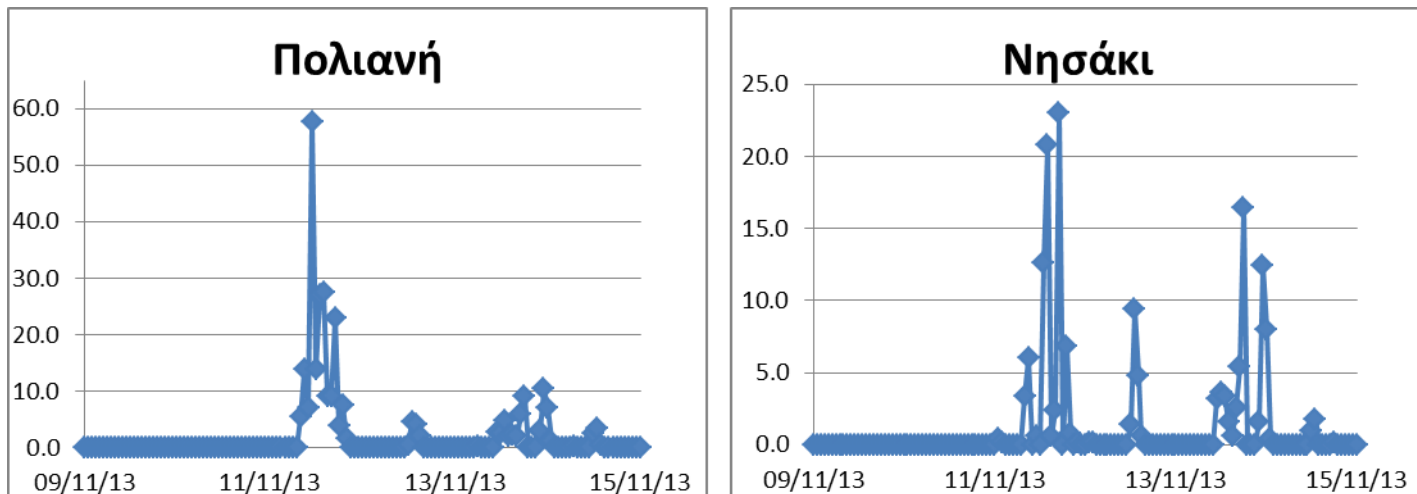


Σχήμα 3.1: Διαγράμματα υψών βροχόπτωσης στους βροχομετρικούς σταθμούς της λεκάνης του Νέδοντα για το επεισόδιο βροχής 170113

Η μέγιστη ημερήσια αθροιστική βροχόπτωση για το επεισόδιο 170113 παρατηρείται στο βροχομετρικό σταθμό της Αλαγονίας και ίσους με 136.8 mm. Στην ωριαία κλίμακα, το μέγιστο ύψος βροχής καταγράφηκε στον σταθμό Νησάκι (βρίσκεται στην πόλη της Καλαμάτας, εκτός της λεκάνης αλλά αρκετά κοντά στον κατάντη σταθμό Λατομείο Μπάκα), με ύψος 38.6 mm στις 16/01/2013 και περίπου στις 07:00 το πρωί. Σημειώνεται ότι για το επεισόδιο αυτό, τα δεδομένα στον σταθμό του Μπάκα λαμβάνονται από το Νησάκι, καθώς η καταγραφή στον Μπάκα είχε διακοπεί για τεχνικούς λόγους.

Στο δεύτερο επεισόδιο βροχής 131113, η μέγιστη ημερήσια αθροιστική βροχόπτωση παρατηρείται στον σταθμό της Νέδουσας και έχει ύψος 120.2 mm. Η μέγιστη ωριαία καταγραφή βροχής έγινε στις 11/11/2013 και ώρα 11:00 το πρωί στον σταθμό της Πολιανής.

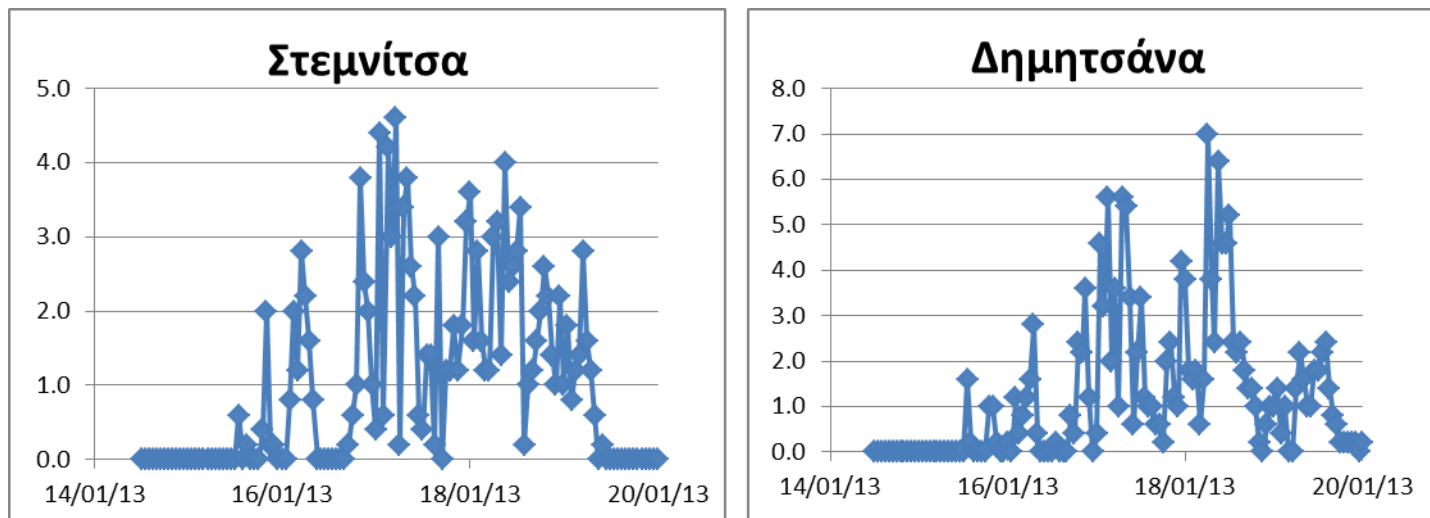


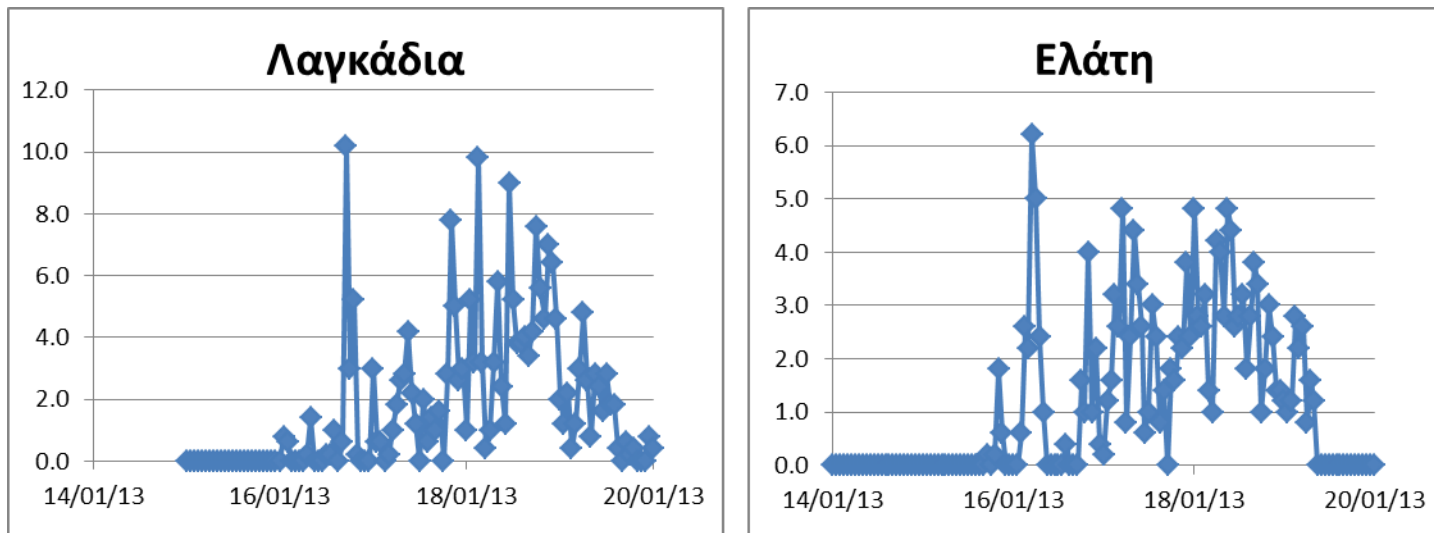


Σχήμα 3.2: Διαγράμματα υψών βροχόπτωσης στους βροχομετρικούς σταθμούς της λεκάνης του Νέδοντα για το επεισόδιο βροχής 131113

3.1.2. Λεκάνη Λούσιου

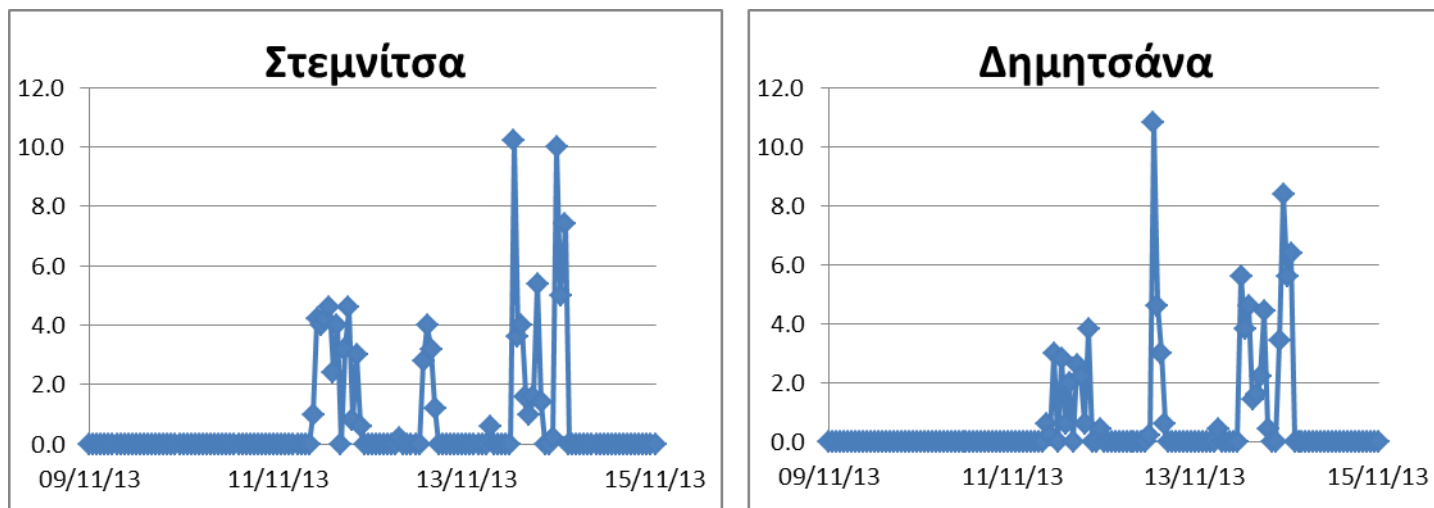
Στη λεκάνη του Λούσιου έχουμε 4 βροχομετρικούς σταθμούς και στα παρακάτω διαγράμματα (Σχήμα 3.3 και Σχήμα 3.4.) φαίνονται τα ύψη βροχόπτωσης των δυο επεισοδίων για κάθε σταθμό.

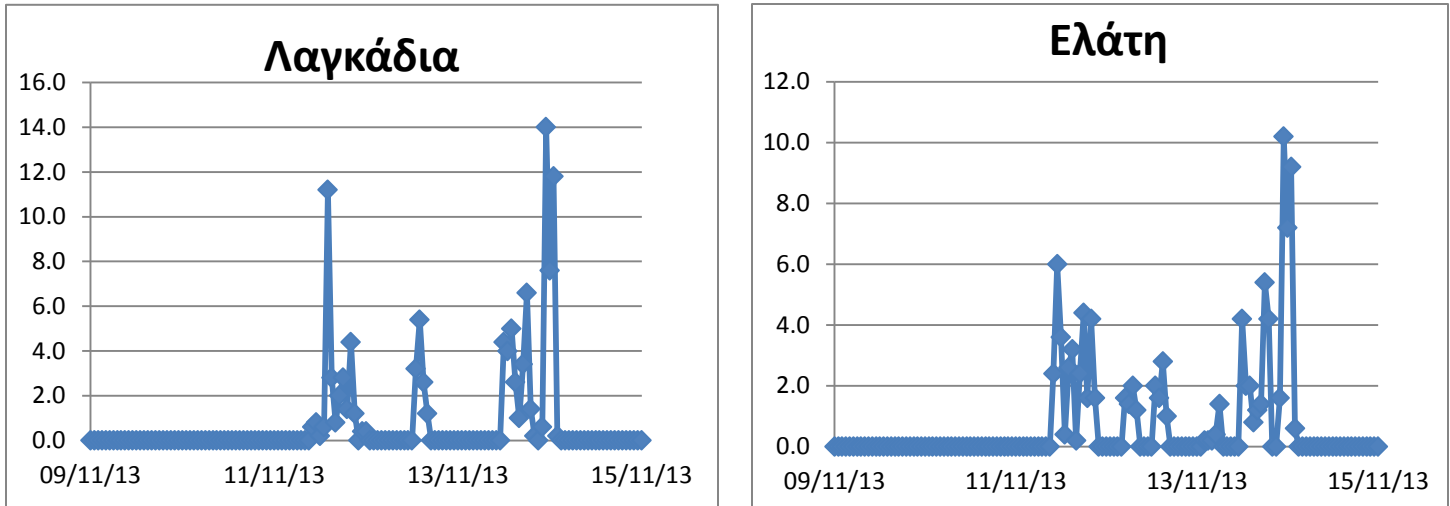




Σχήμα 3.3: Διαγράμματα υψών βροχόπτωσης στους βροχομετρικούς σταθμούς της λεκάνης του Λούσιου για το επεισόδιο βροχής 170113

Στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε για το πρώτο επεισόδιο βροχής ότι η μέγιστη ημερήσια αθροιστική βροχόπτωση μετρήθηκε στον σταθμό στα Λαγκάδια και το ύψος της ήταν 106.8 mm. Η μέγιστη καταμέτρηση βροχής συνέβει στις 16/1/2013 στις 05:00 το πρωί και πάλι στο σταθμό στα Λαγκάδια και είχε ύψος 10.2 mm.





Σχήμα 3.4: Διαγράμματα υψών βροχόπτωσης στους βροχομετρικούς σταθμούς της λεκάνης του Λούσιου για το επεισόδιο βροχής 091113

Από τα παραπάνω διαγράμματα συμπεραίνουμε ότι για το επεισόδιο βροχής 131113, η μέγιστη ημερήσια αθροιστική βροχόπτωση παρατηρήθηκε στην Ελάτη και το ύψος της ήταν 52.2 mm. Η μέγιστη καταμέτρηση βροχής συνέβει στις 13/11/2013 στις 23:00 το βράδυ στο σταθμό στα Λαγκάδια και είχε ύψος 14.0 mm.

3.2. Σημειακή ανάλυση των προγνώσεων βροχόπτωσης με βάση τους μετεωρολογικούς σταθμούς

3.2.1. Εισαγωγή

Οι μετεωρολογικές προγνώσεις που μας παρέχει το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών αφορούν διακριτά σημεία (grid points) σε όλη την περιοχή της Πελοποννήσου, με ωριαία πρόγνωση της βροχόπτωσης. Πιο συγκεκριμένα:

- Για το πρώτο επεισόδιο οι προγνώσεις ξεκινούν στις 14/1/13 1200 UTC και λήγουν στις 20/1/13 0000 UTC.
- Για το δεύτερο επεισόδιο ξεκινούν στις 9/1/13 0000 UTC και λήγουν στις 15/11/13 0000 UTC.

Τα σενάρια πρόγνωσης διατίθενται με ένα χρονικό βήμα έξι ωρών στο χρονικό πλαίσιο που καταγράφηκε παραπάνω και συμβολίζονται ανάλογα με το χρόνο έναρξής τους ως εξής:

Επεισόδιο βροχής 170113

1. 140113_12 για την πρόγνωση που ξεκινά στις 14/1/13 1200 UTC
2. 140113_18 για την πρόγνωση που ξεκινά στις 14/1/13 1800 UTC

3. 150113_00 για την πρόγνωση που ξεκινά στις 15/1/13 0000 UTC
4. 150113_06 για την πρόγνωση που ξεκινά στις 15/1/13 0060 UTC
5. 150113_12 για την πρόγνωση που ξεκινά στις 15/1/13 1200 UTC
6. 150113_18 για την πρόγνωση που ξεκινά στις 15/1/13 1800 UTC
7. 160113_00 για την πρόγνωση που ξεκινά στις 16/1/13 0000 UTC
8. 160113_06 για την πρόγνωση που ξεκινά στις 16/1/13 0060 UTC
9. 160113_12 για την πρόγνωση που ξεκινά στις 16/1/13 1200 UTC
10. 160113_18 για την πρόγνωση που ξεκινά στις 16/1/13 1800 UTC
11. 170113_00 για την πρόγνωση που ξεκινά στις 17/1/13 0000 UTC
12. 170113_06 για την πρόγνωση που ξεκινά στις 17/1/13 0060 UTC
13. 170113_12 για την πρόγνωση που ξεκινά στις 17/1/13 1200 UTC

Επεισόδιο βροχής 131113

1. 091113_00 για την πρόγνωση που ξεκινά στις 9/11/13 0000 UTC
2. 091113_06 για την πρόγνωση που ξεκινά στις 9/11/13 0060 UTC
3. 091113_12 για την πρόγνωση που ξεκινά στις 9/11/13 1200 UTC
4. 091113_18 για την πρόγνωση που ξεκινά στις 9/11/13 1800 UTC
5. 101113_00 για την πρόγνωση που ξεκινά στις 10/11/13 0000 UTC
6. 101113_06 για την πρόγνωση που ξεκινά στις 10/11/13 0060 UTC
7. 101113_12 για την πρόγνωση που ξεκινά στις 10/11/13 1200 UTC
8. 101113_18 για την πρόγνωση που ξεκινά στις 10/11/13 1800 UTC
9. 111113_00 για την πρόγνωση που ξεκινά στις 11/11/13 0000 UTC
10. 111113_06 για την πρόγνωση που ξεκινά στις 11/11/13 0060 UTC
11. 111113_12 για την πρόγνωση που ξεκινά στις 11/11/13 1200 UTC
12. 111113_18 για την πρόγνωση που ξεκινά στις 11/11/13 1800 UTC
13. 121113_00 για την πρόγνωση που ξεκινά στις 12/11/13 0000 UTC
14. 121113_06 για την πρόγνωση που ξεκινά στις 12/11/13 0060 UTC
15. 121113_12 για την πρόγνωση που ξεκινά στις 12/11/13 1200 UTC
16. 121113_18 για την πρόγνωση που ξεκινά στις 12/11/13 1800 UTC
17. 131113_00 για την πρόγνωση που ξεκινά στις 13/11/13 0000 UTC

Επίσης, για κάθε λεκάνη απορροής διαθέτουμε τις παρατηρημένες χρονοσειρές βροχόπτωσης για τα παραπάνω χρονικά διαστήματα. Στη λεκάνη του Νέδοντα δεν χρησιμοποιούμε τα δεδομένα από τους μετεωρολογικούς σταθμούς Αρφαρά (εκτός λεκάνης) και Τουριστικό Ταυγέτου (για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω), ενώ στην λεκάνη του Λούσιου χρησιμοποιούμε όλους τους μετεωρολογικούς σταθμούς.

3.2.2. Ανάλυση με βελτιστοποίηση της συμμετοχής των γειτονικών διακριτών σημείων

Οπώς είναι λογικό, οι κόμβοι του υπολογιστικού πλέγματος (grid points) δεν συμπίπτουν με τους μετεωρολογικούς σταθμούς. Για να μπορέσουμε λοιπόν να κάνουμε την ανάλυσή μας λαμβάνουμε τα τέσσερα γειτονικά σημεία κάθε σταθμού. Στους Πίνακες 3.1 και 3.2 φαίνονται συγκεντρωτικά οι συντεταγμένες των τεσσάρων γειτονικών σημείων κάθε μετεωρολογικού σταθμού σε σύστημα αναφοράς WGS84.

Πίνακας 3.1: Οι συντεταγμένες των τεσσάρων γειτονικών σημείων των μετεωρολογικών σταθμών στη λεκάνη του Νέδοντα

id	Αλαγονία		Καρβελιώτης		Μπάκας	
	φ	λ	φ	λ	φ	λ
1	37.119	22.223	37.082	22.219	37.07	22.125
2	37.117	22.246	37.08	22.242	37.068	22.148
3	37.1	22.221	37.064	22.217	37.051	22.123
4	37.099	22.244	37.062	22.24	37.05	22.146

id	Νέδουσα		Νησάκι		Πολιανή	
	φ	λ	φ	λ	φ	λ
1	37.155	22.227	37.034	22.098	37.162	22.135
2	37.154	22.25	37.033	22.121	37.16	22.158
3	37.137	22.225	37.016	22.096	37.143	22.133
4	37.136	22.248	37.015	22.119	37.142	22.156

Πίνακας 3.2: Οι συντεταγμένες των τεσσάρων γειτονικών σημείων των μετεωρολογικών σταθμών στη λεκάνη του Λούσιου

id	Δημητσάνα		Ελάτη		Λαγκάδια		Στεμνίτσα	
	φ	λ	φ	λ	φ	λ	φ	λ
1	37.613	22.018	37.642	22.138	37.687	22.025	37.573	22.06
2	37.612	22.041	37.641	22.161	37.685	22.049	37.572	22.084
3	37.595	22.016	37.624	22.136	37.668	22.023	37.555	22.059
4	37.593	22.039	37.623	22.159	37.667	22.047	37.554	22.082

Οι προγνώσεις βροχόπτωσης στους μετεωρολογικούς σταθμούς εκτιμώνται με βελτιστοποίηση της συμμετοχής των γειτονικών κόμβων κάθε σταθμού στην εκτιμώμενη πρόγνωση. Η βελτιστοποίηση γίνεται με κριτήριο την ελαχιστοποίηση του αθροίσματος του μέσου

τετραγωνικού σφάλματος των 13 προσομοιώσεων για το πρώτο επεισόδιο βροχής (170113) και των 17 προσομοιώσεων για το δεύτερο επεισόδιο βροχής (130113). Η διαδικασία γίνεται με τη χρήση του Microsoft Excel Solver και προκύπτουν οι κατάλληλοι συντελεστές ανά σημείο που θα βελτιώσουν τις προγνώσεις όλων των προσομοιώσεων. Οι συντελεστές ανά σημείο για τους σταθμούς και στις δυο υπό μελέτη λεκάνες απορροής φαίνονται στους Πίνακες 3.3 έως 3.6.

Πίνακας 3.3: Οι συντελεστές που προέκυψαν από την διαδικασία της βελτιστοποίησης για το επεισόδιο 170113 στη λεκάνη του Νέδοντα

Συντελεστές βάρους ανα κόμβο i			
i	Αλαγονία	Καρβελιώτης	Μπάκας
1	0.086	0.428	0.000
2	0.249	0.572	0.000
3	0.000	0.000	0.420
4	0.665	0.000	0.580

Συντελεστές βάρους ανα κόμβο i			
i	Νησάκι	Πολιανή	Νέδουσα
1	0.000	0.742	0.011
2	0.000	0.258	0.000
3	0.514	0.000	0.000
4	0.486	0.000	0.989

Πίνακας 3.4: Οι συντελεστές που προέκυψαν από την διαδικασία της βελτιστοποίησης για το επεισόδιο 131113 στη λεκάνη του Νέδοντα

Συντελεστές βάρους ανα κόμβο i			
i	Αλαγονία	Καρβελιώτης	Μπάκας
1	1.000	1.000	0.822
2	0.000	0.000	0.000
3	0.000	0.000	0.177
4	0.000	0.000	0.000

Συντελεστές βάρους ανα κόμβο i			
i	Νησάκι	Πολιανή	Νέδουσα
1	0.000	1.000	1.000
2	0.000	0.000	0.000
3	1.000	0.000	0.000
4	0.000	0.000	0.000

Συντελεστές w ανα σημείο i				
i	Δημητσάνα	Ελάτη	Λαγκάδια	Στεμνίτσα
1	0.083	1.000	0.000	0.000
2	0.917	0.000	1.000	0.000
3	0.000	0.000	0.000	1.000
4	0.000	0.000	0.000	0.000

Πίνακας 3.5: Οι συντελεστές που προέκυψαν από την διαδικασία της βελτιστοποίησης για το επεισόδιο 170113 στη λεκάνη του Λούσιου

Συντελεστές βάρους ανα κόμβο i				
i	Δημητσάνα	Ελάτη	Λαγκάδια	Στεμνίτσα
1	0.000	1.000	0.000	0.000
2	0.000	0.000	0.552	0.000
3	1.000	0.000	0.000	1.000
4	0.000	0.000	0.448	0.000

Πίνακας 3.6: Οι συντελεστές που προέκυψαν από την διαδικασία της βελτιστοποίησης για το επεισόδιο 131113 στη λεκάνη του Λούσιου

Τα διαγράμματα εξέλιξης της πρόγνωσης για όλους τους μετεωρολογικούς σταθμούς για τις λεκάνες απορροής του Νέδοντα και του Λούσιου παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α.

Από τους παραπάνω πίνακες μπορούμε να σχολιάσουμε ότι η συμμετοχή των γειτονικών διακριτών γειτονικών σημείων δεν είναι ιδιαίτερα ισοκατανομημένη και αυτό τόσο οφείλεται στις διαφορετικές αποστάσεις τους από τον εκάστοτε σταθμό όσο και στις πιθανές τοπογραφικές ανωμαλίες στα εδάφη ενδιάμεσως των διακριτών σημείων και των σταθμών. Για το λόγο αυτό δεν τοποθετήθηκαν περιορισμοί στους συντελεστές, και τα όρια τους κυμάνθηκαν ανεξαιρέτως από 0 έως 1.

3.2.3. Συμπεράσματα σημειακών αναλύσεων στη λεκάνη του Νέδοντα

Αλαγονία

Η ωριαία αιχμή του επεισοδίου 170113 παρατηρείται στις 17/1/13 στις 07:00 το πρωί και έχει ύψος 16.8 mm. Οι δυο καλύτερες προγνώσεις είναι οι 140113_18 και 150113_00, οι αιχμές των οποίων είναι 13.5 mm και 12.4 mm, αντίστοιχα. Οι αιχμές των προγνώσεων έχουν μια χρονική υστέρηση 17 ωρών αφού παρατηρούνται στις 18/1/13 στη 01:00 και για τις δυο προγνώσεις. Γενικά οι προγνώσεις προσεγγίζουν ικανοποιητικά την παρατηρημένη βροχόπτωση αφού ακολουθούν τους ανοδικούς και καθοδικούς κλάδους της, ενώ οι όγκοι νερού είναι περίπου ίδιοι. Πρέπει να τονιστεί ότι σε όλες τις προγνώσεις έχουμε υποεκτίμηση των αιχμών.

Η ωριαία αιχμή του επεισοδίου 131113 παρατηρείται στις 11/11/13 στις 14:00 το μεσημέρι και το ύψος της είναι 12.2 mm. Η γενική εικόνα για αυτό το επεισόδιο είναι καλύτερη, αφού κάποιες προγνώσεις υπερεκτιμούν την αιχμή. Πιο συγκεκριμένη, η καλύτερη πρόγνωση είναι η 101113_12 όπου η αιχμή της υπολογίστηκε στα 18.9 mm στις 14/11/2013 στις 14:00, δηλαδή με υστέρηση τριών ημερών από την παρατηρημένη. Οι προγνώσεις 091113_06, 091113_12, 101113_12, 101113_18, 111113_00 και 111113_18 υπερεκτιμούν την αιχμή της βροχόπτωσης, αν και με αρκετά μεγάλη χρονική υστέρηση.

Καρβελιώτης

Η αιχμή του επεισοδίου 170113 παρατηρείται στις 18/1/13 στις 03:00 και έχει ύψος 18.6 mm. Η καλύτερη πρόγνωση είναι η 140113_18 με την αιχμή της να είναι 12.6 mm, στις 18/1/13 στη 01:00, δηλαδή δύο ώρες νωρίτερα από την παρατηρημένη αιχμή. Γενικά, η αιχμή υποεκτιμάται από όλες τις προγνώσεις, με άλλες ικανοποιητικές προσεγγίσεις να γίνονται στις προγνώσεις 150113_18, 160113_12, 160113_18 και 170113_00.

Η αιχμή του επεισοδίου 131113 παρατηρείται στις 11/11/13 στις 09:00 το πρωί και έχει ύψος 21.2 mm. Η παρατηρημένη αιχμή υπερεκτιμάται μόνο από την πρόγνωση 101113_12 και έχει ύψος 22.6 mm. Από τα δεδομένα προκύπτει ότι πραγματοποιήθηκε στις 14/11/13 στις 14:00, με χρονική υστέρηση 3 ημερών και 5 ωρών. Όλες οι άλλες προγνώσεις υποεκτιμούν την παρατηρημένη αιχμή, με τις προγνώσεις 091113_12, 101113_12, 101113_18 και 111113_00 να θεωρούνται ικανοποιητικές προσεγγίσεις.

Λατομείο Μπάκα

Η αιχμή του επεισοδίου 170113 παρατηρείται στις 16/1/13 στις 07:00 το πρωί, με ύψος 38.6 mm και με τα υπόλοιπα ύψη του επεισοδίου να κυμαίνονται στα 5 mm. Εδώ πρέπει να τονιστεί ότι η παρατηρημένη χρονοσειρά της βροχόπτωσης στον συγκεκριμένο σταθμό για αυτό το επεισόδιο βροχής έχει προκύψει ύστερα από αναγωγή στις παρατηρήσεις του σταθμού Καλαμάτα- Νησάκι καθώς υπήρξε πρόβλημα με το βροχογράφο του σταθμού και δεν είχαν καταγραφεί οι μετρήσεις για αυτό το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Η καλύτερη πρόγνωση είναι η 160113_06 με την αιχμή της να υπολογίζεται στα 10.2 mm στις 17/1/13 στις 23:00, δηλαδή με χρονική υστέρηση μιας ημέρας και 16 ωρών. Όλες οι προγνώσεις υποεκτιμούν την αιχμή, αν και οι όλες εκτός από τις πέντε τελευταίες ακολουθούν τους ανοδικούς και καθοδικούς κλάδους της παρατηρημένης

χρονοσειράς. Τέλος, οι τελευταίες αυτές προγνώσεις υπερεκτιμούν την παρατηρημένη βροχόπτωση συνολικά, αλλά χωρίς να προσεγγίζουν ικανοποιητικά την κατανομή της βροχής.

Η αιχμή του επεισοδίου 131113 παρατηρείται στις 11/11/13 στις 07:00 το πρωί και έχει ύψος 30.2 mm. Όλες οι προγνώσεις υποεκτιμούν την παρατηρημένη αιχμή, ενώ η καλύτερη προσέγγιση παρέχεται από την πρόγνωση 091113_12. Η αιχμή της ανέρχεται σε 15.8 mm και λαμβάνει χώρα στις 14/11/13 στις 0:00, με χρονική υστέρηση 2 ημερών και 17 ωρών.

Νέδουσα

Η αιχμή του επεισοδίου 170113 παρατηρείται στις 16/1/13 στις 07:00 και έχει ύψος 24.8 mm. Όλες οι προγνώσεις υποεκτιμούν την παρατηρημένη αιχμή και η καλύτερη θεωρείται η 150113_00 με αιχμή στα 13.7 mm. Αυτή εμφανίζεται στις 18/1/13 στις 01:00, δηλαδή με χρονική υστέρηση 1 ημέρας και 18 ωρών. Γενικά, εκτός των πέντε τελευταίων προγνώσεων (1601113_12, 1601113_18, 170113_00, 170113_06, 1701113_12), οι άλλες μπορεί να μην προσεγγίζουν την αιχμή, όμως έχουν ικανοποιητική κατανομή σε σχέση με την παρατηρημένη.

Η αιχμή του επεισοδίου 131113 παρατηρείται στις 11/11/13 στις 14:00 το μεσημέρι με ύψος βροχής στα 26.0 mm. Η καλύτερη πρόγνωση είναι η 101113_12 και η αιχμή της υπολογίζεται στα 19.6 mm. Εμφανίζεται στις 14/11/13 στις 02:00 τα ξημερώματα, δηλαδή με χρονική υστέρηση δύο ημερών και 12 ωρών. Αξίζει να σημειωθεί ότι όλες οι προγνώσεις υποεκτιμούν την αιχμή της παρατηρημένης βροχόπτωσης, ακολουθούν όμως ικανοποιητικά τους ανοδικούς και καθοδικούς κλάδους της κατανομής της.

Καλαμάτα-Νησάκι

Η αιχμή του επεισοδίου 170113 παρατηρείται στις 16/1/13 στις 07:00 με ύψος βροχής 38.6 mm. Γενικά οι παρατηρήσεις και οι προγνώσεις αυτού του σταθμού με αυτές στον σταθμό Λατομείο Μπάκα είναι παρόμοιες, καθώς, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, οι μετρήσεις στον τελευταίο προέρχονται από αυτές στο Νησάκι. Επίσης και εδώ όλες οι άλλες μετρήσεις πέραν της αιχμής κυμαίνονται από 5 mm και κάτω. Οι προγνώσεις υποεκτιμούν την μέγιστη παρατηρημένη όμως θεωρούνται ικανοποιητικές καθώς προσεγγίζουν πολύ καλά τις υπόλοιπες μετρήσεις. Η καλύτερη πρόγνωση είναι η 150113_18, με μέγιστο ύψος στα 10.9 mm, που συμβαίνει στις 17/1/13 στις 23:00, δηλαδή 1 ημέρα και 16 ώρες μετά την παρατηρημένη αιχμή.

Η αιχμή του επεισοδίου 131113 παρατηρείται στις 11/11/13 στις 17:00 και έχει ύψος 23.0 mm. Η καλύτερη πρόγνωση είναι η 091113_12 με μέγιστο ύψος βροχής στα 16.6 mm και υπολογίζεται ότι συμβαίνει στις 14/11/13 0:00, με υστέρηση 2 ημερών και 7 ωρών από την αιχμή της παρατηρημένης. Γενικά όλες οι προγνώσεις υποεκτιμούν την χρονοσειρά της παρατηρημένης βροχόπτωσης.

Πολιανή

Η αιχμή του επεισοδίου 170113 παρατηρείται στις 16/1/13 στις 06:00 και έχει ύψος 16.8 mm. Η πρόγνωση 140113_12 υπερεκτιμά την παρατηρημένη αιχμή, με μέγιστο ύψος στα 18.9 mm, που υπολογίζεται ότι συμβαίνει στις 18/1/13 στη 01:00, δηλαδή μία ημέρα και 19 ώρες μετά την

μέγιστη παρατηρημένη. Η πρόγνωση 150113_18 προσεγγίζει με μεγάλη ακρίβεια την μέγιστη παρατηρημένη βροχή, με ύψος 16.8 mm και χρονική υστέρηση μίας ημέρας και 21 ωρών (συμβαίνει στις 18/1/13 στις 03:00). Οι υπόλοιπες προγνώσεις πέραν των πέντε τελευταίων προσεγγίζουν πολύ καλά την παρατηρημένη βροχόπτωση τόσο προς την αιχμή, όσο και ως προς την κατανομή.

Η αιχμή του επεισοδίου 131113 παρατηρείται στις 11/11/13 στις 11:00 το πρωί με ύψος βροχής 57.6 mm. Καλύτερη θεωρείται η πρόγνωση 101113_12, καθώς έχει μέγιστη τιμή 23.3 mm που εμφανίζεται στις 14/11/13 στη 01:00, με χρονική υστέρηση 2 ημερών και 14 ωρών από την παρατηρημένη. Είναι προφανές ότι όλες οι προγνώσεις υποεκτιμούν την παρατηρημένη χρονοσειρά.

Όλα τα διαγράμματα από όπου εξήχθησαν οι παρατηρήσεις φαίνονται στο Παράρτημα Α.

Από τις παραπάνω παρατηρήσεις μπορούμε να συμπεράνουμε ότι:

- Για το επεισόδιο 170113 στην λεκάνη του Νέδοντα οι καλύτερες προγνώσεις είναι αυτές που ξεκινούν δύο μέρες πριν δηλαδή στις 15/1/13, καθώς και για το επεισόδιο 131113, αφού στην πλειονότητα των σταθμών οι καλύτερες προγνώσεις ξεκινούν περίπου στις 10/11/13.
- Η μέθοδος της σημειακής ανάλυσης μπορεί να προσεγγίζει ικανοποιητικά την κατανομή της εκάστοτε παρατηρημένης βροχόπτωσης, όμως αποτυγχάνει στην πλειονότητα των περιπτώσεων να προσεγγίσει ικανοποιητικά την αιχμή της παρατηρημένης βροχόπτωσης.

3.2.4. Συμπεράσματα σημειακών αναλύσεων στη λεκάνη του Λούσιου

Δημητσάνα

Για το επεισόδιο 170113 η μέγιστη βροχόπτωση παρατηρείται στις 18/1/13 στις 06:00 και έχει ύψος 7.0 mm. Γενικά οι προγνώσεις είναι αρκετά ικανοποιητικές, αν και όλες υπερεκτιμούν την παρατηρημένη βροχόπτωση, τόσο την αιχμή, όσο και στο σύνολο της χρονοσειράς. Η καλύτερη πρόγνωση είναι η 150113_06, με μέγιστο ύψος βροχής 10.8 mm που εμφανίζεται στις 15/1/13 στις 10:00, δηλαδή 2 μέρες και 10 ώρες πριν την παρατηρημένη βροχόπτωση.

Για το επεισόδιο 131113 η μέγιστη βροχόπτωση παρατηρείται στις 12/11/12 στις 13:00 και έχει ύψος 10.8 mm. Πέρα από αυτήν την πρόγνωση οι προγνώσεις 101113_06 και 101113_12 υπερεκτιμούν την μέγιστη παρατηρημένη βροχόπτωση, εμφανίζοντας ύψη 16.9 mm και 18.0 mm αντίστοιχα. Η καταγραφή της μέγιστης βροχόπτωσης της πρόγνωσης 101113_06 αναφέρεται στις 13/11/13 στις 22:00, δηλαδή με υστέρηση μίας μέρας και 9 ωρών, ενώ αυτή της πρόγνωσης 101113_12 αναφέρεται στις 11/11/13 στις 15:00, δηλαδή 22 ώρες πριν την μέγιστη παρατηρημένη.

Ελάτη

Στο επεισόδιο 170113 η μέγιστη βροχόπτωση παρατηρείται στις 16/1/13 στις 05:00 και έχει ύψος 6.2 mm. Καλύτερη πρόγνωση θεωρείται η 150113_18, στην οποία το μέγιστο ύψος βροχής υπολογίζεται στα 12.1 mm και συμβαίνει στις 16/1/13 στις 02:00, δηλαδή 3 ώρες πριν την καταγραφή της μέγιστης παρατηρημένης βροχόπτωσης. Γενικά όλα τα σενάρια προγνώσεων υπερεκτιμούν την παρατηρημένη χρονοσειρά της βροχόπτωσης στο σύνολό της.

Στο επεισόδιο 131113 η μέγιστη βροχόπτωση παρατηρείται στις 13/11/13 στις 23:00, με ύψος βροχής 10.2 mm. Η πρόγνωση 091113_12 δίνει μέγιστο ύψος βροχής 18.7 mm στις 11/11/13 στις 22:00, δηλαδή περίπου δύο ημέρες πριν την παρατήρηση. Επίσης οι προγνώσεις 091113_06, 101113_06, 101113_12, 101113_18 και 111113_00 προσεγγίζουν ικανοποιητικά την παρατηρημένη χρονοσειρά βροχής, με τα μέγιστα ύψη τους να κυμαίνοντα από 10 έως 14 mm.

Λαγκάδια

Στο επεισόδιο 170113 παρατηρούμε την αιχμή της βροχόπτωσης στις 16/1/13 στις 05:00 και με ύψος 10.2 mm. Γενικά, όλες οι προγνώσεις υπερεκτιμούν την παρατηρημένη, με καλύτερη να θεωρείται η 150113_00, η οποία έχει μέγιστο ύψος βροχής στα 13.1 mm. Η συγκεκριμένη τιμή αναφέρεται στις 17/1/13 στις 21:00 με χρονική υστέρηση μιας ημέρας και 16 ωρών.

Στο επεισόδιο 131113 η μέγιστη βροχόπτωση παρατηρείται στις 13/11/13 στις 23:00 με ύψος βροχής 14.0 mm. Όλες οι προγνώσεις υποεκτιμούν την μέγιστη παρατηρημένη βροχόπτωση, εκτός από την πρόγνωση 101113_12, η οποία έχει αιχμή βροχής στα 15.5 mm. Η αιχμή συμβαίνει στις 14/11/13 στις 0:00, δηλαδή περίπου 1 ημέρα μετά την μέγιστη παρατηρημένη.

Στεμνίτσα

Στο επεισόδιο 170113 η αιχμή της βροχόπτωσης παρατηρείται στις 17/1/13 στις 05:00 με ύψος 4.6 mm. Γενικά όλες οι προγνώσεις υπερεκτιμούν την παρατηρημένη βροχόπτωση δίνοντας ικανοποιητικές προσεγγίσεις. Αυτή που θεωρείται η καλύτερη είναι η 150113_18, που αναφέρεται στις 17/1/13 στις 20:00 (χρονική υστέρηση 15 ωρών) και δίνει μέγιστο ύψος βροχής 7.8 mm.

Στο επεισόδιο 131113 παρατηρούμε την μέγιστη βροχόπτωση στις 13/11/13 στις 12:00 με ύψος βροχής 10.2 mm. Η καλύτερη πρόγνωση θεωρείται η 091113_12, με ύψος βροχής 20.6 mm και γίνεται στις 11/11/13 στις 22:00, δηλαδή μία ημέρα και 12 ώρες πριν την καταγραφή της μέγιστης παρατηρημένης. Γενικά η πλειοψηφία των προγνώσεων υπερεκτιμά την μέγιστη παρατηρημένη αιχμή της βροχής δίνοντας ικανοποιητικές προσεγγίσεις.

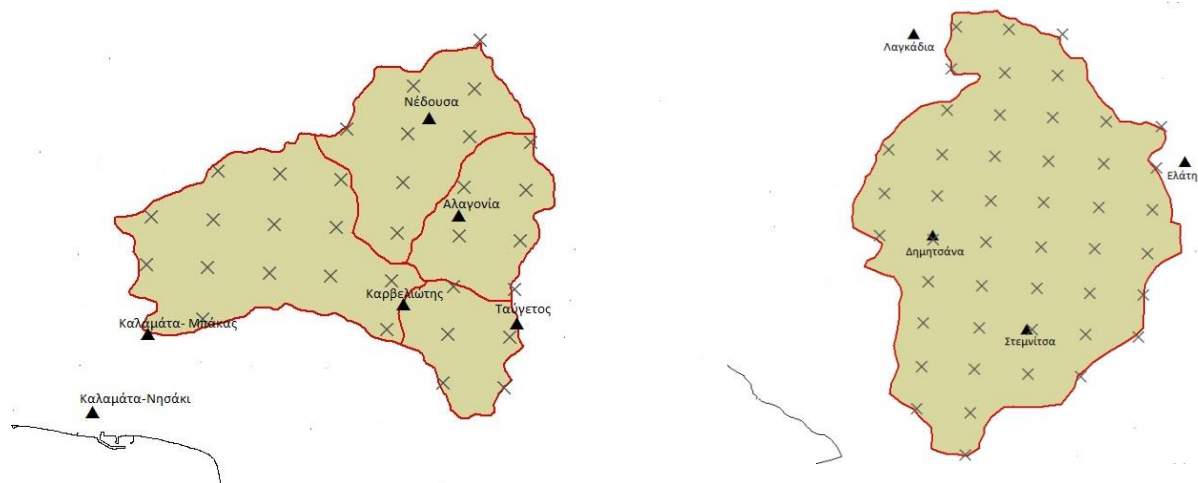
Όλα τα διαγράμματα της σημειακής ανάλυσης από όπου εξήχθησαν οι παραπάνω παρατηρήσεις φαίνονται στο Παράρτημα Α.

Από τα παραπάνω μπορούμε να συμπεράνουμε ότι:

- Στη λεκάνη του Λούσιου για το επεισόδιο 170113 έχουμε καλή προσέγγιση της παρατηρημένης βροχόπτωσης, ενώ οι περισσότερες προγνώσεις υπερεκτιμούν το σύνολο της παρατηρημένης χρονοσειράς. Από την άλλη για το επεισόδιο 131113 η εικόνα δεν είναι τόσο καλή, γιατί συγκεκριμένες μόνο προγνώσεις υπερεκτιμούν την παρατηρημένη αιχμή της βροχής. Γενικά η σημειακή ανάλυση με βελτιστοποίηση των γειτονικών σημείων (grid points) δίνει καλύτερα αποτελέσματα στην λεκάνη του Λούσιου σε σχέση με την ανάλυση στη λεκάνη του Νέδοντα.
- Παρόμοια με την λεκάνη του Νέδοντα και εδώ οι καλύτερες προγνώσεις είναι αυτές που ξεκινούν περίπου 2 ημέρες πριν την εκάστοτε παρατηρημένη αιχμή της βροχόπτωσης.

3.3 Επιφανειακή αναγωγή προγνώσεων βροχόπτωσης με βάση όλα τα σημειακά δειγματα

Για την επιφανειακή ολοκλήρωση των προγνώσεων της βροχόπτωσης χρησιμοποιούμε όλα τα διακριτά σημεία (grid points) που βρίσκονται εντός της περιοχής μελέτης ή πολύ κοντά της (Σχήμα 3.5). Οι προγνώσεις της βροχής υπολογίζονται ανά λεκάνη απορροής. Με τον τρόπο αυτό, προκύπτουν 13 σενάρια πρόγνωσης για το επεισόδιο βροχής 170113 και 17 σενάρια πρόγνωσης για το επεισόδιο βροχής 131113 για κάθε λεκάνη απορροής. Επισημαίνεται ότι στο υδρολογικό μοντέλο του Νέδοντα εισάγονται μόνο τα 13 σενάρια πρόγνωσης για το επεισόδιο 170113, ενώ σε αυτό της λεκάνης του Λούσιου εισάγονται οι προγνώσεις και για τα δυο επεισόδια βροχής που μελετάμε.



Σχήμα 3.5: Απεικόνιση κόμβων υπολογιστικού πλέγματος (grid points) που χρησιμοποιήθηκαν στην επιφανειακή ανάλυση για την λεκάνη απορροής του Νέδοντα (αριστερά) και του Λούσιου (δεξιά)

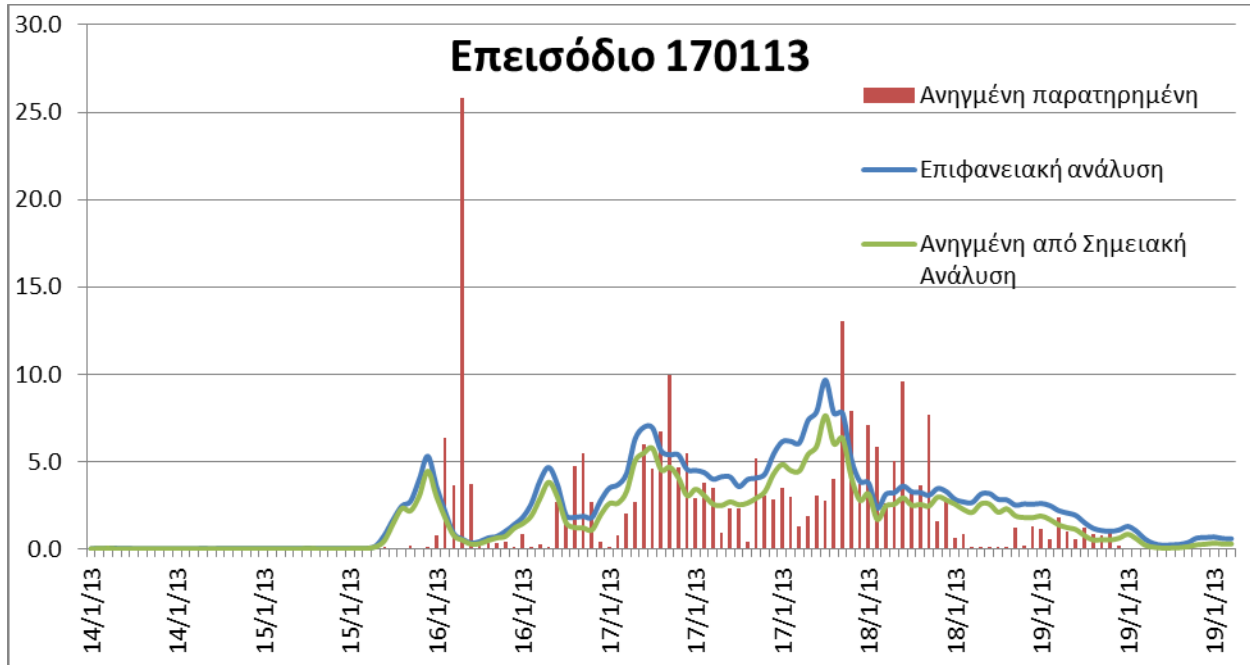
Η διαδικασία επεξεργασίας των προγνώσεων ουσιαστικά αποτελεί μία ειδική περίπτωση της μεθόδου των πολυγώνων Thiessen, μόνο που η συμμετοχή όλων των σημείων είναι ισόποση στην εκτίμηση της επιφανειακής βροχόπτωσης της λεκάνης. Αυτό συμβαίνει γιατί το υπολογιστικό πλέγμα είναι ορθογωνικό, οπότε οι αποστάσεις των κόμβων είναι σταθερές και τα πολύγωνα που διαμορφώνονται έχουν την ίδια έκταση εντός της λεκάνης ($2 \times 2 = 4 \text{ km}^2$). Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα από την επιφανειακή ανάλυση για κάθε μελετώμενη λεκάνη απορροής ξεχωριστά.

3.3.1 Λεκάνη απορροής Νέδοντα

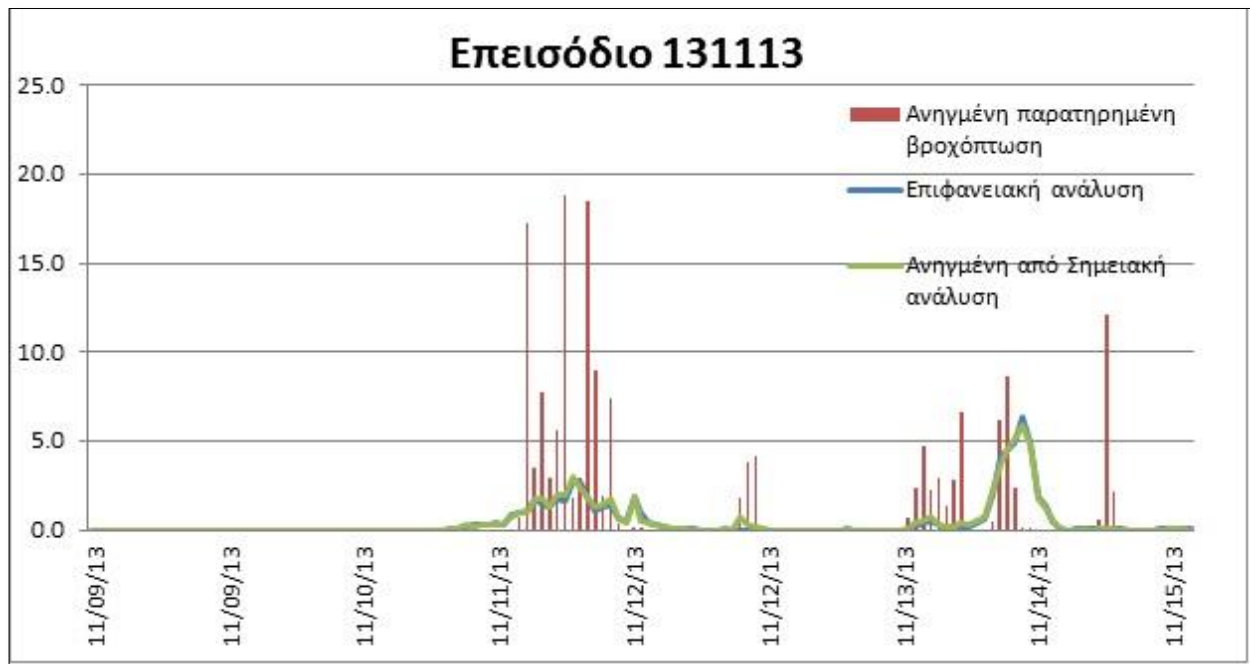
Στη λεκάνη απορροής του Νέδοντα για το επεισόδιο 170113 η καλύτερη πρόγνωση θεωρείται η 140113_18, με την οποία υπολογίστηκε αιχμή της βροχής 16.6 mm. Η μέγιστη παρατηρημένη βροχόπτωση καταγράφηκε ίση με 25 mm και η χρονική υστέρηση της υπολογισμένης μέγιστης τιμής σε σχέση με την παρατηρημένη είναι 42 ώρες. Για το επεισόδιο 131113 η μέγιστη παρατηρημένη βροχόπτωση είναι 18.8 mm, ενώ η μέγιστη βροχόπτωση που προέκυψε με την επιφανειακή αναγωγή των διακριτών σημείων υπολογίστηκε 19.1 mm στην πρόγνωση 101113_12. Το χρονικό διάστημα μεταξύ αυτών των δυο τιμών είναι περίπου 54 ώρες, με την παρατηρημένη να προηγείται. Τα διαγράμματα των προγνώσεων σε σχέση με την ανηγμένη παρατηρημένη φαίνονται στο Παράρτημα Α.

Με σκοπό την σύγκριση των αποτελεσμάτων των δυο μεθόδων με την παρατηρημένη, αλλά και μεταξύ τους, η χρονοσειρά της παρατηρημένης βροχόπτωσης και της υπολογισμένης από την σημειακή ανάλυση ανήχθησαν στην ολική επιφάνεια της λεκάνης με την μέθοδο Thiessen με συντελεστές 0.22 για την Αλαγονία, 0.32 για τον Καρβελιώτη, 0.18 για τον Μπάκα, 0.23 για τη Νέδουσα και 0.05 για την Πολιανή.

Σε σύγκριση με την μέθοδο της σημειακής ανάλυσης με βελτιστοποίηση των γειτονικών διακριτών σημείων είναι φανερό ότι η επιφανειακή ανάλυση υπερτερεί, αφού δίνει μεγαλύτερες τιμές της βροχόπτωσης για όλο το χρονικό διάστημα όπου γίνονται οι δυο αναλύσεις, όπως φαίνεται στα Σχήματα 3.6 και 3.7. Συνεπώς ως είσοδος στο μοντέλο προσομοίωσης της λεκάνης απορροής του Νέδοντα λαμβάνονται τα σενάρια πρόγνωσης που παράχθησαν από την μέθοδο της επιφανειακής ανάλυσης.



Σχήμα 3.6: Σύγκριση αποτελεσμάτων από την σημειακή και την επιφανειακή ανάλυση με την παρατηρημένη βροχόπτωση στη λεκάνη του Νέδοντα για το επεισόδιο βροχής 170113



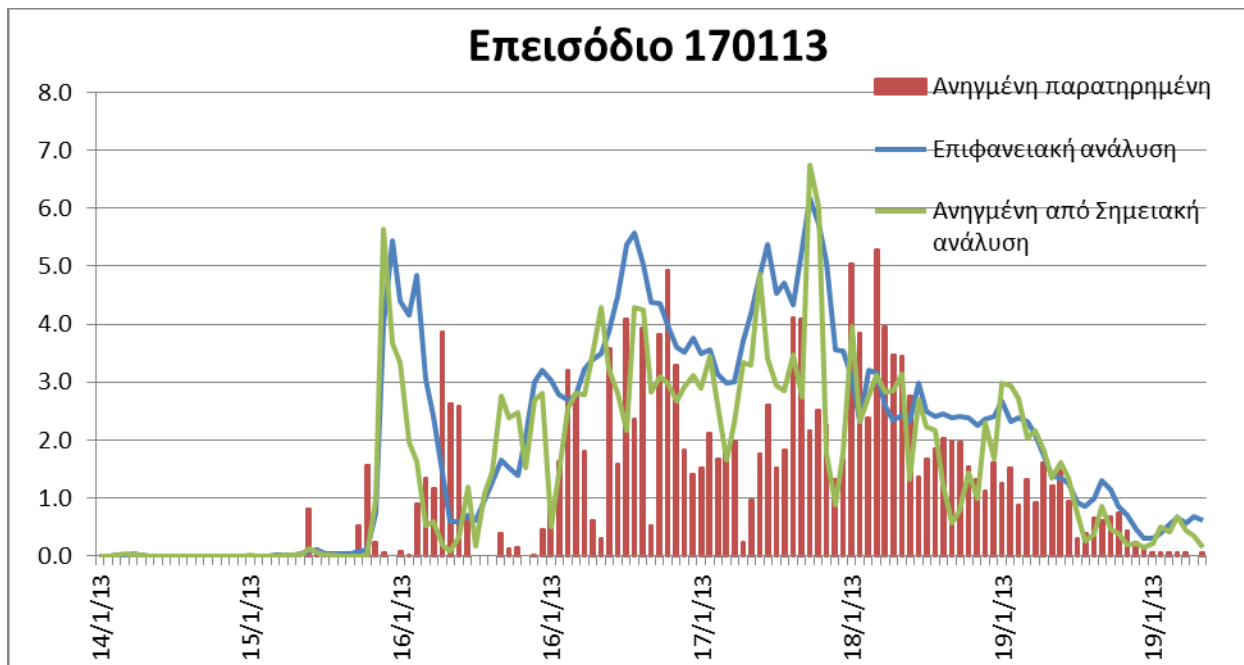
Σχήμα 3.7: Σύγκριση αποτελεσμάτων από την σημειακή και την επιφανειακή ανάλυση με την παρατηρημένη βροχόπτωση στη λεκάνη του Νέδοντα για το επεισόδιο βροχής 131113

3.3.2 Λεκάνη απορροής Λούσιου

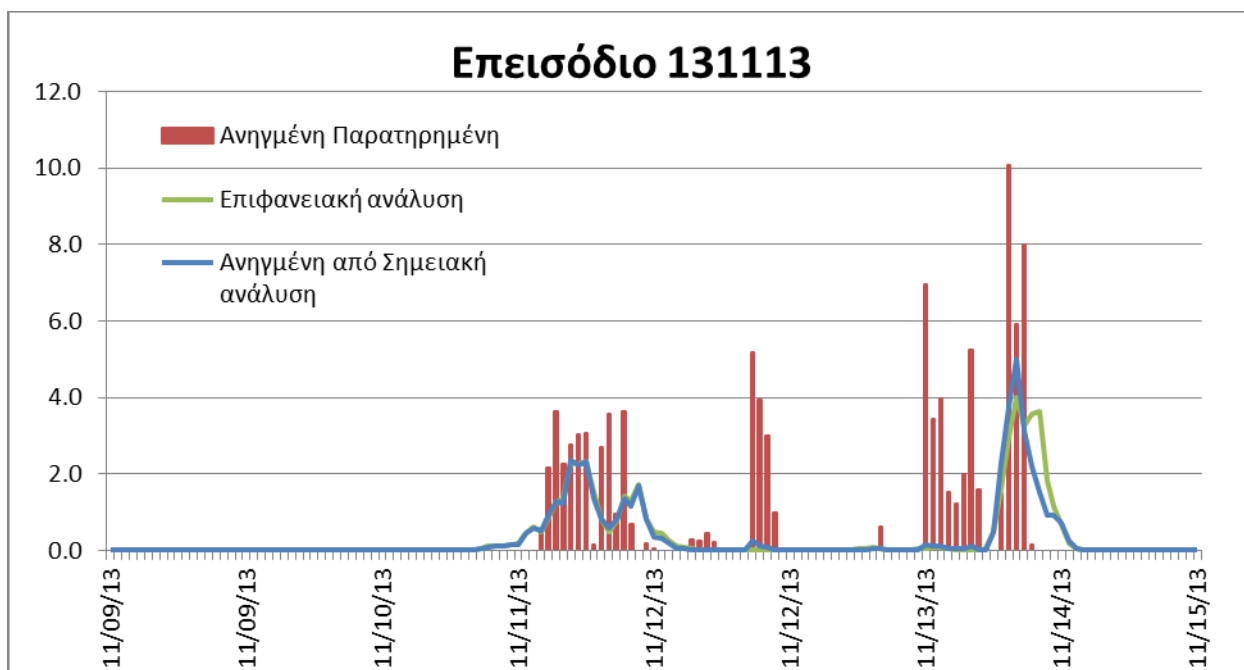
Στη λεκάνη απορροής του Λούσιου η μέγιστη ανηγμένη παρατηρημένη βροχόπτωση είναι ίση με 5.3 mm για το επεισόδιο 170113, και η καλύτερη πρόγνωση θεωρείται η 150113_18, όπου υπολογίστηκε αιχμή της βροχής 9.4 mm. Η μέγιστη υπολογισμένη βροχόπτωση για αυτήν την πρόγνωση προηγείται 54 ώρες από την μέγιστη παρατηρημένη. Για το επεισόδιο 131113 η μέγιστη ανηγμένη παρατηρημένη βροχόπτωση είναι 10.1 mm, ενώ η μέγιστη βροχόπτωση που προέκυψε με την επιφανειακή αναγωγή των διακριτών σημείων υπολογίστηκε 17.6 mm στην πρόγνωση 091113_12. Το χρονικό διάστημα μεταξύ αυτών των δύο παραπάνω τιμών είναι περίπου 40 ώρες, με την υπολογισμένη να προηγείται της παρατηρημένης. Τα διαγράμματα των προγνώσεων σε σχέση με την ανηγμένη παρατηρημένη φαίνονται στο Παράρτημα Α.

Με σκοπό την σύγκριση των αποτελεσμάτων των δυο μεθόδων με την παρατηρημένη, αλλά και μεταξύ τους, η χρονοσειρά της παρατηρημένης βροχόπτωσης και της υπολογισμένης από την σημειακή ανάλυση ανήχθησαν στην ολική επιφάνεια της λεκάνης με την μέθοδο Thiessen με συντελεστές 0.31 για την Δημητσάνα, 0.18 για την Ελάτη, 0.13 για τα Λαγκάδια και 0.38 για την Στεμνίτσα.

Σε σύγκριση με την μέθοδο της σημειακής ανάλυσης με βελτιστοποίηση των γειτονικών διακριτών σημείων είναι φανερό ότι η επιφανειακή ανάλυση υπερτερεί αφού δίνει μεγαλύτερες τιμές της βροχόπτωσης για όλο το χρονικό διάστημα όπου γίνονται οι δυο αναλύσεις, όπως φαίνεται στα σχήματα παρακάτω (Σχήμα 3.8, Σχήμα 3.9) για τα δυο επεισόδια βροχής. Συνεπώς ως είσοδος στο μοντέλο προσομοίωσης της λεκάνης απορροής του Λούσιου λαμβάνονται τα σενάρια πρόγνωσης που παράχθησαν από την μέθοδο της επιφανειακής ανάλυσης.



Σχήμα 3.8: Σύγκριση αποτελεσμάτων από την σημειακή και την επιφανειακή ανάλυση με την παρατηρημένη βροχόπτωση στη λεκάνη του Λούσιου για το επεισόδιο βροχής 170113



Σχήμα 3.9: Σύγκριση αποτελεσμάτων από την σημειακή και την επιφανειακή ανάλυση με την παρατηρημένη βροχόπτωση στη λεκάνη του Λούσιου για το επεισόδιο βροχής 131113

Κεφάλαιο 4: Υδρολογική προσομοίωση λεκανών Νέδοντα και Λούσιου

4.1. Βασικές έννοιες υδρολογικών μοντέλων

Ο όρος μοντέλο υδρολογικής προσομοίωσης (ή, απλούστερα, υδρολογικό μοντέλο) ορίζεται ως «ένα ευρύ φάσμα μαθηματικών μετασχηματισμών που χρησιμοποιούν δεδομένα πεδίου και εύλογες υποθέσεις σχετικά με τους φυσικούς μηχανισμούς, με στόχο την ποσοτική εκτίμηση υδρολογικών μεταβλητών που ενδιαφέρουν σε εφαρμογές της πράξης» (Ευστρατιάδης, 2008). Η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου υδρολογικής προσομοίωσης εξαρτάται από δύο κυρίως παράγοντες:

- από τον σκοπό της μελέτης και
- από τα διαθέσιμα δεδομένα, που συχνά αποτελούν τον κύριο περιοριστικό παράγοντα.

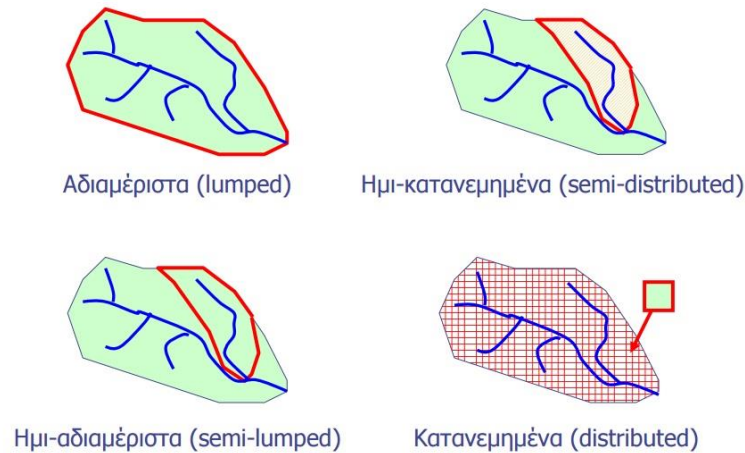
Γενικά, η ανάπτυξη υδρολογικών μοντέλων, προσανατολισμένων για την πλημμυρική πρόγνωση περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

1. την επιλογή των κατάλληλων διεργασιών του επιφανειακού και υπόγειου συστήματος έτσι ώστε να συμβαδίζουν με τα γενικά χαρακτηριστικά της υπό μελέτη λεκάνης απορροής (που σε κάποιες περιπτώσεις οφείλει να περιλαμβάνει και τις διεργασίες του υδροφορέα).
2. τη διατύπωση του μαθηματικού υπόβαθρου και παραμετροποίησης του μοντέλου, και την κωδικοποίηση της εν λόγω υπολογιστικής διαδικασίας
3. τη βαθμονόμηση (calibration) των παραμέτρων, δηλαδή την εύρεση των βέλτιστων τιμών τους, με τη βοήθεια ιστορικών χρονοσειρών του συγκεκριμένου πεδίου εφαρμογής και την αποτίμηση της ακρίβειας του μοντέλου σε μια ανεξάρτητη χρονική περίοδο (validation)
4. την εισαγωγή χρονοσειρών βροχόπτωσης πρόγνωσης της βροχής (για το χρονικό διάστημα της πρόγνωσης), για την εξαγωγή προγνώσεων της απορροής και αξιολόγησή τους με βάση τις αντίστοιχες παρατηρημένες πλημμύρες.

Τα υδρολογικά μοντέλα που γενικά χρησιμοποιούνται χωρίζονται σε κατηγορίες με βάση την χωρική κλίμακα, την χρονική κλίμακα και την μαθηματική τους δομή.

- Με βάση τη χωρική κλίμακα υπάρχουν τέσσερις υποκατηγορίες: τα αδιαμέριστα (lumped), τα ημι-κατανεμημένα (semi-distributed), τα ημι-αδιαμέριστα (semi-lumped) και τα κατανεμημένα (distributed). Στο Σχήμα 4.1 φαίνονται μερικά παραδείγματα της παραπάνω κατηγοριοποίησης.
- Με βάση τη χρονική κλίμακα, τα μοντέλα χωρίζονται σε μηνιαίας κλίμακας (ειδικά για μελέτες διαχειριστικού ενδιαφέροντος) και ημερήσιας ή μικρότερης (ωριαίας) κλίμακας (ειδικά για περιγραφή πλημμυρικών φαινομένων).
- Τέλος, με βάση την μαθηματική τους δομή τα υδρολογικά μοντέλα χωρίζονται σε: μοντέλα φυσικής βάσης, εννοιολογικά μοντέλα, στατιστικά-στοχαστικά μοντέλα και μοντέλα μαύρου κουτιού.

Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζεται, συνοπτικά, το θεωρητικό υπόβαθρο και η φυσική συνέπεια κάθε τύπου μοντέλου.



Σχήμα 4.1: Κατηγοριοποίηση υδρολογικών μοντέλων με βάση τη χωρική κλίμακα (Ευστρατιάδης, 2006)

	Θεωρητικό υπόβαθρο	Φυσική συνέπεια
Μοντέλα φυσικής βάσης	Εξισώσεις ακόρεστης και κορεσμένης ροής, άλλες εμπειρικές εξισώσεις από πειραματικές λεκάνες	Θεωρητικά πλήρης, αλλά μόνο σε πολύ μικρή (απειροστή;) χωρική κλίμακα
Εννοιολογικά μοντέλα	Παραμετρικές σχέσεις, σε υδραυλικά ανάλογα που αναπαριστούν τις κύριες υδρολογικές διεργασίες	Σχετική, εφόσον οι παράμετροι θεωρηθούν αντιπροσωπευτικές των «μακροσκοπικών» χαρακτηριστικών της λεκάνης
Στατιστικά-στοχαστικά μοντέλα	Σχέσεις που αναπαράγουν την στατιστική δομή των μετρημένων αποκρίσεων	Στοιχειώδης φυσική συνέπεια, ελεγχόμενη (από το μοντέλο) στατιστική συνέπεια
Μοντέλα «μαύρου κουτιού»	Διαδοχικοί μη γραμμικοί μετασχηματισμοί σχέσεων αιτίου-αποτελέσματος	Απολύτως καμία

Πίνακας 4.1: Παρουσίαση κατηγοριοποίησης υδρολογικών μοντέλων με βάση τη μαθηματική τους δομή (Ευστρατιάδης, 2006)

4.2. Γενικά χαρακτηριστικά μοντέλου προσομοίωσης λεκανών ενδιαφέροντος

Η υδρολογική προσομοίωση των δύο μελετούμενων λεκανών στην περιοχή της Πελοποννήσου, της λεκάνης του Νέδοντα και της λεκάνης του Λούσιου, έγινε με αδιαμέριστη προσέγγιση (lumped approach), δηλαδή μοντελοποίηση σε κλίμακα λεκάνης απορροής, χωρίς την χρήση υπολεκάνων, και με την μαθηματική δομή ενός εννοιολογικού μοντέλου. Αναπτύχθηκαν δύο υδρολογικά μοντέλα στην γλώσσα προγραμματισμού R με ένα σετ παραμέτρων για το σύνολο της κάθε λεκάνης. Τα μοντέλα αναπτύχθηκαν στα πρότυπα των υδρολογικών διεργασιών του υπολογιστικού συστήματος Υδρόγειος για την προσομοίωση των επιφανειακών διεργασιών, ενώ για την προσομοίωση των υπόγειων διεργασιών εφαρμόστηκε μια απλοποιημένη δομή του μοντέλου.

Στην πλήρη εκδοχή της, η Υδρόγειος είναι ένα ολοκληρωμένο σχήμα προσομοίωσης, το οποίο υλοποιεί ένα συνδυαστικό (επιφανειακό και υπόγειο) υδρολογικό μοντέλο που αναπαριστά τις διεργασίες στο έδαφος και το υπέδαφος, σε συνδυασμό με ένα σχήμα διαχείρισης συστημικού προσανατολισμού, το οποίο εκτιμά τις ροές κατά μήκος του φυσικού (υδρογραφικού) και τεχνητού (έργα μεταφοράς) δικτύου και τις πραγματικές απολήψεις του υδροσυστήματος, λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά και τους περιορισμούς των τεχνικών έργων αξιοποίησης των υδατικών πόρων. Το μοντέλο και το αντίστοιχο λογισμικό έχουν αναπτυχθεί στο πλαίσιο ερευνητικών προγραμμάτων του ΕΜΠ, με πλέον πρόσφατη την έκδοση 3, η οποία ενσωμάτωσε νέες μεθοδολογίες και λειτουργικότητες για την προσομοίωση σε ωριαία χρονική κλίμακα (Ευστρατιάδης κ.ά., 2014). Αναλυτικές πληροφορίες δίνονται στην ιστοσελίδα του μοντέλου (<http://www.itia.ntua.gr/el/softinfo/25/>).

Στην παρούσα εργασία, η χωρική κλίμακα αναπαράστασης των διεργασιών βασίστηκε στην αδιαμέριστη σχηματοποίηση της λεκάνης απορροής, δηλαδή οι χρονοσειρές φόρτισης ολοκληρώθηκαν σε όλη την επιφάνεια της λεκάνης, με ένα σετ παραμέτρων και εκτιμήθηκε το ισοζύγιο των υδατικών πόρων μόνο στην έξοδο της κάθε λεκάνης.

Ως προς τη χρονική κλίμακα, στις μελέτες πλημμυρών, που αποτελούν και το πεδίο εφαρμογής της εργασίας, ενδεικνύεται η εφαρμογή του ωριαίου χρονικού βήματος, που προϋποθέτει την προσομοίωση όχι μόνο των υδρολογικών αλλά και των υδραυλικών διεργασιών, δηλαδή την αναπαράσταση της διόδευσης των πλημμυρικών παροχών κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου.

Ως προς τη μοντελοποίηση των υδρολογικών διεργασιών στην επιφάνεια υιοθετείται μια προσέγγιση εννοιολογικού μοντέλου, η οποία επιτρέπει την προσομοίωση πολύπλοκων φυσικών διεργασιών με έντονη χωρική ανομοιογένεια, μέσω ενός μικρού αριθμού παραμέτρων. Οι εν λόγω παράμετροι, αν και δεν έχουν πλήρη φυσική ερμηνεία, μπορούν να θεωρηθούν αντιπροσωπευτικές των «μακροσκοπικών» χαρακτηριστικών της χωρικής ενότητας (στην εργασία, οι παράμετροι αντιστοιχούν στο σύνολο της λεκάνης και του υδροφορέα). Η εκτίμηση των παραμέτρων γίνεται μέσω βαθμονόμησης, δηλαδή με προσαρμογή των αποκρίσεων του μοντέλου στις παρατηρημένες αποκρίσεις της λεκάνης (στην προκειμένη περίπτωση, την χρονοσειρά παρατηρημένων παροχών στην έξοδο της λεκάνης).

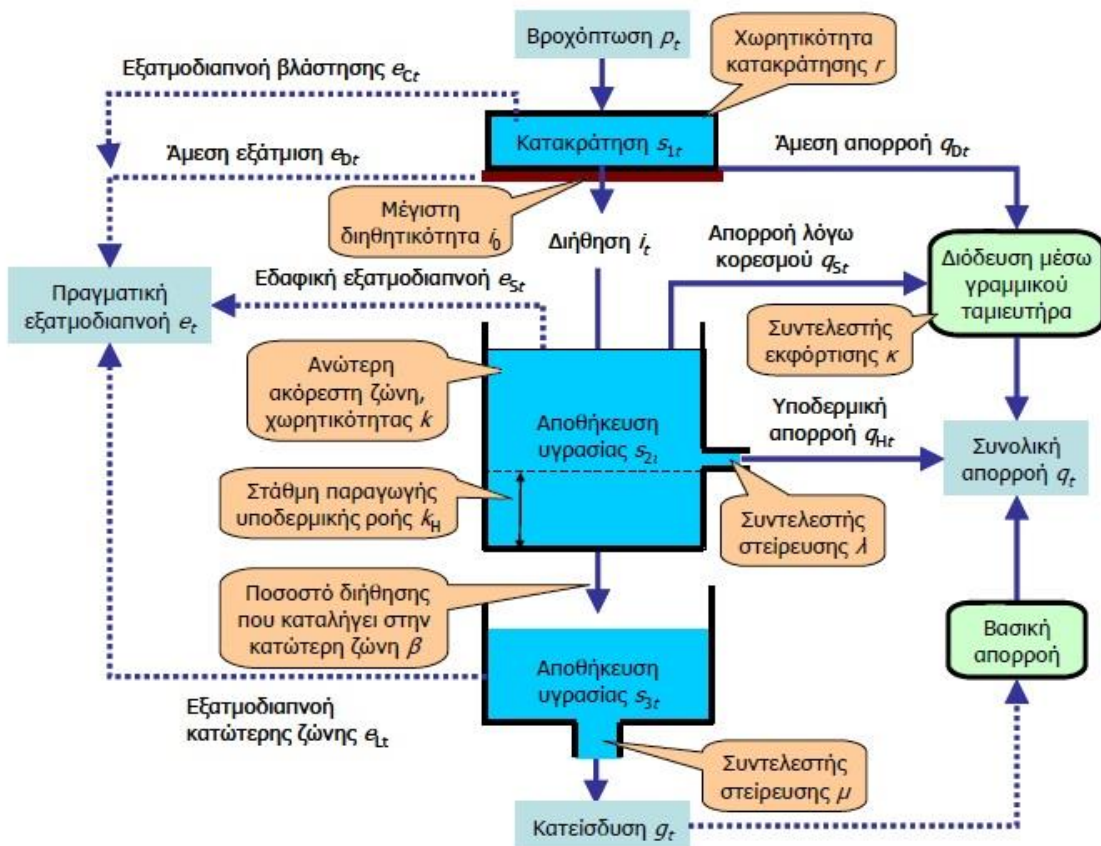
4.3. Θεωρητικό υπόβαθρο μοντέλου προσομοίωσης

Στην συγκεκριμένη εργασία, επειδή σκοπός της είναι να αποτυπώνονται οι υδρολογικές διεργασίες στην κλίμακα του επεισοδίου βροχής, υιοθετήθηκε ωριαία κλίμακα προσομοίωσης και εφαρμόστηκε η δομή του επιφανειακού μοντέλου που απεικονίζεται στο Σχήμα 4.2 και περιλαμβάνει τέσσερις συνιστώσες:

- την **δεξαμενή κατακράτησης**, χωρητικότητας r , που υποδηλώνει τη μέγιστη ποσότητα νερού της βροχόπτωσης που μπορεί να συγκρατήσει η βλάστηση, η οποία στη συνέχεια μετατρέπεται σε άμεση εξατμοδιαπνοή
- η **εδαφική επιφάνεια**, μέγιστης διηθητικότητας i_0 , που τροφοδοτείται από την περίσσεια βροχής, την οποία επιμερίζει σε επιφανειακή απορροή και διήθηση, που με τη σειρά της επιμερίζεται στην ανώτερη και κατώτερη ζώνη εδαφικής υγρασίας, με βάση ένα σταθερό ποσοστό β
- την **ανώτερη ακόρεστη ζώνη**, χωρητικότητας k , που τροφοδοτείται από ποσοστό $(1 - \beta)$ της διήθησης, η οποία παράγει υποερμική απορροή, εφόσον η αποθήκευση υγρασίας υπερβεί τη στάθμη k_H , και απορροή λόγω κορεσμού, εφόσον η αποθήκευση υγρασίας υπερβεί τη χωρητικότητα k , και επιπλέον αναλώνει ένα μέρος της αποθηκευμένης υγρασίας σε εδαφική εξατμοδιαπνοή

- την **κατώτερη ακόρεστη ζώνη**, απεριόριστης χωρητικότητας k , που τροφοδοτείται από ποσοστό β της διήθησης, η οποία παράγει κατείσδυση, και επιπλέον αναλώνει ένα μέρος της αποθηκευμένης υγρασίας σε βαθιά εξατμοδιαπνοή.

Η συνολική απορροή επιμερίζεται σε τρεις συνιστώσες: την άμεση απορροή, την απορροή λόγω κορεσμού και την υποερμική απορροή. Οι δύο πρώτες συνιστώσες αναφέρονται σε ροή πάνω στην επιφάνεια του εδάφους, και αποτελούν την επιφανειακή απορροή του εδαφικού στοιχείου, ενώ η υποερμική ροή πραγματοποιείται στο ρηχό τμήμα του υπεδάφους, δηλαδή την ανώτερη ακόρεστη ζώνη. Η επιφανειακή απορροή διοδεύεται μέχρι την έξοδο της λεκάνης μέσω ενός γραμμικού ταμιευτήρα, στην οποία καταλήγουν ακόμη η υποερμική απορροή καθώς και η βασική απορροή. Η τελευταία προέρχεται από την επιφανειακή εκφόρτιση του υδροφορέα, που τροφοδοτείται από την κατείσδυση των ανώτερων στρωμάτων.



Σχήμα 4.2: Σχηματική αναπαράσταση ημερήσιου-ωριαίου υδατικού ισοζυγίου (Ευστρατιάδης κ.α. , 2014)

Έστω ότι στο χρονικό διάστημα $[\tau, \tau + \Delta\tau]$, όπου $\Delta\tau$ το βήμα της προσομοίωσης (στην προκειμένη περίπτωση ωριαίο) είναι γνωστά η συνολική κατακρήμιση, p_t , η δυνητική

εξατμοδιαπνοή, e_{pt} , η κατακράτηση νερού στη χλωρίδα, s_{1t} , και η αποθήκευση εδαφικής υγρασίας στην ανώτερη, s_{2t} , και κατώτερη, s_{3t} , ακόρεστη ζώνη. Για τις τρεις συνιστώσες αποθήκευσης, που αποτελούν τις μεταβλητές κατάστασης του μοντέλου, απαιτείται η γνώση των αρχικών τιμών τους στον χρόνο $t=0$. Εφόσον η προσομοίωση ξεκινά στην αρχή του υδρολογικού έτους και δεν έχει πραγματοποιηθεί κάποιο σημαντικό επεισόδιο βροχής τις προηγούμενες μέρες, η αρχική τιμή των τριών μεταβλητών μπορεί να θεωρηθεί ίση με μηδέν. Η υλοποίηση των διεργασιών πραγματοποιείται κατά την κατακόρυφη έννοια ως εξής:

- Αρχικά, εκτιμάται η κατακράτηση μέρους (ή του συνόλου) της προσπίπτουσας βροχόπτωσης από τη χλωρίδα, ως εξής:

$$r_{0t} = \min (p_t, r - s_{1t}) \quad (4.1)$$

όπου r η χωρητικότητα κατακράτησης, που έχει διαστάσεις ισοδύναμου ύψους νερού και αποτελεί παράμετρο του μοντέλου.

- Μετά την προσθήκη της κατακρατούμενης ποσότητας r_{0t} , η συνολική υγρασία που έχει αποθηκευτεί στη βλάστηση επικαιροποιείται σε:

$$s_{1t} \rightarrow s_{1t} + r_{0t} \quad (4.2)$$

- Στη συνέχεια εκτιμώνται οι απώλειες λόγω της άμεσης εξατμοδιαπνοής από τη χλωρίδα. Η ποσότητα αυτή είναι το ελάχιστο μεταξύ της διαθέσιμης υγρασίας που έχει κατακρατηθεί στη χλωρίδα και της αντίστοιχης θεωρητικής ζήτησης, ήτοι:

$$e_{ct} = \min [s_{1t}/\Delta t, e_{pt} (s_{1t}/r)^{2/3}] \quad (4.3)$$

Στην παραπάνω σχέση, ο όρος της θεωρητικής ζήτησης εκτιμάται από την ημιεμπειρική εξίσωση του Deardorff (1978).

- Η τελική αποθήκευση υγρασίας στη δεξαμενή κατακράτησης υπολογίζεται από την εξίσωση ισοζυγίου, δηλαδή:

$$s_{1,t+1} = s_{1t} + r_{0t} - e_{ct} \quad (4.4)$$

ενώ η περίσσεια της βροχής $\Delta p_t = p_t - r_{0t}$ πέφτει στο έδαφος. Από την ποσότητα αυτή, ένα μέρος (ή το σύνολο) διηθείται προς την ακόρεστη ζώνη, ενώ το υπόλοιπο τμήμα (ή καθόλου) απορρέει επιφανειακά, ως άμεση απορροή.

- Η διηθητικότητα του εδάφους εκτιμάται από την ακόλουθη εμπειρική σχέση, συναρτήσει της μέγιστης δυνατικής διηθητικότητας, i_0 , και του ποσοστού πλήρωσης της ανώτερης ακόρεστης ζώνης σε υγρασία, s_{2t}/k , δηλαδή:

$$i_{\max,t} = i_0 \exp (-s_{2t}/k) \quad (4.5)$$

Σύμφωνα με την παραπάνω έκφραση, αν η ανώτερη ζώνη είναι εντελώς ξηρή, δηλαδή $s_2 = 0$, τότε το έδαφος μπορεί να απορροφήσει ποσότητα ίση με τη μέγιστη δυνητική διηθητικότητα, i_0 , που αποτελεί παράμετρο του μοντέλου και εξαρτάται από το εδαφικό υλικό. Αντίθετα, αν το ανώτερο στρώμα του εδάφους είναι κορεσμένο, ήτοι $s_2 = k$ (όπου k η χωρητικότητα της δεξαμενής εδαφικής υγρασίας), τότε το έδαφος μπορεί δυνητικά να απορροφήσει ποσότητα ίση με $0.367i_0$. Η παραπάνω σχέση εξασφαλίζει ότι κατά τη διάρκεια ισχυρών επεισοδίων βροχής, η διηθητικότητα του εδάφους μειώνεται, όπως προβλέπει η υδρολογική θεωρία.

- Η πραγματική διήθηση θα είναι ίση με το ελάχιστο μεταξύ της δυνητικής διηθητικότητας και της περιόδου βροχής, δηλαδή:

$$i_t = \min (\Delta p_t, i_{\max,t}) \quad (4.6)$$

- Η διηθούμενη ποσότητα νερού επιμερίζεται στην ανώτερη και κατώτερη ακόρεστη ζώνη, με βάση έναν συντελεστή β , που αποτελεί αδιάστατη παράμετρο του μοντέλου. Οι τιμές αποθήκευσης στις δύο ζώνες εδαφικής υγρασίας, οι οποίες στο μοντέλο αναπαρίστανται ως δεξαμενές, επικαιροποιούνται ως εξής:

$$s_{2t} \rightarrow s_{2t} + (1 - \beta) i_t \quad (4.7)$$

$$s_{3t} \rightarrow s_{3t} + \beta i_t \quad (4.8)$$

- Η ποσότητα νερού που απομένει πάνω στο έδαφος αναλώνεται, καταρχήν, σε απώλειες λόγω άμεσης εξάτμισης, σύμφωνα με τη σχέση:

$$e_{Dt} = \min [\Delta p_t - i_t, e_{Pt} - e_{Ct}] \quad (4.9)$$

- Η υπολειπόμενη ποσότητα αποτελεί την άμεση απορροή, η οποία πραγματοποιείται στην επιφάνεια του εδάφους, χωρίς να έχει μεσολαβήσει διήθησή της στο έδαφος. Η απορροή αυτή υπολογίζεται ως εξής:

$$q_{Dt} = \Delta p_t - i_t - e_{Dt} \quad (4.10)$$

- Οι διεργασίες της άνω δεξαμενής είναι η εδαφική εξατμοδιαπνοή, η υποερμική απορροή και η απορροή λόγω κορεσμού. Για την εδαφική εξατμοδιαπνοή της ανώτερης ακόρεστης ζώνης θεωρείται ότι μπορεί να ικανοποιηθεί το σύνολο της υπολειπόμενης θεωρητικής ζήτησης, εφόσον υπάρχει επάρκεια υγρασίας, δηλαδή:

$$e_{St} = \min [s_{2t}/\Delta t, e_{Pt} - e_{Ct} - e_{Dt}] \quad (4.11)$$

- Μετά την αφαίρεση της εν λόγω ποσότητας, δηλαδή $s_{2t} \rightarrow s_{2t} - e_{St}$, εξετάζεται αν η διαθέσιμη υγρασία υπερβαίνει το κατώφλι k_H , που αποτελεί παράμετρο του μοντέλου με διαστάσεις ισοδύναμου ύψους νερού, οπότε παράγεται υποερμική απορροή σύμφωνα με τη σχέση:

$$q_{Ht} = \max [0, \lambda (s_{2t} - k_H)] \quad (4.12)$$

όπου λ αδιάστατη παράμετρος (συντελεστής στείρευσης), που σχετίζεται με την οριζόντια υδραυλική αγωγιμότητα του ρηχού εδαφικού στρώματος.

- Αν μετά την αφαίρεση της υποδερμικής ροής, δηλαδή $s_{2t} \rightarrow s_{2t} - q_{Ht}$, η τρέχουσα τιμή της εδαφικής υγρασίας ξεπερνά τη χωρητικότητα της δεξαμενής, k , που αποτελεί παράμετρο του μοντέλου με διαστάσεις ισοδύναμου ύψους νερού, παράγεται απορροή λόγω κορεσμού του εδάφους από κάτω, με τη μορφή υπερχειλίσης της δεξαμενής, δηλαδή:

$$q_{St} = \max [0, s_{2t} - k] \quad (4.13)$$

Συνεπώς, η τελική τιμή της εδαφικής υγρασίας στην ανώτερη ακόρεστη ζώνη δεν μπορεί να υπερβεί την χωρητικότητα k . Η απορροή λόγω κορεσμού, μαζί με την άμεση απορροή, αποτελούν τις δύο συνιστώσες της επιφανειακής απορροής.

- Οι υδρολογικές διεργασίες της κάτω δεξαμενής, που αντιπροσωπεύει την κατώτερη ακόρεστη ζώνη, αυτές είναι η βαθιά εξατμοδιαπνοή και η κατείσδυση. Εφόσον δεν έχει ικανοποιηθεί πλήρως η θεωρητική ζήτηση εξατμοδιαπνοής, δηλαδή $e_{Pt} - e_{Ct} - e_{Dt} - e_{St} > 0$, τότε μια ισόποση ποσότητα υγρασίας θεωρείται ότι ανυψώνεται προς την ανώτερη ζώνη, μέσω των δυνάμεων μύζησης. Η εν λόγω ποσότητα δίνεται από τη σχέση:

$$u_t = \min (s_{3t}/\Delta t, e_{Pt} - e_{Ct} - e_{Dt} - e_{St}) \quad (4.14)$$

και προστίθεται στην αποθηκευμένη ποσότητα της άνω δεξαμενής, δηλαδή $s_{2t} \rightarrow s_{2t} + u_t$, ενώ αφαιρείται από την αποθήκευση της κάτω δεξαμενής, ήτοι $s_{3t} \rightarrow s_{3t} - u_t$.

- Η παραγόμενη βαθιά εξατμοδιαπνοή εξαρτάται από το βαθμό κορεσμού της ανώτερης ζώνης, σύμφωνα με την εμπειρική σχέση:

$$e_{Lt} = (e_{Pt} - e_{Ct} - e_{Dt} - e_{St}) (s_{2t} / k)^{2/3} \quad (4.15)$$

- Η κατείσδυση προς τα βαθύτερα στρώματα (κορεσμένη ζώνη) δίνεται από τη σχέση:

$$g_t = \mu s_{3t} \quad (4.16)$$

όπου μ αδιάστατη παράμετρος (συντελεστής στείρευσης), που σχετίζεται με την κατακόρυφη υδραυλική αγωγιμότητα εδάφους.

- Η τελική αποθήκευση υγρασίας στην άνω και κάτω ακόρεστη ζώνη υπολογίζεται από τις αντίστοιχες εξισώσεις υδατικού ισοζυγίου, δηλαδή:

$$s_{2,t+1} = s_{2t} + (1 - \beta) i_t + u_t - e_{St} - e_{Lt} - q_{Ht} - q_{St} \quad (4.17)$$

$$s_{3,t+1} = s_{3t} + \beta i_t - u_t - g_t \quad (4.18)$$

Η δομή του υπόγειου μοντέλου είναι πολύ απλή, αφού αποτελείται από μια θεωρητική δεξαμενή άπειρης χωρητικότητας, η λειτουργία της οποίας φαίνεται στο Σχήμα 4.3. Η δεξαμενή αυτή τροφοδοτείται από την κατείσυση g_t των υπερκείμενων στρωμάτων, δηλαδή:

$$s_{Gt} \rightarrow s_{Gt} + g_t \quad (4.19)$$

Όταν η αποθηκευμένη ποσότητα υπόγειου νερού, s_{Gt} , ξεπεράσει ένα κατώφλι k_G , που αποτελεί παράμετρο του μοντέλου, παράγεται βασική απορροή q_{Bt} με την μορφή εκροής από μια οριζόντια οπή και εφαρμογή ενός συντελεστή στείρευσης φ , δηλαδή:

$$q_{Bt} = \max [0, \varphi (s_{Gt} - k_G)] \quad (4.20)$$

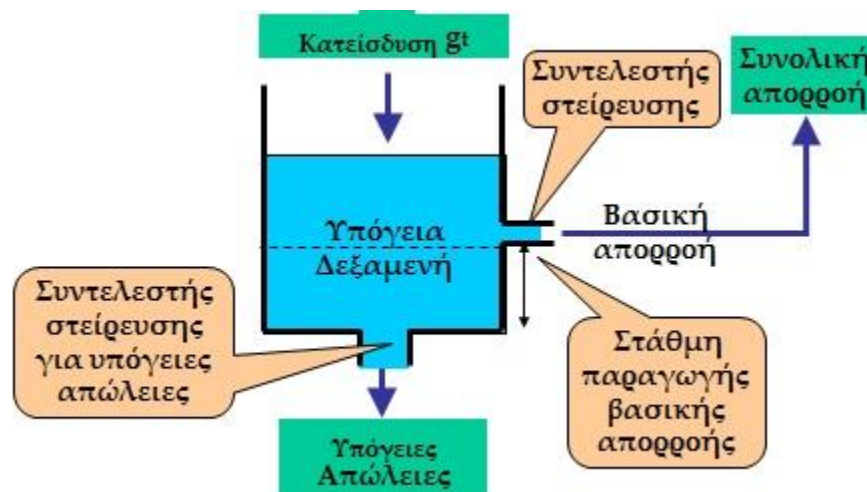
Η παραπάνω ποσότητα προστίθεται στην συνολική απορροή του ποταμού. Τέλος, ένα ποσοστό της αποθήκευσης (παράμετρος στείρευσης ξ) θεωρείται ότι διαφεύγει από τη δεξαμενή μέσω μιας κατακόρυφης οπής, σύμφωνα με τη σχέση:

$$l_t = \xi s_{Gt} \quad (4.21)$$

Η ποσότητα αυτή αντιπροσωπεύει τις διαφυγές υπόγειου νερού προς γειτονικούς υδροφορείς ή τη θάλασσα.

Η τελική αποθήκευση υπόγειου νερού δίνεται από την εξίσωση ισοζυγίου:

$$s_{G,t+1} = s_{Gt} + g_t - q_{Bt} - l_t \quad (4.22)$$

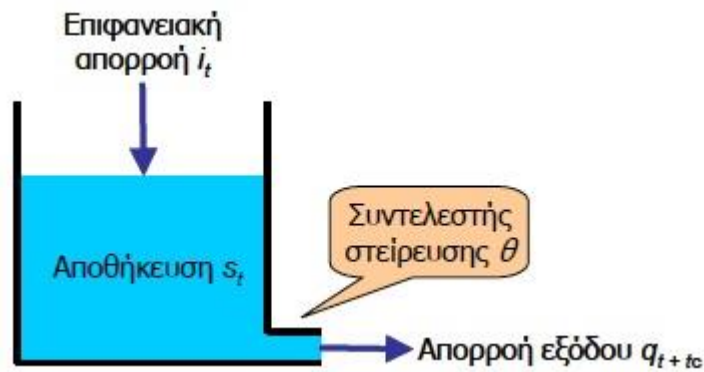


Σχήμα 4.3: Σχηματική αναπαράσταση του μοντέλου υπόγειων διεργασιών (Ευστρατιάδης κ.ά., 2014)

Στην ωριαία προσομοίωση, για την διόδευση της επιφανειακής απορροής, η θεώρηση της ακαριαίας μεταφοράς της στον κόμβο εξόδου της λεκάνης δεν είναι ρεαλιστική. Στην πραγματικότητα, τόσο η άμεση απορροή, q_{Dt} , όσο και η απορροή λόγω κορεσμού, q_{St} , κινούνται

πάνω στην εδαφική επιφάνεια, και μέσω των μισγαγγειών και μη διαμορφωμένων πλαγιών φτάνουν στην έξοδο της λεκάνης εξομαλυμένες και με χρονική υστέρηση. Αντίστοιχες είναι οι διεργασίες της υποερμικής ροής, q_{Ht} , η οποία διοδεύεται μέσω του υπεδάφους, με ρυθμό που εξαρτάται από την τιμή του συντελεστή στείρευσης λ , καθώς και της βασικής απορροής, q_{Bt} , η οποία διοδεύεται μέσω του υπόγειου υδροφορέα, με ρυθμό που εξαρτάται από την τιμή του συντελεστή στείρευσης φ .

Προκειμένου να απεικονιστεί πιο ρεαλιστικά η διαδικασία διόδευσης της απορροής που παράγεται στο έδαφος, δηλαδή του αθροίσματος $q_{Dt} + q_{St}$, μέχρι την έξοδο της λεκάνης (εδαφική απορροή, i_t), εφαρμόζεται ένας μετασχηματισμός που βασίζεται στην εφαρμογή ενός μοντέλου γραμμικού ταμιευτήρα με χρονική μετατόπιση, η λειτουργία του οποίου απεικονίζεται στο Σχήμα 4.4. Ο ταμιευτήρας, που έχει άπειρη χωρητικότητα, δέχεται ως εισροή την επιφανειακή απορροή της λεκάνης, i_t , ενώ η εκροή εκφράζει τον χωροχρονικό μετασχηματισμό της σε απορροή, q_t , στον κόμβο εξόδου. Στο σχήμα αυτό, η αποθήκευση s_t εκφράζει την ανάσχεση της απορροής.



Σχήμα 4.4: Σχηματική παράσταση μοντέλου γραμμικού ταμιευτήρα για τη διόδευση της εδαφικής απορροής της λεκάνης (Ευστρατιάδης κ.ά., 2014)

Το μοντέλο διόδευσης περιλαμβάνει δύο παραμέτρους:

- τον συντελεστή στείρευσης της εδαφικής απορροής θ , που εκτιμάται μέσω βαθμονόμησης·
- τη χρονική υστέρηση, που θεωρείται ότι ταυτίζεται με τον χρόνο συγκέντρωσης, t_c .

Ο χρόνος συγκέντρωσης της λεκάνης εκτιμάται από την εμπειρική σχέση Giandotti:

$$t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{\Delta z}} \quad (4.23)$$

όπου t_c ο χρόνος συγκέντρωσης (h), A η επιφάνεια της υπολεκάνης (km^2), L το μήκος της κύριας μισγάγκειας (km), η οποία ορίζεται από το πιο απομακρυσμένο σημείο της μέχρι τη διατομή

εξόδου, και Δz η υψομετρική διαφορά του μέσου υψόμετρου της λεκάνης από το υψόμετρο της εξόδου της (m).

Η επίλυση του μοντέλου βασίζεται σε ένα ρητό (βήμα-προς-βήμα) αριθμητικό σχήμα. Έστω ότι στο χρονικό βήμα t είναι γνωστά η εισροή (εδαφική απορροή) i_t και η αποθήκευση s_{t-1} .

Αρχικά, το απόθεμα του ταμιευτήρα αυξάνει σε:

$$s_t = s_{t-1} + i_t \Delta t \quad (4.24)$$

Η εκροή (δηλαδή η απορροή εξόδου) θεωρείται ότι παράγεται με υστέρηση t_c , και εκτιμάται από τη σχέση:

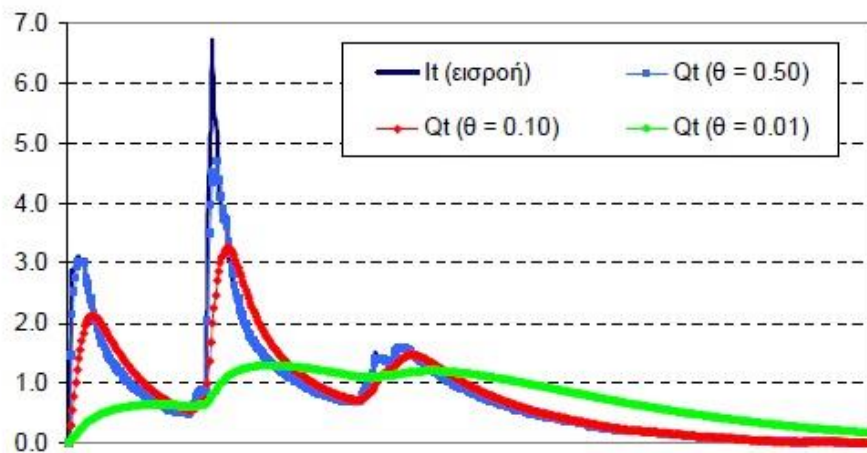
$$q_t + t_c = \theta s_t \quad (4.25)$$

Στην παραπάνω τιμή προστίθεται η υποερμική ροή που παράγεται στην λεκάνη, καθώς και η βασική ροή, συνθέτονται έτσι το πλήρες υδρογράφημα στην εξόδό της.

Σημειώνεται ότι για την εφαρμογή του αριθμητικού σχήματος ο χρόνος συγκέντρωσης πρέπει να στρογγυλευτεί στην εγγύτερη ακέραια τιμή. Επιπλέον, η αποθήκευση για τα πρώτα αυτά χρονικά βήματα θεωρείται μηδενική. Τελικά, η παραγόμενη εκροή αφαιρείται από το απόθεμα του ταμιευτήρα, το οποίο επικαιροποιείται σε:

$$s_t \rightarrow s_t - q_t + t_c \Delta t \quad (4.26)$$

Η παράμετρος στείρευσης θ λαμβάνει τιμές από 0 έως 1. Για $\theta = 1$, πραγματοποιείται απλή χρονική μετατόπιση της επιφανειακής απορροής για χρονικό διάστημα ίσο με τον χρόνο συγκέντρωσης της λεκάνης (σε ακέραιες ώρες). Όσο η τιμή του θ μειώνεται, το σχήμα του υδρογραφήματος εξόδου εξομαλύνεται. Χαρακτηριστικά παραδείγματα δίνονται στο Σχήμα 4.5.



Σχήμα 4.5: Παραδείγματα υδρογραφήματων εξόδου που παράγονται (χωρίς χρονική μετατόπιση) για δεδομένη χρονοσειρά εισροών από γραμμικό ταμιευτήρα για διαφορετικές τιμές του συντελεστή στείρευσης θ .

4.4 Διαμόρφωση χρονοσειρών εισόδου

Στο αδιαμέριστο υδρολογικό μοντέλο απαιτείται η εισαγωγή τριών χρονοσειρών:

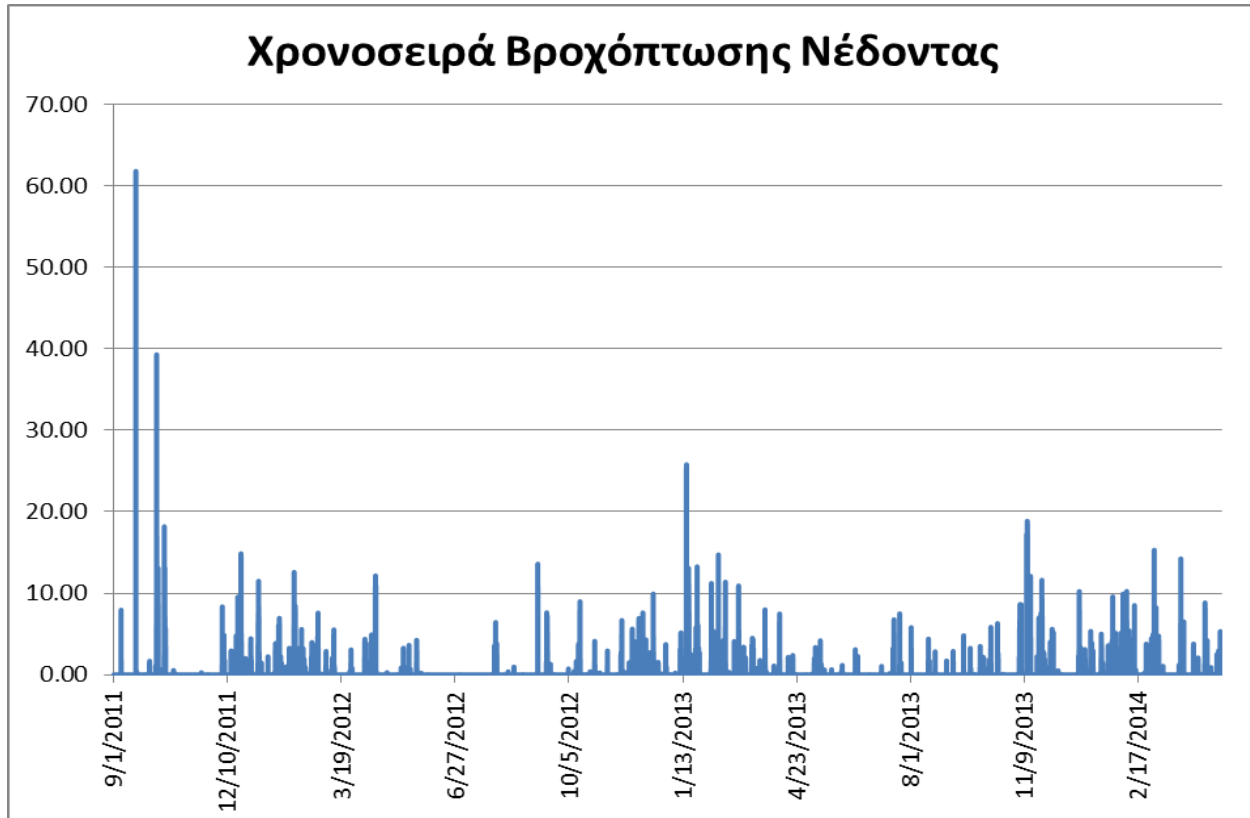
- Ωριαίας βροχόπτωσης, ανηγμένης στην επιφάνεια της λεκάνης (mm)
- Ωριαίας δυναμικής εξατμοδιαπνοής, ανηγμένης στην επιφάνεια της λεκάνης (mm)
- Ωριαίας παροχής στην έξοδο της λεκάνης (m^3/s)

Καθώς οι δύο λεκάνες θα μοντελοποιηθούν στο σύνολο τους, χωρίς την χρήση υπολεκάνων, στο υδρολογικό μοντέλο θα εισαχθούν οι χρονοσειρές επιφανειακής βροχόπτωσης και δυναμικής εξατμοδιαπνοής για κάθε μελετούμενη λεκάνη. Οι σημειακές παρατηρημένες χρονοσειρές της βροχόπτωσης στους μετεωρολογικούς σταθμούς παρέχονται σε 10-λεπτο και 15-λεπτο βήμα και είναι αναγκαία η αναγωγή τους σε ωριαίο βήμα, με χρήση του λογισμικού Υδρογνώμων.

4.4.1 Χρονοσειρές βροχόπτωσης

Για την παραγωγή των χρονοσειρών είναι απαραίτητη η εφαρμογή της μεθόδου επιφανειακής ολοκλήρωσης Thiessen για τις δυο λεκάνες. Υπενθυμίζεται εδώ ότι η μέθοδος Thiessen βασίζεται στην γεωμετρική κατασκευή ζωνών επιρροής για κάθε σταθμό μέσω χάραξης των μεσοκαθέτων των ευθύγραμμων τμημάτων που συνδέουν ανά δύο τους εγκατεστημένους σταθμούς (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999).

Στη λεκάνη απορροής του Νέδοντα έχουμε μετρήσεις της βροχόπτωσης για όλο το χρονικό διάστημα της προσομοίωσης, καθώς έχει γίνει συμπλήρωση των μετρήσεων στους σταθμούς Λατομείο Μπάκα, Νέδουσα, Αλαγονία και Πολιανή (Σχήμα 4.6). Έτσι με τη βοήθεια της επιφανειακής ολοκλήρωσης Thiessen και με συντελεστές 0.22 για την Αλαγονία, 0.32 για τον Καρβελιώτη, 0.18 για το Λατομείο Μπάκα, 0.23 για την Νέδουσα και 0.05 για την Πολιανή εκτιμήθηκε η χρονοσειρά της παρατηρημένης βροχόπτωσης για να εισαχθεί στο υδρολογικό μοντέλο.



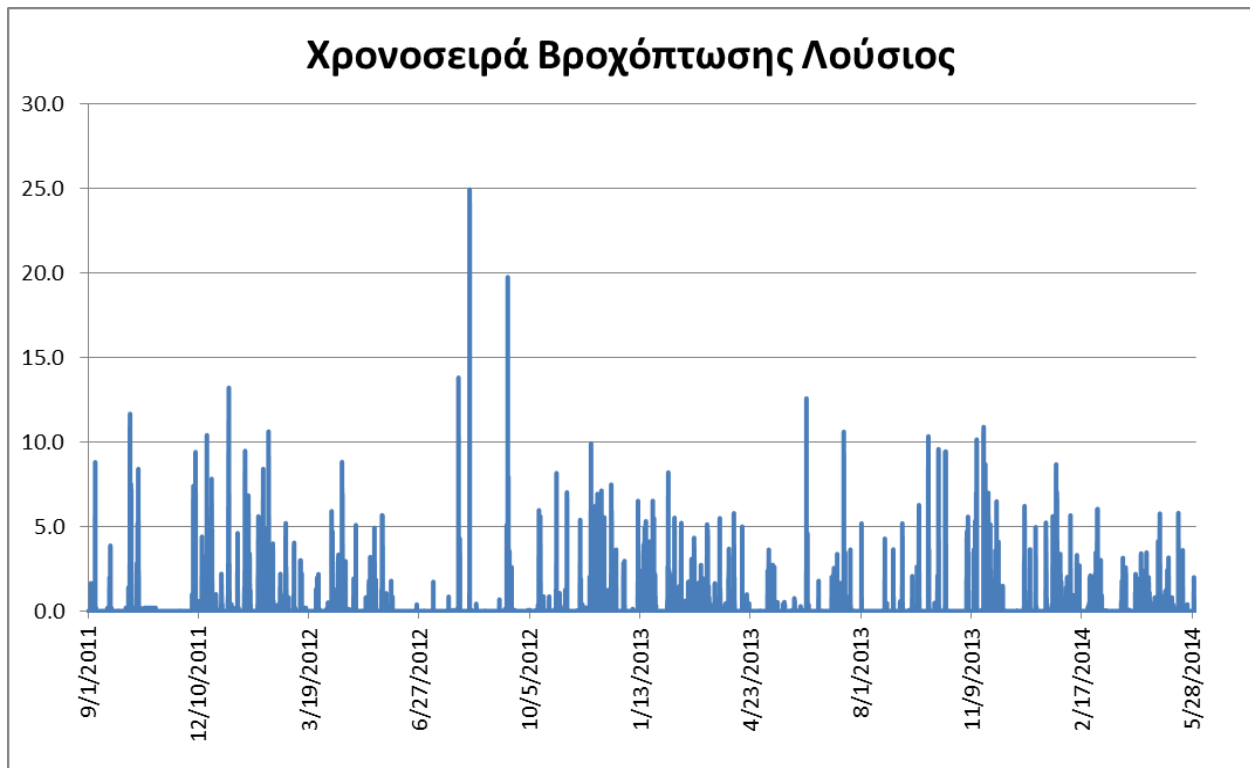
Σχήμα 4.6: Η παρατηρημένη χρονοσειρά βροχόπτωσης, που εισάγεται για την προσομοίωση στο υδρολογικό μοντέλο του Νέδοντα

Στη λεκάνη απορροής του Λούσιου τα κενά που υπήρχαν στις μετρήσεις της βροχής δεν συμπληρώθηκαν με αναγωγή από γειτονικούς σταθμούς, καθώς η χωρική μεταβλητότητα της βροχόπτωσης στην κλίμακα του επεισοδίου είναι πολύ μεγάλη. Συνεπώς, χρησιμοποιήθηκε η επιφανειακή ολοκλήρωση Thiessen, αλλά αυτή τη φορά με διαφορετικούς συντελεστές για διάφορα χρονικά διαστήματα. Πιο συγκεκριμένα:

- Από 1/9/2011 01:00 έως 16/3/2012 15:00 υπάρχουν μετρήσεις μόνο για τον μετεωρολογικό σταθμό στην Ελάτη (δεν είχαν τοποθετηθεί οι υπόλοιποι σταθμοί), και έτσι η χρονοσειρά για αυτό το χρονικό διάστημα ισούται με την παρατηρημένη χρονοσειρά βροχόπτωσης στην Ελάτη.
- Από 16/3/2012 16:00 έως 27/10/2012 17:00 υπάρχουν μετρήσεις στους σταθμούς της Στεμνίτσας και της Ελάτης και γίνεται επιφανειακή ολοκλήρωση με συντελεστές Thiessen 0.62 και 0.32, αντίστοιχα.
- Από 27/10/2012 18:00 έως 8/11/2012 12:00 υπάρχουν μετρήσεις σε όλους τους σταθμούς εκτός από την Δημητσάνα, και οι συντελεστές Thiessen είναι 0.56 για την Στεμνίτσα, 0.22 για τα Λαγκάδια, και 0.22 για την Ελάτη.

- Από 8/11/2012 13:00 έως 3/5/2014 11:00 υπάρχουν μετρήσεις σε όλους τους σταθμούς της λεκάνης και γίνεται επιφανειακή ολοκλήρωση Thiessen με συντελεστές 0.38 για την Στεμνίτσα, 0.31 για την Δημητσάνα, 0.13 για τα Λαγκάδια, και 0.18 για την Ελάτη.
- Από 3/5/2014 12:00 έως 8/5/2014 13:00 υπάρχουν μετρήσεις στους σταθμούς της Δημητσάνας και της Ελάτης και γίνεται ολοκλήρωση Thiessen με συντελεστές 0.71 και 0.29, αντίστοιχα
- Τέλος, από 8/5/2014 14:00 έως και το τέλος της περιόδου προσομοίωσης (31/5/2014 23:00), υπάρχουν μετρήσεις μόνο στην Ελάτη, οπότε θεωρείται ότι η παρατηρημένη χρονοσειρά της λεκάνης ταυτίζεται με τη σημειακή μέτρηση βροχής στην Ελάτη.

Με χρονολογική παράθεση των παραπάνω χρονοσειρών, εκτιμήθηκε η παρατηρημένη χρονοσειρά βροχόπτωσης για να εισαχθεί στο υδρολογικό μοντέλο της λεκάνης του Λούσιου (Σχήμα 4.7). Οι συντελεστές Thiessen για τους παραπάνω διαφορετικούς συνδυασμούς των σταθμών υπολογίστηκαν με την βοήθεια του λογισμικού ArcMap της συλλογής λογισμικών ArcGIS.



Σχήμα 4.7: Η παρατηρημένη χρονοσειρά βροχόπτωσης, που εισάγεται για την προσομοίωση στο υδρολογικό μοντέλο του Λούσιου

4.2.2 Χρονοσειρές δυνητικής εξατμοδιαπνοής

«Η δυνητική εξατμοδιαπνοή αποτελεί δεδομένο εισόδου των υδρολογικών μοντέλων συνεχούς προσομοίωσης, και εκφράζει τη θεωρητική ζήτηση της λεκάνης σε νερό που καταναλώνεται σε απώλειες εξάτμισης από το έδαφος καθώς και από μόνιμες ή περιστασιακές υδάτινες επιφάνειες, και σε απώλειες λόγω των διεργασιών διαπνοής των φυτών.» (Ευστρατιάδης κ.ά., 2014). Στην παρούσα εργασία για την εκτίμηση της δυνητικής εξατμοδιαπνοής σε ημερήσια κλίμακα, εφαρμόστηκε μια παραμετρική μέθοδος που αναπτύχθηκε από τους *Koutsogiannis & Xanthopoulos* και αναλύθηκε με δεδομένα ενός μεγάλου αριθμού μετεωρολογικών δεδομένων στην Ελλάδα (*Tegos et al.*, 2013). Σύμφωνα με αυτήν την μέθοδο η εξατμοδιαπνοή εξαρτάται από την ηλιακή ακτινοβολία και την θερμοκρασία. Η ηλιακή ακτινοβολία είναι θεωρητικό μέγεθος που εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος και την εποχή, ενώ η θερμοκρασία εκτιμάται με βάση επίγειες παρατηρήσεις από μετεωρολογικούς σταθμούς.

Η μέθοδος Penman-Monteith, που θεωρείται η πλέον τεκμηριωμένη μέθοδος εκτίμησης της εξατμοδιαπνοής εκφράζεται στην παρακάτω μορφή:

$$E = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_n}{\lambda} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} F(u) D \quad (4.27)$$

Η μέθοδος των *Koutsogiannis & Xanthopoulos*, αποτελεί μια παραμετρική απλοποίηση της παραπάνω μεθόδου, όπου ο αριθμητής συνδέεται γραμμικά με την εξωγήινη ηλιακή ακτινοβολία ενώ ο παρανομαστής συνδέεται γραμμικά με φθίνων τρόπο με τη θερμοκρασία. Συγκεκριμένα, πρότειναν τον τύπο:

$$E = \frac{aR_a + b}{1 - cT_a} \quad (4.28)$$

Όπου,

E η εξάτμιση σε mm/d

R_a η ηλιακή ακτινοβολία σε kJ/(m²d)

T_a η θερμοκρασία σε °C και

a, b, c παράμετροι.

Η παράμετρος *a* (kg/kJ) εκφράζει το μέσο ποσοστό της ενέργειας που προσλαμβάνεται από τον ήλιο, η οποία, αφού φτάσει στην επιφάνεια της γης, μετασχηματίζεται σε λανθάνουσα θερμότητα, τροφοδοτώντας έτσι τη διεργασία της εξάτμισης. Η παράμετρος *b* (kg/m²) ενσωματώνει την έλλειψη πληροφορίας για τις αεροδυναμικές διεργασίες, που οφείλονται στον άνεμο και το έλλειμμα υγρασίας στην ατμόσφαιρα. Τέλος η παράμετρος *c* (°C⁻¹), που εμπεριέχεται στην έκφραση $1 - c T_a$ προσεγγίζει τον πιο πολύπλοκο όρο της Penman-Monteith $1 + \gamma' / \Delta$. Υπενθυμίζεται ότι η ποσότητα γ' είναι συνάρτηση της επιφανειακής και

αεροδυναμικής αντίστασης, ενώ η κλίση της καμπύλης πίεσης κορεσμού Δ είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας T_a (Tegos *et al.*, 2013).

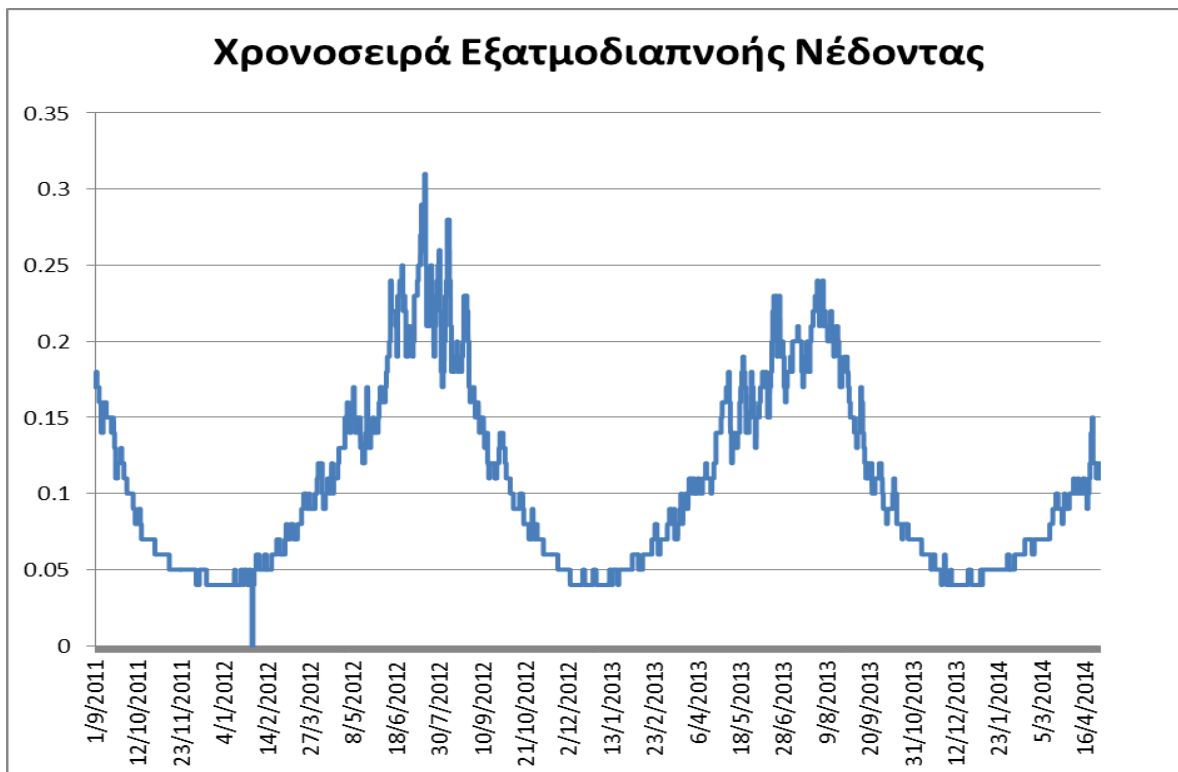
Για την εκτίμηση των παραμέτρων a , b και c , στην ελληνική επικράτεια, υιοθετήθηκε μια προσέγγιση βελτιστοποίησης, που βασίστηκε σε δείγματα μετεωρολογικών χρονοσειρών από 37 σταθμούς της ΕΜΥ, επαρκώς κατανομημένους στον ελληνικό χώρο (Τέγος, 2007). Σε κάθε σταθμό, υπολογίστηκαν οι χρονοσειρές μηνιαίας εξάτμισης και δυναμικής εξατμοδιαπνοής με τις αναλυτικές μεθόδους Penman και Penman-Monteith, αντίστοιχα, που χρησιμοποιήθηκαν ως χρονοσειρές αναφοράς. Για την αναπαραγωγή των τιμών αναφοράς εφαρμόστηκε η σχέση (4.28), θεωρώντας τις τρεις παραμέτρους ως μεταβλητές ελέγχου ενός προβλήματος βαθμονόμησης, και χρησιμοποιώντας ως μοναδικό δεδομένο εισόδου την χρονοσειρά μηνιαίας θερμοκρασίας κάθε σταθμού. Με τον τρόπο αυτό, σε κάθε σταθμό υπολογίστηκαν οι τιμές των παραμέτρων που εξασφαλίζουν την ελάχιστη απόκλιση μεταξύ των τιμών εξάτμισης (αντίστοιχα, δυναμικής εξατμοδιαπνοής) που εκτιμώνται από την παραμετρική μέθοδο σε σχέση με τις τιμές που προκύπτουν από την ακριβή μέθοδο Penman (αντίστοιχα, Penman-Monteith). Με γνωστές τιμές των παραμέτρων σε κάθε σταθμό, παρήχθησαν, ακόμη, χάρτες χωρικής μεταβολής τους. Αυτό επιτρέπει τον υπολογισμό της εξάτμισης (ή δυναμικής εξατμοδιαπνοής) σε οποιαδήποτε θέση, με εφαρμογή της (4.28), όπου οι τοπικές τιμές των παραμέτρων εκτιμώνται μέσω χωρικής παρεμβολής των σημειακών εκτιμήσεων.

Συνεπώς, για την εφαρμογή της μεθόδου απαιτήθηκε η εκτίμηση της μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας κάθε λεκάνης, με βάση τις σημειακές μετρήσεις θερμοκρασίας από το δίκτυο των μετεωρολογικών σταθμών της. Η χωρική αναγωγή των σημειακών μετρήσεων της θερμοκρασίας των σταθμών στο σύνολο της λεκάνης για την παραγωγή της χρονοσειράς της ημερήσιας θερμοκρασίας της κάθε λεκάνης έγινε με την μέθοδο Thiessen και οι τιμές των συντελεστών παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1: Συντελεστές Thiessen για τους σταθμούς στις λεκάνες του Νέδοντα και του Λούσιου

		Λούσιος				
		Έλατη	Λαγκάδια	Στεμνίτσα	Δημητσάνα	
Συντελεστής Thiessen		0.18	0.13	0.38	0.31	
	Νέδοντας					
		Αλαγονία	Καρβελιώτης	Μπάκας	Νέδουσα	Πολιανή
Συντελεστής Thiessen		0.22	0.32	0.18	0.23	0.05

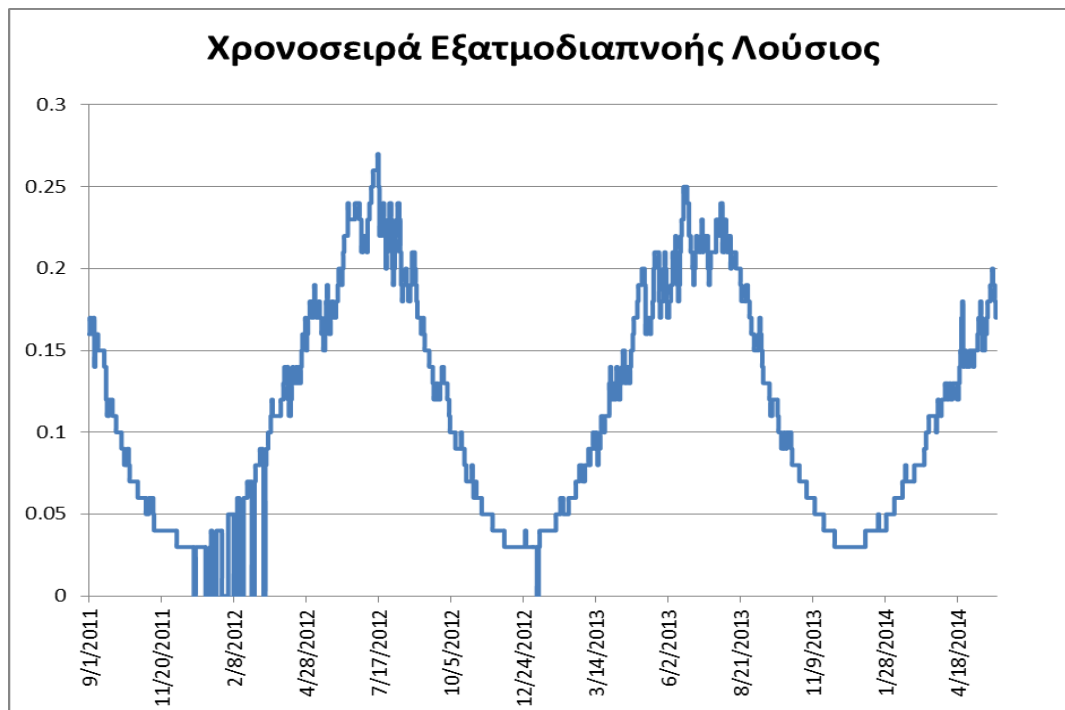
Για την εκτίμηση της ημερήσιας δυνητικής εξατμοδιαπνοής στο σύνολο της λεκάνης του Νέδοντα (Σχήμα 4.8) με βάση την χρονοσειρά της επιφανειακής θερμοκρασίας με την μέθοδο που περιγράφηκε παραπάνω, εφαρμόστηκαν οι παρακάτω τιμές των τριών παραμέτρων της σχέσης (4.28): $a = 0.000053 \text{ kg/kJ}$, $b = -0.064 \text{ kg/m}^2$, $c = 0.0253 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Το γεωγραφικό πλάτος επιλέχθηκε ίσο με $\varphi = 37.5^\circ$.



Σχήμα 4.8: Η χρονοσειρά εξατμοδιαπνοής που εισάγεται για την προσομοίωση του υδρολογικού μοντέλου στη λεκάνη του Νέδοντα

Αντίστοιχα, εκτίμηθηκαν οι τιμές των παραμέτρων a , b , c για τον υπολογισμό της ημερήσιας δυνητικής εξατμοδιαπνοής στη λεκάνη του Λούσιου (Σχήμα 4.9) με βάση την χρονοσειρά της επιφανειακής θερμοκρασίας.

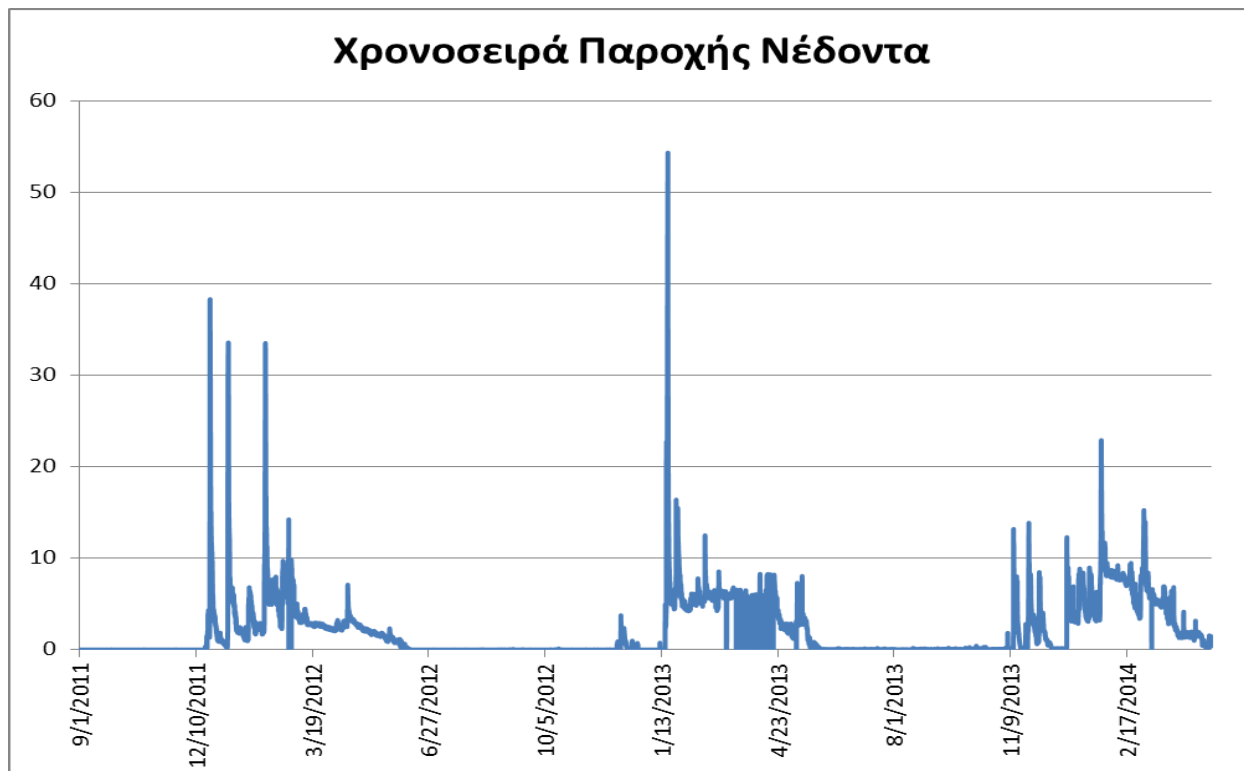
Στη συνέχεια, για τον ωριαίο επιμερισμό της ημερήσιας δυνητικής εξατμοδιαπνοής, θεωρήθηκε η στοιχειώδης προσέγγιση κατανομής του ημερήσιου ύψους δυνητικής εξατμοδιαπνοής σε 24 ίσες ωριαίες τιμές.



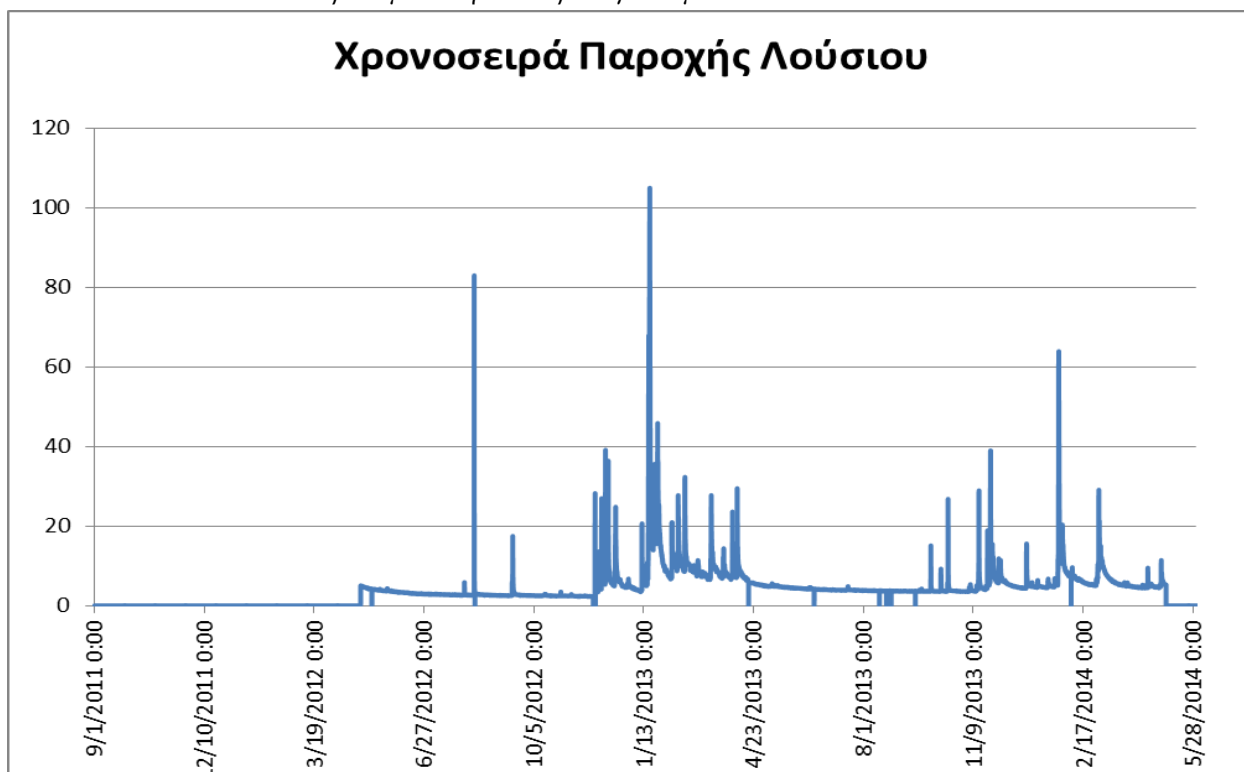
Σχήμα 4.9: Η χρονοσειρά εξατμοδιαπνοής που εισάγεται για την προσομοίωση του υδρολογικού μοντέλου στη λεκάνη του Λούσιου

4.4.3 Χρονοσειρές παροχής

Οι παρατηρημένες χρονοσειρές παροχής στους δύο υδρομετρικούς σταθμούς Λατομείο Μπάκα (για την λεκάνη του Νέδοντα, Σχήμα 4.10) και Γέφυρα Ατσίχολου (για την λεκάνη του Λούσιου, Σχήμα 4.11) ανακτήθηκαν από τον ιστότοπο deucalionproject.gr. Χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Υδρογνώμων για την αναγωγή του 15-λεπτου βήματος των χρονοσειρών παροχής (επιφανειακής απορροής) σε ωριαίο βήμα, παράγοντας και τις προς εισαγωγή χρονοσειρές απορροής για τα αντίστοιχα υδρολογικά μοντέλα.



Σχήμα 4.10: Η παρατηρημένη χρονοσειρά απορροής στη θέση Λατομείο Μπάκας, που εισάγεται για την προσομοίωση του υδρολογικού μοντέλου του Νέδοντα



Σχήμα 4.11: Η παρατηρημένη χρονοσειρά απορροής στη θέση Γέφυρα Ατσίχολου, που εισάγεται για την προσομοίωση του υδρολογικού μοντέλου του Λούσιου

Κεφάλαιο 5: Βαθμονόμηση υδρολογικού μοντέλου

5.1. Η έννοια της βαθμονόμησης

Η βαθμονόμηση (calibration) ενός υδρολογικού μοντέλου ορίζεται ως «**η συστηματική διαδικασία προσαρμογής των τιμών των παραμέτρων ενός υδρολογικού μοντέλου έτσι ώστε οι προσομοιωμένες αποκρίσεις του να προσεγγίζουν όσο το δυνατόν περισσότερο τις αντίστοιχες παρατηρημένες τιμές του**» (Ευστρατιάδης κ.ά., 2009). Κατά την διαδικασία της βαθμονόμησης δεν γίνεται μόνο εκτίμηση των παραμέτρων, αλλά και έλεγχος της ευρύτερης επίδοσης του μοντέλου ως προς διάφορα κριτήρια, αριθμητικά και εμπειρικά. Έτσι η επιτυχία της προϋποθέτει συστηματικές μετρήσεις των υδρολογικών μεταβλητών εισόδου (βροχόπτωση και θερμοκρασία για την εκτίμηση της δυναμικής εξατμοδιαπνοής) και μετρήσεις απόκρισης του φυσικού συστήματος (π.χ., απορροή), ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση των ιστορικών με τα προσομοιωμένα δεδομένα.

Η έννοια της βαθμονόμησης είναι στενά συνδεδεμένη με εκείνη της βελτιστοποίησης, όχι όμως με τη λογική βελτιστοποίησης της λειτουργίας του υπό μελέτη συστήματος ως προς κάποια εξωτερικά κριτήρια (όπως για παράδειγμα το κόστος ή η αξιοπιστία), αλλά βελτιστοποίησης της ίδιας της μαθηματικής δομής του, ώστε οι προσομοιωμένες τιμές να προσεγγίζουν καλύτερα τις παρατηρημένες (Ευστρατιάδης, 2009). Για αυτό το λόγο η εκτίμηση των παραμέτρων των υδρολογικών μοντέλων, σε αντίθεση με το ευθύ πρόβλημα βελτιστοποίησης, είναι γνωστή και ως *αντίστροφο πρόβλημα* (inverse problem).

Στη βαθμονόμηση τίθενται δύο θεμελιώδεις στόχοι που αφορούν αφενός στην εξασφάλιση επαρκούς προγνωστικής ικανότητας και αφετέρου στη διατήρηση συνέπειας με τον εννοιολογικό ορισμό των παραμέτρων (Efstratiadis and Koutsoyiannis, 2010· Nalbantis *et al.*, 2011). Ο πρώτος στόχος υποδηλώνει ότι το μοντέλο, αφού βαθμονομηθεί, αναπαράγει με ικανοποιητική ακρίβεια τις μετρημένες αποκρίσεις του συστήματος για δεδομένες φορτίσεις, ενώ ο δεύτερος στόχος εξασφαλίζει ότι οι παράμετροι που εντοπίζονται πράγματι εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του φυσικού συστήματος, και δεν είναι αποτέλεσμα μιας μαθηματικής διαδικασίας τύπου «μαύρου κουτιού», χωρίς δηλαδή φυσικό υπόβαθρο.

Αναμφίβολα, η επίτευξη των παραπάνω στόχων αποτελεί ένα δύσκολο εγχείρημα, δεδομένου ότι το μοντέλο αποσκοπεί στην αναπαράσταση σύνθετων φυσικών συστημάτων μεγάλης, σχετικά, κλίμακας, με συνδυαστική μοντελοποίηση των επιφανειακών και υπόγειων υδρολογικών διεργασιών αλλά και των ανθρωπογενών αλληλεπιδράσεων (εφόσον υπάρχουν). Αυτό σημαίνει ότι ο αριθμός των παραμέτρων είναι, αναγκαστικά, μεγάλος, που σε συνδυασμό με την πολυπλοκότητα αλλά και την αβεβαιότητα των διεργασιών δυσχεραίνουν σημαντικά τη διαδικασία βαθμονόμησης.

5.2 Τοποθέτηση του προβλήματος βαθμονόμησης

Έστω h η προσδιοριστική υπολογιστική διαδικασία που υλοποιεί το μοντέλο προσομοίωσης μιας υδρολογικής λεκάνης, και περιέχει n το πλήθος βαθμούς ελευθερίας (παραμέτρους). Έστω s_0 οι αρχικές και οριακές συνθήκες του μοντέλου, x οι χρονοσειρές φόρτισης, που είναι διαθέσιμες για χρονικό ορίζοντα T , και y οι χρονοσειρές των παρατηρημένων αποκρίσεων του συστήματος, για τον ίδιο χρονικό ορίζοντα. Αν $\theta = (\theta_1, \dots, \theta_n)$ είναι ένα δεδομένο σύνολο τιμών των παραμέτρων του μοντέλου, τότε η προσομοιωμένη απόκριση y' προκύπτει ως:

$$y' = h(s_0, x, \theta) \quad (5.1)$$

Στην παρούσα εργασία η απόκριση y αναφέρεται στην απορροή εξόδου των δύο λεκάνων.

Ως βαθμονόμηση νοείται ο εντοπισμός των πλέον πρόσφορων τιμών των παραμέτρων θ , με τις οποίες εξασφαλίζεται η προσαρμογή των αποκρίσεων του μοντέλου y' στις αντίστοιχες παρατηρήσεις y , μέσω μιας διαδικασίας δοκιμής-σφάλματος (trial and error). Συνεπώς, η βαθμονόμηση προϋποθέτει τη σύγκριση των προσομοιωμένων αποκρίσεων της λεκάνης σε σχέση με τις παρατηρημένες, με βάση κάποιο ποιοτικό ή εμπειρικό κριτήριο αξιολόγησης της συμπεριφοράς του μοντέλου. Εξετάζοντας διαφορετικούς συνδυασμούς παραμέτρων θ , επιλέγεται εκείνος ο συνδυασμός θ^* που επιτυγχάνει την καλύτερη (σύμφωνα με το κριτήριο που υιοθετείται) προσαρμογή στις ιστορικές αποκρίσεις της λεκάνης. Ο χειρισμός του παραπάνω προβλήματος μπορεί να γίνει με τους εξής τρόπους:

- Εμπειρική βαθμονόμηση
- Αυτόματη βαθμονόμηση
- Ημιαυτόματη βαθμονόμηση

Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε να γίνει ημιαυτόματη βαθμονόμηση, η οποία είναι μια διαδραστική προσέγγιση που επιδιώκει την επέμβαση του χρήστη στη διαδικασία βελτιστοποίησης των παραμέτρων, ώστε να «κατευθύνει» την αναζήτηση προς τις πλέον πρόσφορες περιοχές του πεδίου ορισμού τους. Πρόκειται για έναν συνδυασμό της παραδοσιακής χειρωνακτικής βαθμονόμησης και της πλήρως αυτοματοποιημένης προσέγγισης, με τη χρήση αλγορίθμων ολικής βελτιστοποίησης (Boyle *et al.*, 2000). Η διαδικασία της ημιαυτόματης βαθμονόμησης θα περιγραφεί πιο λεπτομερώς παρακάτω.

5.3 Κριτήρια καλής προσαρμογής

Για τον έλεγχο της προσαρμογής του μοντέλου στα ιστορικά δεδομένα, χρησιμοποιούνται τα κριτήρια καλής προσαρμογής, τα οποία τα οποία ουσιαστικά αποτελούν αριθμητικούς δείκτες που ελέγχουν της προσαρμογή του μοντέλου στα ιστορικά δεδομένα, δηλαδή κατά πόσο αποτελεσματικά προσομοιώνονται οι υδρολογικοί μηχανισμοί μιας περιοχής από το υδρολογικό μοντέλο, ώστε οι προσομοιωμένες χρονοσειρές απόκρισης να πλησιάζουν όσο το δυνατόν καλύτερα τις παρατηρημένες. Τα κριτήρια προσαρμογής αναφέρονται σε μία ή περισσότερες μεταβλητές απόκρισης. Γενικότερα, στο μοντέλο Υδρόγειος, εφόσον υιοθετείται η ημικατανεμημένη δομή του, ο έλεγχος προσαρμογής μπορεί να γίνει ως προς τις ακόλουθες μεταβλητές:

- παροχή κατάντη κόμβων του υδρογραφικού δικτύου·
- παροχή στην έξοδο υπολεκανών·
- παροχή πηγών·
- στάθμη υπόγειων δεξαμενών.

Στην παρούσα μελέτη ο έλεγχος γίνεται μόνο ως προς τις παρατηρημένες χρονοσειρές παροχής στην έξοδο των δύο λεκανών.

Οι ιστορικές χρονοσειρές ελέγχου μπορεί να μην είναι πλήρεις. Στην περίπτωση αυτή, η σύγκριση μεταξύ μετρημένων και προσομοιωμένων χρονοσειρών γίνεται προφανώς μόνο για το κοινό δείγμα τιμών τους. Για κάθε κριτήριο που αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη μεταβλητή, f_i , εισάγεται ένας μη αρνητικός συντελεστής βάρους, w_i . Με συνάθροιση των m επιμέρους κριτηρίων, προκύπτει ένα καθολικό μέτρο σφάλματος, $F(\theta)$, ως προς τις άγνωστες παραμέτρους, $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$, που αποτελεί τη στοχική συνάρτηση του προβλήματος βελτιστοποίησης, ήτοι:

$$F(\theta) = \sum_{i=1}^m w_i f_i(\theta) \quad (5.2)$$

Συμβατικά, όλα τα μέτρα ορίζονται κατά τρόπο ώστε η λύση του προβλήματος, η οποία αντιστοιχεί στις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων, $\theta^* = (\theta_1^*, \theta_2^*, \dots, \theta_n^*)$, να βρίσκεται στην κατεύθυνση ελαχιστοποίησης της στοχικής συνάρτησης. Είναι προφανές ότι με την εφαρμογή διαφορετικών συντελεστών βάρους, προκύπτει διαφορετική, κάθε φορά, βέλτιστη λύση.

5.3.1 Αποτελεσματικότητα - Αποτελεσματικότητα υψηλών παροχών

Στην παρούσα εργασία τα κριτήρια καλής προσαρμογής που επιλέχθηκαν είναι η αποτελεσματικότητα (efficiency) και μια τροποποιημένη εκδοχή της, που στη συνέχεια θα αναφέρεται ως αποτελεσματικότητα υψηλών παροχών.

Η αποτελεσματικότητα είναι ένα τυπικό στατιστικό κριτήριο καλής προσαρμογής, και είναι μάλιστα το περισσότερο χρησιμοποιούμενο μέτρο επίδοσης των υδρολογικών μοντέλων. Αποτελεί ουσιαστικά ένα μέτρο «απόστασης» μεταξύ των παρατηρημένων Q_0^t και των

προσομοιωμένων Q_m^t παροχών, για τον χρονικό ορίζοντα της περιόδου ελέγχου του μοντέλου, που συμβολίζεται με T . Αναφέρεται συχνά και ως συντελεστής Nash-Sutcliffe και δίνεται απο τον τύπο:

$$EFF=1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_0^t - Q_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_0^t - \overline{Q_0})^2} \quad (5.3)$$

όπου $\overline{Q_0}$ είναι η μέση τιμή της παρατηρημένης απορροής.

Ουσιαστικά, η αποτελεσματικότητα εκφράζει το ποσοστό της στατιστικής αβεβαιότητας που «εξηγείται» από το μοντέλο, ελέγχοντας κατά πόσο η προσομοιωμένη χρονοσειρά είναι καλύτερη εκτιμήτρια σε σχέση με τη μέση τιμή των παρατηρήσεων. Η θεωρητική τιμή της κυμαίνεται από $-\infty$ έως 1, με την μονάδα να υποδηλώνει τέλεια προσαρμογή του μοντέλου. Στην πράξη, τιμές 0.80-0.90 θεωρούνται πολύ ικανοποιητικές για την προσαρμογή του μοντέλου, ενώ τιμές γύρω στο 0.30 είναι οριακές για την αποδοχή του μοντέλου ως αντιπροσωπευτικού του προσομοιωμένου φυσικού συστήματος. Η μηδενική τιμή υποδηλώνει ότι το μοντέλο αποτελεί ισοδύναμη εκτιμήτρια με την παρατηρημένη μέση τιμή, δηλαδή η αβεβαιότητα ταυτίζεται σε αυτή την περίπτωση με την υδρολογική αβεβαιότητα. Τέλος, οι αρνητικές τιμές καθιστούν το μοντέλο εντελώς αναξιόπιστο για προγνώσεις.

Πάντως, ακόμα και υψηλές τιμές της αποτελεσματικότητας δεν διασφαλίζουν απαραίτητα καλή προγνωστική ικανότητα, καθώς το μέτρο αυτό είναι ευαίσθητο σε παράγοντες όπως το μέγεθος και η χρονική διακρίτοτητα του δείγματος, οι εξωκείμενες τιμές και η μεροληψία. Πιο συγκεκριμένα, λόγω του ότι οι διαφορές μεταξύ των παρατηρημένων και προσομοιωμένων τιμών είναι υψηλές στο τετράγωνο, οι υψηλές τιμές τους υπερεκτιμώνται, ενώ οι χαμηλές τους εμφανώς υποεκτιμώνται και επί της ουσίας δε λαμβάνονται υπόψη. Έτσι, αναφορικά με την ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας της πρόγνωσης, το μοντέλο οδηγείται σε μια υπερεκτίμηση σε περιόδους υψηλών απορροών και σε μια εμφανή υποεκτίμηση σε περιόδους χαμηλών παροχών, για τις οποίες ο δείκτης της αποτελεσματικότητας τίθεται προς αμφισβήτηση.

Για την μελέτη πλημμυρικών αιχμών και γενικότερα στις ωριαίες προσομοιώσεις, προκειμένου να εξασφαλιστεί η αναπαραγωγή των υψηλών τιμών των παροχών, έχει δημιουργηθεί ένα ειδικό μέτρο καλής προσαρμογής, η αποτελεσματικότητα υψηλών απορροών (high flow efficiency). Ουσιαστικά είναι μια παραλλαγή της αποτελεσματικότητας, με τη μοναδική διαφορά ότι αναφέρεται στις τιμές της παροχής που είναι μεγαλύτερες από τη μέση τιμή των παρατηρημένων παροχών ($Q_m^t > \overline{Q_0}$). Πρόκειται για ένα μέτρο το οποίο ενδείκνυται η συμπληρωματική στην αποτελεσματικότητα χρήση του για παρατηρημένες χρονοσειρές μη μόνιμης και χειμαρρικής απορροής.

5.4 Διαδικασία βαθμονόμησης

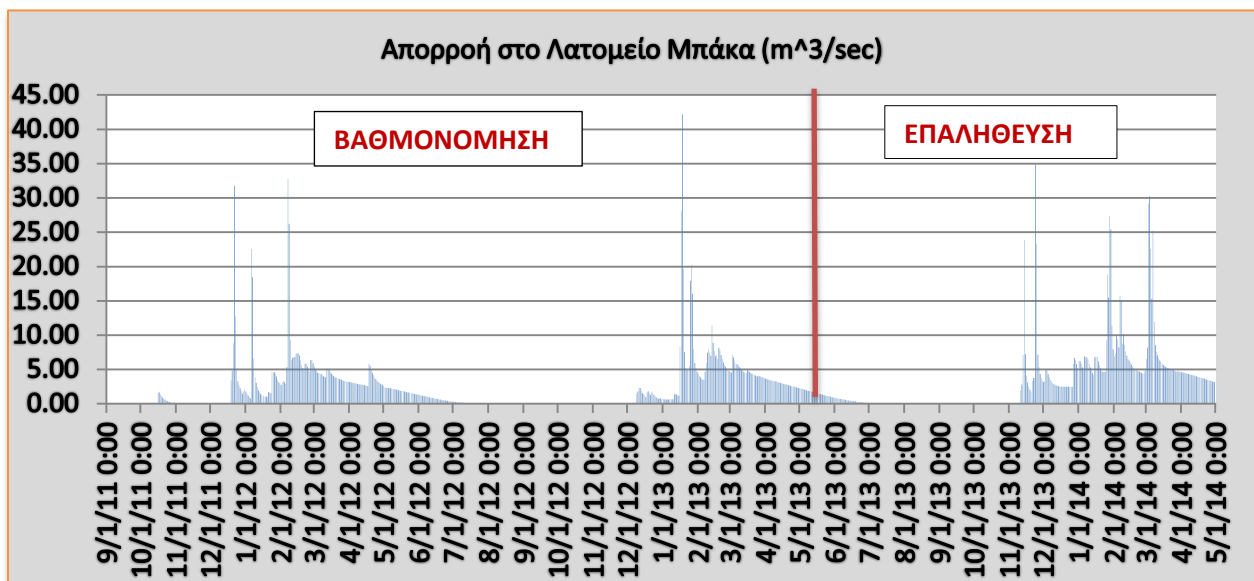
5.4.1. Ορισμός χρονικών περιόδων

Η περίοδος ελέγχου, που συνήθως ταυτίζεται με την περίοδο της παρατηρημένης χρονοσειράς χωρίζεται σε δυο υποπεριόδους: στην περίοδο βαθμονόμησης (calibration) και στην περίοδο επαλήθευσης (validation). Αυτό γίνεται για να μπορέσει να ικανοποιηθεί ο πρώτος στόχος της βαθμονόμησης (βλ. 5.1), δηλαδή ο έλεγχος της επαρκούς προγνωστικής ικανότητας του μοντέλου ως προς μια ανεξάρτητη περίοδο μετρήσεων.

Συγκεκριμένα, οι βέλτιστες παράμετροι που προκύπτουν μέσα από τη διαδικασία της βαθμονόμησης είναι λογικό να προσεγγίζουν τις παρατηρημένες τιμές για την περίοδο βαθμονόμησης. Όμως, δεν εξασφαλίζεται ότι με την εισαγωγή άλλων ιστορικών δεδομένων η προσέγγιση θα είναι εξίσου ικανοποιητική, καθώς είναι πιθανό το μοντέλο να λειτουργεί ως «μαύρο κουτί» και οι παράμετροι να μην αντιπροσωπεύουν μακροσκοπικά τα φυσικά χαρακτηριστικά του συστήματος. Για αυτόν το λόγο καθίσταται απαραίτητη η χρήση μιας μικρότερης αλλά σημαντικής περιόδου της συνολικής προσομοίωσης για την επαλήθευση της διαδικασίας. Η μέθοδος αυτή διαχωρισμού είναι γνωστή ως *data-split*.

Για τη λεκάνη του Νέδοντα, οι χρονικές περιόδους έχουν ως εξής (Σχήμα 5.1):

- Συνολική περίοδος προσομοίωσης: από 01/09/2011 01:00 πμ έως 30/04/2014 11:00 μμ
- Περίοδος βαθμονόμησης: από 01/09/2011 01:00 πμ έως 31/05/2013 11:00 μμ
- Περίοδος επαλήθευσης: από 01/06/2013 12:00 πμ έως 30/04/2014 11:00 μμ



Σχήμα 5.1: Ο διαχωρισμός (*data-split*) της περιόδου προσομοίωσης σε περίοδο βαθμονόμησης και επαλήθευσης, όπως αναπαρίσταται στην προσομοιωμένη απορροή για την λεκάνη του Νέδοντα.

Για την λεκάνη του Λούσιου, οι χρονικές περίοδοι έχουν ως εξής (Σχήμα 5.2):

- Συνολική περίοδος προσομοίωσης: από 01/09/2011 01:00 πμ έως 3/05/2014 10:00 πμ
- Περίοδος βαθμονόμησης: από 01/09/2011 01:00 πμ έως 30/06/2013 11:00 μμ
- Περίοδος επαλήθευσης: από 01/07/2013 12:00 πμ έως 3/05/2014 10:00 πμ



Σχήμα 5.2: Ο διαχωρισμός (data-split) της περιόδου προσομοίωσης σε περίοδο βαθμονόμησης και επαλήθευσης, όπως αναπαρίσταται στην προσομοιωμένη απορροή για την λεκάνη του Λούσιου.

5.4.2. Παράμετροι- Όρια παραμέτρων

Για το υδρολογικό μοντέλο τόσο στην λεκάνη του Νέδοντα, όσο και στην λεκάνη του Λούσιου επιλέχθηκε η χρήση 11 παραμέτρων για την επιφανειακή και την υπόγεια προσομοίωση. Συγκεκριμένα οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι εξής:

1. χωρητικότητα δεξαμενής κατακράτησης (r)
2. χωρητικότητα ανώτερης ακόρεστης ζώνης ($k-k_H$)
3. χωρητικότητα κατώτερης ακόρεστης ζώνης (k_H)
4. μέγιστη διηθητικότητα εδάφους (i_0)
5. ποσοστό επιμερισμού διήθησης (β)
6. συντελεστής στείρευσης υποδερμικής απορροής (λ)
7. συντελεστής στείρευσης για την κατείσδυση (μ)
8. συντελεστής στείρευσης βασικής ροής (φ)
9. στάθμη παραγωγής βασικής ροής (k_G)
10. συντελεστής στείρευσης για την εκροή σε γειτονικούς υδροφόρους ορίζοντες ή την θάλασσα (ξ)

11. συντελεστής στείρευσης μοντέλου διόδευσης (θ)

Μέσα στην παρένθεση φαίνονται οι συμβολισμοί των παραμέτρων στο μοντέλο που γράφτηκε στην γλώσσα προγραμματισμού R. Όλες οι χωρητικότητες των δεξαμένων και η στάθμη παραγωγής της βασικής ροής υπολογίζονται σε mm.

Εφόσον προσδιοριστούν οι προς βελτιστοποίηση παράμετροι, είναι απαραίτητη η προσέγγιση των ορίων τους (άνω και κάτω). Τα όρια των παραμέτρων τα έθεσε χειροκίνητα ο χρήστης εκφράζοντας τη «διαίσθησή» του σχετικά με την υδρολογική συμπεριφορά της λεκάνης προσδίδοντας ταχύτερη σύγκλιση στην όλη διαδικασία. Έτσι για κάθε μια παράμετρο ορίστηκε ένα άνω όριο (x_{up}) και ένα κάτω όριο (x_{low}), τα οποία ύστερα από κάθε επανάληψη της διαδικασίας του μοντέλου αλλάζουν ανάλογα με τα αποτελέσματα. Αν βρίσκονται κοντά στο άνω ή κάτω όριο που έχει τεθεί, τότε πρέπει να μεγαλώσει το εύρος τιμών, ώστε να ελεγχθεί η περίπτωση εύρεσης βέλτιστης λύσης στη γειτονική περιοχή του εφικτού χώρου. Η διαδικασία επαναλήφθηκε αρκετές φορές μέχρι η αποτελεσματικότητα και η αποτελεσματικότητα υψηλών απορροών να λάβουν ικανοποιητική τιμή. Τα όρια των παραμέτρων που τέθηκαν και οι τελικές τιμές των βέλτιστων παραμέτρων για κάθε μοντέλο, καθώς και η τελικές τιμές της αποτελεσματικότητας και της αποτελεσματικότητας υψηλών απορροών παρουσιάζονται στο τέλος του παρόντος κεφαλαίου.

5.4.3 Ορισμός στοχικής συνάρτησης

Η στοχική συνάρτηση προς βελτιστοποίηση (εν προκειμένω προς ελαχιστοποίηση) διαμορφώθηκε με δύο συνιστώσες:

- δείκτης αποτελεσματικότητας (efficiency) στη θέση μέτρησης στη έξοδο της λεκάνης απορροής, δηλαδή στο Λατομείο Μπάκα για το μοντέλο της λεκάνης του Νέδοντα και στη Γέφυρα Ατσίχολου για το μοντέλο της λεκάνης του Λούσιου
- δείκτης αποτελεσματικότητα υψηλών παροχών (high flow efficiency) στις ίδιες θέσεις ελέγχου.

Όπως είναι φανερό τα μεγέθη σταθμίστηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να δίνεται στην αναπαραγωγή των παροχών, που είναι και το βασικό κριτήριο ελέγχου της αξιοπιστίας του μοντέλου (Ζωγάκης, 2012).

5.4.4 Βαθμονόμηση παραμέτρων

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω για τη βαθμονόμηση των παραμέτρων ακολουθήθηκε μια διαδικασία ημιαυτόματης βαθμονόμησης. Είναι προφανές ότι δεν είναι λογικό να αναμένει κανείς ότι με μία μόνο μεμονωμένη αναζήτηση, έστω και με χρήση ενός εξελιγμένου αλγορίθμου βελτιστοποίησης, θα προσδιοριστούν οι κατάλληλες τιμές για τις παραμέτρους, αφού λόγω των πολλαπλών πηγών αβεβαιότητας και της πολυπλοκότητας του αλγορίθμου βελτιστοποίησης μια τέτοια διαδικασία δε μπορεί να δώσει καθόλου ικανοποιητικά

αποτελέσματα. Έτσι, καθόλη τη διάρκεια της βαθμονόμησης ελέγχονται οι τιμές των παραμέτρων, ώστε όταν προσεγγίζουν τα όρια τους, εξετάζεται το ενδεχόμενο διεύρυνσης των τιμών για την εύρεση βέλτιστης λύσης εκτός του τρέχοντος εφικτού χώρου. Το κύριο κριτήριο που κάνει τον μελέτητη να διευρύνει ή να περιορίζει τα όρια των παραμέτρων είναι η τιμή του δείκτη της αποτελεσματικότητας. Ο στόχος είναι ο δείκτης αυτός να προσεγγίσει όσο το δυνατόν πιο κοντά στην μονάδα, ενώ τιμές άνω του 0.70 θεωρήθηκαν ικανοποιητικές για την επίδοση του μοντέλου.

5.5 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

5.5.1 Λεκάνη Νέδοντα

Αποτελεσματικότητα- αποτελεσματικότητα υψηλών παροχών

Μετά από πολλές διαδοχικές δοκιμές με τη μεθοδολογία που περιγράφηκε προηγουμένως οι τελικές τιμές της αποτελεσματικότητας και της αποτελεσματικότητας υψηλών παροχών στο μοντέλο της λεκάνης του Νέδοντα για τις περιόδους βαθμονόμησης και επαλήθευσης φαίνονται στον Πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1: Οι τελικές τιμές των δεικτών αποτελεσματικότητας και αποτελεσματικότητας υψηλών παροχών για το μοντέλο στη λεκάνη του Νέδοντα και για τις δυο περιόδους

	NSE	NSE υψηλών παροχών
Βαθμονόμηση	0.868	0.827
Επαλήθευση	0.587	0.584

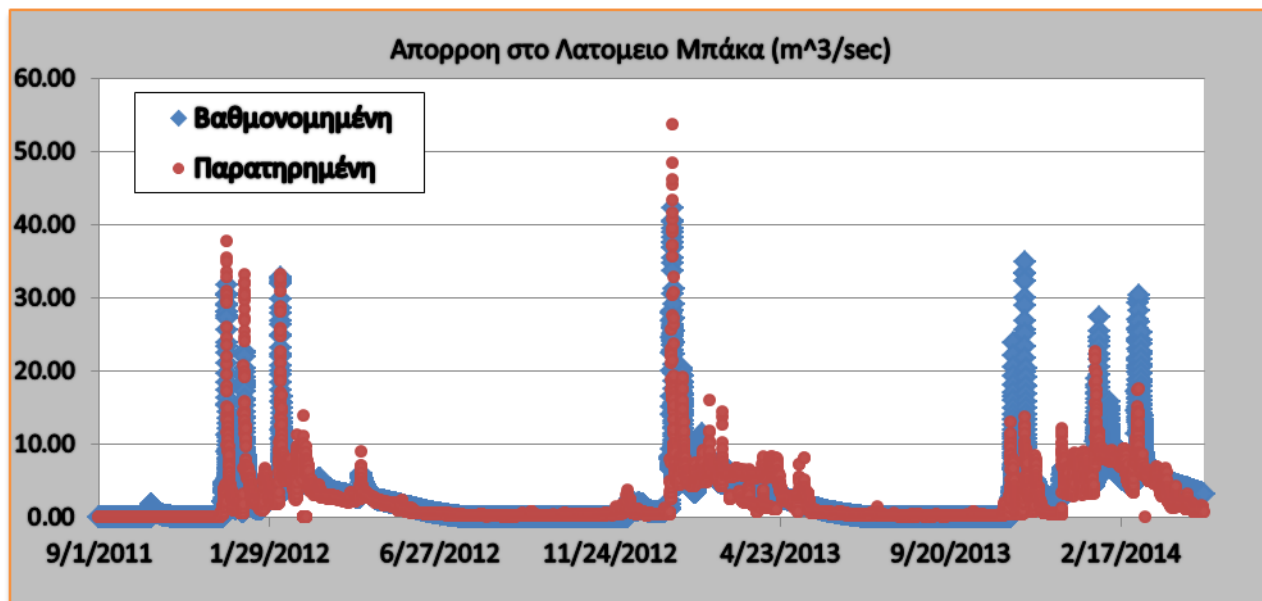
Από τον πίνακα μπορούμε να εξάγουμε τα εξής συμπεράσματα:

- Το μοντέλο παρουσιάζει εξαιρετική αποτελεσματικότητα για την περίοδο βαθμονόμησης και αποδεκτή επίδοση για την περίοδο επαλήθευσης (86.8% και 58.7% αντίστοιχα) στο σημείο ελέγχου στην έξοδο της λεκάνης στο Λατομείο Μπάκα.
- Όσον αφορά την αποτελεσματικότητα υψηλών παροχών, το μοντέλο εξάγει κι εδώ πολύ καλές τιμές για την περίοδο βαθμονόμησης και παρόμοια με παραπάνω αποτελέσματα για την περίοδο επαλήθευσης (82.7% και 58.4% αντίστοιχα).
- Η επίδοση του μοντέλου στην περίοδο βαθμονόμησης είναι εμφανώς καλύτερη από την επίδοση την περίοδο επαλήθευσης.

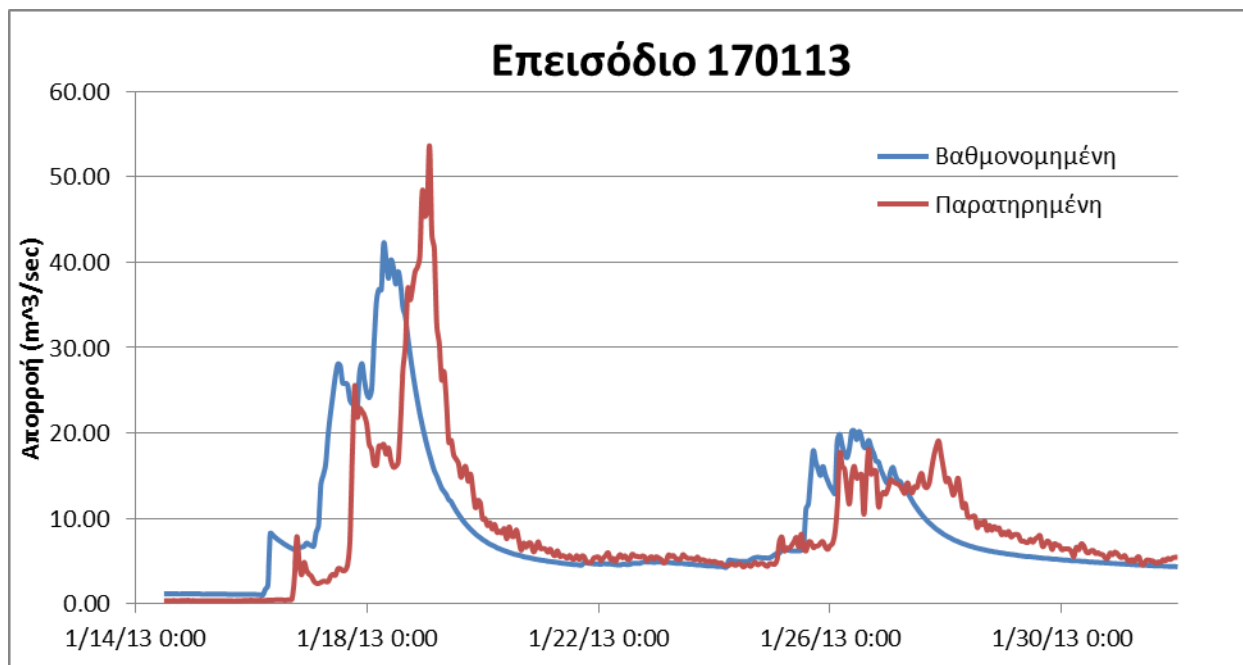
Διάγραμμα προσομοιωμένων χρονοσειρών απορροής

Το διάγραμμα της προσομοιωμένης χρονοσειράς απορροής στη θέση ελέγχου Λατομείο Μπάκα δείχνει εποπτικά την ικανότητα του μοντέλου να προσομοιώνει την παρατηρημένη χρονοσειρά

απορροής (Σχήμα 5.3). Στο Σχήμα 5.4 φαίνεται σε μεγέθυνση το επεισόδιο που μας ενδιαφέρει στις 17/1/13.



Σχήμα 5.3: Οι παρατηρημένη και η βαθμονομημένη χρονοσειρά απορροής στη θέση ελέγχου Λατομείο Μπάκα



Σχήμα 5.4: Αναπαράσταση των χρονοσειρών απορροής (βαθμονομημένων και παρατηρημένων) στη θέση ελέγχου Λατομείο Μπάκα για το επεισόδιο 170113.

Από τα παραπάνω σχήματα παρατηρούμε τα εξής:

- Η γενική εικόνα των διαγραμμάτων δείχνει ότι το υδρολογικό μοντέλο καταφέρνει να προσομοιώνει όλες τις περιόδους με έντονη ή περιορισμένη παροχή και με σχετική ποσοτική προσέγγιση των παρατηρήσεων.
- Αρχικά στην περίοδο της βαθμονόμησης, όπου έχουμε αρκετά μεγάλο δείκτη NSE και NSE υψηλών παροχών παρατηρούμε ότι η παρατηρημένη απορροή προσεγγίζεται πολύ καλά από την βαθμονομημένη, χωρίς όμως να «πιάνει» τις αιχμές. Στην περίοδο της επαλήθευσης παρατηρούμε ότι η προσέγγιση δεν είναι πολύ καλή στην γενικότερη εικόνα, παρ' όλο που οι βαθμονομημένη ξεπερνά τις αιχμές της παρατηρημένης.
- Στο διάγραμμα του μεμονομένου επεισοδίου παρατηρείται μια μικρή χρονική υστέρηση της τάξης ωρών, ενώ η αιχμή της παρατηρημένης προσεγγίζεται σε ποσοστό περίπου 78% από την βαθμονομημένη. Επίσης στο γενικότερο πλαίσιο οι ανοδικοί και οι καθοδικοί κλάδοι της χρονοσειράς της παρατήρησης αναπαράγονται και από την χρονοσειρά του μοντέλου.

Τιμές παραμέτρων

Στον Πίνακα 5.2 δίνονται οι τελικές τιμές των βελτιστοποιημένων παραμέτρων και τα όρια τους. Οι παράμετροι αποδίδονται σύμφωνα με τους ορισμούς και τους συμβολισμούς που δόθηκαν στην παράγραφο 5.4.2.

Πίνακας 5.2: Οι τιμές και τα όρια των παραμέτρων του υδρολογικού μοντέλου στην λεκάνη του Νέδοντα

Παράμετρος	Συμβολισμός	xlow	xup	Τελική τιμή
Χωρητικότητα δεξαμενής κατακράτησης (mm)	r	30	50	35.169
Χωρητικότητα ανώτερης ακόρεστης ζώνης (mm)	k-k _H	10	100	48.127
Χωρητικότητα κατώτερης ακόρεστης ζώνης (mm)	k _H	0	50	17.816
Μέγιστη διηθητικότητα εδάφους	i ₀	0.04	0.1	0.079
Ποσοστό επιμερισμού διήθησης	β	0.4	0.7	0.679
Συντελεστής στείρευσης υποδερμικής απορροής	λ	0.001	0.03	0.009
Συντελεστής στείρευσης για την κατείσδυση	μ	0.0001	0.01	0.001

Συντελεστής στείρευσης βασικής ροής	ϕ	0.00001	0.05	0.000985
Στάθμη παραγωγής βασικής ροής (mm)	k_G	0	200	158.241
Συντελεστής στείρευσης για εκροή σε γειτονικούς υδροφόρους ορίζοντες ή την θάλασσα	ξ	0.00001	0.05	0.000119
Συντελεστής στείρευσης μοντέλου διόδευσης	θ	0.01	0.5	0.08258

5.5.2 Λεκάνη Λούσιου

Αποτελεσματικότητα- αποτελεσματικότητα υψηλών παροχών

Οι τελικές τιμές της αποτελεσματικότητας και της αποτελεσματικότητας υψηλών παροχών στο μοντέλο της λεκάνης του Λούσιου για τις περιόδους βαθμονόμησης και επαλήθευσης φαίνονται στον Πίνακα 5.3.

Πίνακας 5.3: Οι τελικές τιμές των δεικτών αποτελεσματικότητας και αποτελεσματικότητας υψηλών παροχών για το μοντέλο στη λεκάνη του Λούσιου και για τις δυο περιόδους

	NSE	NSE υψηλών παροχών
Βαθμονόμηση	0.835	0.885
Επαλήθευση	0.181	0.349

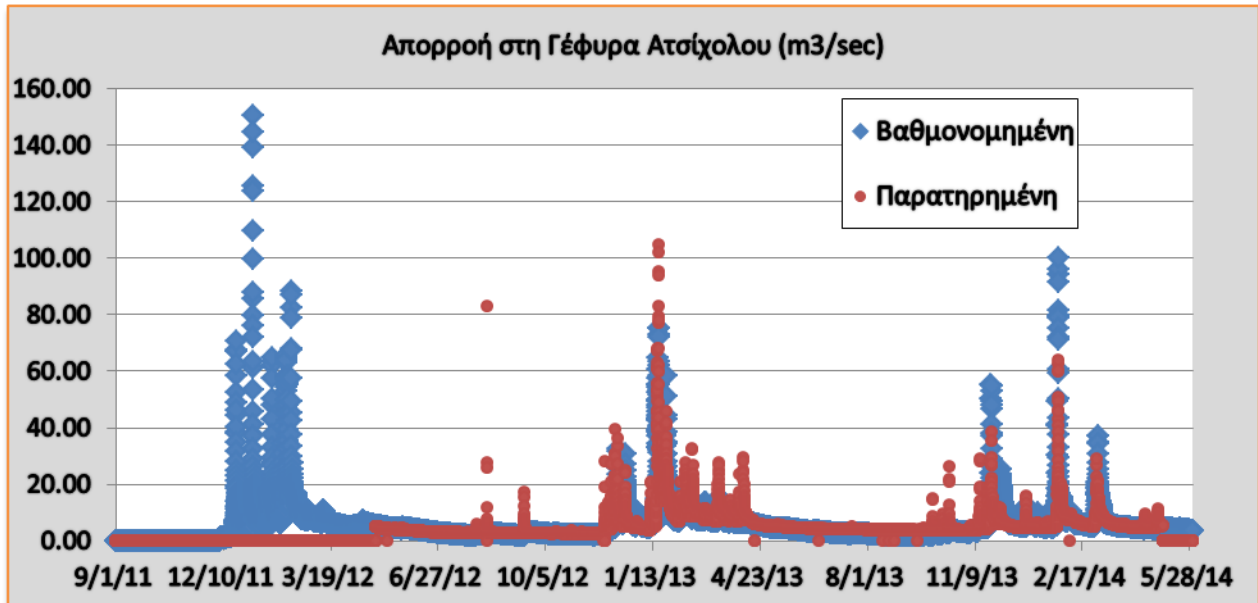
Από τον πίνακα μπορούμε να εξάγουμε τα εξής συμπεράσματα:

- Το μοντέλο παρουσιάζει πολύ καλά αποτελεσματικότητα για την περίοδο βαθμονόμησης και καθόλου καλή επίδοση για την περίοδο επαλήθευσης (83.5% και 18.1% αντίστοιχα) στο σημείο ελέγχου στην έξοδο της λεκάνης στη Γέφυρα Ατσίχολου.
- Όσον αφορά την αποτελεσματικότητα υψηλών παροχών, το μοντέλο εξάγει εξαιρετική τιμή για την περίοδο βαθμονόμησης και στο όριο του αποδεκτού αποτελέσματα για την περίοδο επαλήθευσης (88.5% και 34.9% αντίστοιχα).
- Η επίδοση του μοντέλου στην περίοδο βαθμονόμησης είναι εμφανώς καλύτερη από την επίδοση στην περίοδο επαλήθευσης.

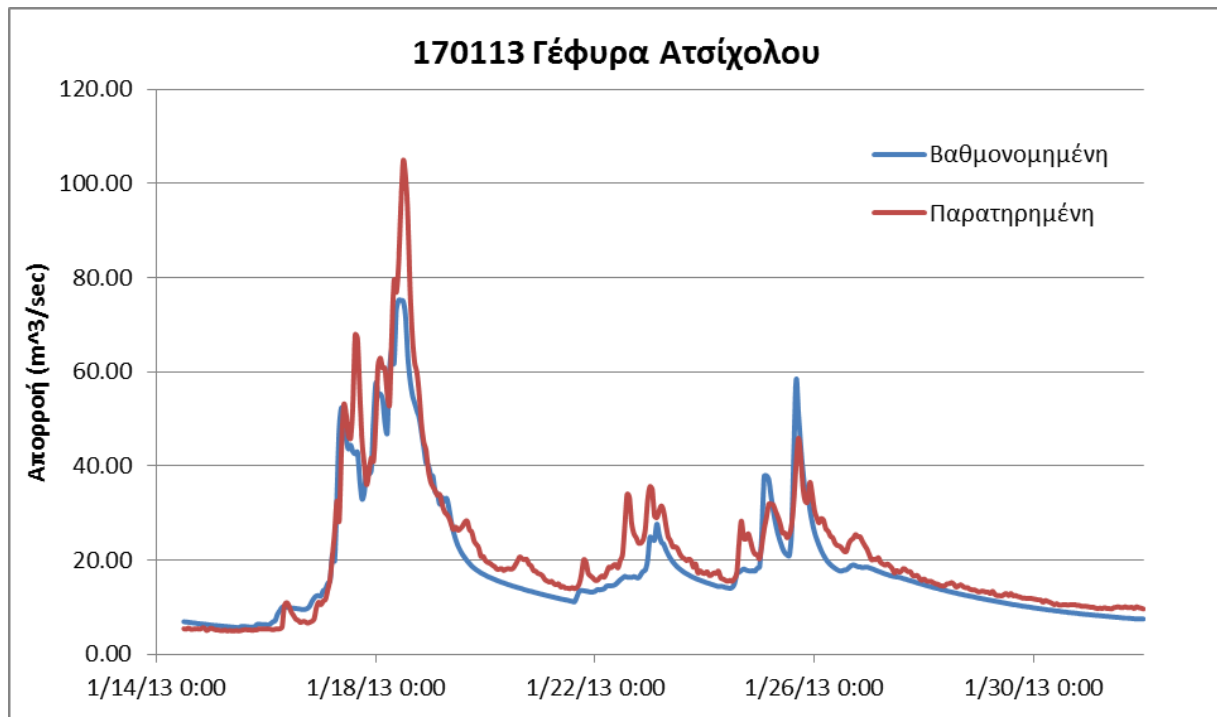
Διάγραμμα προσομοιωμένων χρονοσειρών απορροής

Το διάγραμμα της προσομοιωμένης χρονοσειράς απορροής στη θέση ελέγχου Γέφυρα Ατσίχολου δείχνει εποπτικά την ικανότητα του μοντέλου να προσομοιώνει την παρατηρημένη

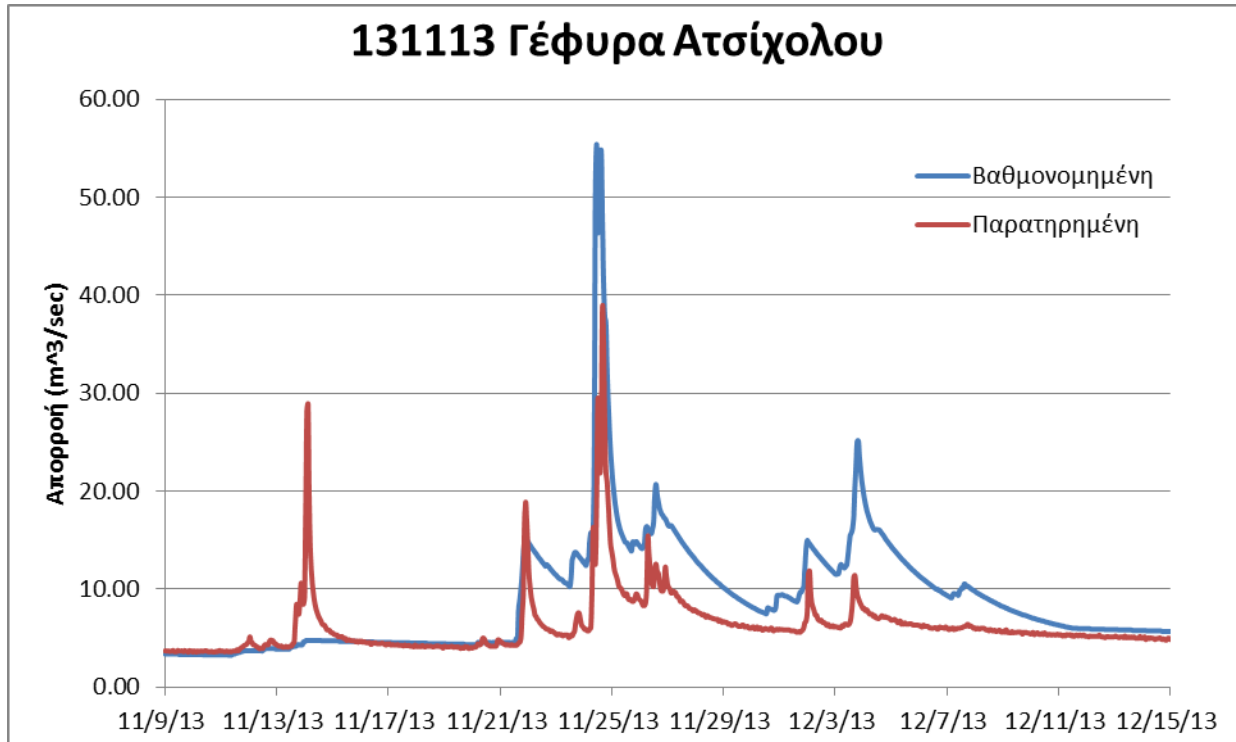
χρονοσειρά απορροής (Σχήμα 5.5). Επίσης παρουσιάζονται σε μεγαλύτερη κλίμακα τα δύο επεισόδια βροχής που μας ενδιαφέρουν για την λεκάνη του Λούσιου, δηλαδή τα 170113 και 131113 (Σχήματα 5.6 και 5.7, αντίστοιχα).



Σχήμα 5.5: Οι παρατηρημένη και η βαθμονομημένη χρονοσειρά απορροής στη θέση ελέγχου Γέφυρα Ατσίχολου



Σχήμα 5.6: Αναπαράσταση των χρονοσειρών απορροής (βαθμονομημένων και παρατηρημένων) στη θέση ελέγχου Γέφυρα Ατσίχολου για το επεισόδιο 170113.



Σχήμα 5.7: Αναπαράσταση των χρονοσειρών απορροής (βαθμονομημένων και παρατηρημένων) στη θέση ελέγχου Γέφυρα Ατσίχολου για το επεισόδιο 131113.

Από τα παραπάνω σχήματα παρατηρούμε τα εξής:

- Η γενική εικόνα των διαγραμμάτων δείχνει ότι το υδρολογικό μοντέλο καταφέρνει να προσομοιώνει όλες τις περιόδους με έντονη ή περιορισμένη παροχή και με σχετική ποσοτική προσέγγιση των παρατηρήσεων.
- Η επίδοση του μοντέλου, όπως περιγράφηκε παραπάνω, φαίνεται σε αυτά τα δυο διαγράμματα. Αρχικά στην περίοδο της βαθμονόμησης, όπου έχουμε αρκετά μεγάλο δείκτη NSE και NSE υψηλών παροχών παρατηρούμε ότι η παρατηρημένη απορροή προσεγγίζεται πολύ καλά από την βαθμονομημένη, χωρίς όμως να «πιάνει» τις αιχμές. Συγκεκριμένα στο επεισόδιο 170113, το οποίο χρονικά βρίσκεται στην περίοδο βαθμονόμησης, η αιχμή της προσομοιωμένης χρονοσειράς είναι το 76% της παρατηρημένης.
- Στην περίοδο της επαλήθευσης παρατηρούμε ότι η προσέγγιση δεν είναι πολύ καλή στην γενικότερη εικόνα, παρ' όλο που οι αιχμές της βαθμονομημένης ξεπερνούν τις αιχμές της παρατηρημένης.
- Στο διάγραμμα του δεύτερου επεισοδίου 131113, η αιχμή της εκτιμημένης παροχής ξεπερνά κατά πολύ την αιχμή της παρατηρημένης (143%). Επίσης στο γενικότερο πλαίσιο οι ανοδικοί και οι καθοδικοί κλάδοι της χρονοσειράς παροχής αναπαράγονται από το μοντέλο.

Τιμές παραμέτρων

Στον Πίνακα 5.4 απεικονίζονται οι τελικές τιμές των βελτιστοποιημένων παραμέτρων και τα όρια τους.

Πίνακας 5.4: Οι τιμές και τα όρια των παραμέτρων του υδρολογικού μοντέλου στην λεκάνη του Λούσιου

Παράμετρος	Συμβολισμός	xlow	xup	Τελική τιμή
Χωρητικότητα δεξαμενής κατακράτησης (mm)	r	0.00	50.00	0.000005
Χωρητικότητα ανώτερης ακόρεστης ζώνης (mm)	k-kH	50.00	150.00	120.029
Χωρητικότητα κατώτερης ακόρεστης ζώνης (mm)	kH	0.00	50.00	15.045
Μέγιστη διηθητικότητα εδάφους	i0	0.10	100.00	0.148
Ποσοστό επιμερισμού διήθησης	β	0.30	0.90	0.561
Συντελεστής στείρευσης υποερμικής απορροής	λ	0.01	0.05	0.016
Συντελεστής στείρευσης για την κατείσδυση	μ	0.50	5.00	2.001
Συντελεστής στείρευσης βασικής ροής	φ	0.0001	0.01	0.00066
Στάθμη παραγωγής βασικής ροής (mm)	kG	50.00	300.00	105.162
Συντελεστής στείρευσης για εκροή σε γειτονικούς υδροφόρους ορίζοντες ή την θάλασσα	ξ	0.0000001	0.05	0.00
Συντελεστής στείρευσης μοντέλου διόδευσης	θ	0.01	0.50	0.208

5.5.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων των δυο λεκανών

Εξετάζοντας τις τελικές τιμές των παραμέτρων των δυο μοντέλων (Πίνακας 5.5) εξάγονται κάποια συμπεράσματα για τα φυσικά χαρακτηριστικά της κάθε λεκάνης. Συγκεκριμένα:

- Η χωρητικότητα της δεξαμενής κατακράτησης r είναι σχεδόν μηδενική στο μοντέλο της λεκάνης του Λούσιου, γεγονός που υποδεικνύει ότι η βροχόπτωση σχεδόν στο σύνολό της καταλήγει στα κατώτερα στρώματα του εδάφους, με πολύ μικρό ποσοστό της να εξατμίζεται. Αντίθετα στον Νέδοντα αξιόλογη ποσότητα της βροχής εγκλωβίζεται στη βλάστηση και στην επιφάνεια του εδάφους με αποτέλεσμα να εξατμίζεται.

- Η μέγιστη διηθητικότητα του εδάφους i_0 έχει σημαντικά μεγαλύτερη τιμή στην λεκάνη του Λούσιου από αυτήν στο Νέδοντα, διευκολύνοντας έτσι την διήθηση προς τα κατώτερα στρώματα του εδάφους και περιορίζοντας την άμεση απορροή.
- Το ποσοστό επιμερισμού της διήθησης β είναι περίπου ίδιο και στις δύο λεκάνες και με τιμή κοντά στο 0.5, με αυτό του Νέδοντα να είναι λίγο μεγαλύτερο, έτσι ώστε η διήθηση να μοιράζεται μεταξύ της ανώτερης και της κατώτερης ζώνης εδαφικής υγρασίας.
- Η χωρητικότητα της ανώτερης ακόρεστης ζώνης $k-k_H$ είναι σχεδόν τριπλάσια στην λεκάνη του Λούσιου, γεγονός που αυξάνει την υποερμική απορροή και περιορίζει την επιφανειακή. Στη λεκάνη του Νέδοντα συγκριτικά με αυτήν του Λούσιου διευκολύνεται η επιφανειακή απορροή και περιορίζεται η υποερμική απορροή.
- Οι μεταβλητές που αναφέρονται στην υδραυλική αγωγιμότητα του εδάφους είναι ο συντελεστής στείρευσης της υποερμικής απορροής λ (οριζόντια) και ο συντελεστής στείρευσης για την κατείσδυση μ (κατακόρυφη). Οι τιμές αυτών των δυο παραμέτρων είναι σαφώς μεγαλύτερες στο μοντέλο της λεκάνης του Λούσιου από αυτές του Νέδοντα, γεγονός που υποδεικνύει ότι ο εδαφικός σχηματισμός του Λούσιου είναι πιο περατός από αυτόν του Νέδοντα. Συνεπώς, στη λεκάνη του Λούσιου έχουμε περιορισμένη επιφανειακή απορροή, με το μεγαλύτερο τμήμα της απορροής να καταλήγει στα κατώτερα στρώματα.

Πίνακας 5.5: Συγκριτικός πίνακας των τελικών τιμών των παραμέτρων των υδρολογικών μοντέλων των δυο λεκανών.

Παράμετρος	Συμβολισμός	Τελικές Τιμές Παραμέτρων	
		Νέδοντας	Λούσιος
Χωρητικότητα δεξαμενής κατακράτησης (mm)	r	35.169	0.000005
Χωρητικότητα ανώτερης ακόρεστης ζώνης (mm)	$k-k_H$	48.127	120.029
Χωρητικότητα κατώτερης ακόρεστης ζώνης (mm)	k_H	17.816	15.045
Μέγιστη διηθητικότητα εδάφους	i_0	0.079	0.148
Ποσοστό επιμερισμού διήθησης	β	0.679	0.561
Συντελεστής στείρευσης υποερμικής απορροής	λ	0.009	0.016
Συντελεστής στείρευσης για την κατείσδυση	μ	0.001	2.001

Διερεύνηση σεναρίων υδρομετεωρολογικής πρόγνωσης στην περιοχή της Πελοποννήσου

Συντελεστής στείρευσης βασικής ροής	ϕ	0.000985	0.00066
Στάθμη παραγωγής βασικής ροής (mm)	k_G	158.241	105.162
Συντελεστής στείρευσης για εκροή σε γειτονικούς υδροφόρους ορίζοντες ή την θάλασσα	ξ	0.000119	0.00
Συντελεστής στείρευσης μοντέλου διόδευσης	θ	0.08258	0.208

Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα πλημμυρικής πρόγνωσης

6.1 Δημιουργία χρονοσειρών πρόγνωσης

Με βάση τις αναλύσεις του Κεφαλαίου 3, που αφορούν στην επιφανειακή ολοκλήρωση των σημειακών προγνώσεων βροχόπτωσης, προέκυψε ότι για την πλημμυρική πρόγνωση θα χρησιμοποιηθούν τα 13 σενάρια προγνώσεων για το επεισόδιο βροχής 170113 και τα 17 σενάρια προγνώσεων για το επεισόδιο 131113. Αντίστοιχα, θα πρέπει να αναπτυχθούν 13 σετ χρονοσειρών βροχόπτωσης για το επεισόδιο βροχής 170113 και άλλα 17 για το επεισόδιο 131113, στις οποίες το τμήμα που αντιστοιχεί στο χρονικό διάστημα που έχει ήδη προσομοιωθεί θα αντικατασταθεί από αυτές, ώστε να προκύψουν προγνώσεις βροχόπτωσης. Για κάθε σενάριο πρόγνωσης παράγεται μια χρονοσειρά βροχόπτωσης για όλη την λεκάνη παροχής. Τα σενάρια πρόγνωσης που παράχθηκαν με την σημειακή ανάλυση δεν θα εισαχθούν στο υδρολογικό μοντέλο, καθώς είναι προφανές από την σύγκριση των δύο μεθόδων (βλ. 3.3) ότι θα δίνει χειρότερα αποτελέσματα. Στο υδρολογικό μοντέλο του Νέδοντα θα εισαχθούν οι χρονοσειρές, που προκύπτουν από τις προγνώσεις μόνο του επεισοδίου 170113, ενώ στο μοντέλο του Λούσιου θα εισαχθούν οι χρονοσειρές που προκύπτουν από τις προγνώσεις και των δυο επεισοδίων βροχής που αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 3 (170113, 131113). Οι χρονοσειρές εξατμοδιαπνοής δεν αλλάζουν, εφόσον δεν διαθέτουμε αντίστοιχα δεδομένα για την πρόγνωση της θερμοκρασίας. Σε περίπτωση, η επίδρασή τους στην κλίμακα των επεισοδίων πλημμύρας είναι αμελητέα.

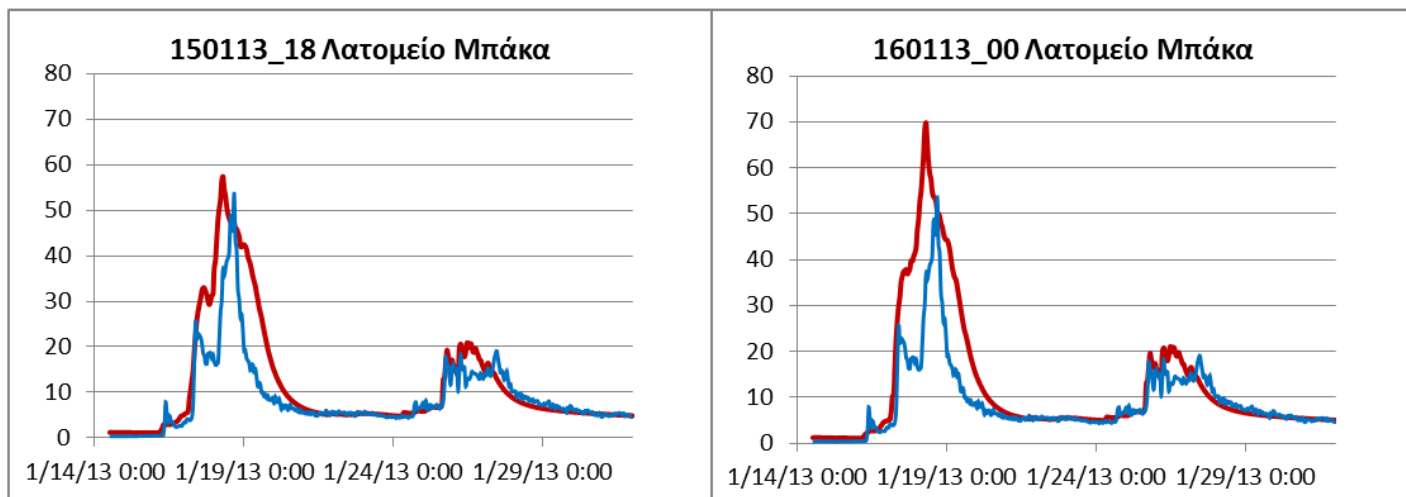
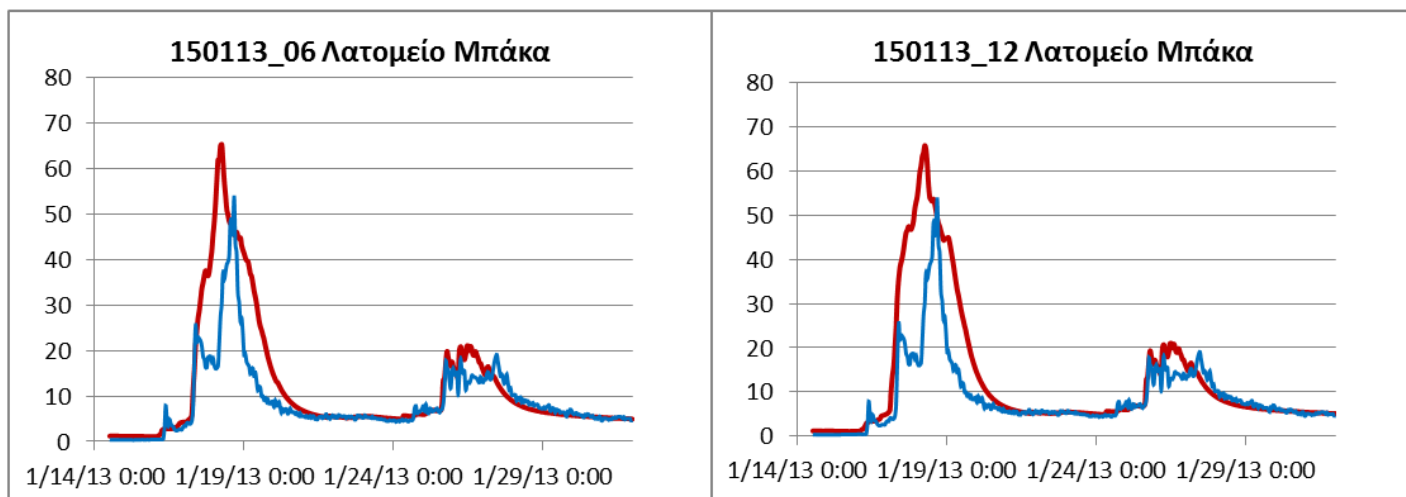
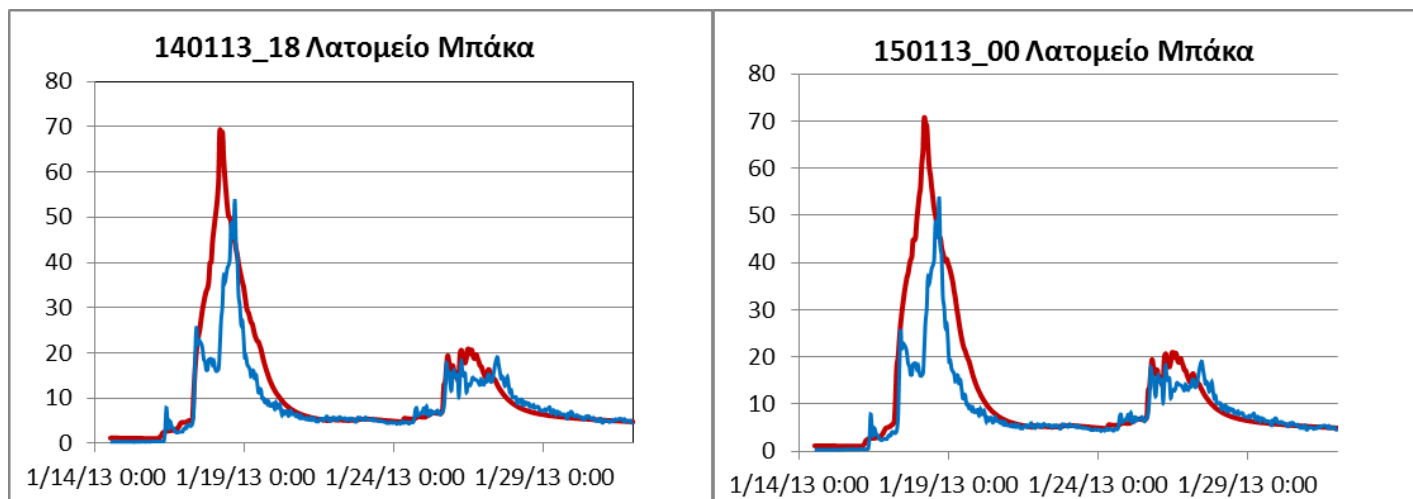
Οι χρονοσειρές που προκύπτουν εισάγονται στο υδρολογικό μοντέλο στη θέση της παρατηρημένης χρονοσειράς βροχόπτωσης. Τα αποτελέσματα των προγνώσεων παρατίθενται στα επόμενα υποκεφάλαια για τις δυο λεκάνες απορροής.

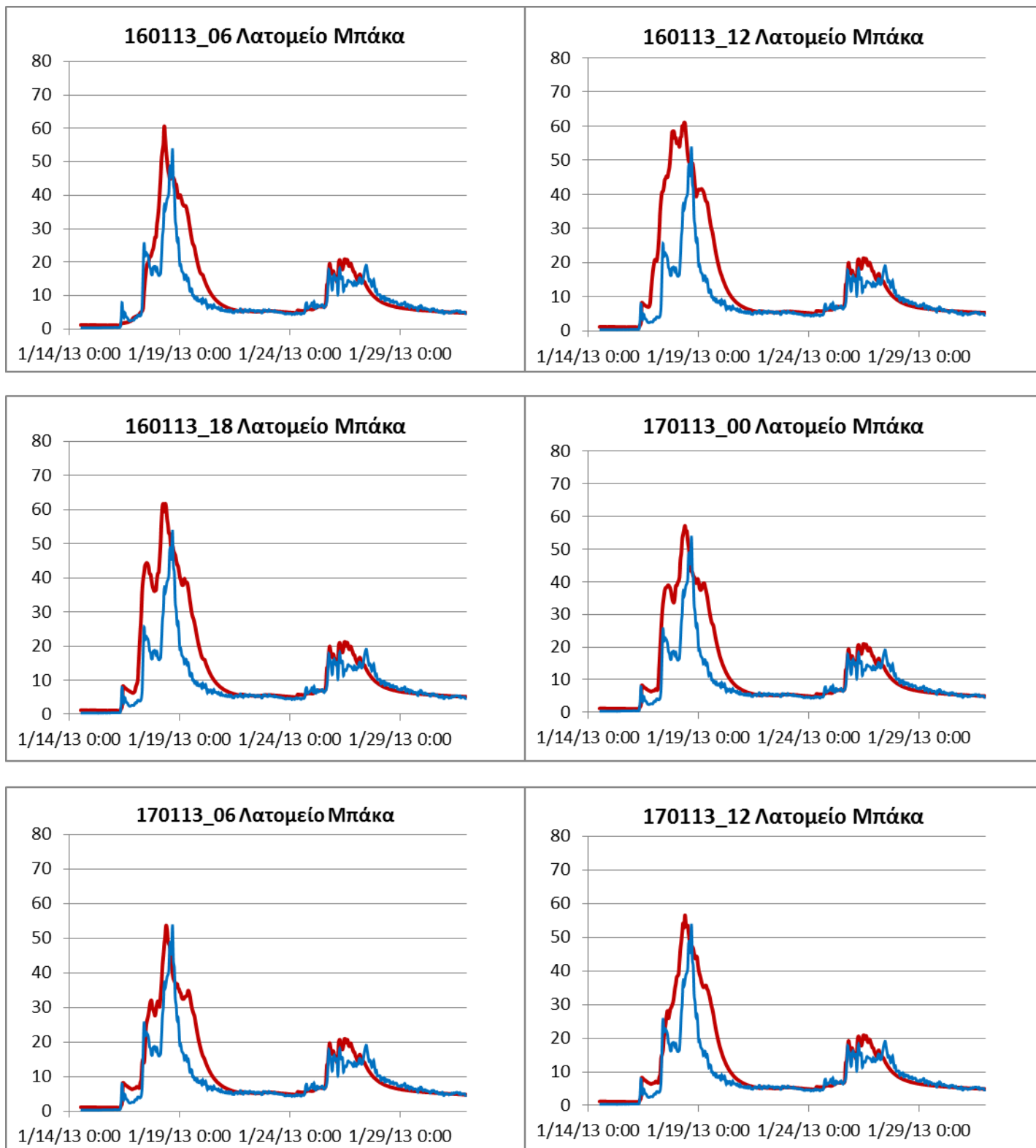
6.2 Λεκάνη απορροής Νέδοντα

Στο υδρολογικό μοντέλο της λεκάνης απορροής του Νέδοντα εισάγονται οι 13 παρατηρημένες χρονοσειρές, με τα αλλαγμένα δεδομένα για το χρονικό διάστημα του επεισοδίου βροχής 170113. Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα για την παροχή στο σημείο ελέγχου στην έξοδο της λεκάνης στο Λατομείο Μπάκα. Για σύγκριση παρατίθενται και οι αντίστοιχες παρατηρημένες τιμές παροχής, καθώς και η βελτιστοποιημένη χρονοσειρά, όπως προέκυψε από τη διαδικασία βαθμονόμησης. Το διάστημα που επιλέγεται να παρουσιαστεί έχει αρχή στις

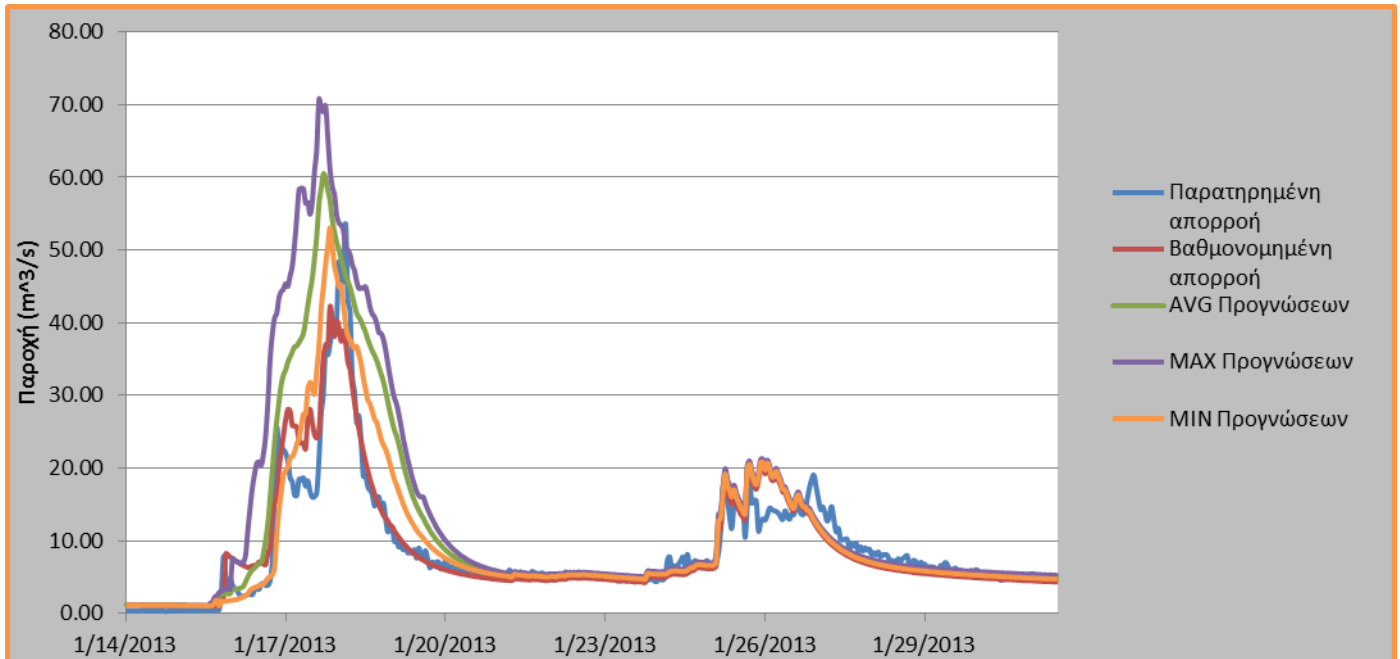
Διερεύνηση σεναρίων υδρομετεωρολογικής πρόγνωσης στην περιοχή της Πελοποννήσου

14/01/2013 12:00, οπότε ξεκινά και το πρώτο σενάριο πρόγνωσης και χρόνο λήξης στις 01/02/2013 00:00, όταν και εκφορτίζεται η πλημμύρα (Σχήματα 6.1 και 6.2).





Σχήμα 6.1: Πρόγνωση παροχής στο Λατομείο Μπάκα (κόκκινο) με βάση τις προγνώσεις βροχόπτωσης με την επιφανειακή ανάλυση, σε σύγκριση με την παρατηρημένη παροχή (μπλε).



Σχήμα 6.2: Η μέση (AVG), η μέγιστη (MAX) και η ελάχιστη (MIN) πρόγνωση της παροχής στο Λατομείο Μπάκα με βάση τα 13 σενάρια πρόγνωσης βροχοπτώσης που αναπτύχθηκαν με την επιφανειακή ολοκλήρωση των προγνώσεων.

Με βάση τα παραπάνω διαγράμματα για την πλημμυρική παροχή στη Γέφυρα Ατσίχολου παρατηρούμε τα εξής:

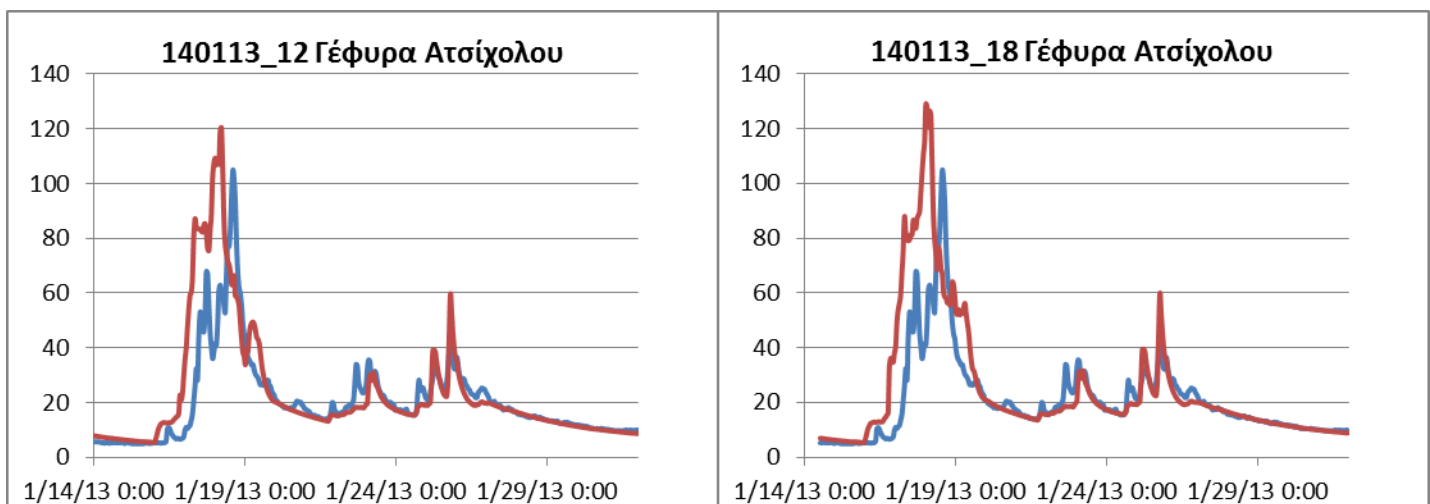
- Η γενική εικόνα όλων των διαγραμμάτων είναι εξαιρετική, καθώς όλες οι προγνώσεις προσεγγίζουν (με κάποια υπέρβαση, ωστόσο) την αιχμή της παρατηρημένης παροχής. Συγκεκριμένα η τιμή της παρατηρημένης αιχμής είναι $53.6 \text{ m}^3/\text{s}$ και η μέγιστη αιχμή των προγνώσεων υπολογίζεται στην πρόγνωση 150113_00 με τιμή $70.7 \text{ m}^3/\text{s}$. Η πρόγνωση που προσεγγίζει καλύτερα την παραπάνω παρατηρημένη είναι η 170113_06 με τιμή $53.7 \text{ m}^3/\text{s}$ (ταυτίζεται δηλαδή με την παρατηρημένη). Η μέση προσομοιωμένη αιχμή της παροχής είναι το 131.8% της παρατηρημένης, και στην συνολική εικόνα η προσομοιωμένη χρονοσειρά ακολουθεί τους ανοδικούς και καθοδικούς κλάδους της παρατηρημένης παροχής.
- Η αιχμή της παρατηρημένης παροχής καταγράφεται στις 18/1/13 15:00, ενώ η αιχμή της αποτελεσματικότερης πρόγνωσης (170113_06) υπολογίζεται στις 18/1/13 08:00, δηλαδή με χρονική υστέρηση επτά ωρών. Στην πρόγνωση της βροχής 170113_06 η μέγιστη βροχοπτώση υπολογίστηκε στις 18/1/13 02:00, δηλαδή έξι ώρες νωρίτερα την αιχμή της παροχής. Γενικά, οι μεγάλες χρονικές υστερήσεις που παρατηρήθηκαν στις προγνώσεις των βροχών δεν εντοπίζονται εδώ. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στο επεισόδιο βροχής 170113 έχουμε μια μέγιστη μέτρηση στις 16/1/13 07:00 που έχει πολύ μεγάλη τιμή σε σχέση με τις μετρήσεις των προηγούμενων και των επόμενων ωρών. Αρχικά θα μπορούσε να αποδοθεί σε κάποιο σφάλμα σε μεμονωμένο βροχομετρικό σταθμό, ωστόσο παρόμοια αιχμή παρατηρείται σε όλους τους σταθμούς, γεγονός που αποκλείει την παραπάνω θεώρηση.

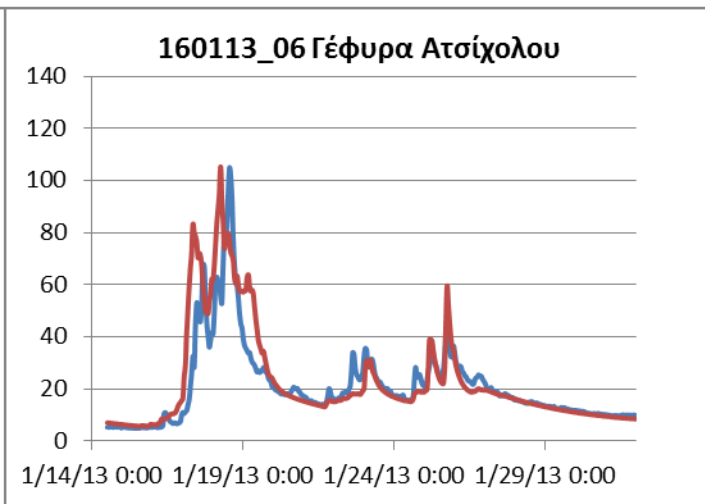
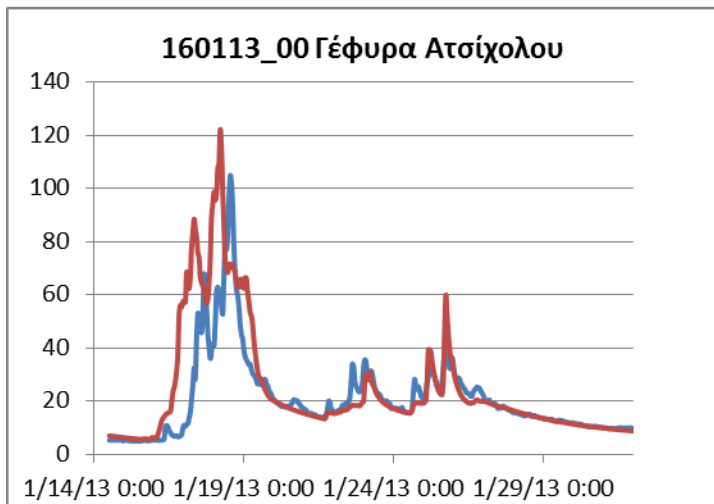
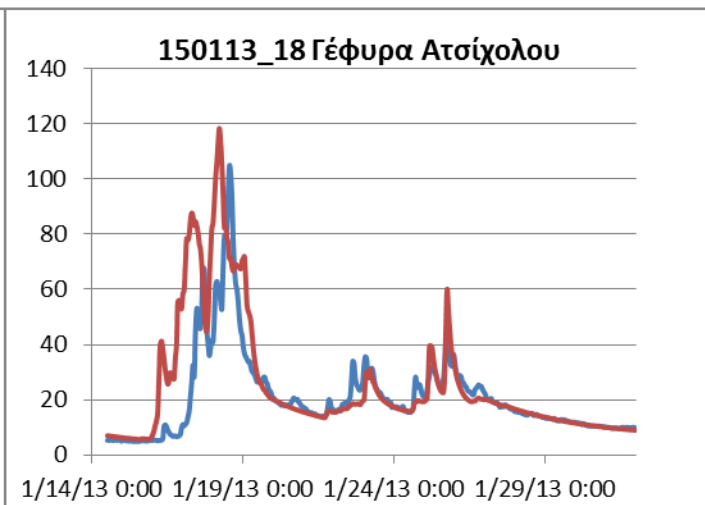
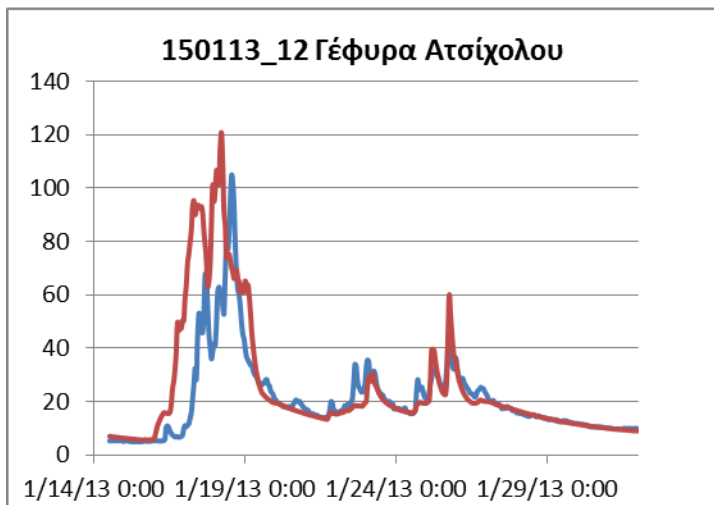
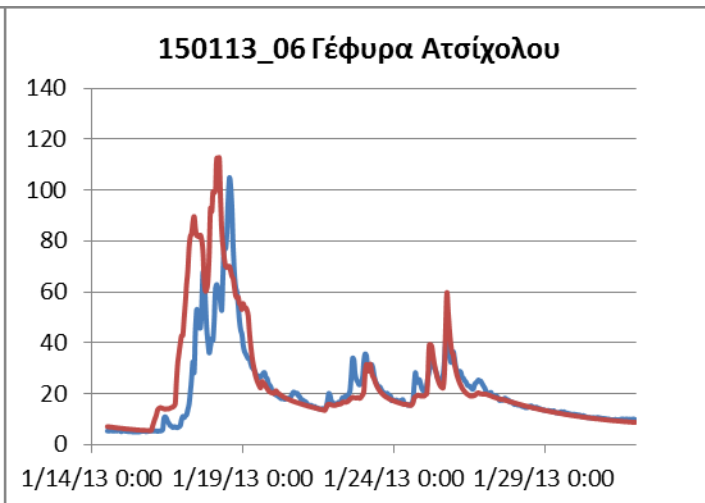
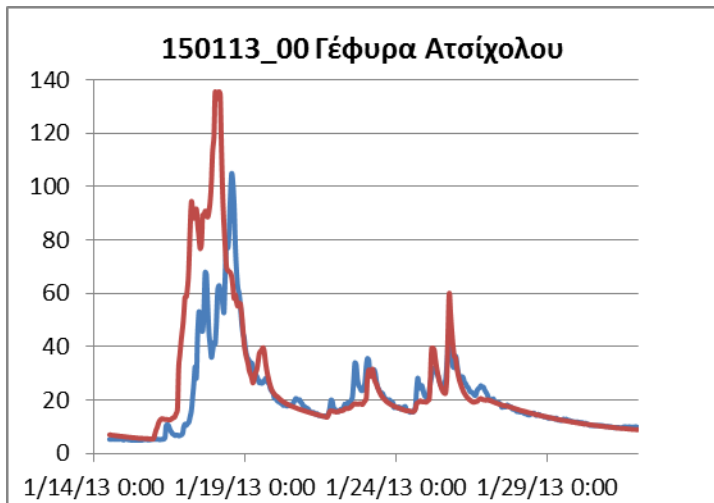
- Η καλύτερη πρόγνωση της παροχής είναι αυτή που υπολογίστηκε με την πρόγνωση βροχής 170113_06, δηλαδή με χρόνο έναρξης 33 ώρες πριν παρατηρηθεί η μέγιστη παροχή.
- Στο τελευταίο διάγραμμα (Σχήμα 6.2) φαίνεται ότι η χρονοσειρά της μέσης τιμής των προγνώσεων των παροχών ξεπερνά και αυτή την παρατηρημένη, με την αιχμή της να είναι $60.5 \text{ m}^3/\text{s}$ (ποσοστό 113% της παρατηρημένης αιχμής). Από την άλλη η βαθμονομημένη χρονοσειρά έχει αιχμή $42.2 \text{ m}^3/\text{s}$, η οποία είναι μικρότερη της παρατηρημένης. Τα πολύ καλά αποτελέσματα των προγνώσεων της παροχής στη λεκάνη του Νέδοντα οφείλονται κυρίως στην εξαιρετική προσομοίωση του υδρολογικού μοντέλου, αλλά και στην επιλογή της επιφανειακής ανάλυσης ως μεθόδου επεξεργασίας των προγνώσεων των βροχοπτώσεων που εισήχθησαν στο μοντέλο.

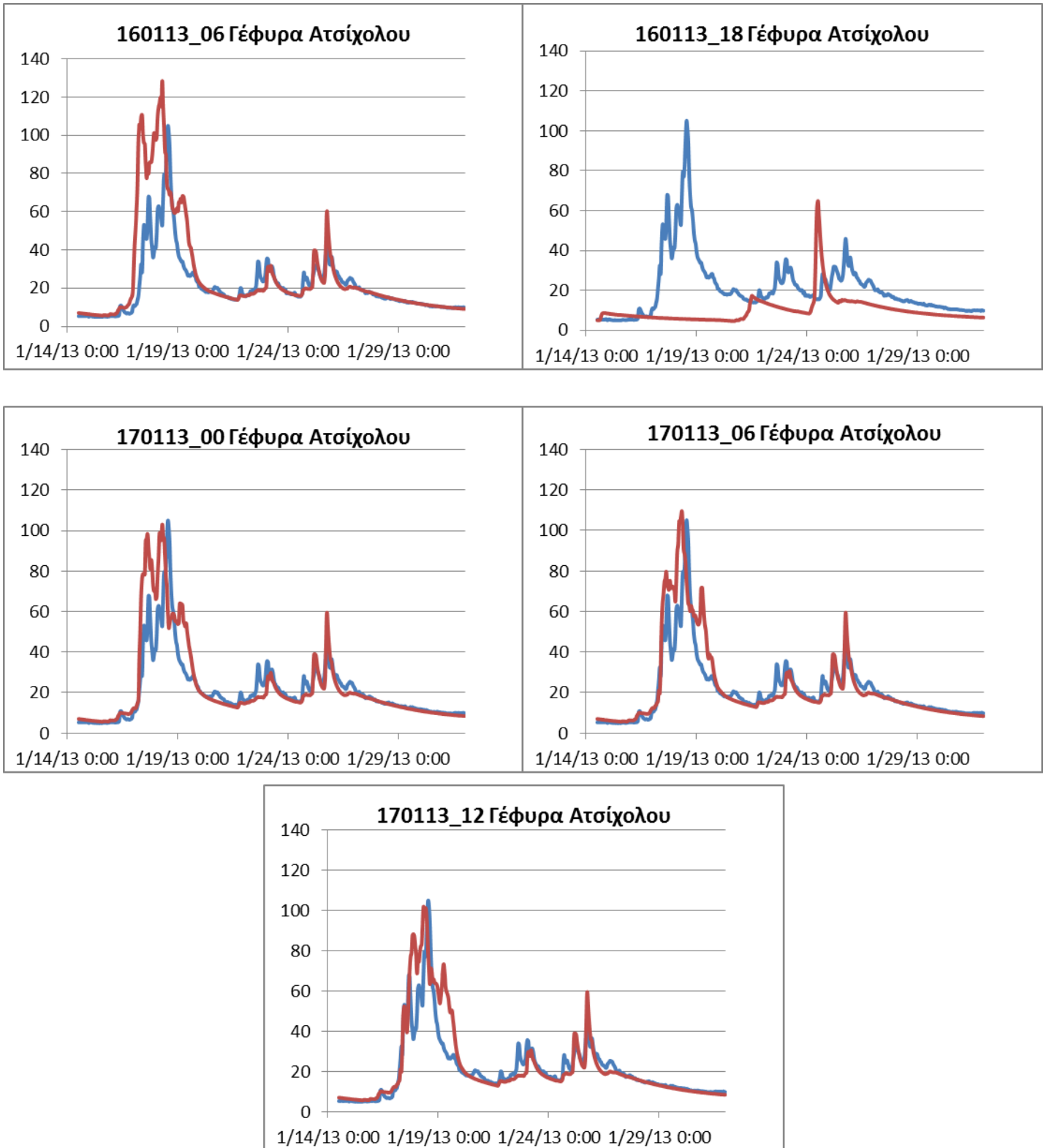
6.3 Λεκάνη απορροής Λούσιου

6.3.1 Πλημμυρική πρόγνωση επεισοδίου βροχής 170113

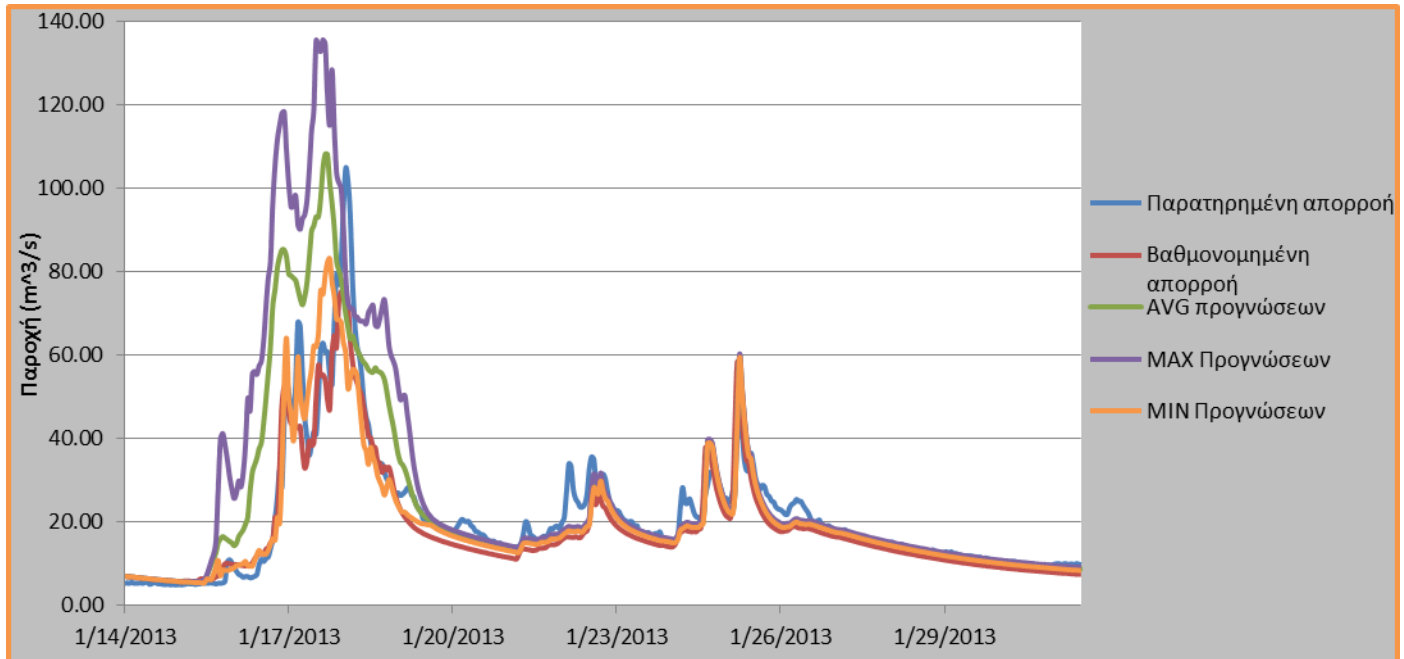
Στο υδρολογικό μοντέλο της λεκάνης απορροής του Λούσιου εισάγονται οι 13 παρατηρημένες χρονοσειρές με τα αλλαγμένα δεδομένα για το χρονικό διάστημα του επεισοδίου βροχής 170113. Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα για την παροχή στο σημείο ελέγχου στην έξοδο της λεκάνης στη Γέφυρα Ατσίχολου. Για σύγκριση παρατίθενται και οι αντίστοιχες παρατηρημένες τιμές παροχής, καθώς και η βαθμονομημένη χρονοσειρά. Το διάστημα που επιλέγεται να παρουσιαστεί για το επεισόδιο 170113 έχει αρχή στις 14/01/2013 12:00, οπότε ξεκινά και το πρώτο σενάριο πρόγνωσης, και χρόνο λήξης στις 01/02/2013 00:00, όταν και εκφορτίζεται η πλημμύρα (Σχήμα 6.3, Σχήμα 6.4).







Σχήμα 6.3: Πρόγνωση παροχής στη Γέφυρα Ατσίχολου (κόκκινο) με βάση τις προγνώσεις βροχόπτωσης με την επιφανειακή ανάλυση, σε σύγκριση με την παρατηρημένη παροχή (μπλε), με τα σενάρια πρόγνωσης του επεισοδίου 170113.



Σχήμα 6.4: Μέση (AVG), μέγιστη (MAX) και ελάχιστη (MIN) πρόγνωση παροχής στη Γέφυρα Ατσίχολου με βάση τα 13 σενάρια πρόγνωσης βροχόπτωσης που αναπτύχθηκαν με την επιφανειακή ολοκλήρωση των προγνώσεων για το επεισόδιο 170113.

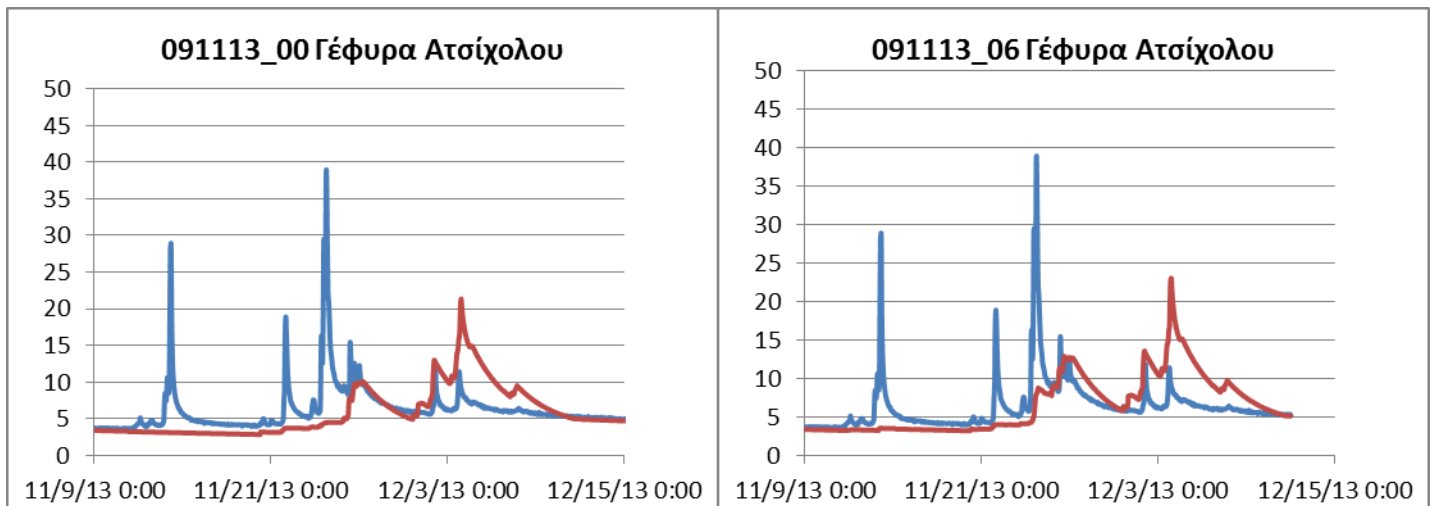
Με βάση τα παραπάνω διαγράμματα για την πλημμυρική παροχή στη Γέφυρα Ατσίχολου παρατηρούμε τα εξής:

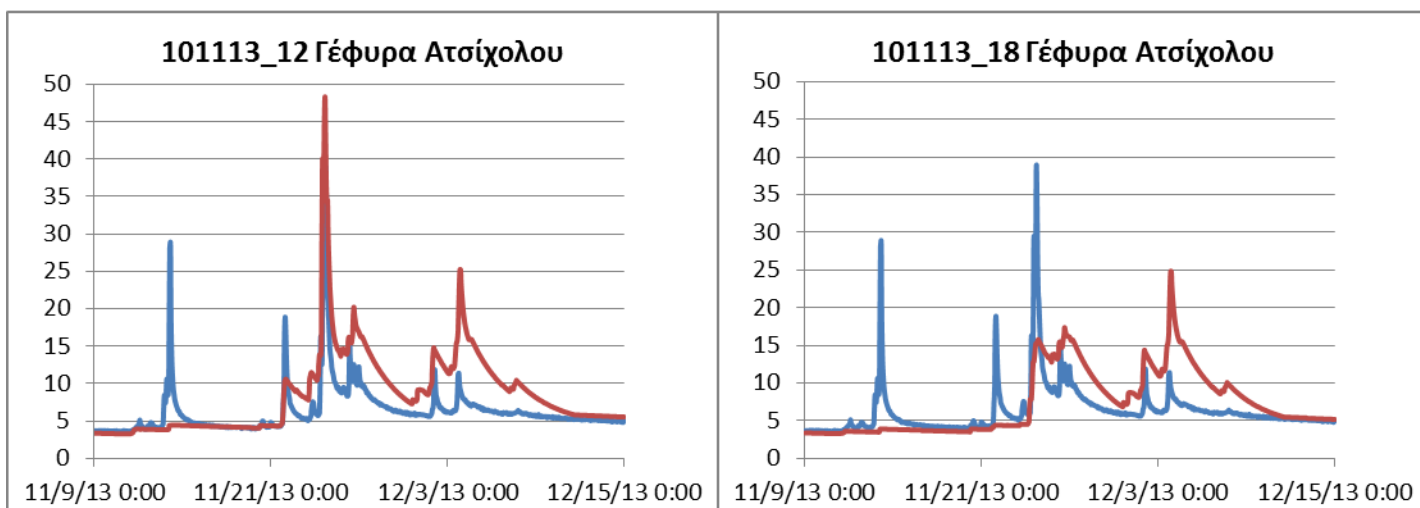
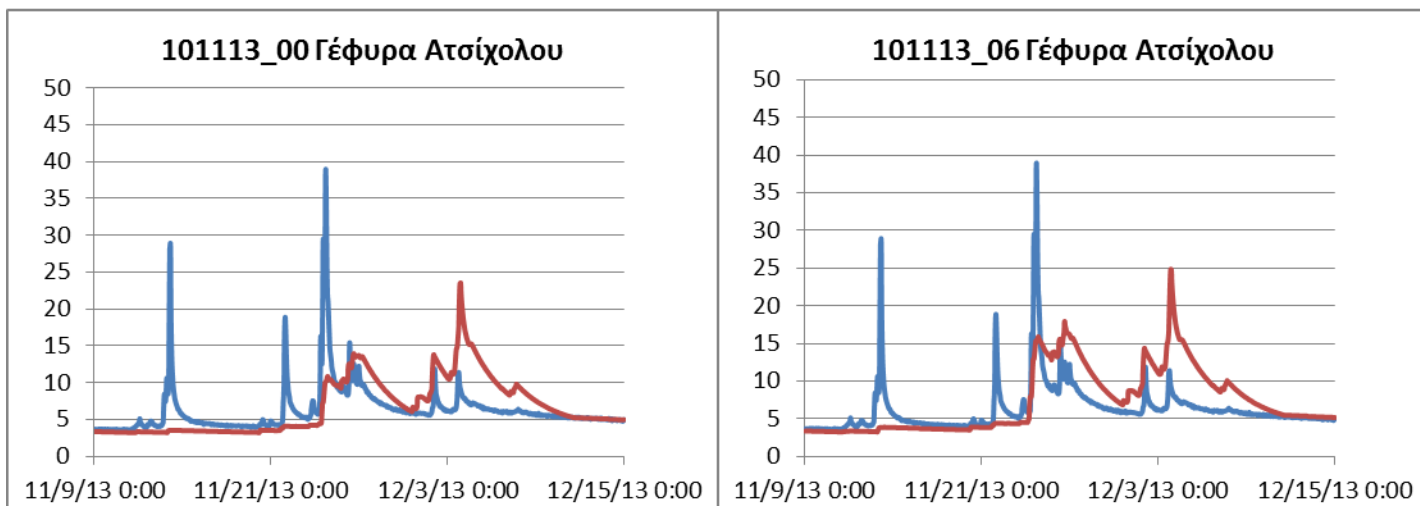
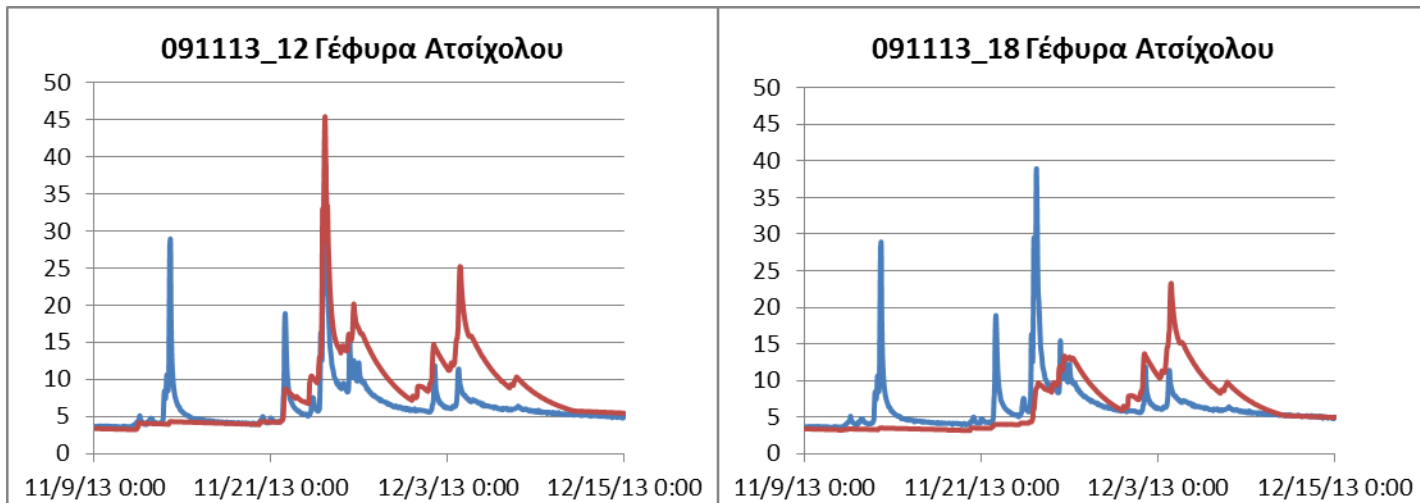
- Η γενική εικόνα των διαγραμμάτων είναι σχετικά καλή, ενώ σε όλες σχεδόν τις προγνώσεις υπερεκτιμάται η παρατηρημένη αιχμή. Ειδικότερα η τιμή της παρατηρημένης αιχμής είναι $104.8 \text{ m}^3/\text{s}$ και καταγράφηκε στις 18/1/13 13:00. Η αιχμή όλων των προγνώσεων υπολογίστηκε στην πρόγνωση 150113_00 με τιμή $135.6 \text{ m}^3/\text{s}$, αλλά αυτή που προσεγγίζει καλύτερα την παρατηρημένη είναι η 160113_06 με τιμή $105.3 \text{ m}^3/\text{s}$ (ποσοστό 100.5 % της παρατηρημένης). Μια άλλη πολύ καλή προσέγγιση είναι η 170113_00, με παροχή αιχμής $103.6 \text{ m}^3/\text{s}$, δηλαδή 98.8 % της παρατηρημένης τιμής.
- Η αιχμή της καλύτερης πρόγνωσης (160113_06) υπολογίστηκε στις 18/1/13 06:00, δηλαδή με χρονική υστέρηση επτά ωρών. Στην πρόγνωση της βροχής 160113_06 η μέγιστη βροχόπτωση υπολογίστηκε στις 18/1/13 04:00, δηλαδή δύο ώρες νωρίτερα την αιχμή της παροχής. Γενικά, οι μεγάλες χρονικές υστερήσεις που παρατηρήθηκαν στις προγνώσεις των βροχών δεν εντοπίζονται εδώ.
- Η καλύτερη πρόγνωση της παροχής είναι αυτή που υπολογίστηκε με το σενάριο πρόγνωσης της βροχής 160113_06, δηλαδή με χρόνο έναρξης 55 ώρες πριν παρατηρηθεί η μέγιστη παροχή, ενώ το δεύτερο καλύτερο σενάριο πρόγνωσης (170113_00) έχει χρόνο έναρξης 37 ώρες νωρίτερα από την παρατηρημένη αιχμή της παροχής.

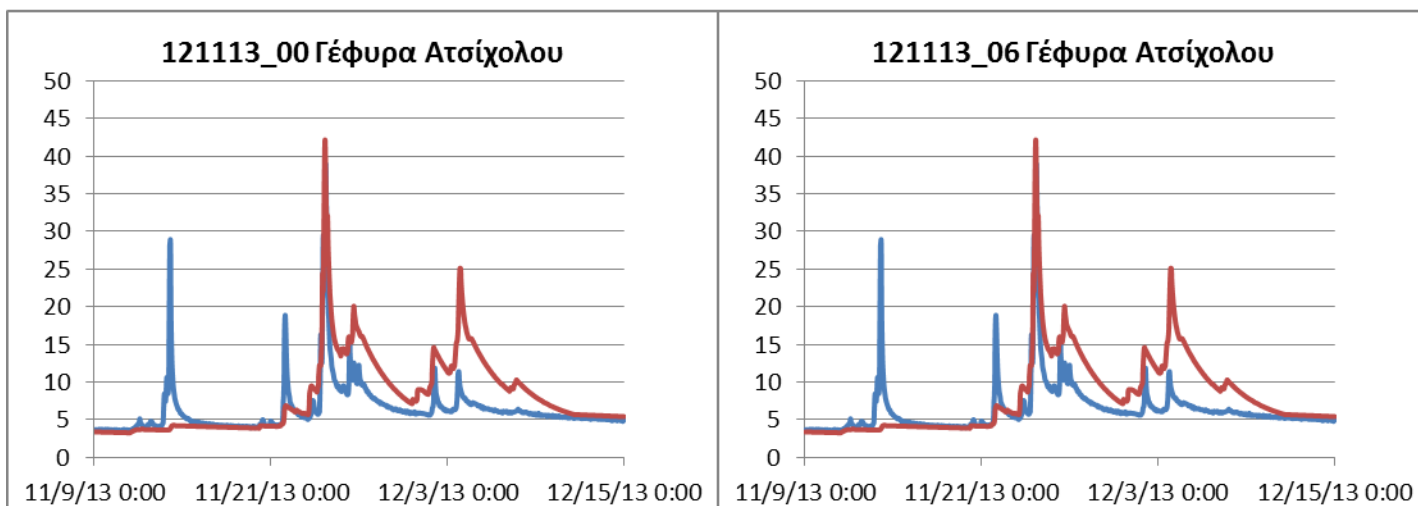
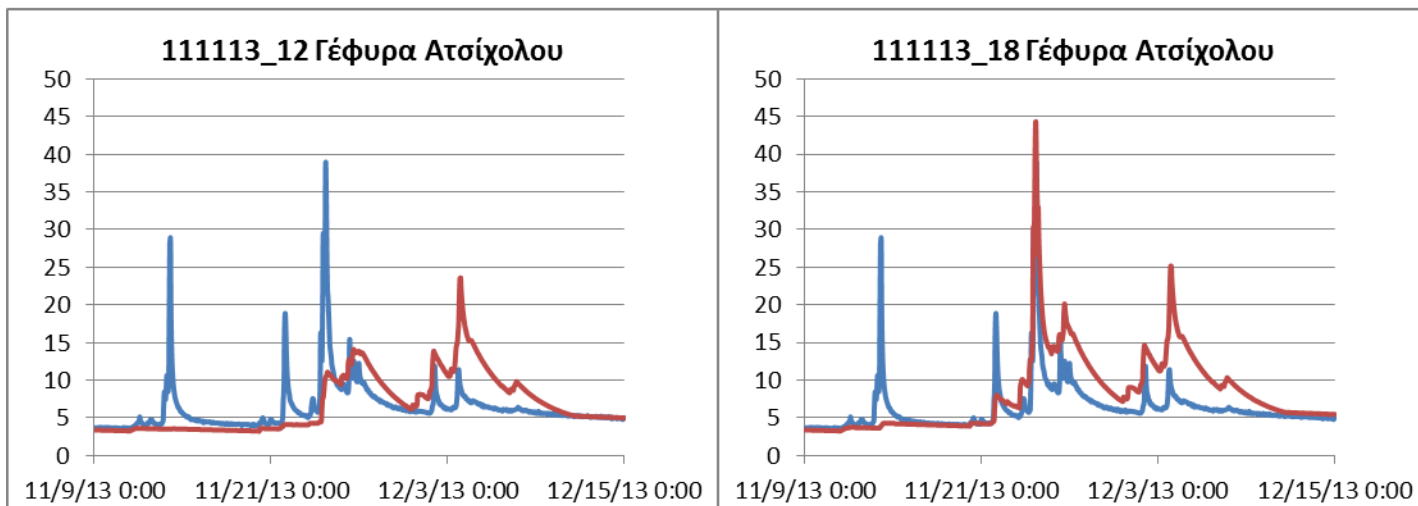
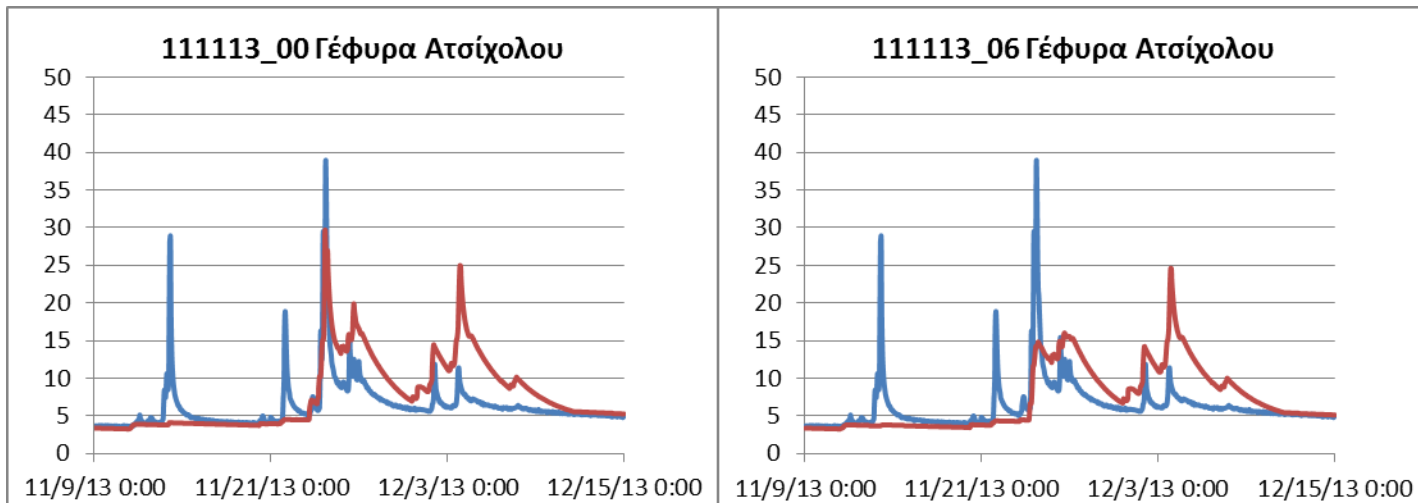
- Η χρονοσειρά 160113_18 δεν προσεγγίζει καθόλου το παρατηρημένο πλημμυρογράφημα (ανοδικούς και καθοδικούς κλάδους), ούτε την αιχμή του, και οφείλεται σε αστοχία του μοντέλου πρόγνωσης.
- Στο τελευταίο διάγραμμα (Σχήμα 6.4) φαίνεται ότι η χρονοσειρά της μέσης τιμής των προγνώσεων των παροχών ταυτίζεται σχεδόν με την παρατηρημένη, με την αιχμή της να είναι $108.2 \text{ m}^3/\text{s}$ (ποσοστό 103% της παρατηρημένης). Από την άλλη, η βαθμονομημένη χρονοσειρά έχει αιχμή $75.2 \text{ m}^3/\text{s}$, η οποία είναι σημαντικά μικρότερη της παρατηρημένης.

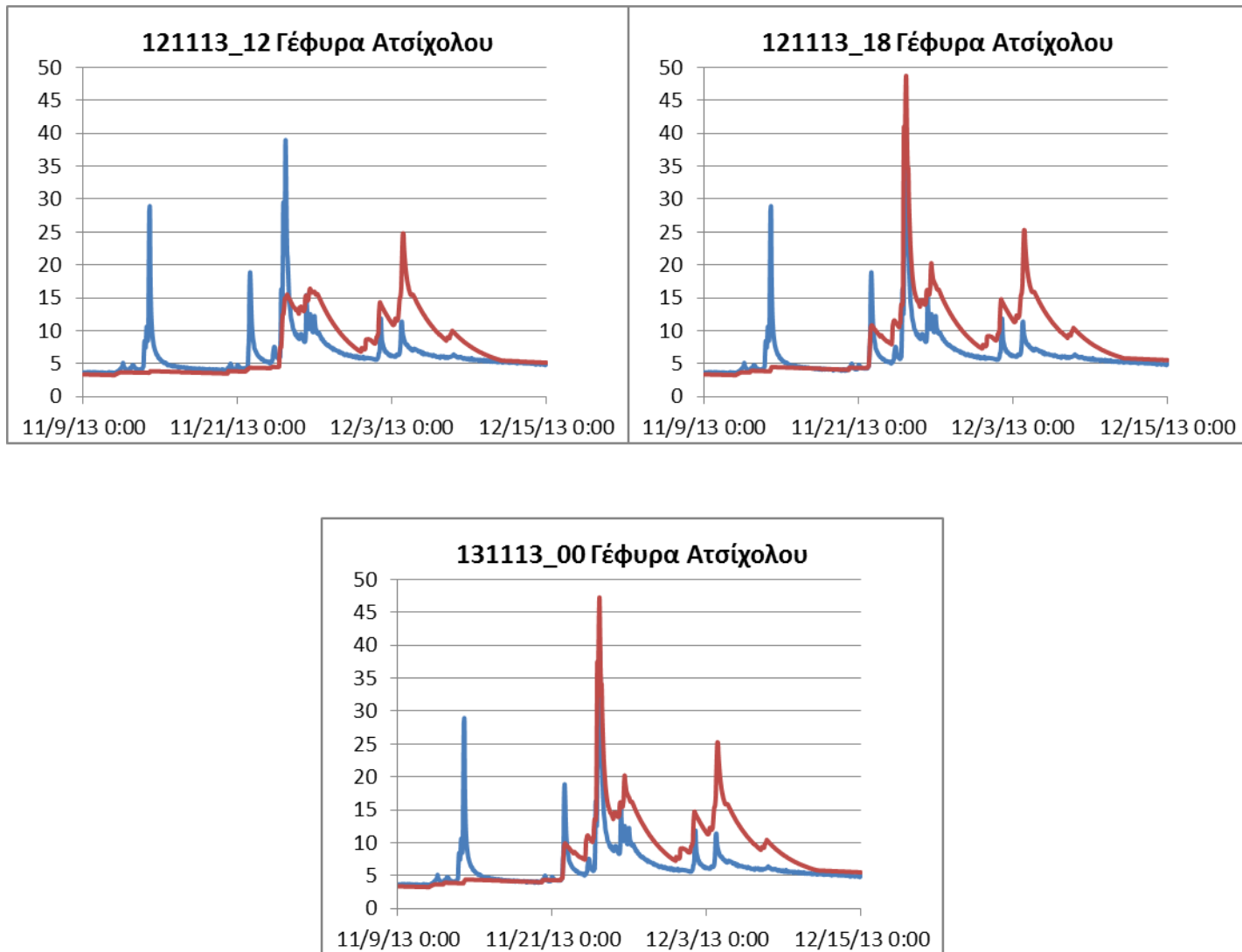
6.3.2 Πλημμυρική πρόγνωση επεισοδίου βροχής 131113

Όπως και παραπάνω, εισάγονται στο μοντέλο οι 17 παρατηρημένες χρονοσειρές με τα αλλαγμένα δεδομένα για το χρονικό διάστημα του επεισοδίου βροχής 131113. Στα διαγράμματα (Σχήματα 6.5 και 6.6) φαίνονται τα αποτελέσματα για την παροχή στο σημείο ελέγχου στην έξοδο της λεκάνης στη Γέφυρα Ατσίχολου. Για σύγκριση παρατίθενται και οι αντίστοιχες παρατηρημένες τιμές παροχής, καθώς και η βαθμονομημένη χρονοσειρά. Το χρονικό διάστημα που παρουσιάζεται ξεκινά στις 09/01/2013 00:00, και λήγει στις 15/12/2013 00:00, όταν και έχει εκφορτιστεί το μεγαλύτερο μέρος της πλημμύρας.

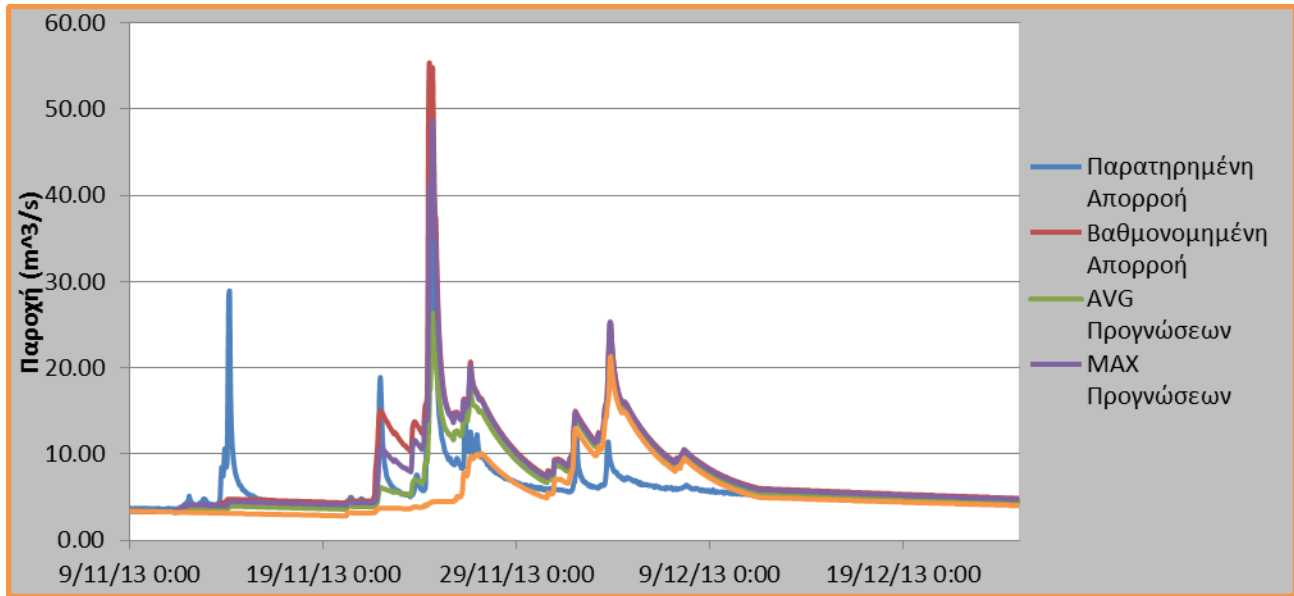








Σχήμα 6.5: Πρόγνωση παροχής στη Γέφυρα Ατσίχολου (κόκκινο) με βάση τις προγνώσεις βροχόπτωσης με την επιφανειακή ανάλυση, σε σύγκριση με την παρατηρημένη παροχή (μπλε), με τα σενάρια πρόγνωσης του επεισοδίου 131113.



Σχήμα 6.6: Μέση (AVG), μέγιστη (MAX) και ελάχιστη (MIN) πρόγνωση παροχής στη Γέφυρα Ατσίχολου με βάση τα 17 σενάρια πρόγνωσης βροχόπτωσης που αναπτύχθηκαν με την επιφανειακή ολοκλήρωση των προγνώσεων για το επεισόδιο 131113.

Με βάση τα παραπάνω διαγράμματα μπορούμε να σχολιάσουμε τα παρακάτω:

- Τα περισσότερα σενάρια προγνώσεων της παροχής για το επεισόδιο 131113 δεν μας δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα, ειδικότερα στις πρώτες προγνώσεις, με τους ανοδικούς και καθοδικούς κλάδους της βαθμονομημένης χρονοσειράς να μην ακολουθούν τους αντίστοιχους της παρατηρημένης. Υπάρχουν όμως κάποιες προγνώσεις που προσεγγίζουν επαρκώς την παρατηρημένη πλημμύρα, ενώ γενικά υπερεκτιμούν την αιχμή της παροχής (091113_12, 101113_12, 111113_18, 121113_00, 121113_06, 121113_18, 131113_00). Τελικά, από τις 17 προγνώσεις, μόνο οι επτά δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα.
- Η αιχμή της παρατηρημένης παροχής είναι ίση με $38.7 \text{ m}^3/\text{s}$ και καταγράφηκε στις 24/11/13 17:00, ενώ η μεγαλύτερη αιχμή των προγνώσεων υπολογίστηκε στην πρόγνωση 121113_18 με τιμή $48.7 \text{ m}^3/\text{s}$. Καλύτερη όμως θεωρείται η πρόγνωση που προσεγγίζει την αιχμή της παρατηρημένης, και εδώ είναι η 121113_00, με τιμή αιχμής $42.2 \text{ m}^3/\text{s}$ στις 24/11/13 16:00, δηλαδή με πολύ μικρή χρονική υστέρηση μίας ώρας. Η βαθμονομημένη αιχμή της παροχής είναι το 109.1% της παρατηρημένης αιχμής, και προφανώς οι μεγάλες υστερήσεις που παρατηρήθηκαν στις βροχοπτώσεις δεν επιβεβαιώνονται για τις παροχές.
- Η καλύτερη πρόγνωση της παροχής (121113_00) έχει χρόνο έναρξης 12 μέρες και 17 ώρες πριν παρατηρηθεί η παροχή αιχμής.
- Στο τελευταίο διάγραμμα (Σχήμα 6.6) φαίνεται ότι η χρονοσειρά της μέσης τιμής των προγνώσεων των πλημμυρικών παροχών υποεκτιμά την παρατηρημένη, με την αιχμή της να είναι $26.4 \text{ m}^3/\text{s}$ (ποσοστό 68.3% της παρατηρημένης), ενώ η βαθμονομημένη χρονοσειρά εμφανίζει αιχμή $55.4 \text{ m}^3/\text{s}$.

Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα και προτάσεις

7.1 Συμπεράσματα

Με σύγκριση όλων των παραπάνω μπορούμε να συμπεράνουμε τα εξής:

- Το υδρολογικό μοντέλο του Λούσιου παρουσιάζει λιγότερο καλή προγνωστική ικανότητα σε σχέση με αυτό του Νέδοντα, όπως αποτυπώνεται στη χαμηλότερη επίδοση του μοντέλου σε όρους αποτελεσματικότητας και αποτελεσματικότητας υψηλών παροχών (βλ. Κεφάλαιο 5.5). Όσον αφορά την μέτρια πρόγνωση για το επεισόδιο βροχής 131113, θεωρείται ότι οφείλεται όχι μόνο στην βαθμονόμηση, αλλά και στα σενάρια πρόγνωσης της βροχής, που έδιναν ήδη μέτρια αποτελέσματα σε σχέση με την παρατηρημένη βροχόπτωση.
- Τα σενάρια προγνώσεων που δίνουν τα καλύτερα αποτελέσματα είναι αυτά που ξεκινούν 36 με 42 ώρες πριν την παρατηρημένη παροχή αιχμής. Αυτή η υπόθεση επιβεβαιώνεται πλήρως στη λεκάνη του Νέδοντα για τις προγνώσεις του επεισοδίου βροχής 170113 και στην δεύτερη καλύτερη πρόγνωση στη λεκάνη του Λούσιου για το επεισόδιο 170113.
- Οι μεγάλες χρονικές υστερήσεις που παρατηρήθηκαν στις προγνώσεις των βροχοπτώσεων σε σχέση με τις παρατηρημένες τιμές δεν παρατηρούνται στις αντίστοιχες χρονοσειρές των απορροών, αφού η μεγαλύτερη χρονική υστέρηση είναι της τάξης των 7 ωρών.

7.2 Προτάσεις επιχειρησιακής αξιοποίησης μεθοδολογίας

Με βάση τη μεθοδολογία της εργασίας μπορεί να προταθεί η ανάπτυξη ενός συστήματος πλημμυρικής πρόγνωσης σε σχεδόν πραγματικό χρόνο για τις λεκάνες απορροής του Νέδοντα και του Λούσιου. Η προτεινόμενη διαδικασία λειτουργίας του συστήματος είναι η εξής:

1. Λήψη δεδομένων βροχόπτωσης και παροχής από τους μετεωρολογικούς και υδρομετρικούς σταθμούς των δύο λεκανών.
2. Συνεχής προσομοίωση της παροχής μέσω των υδρολογικών μοντέλων των δύο λεκανών, με βάση τα στοιχεία που συλλέγονται από το μετρητικό δίκτυο.
3. Τακτική αναθεώρηση του βέλτιστου σετ παραμέτρων κάθε λεκάνης με νέες βαθμονομήσεις, ώστε να αναπαριστά αποτελεσματικότερα τις υδρολογικές διεργασίες κάθε λεκάνης και κυρίως τα πλημμυρικά επεισόδια.

4. Παραγωγή δεδομένων πρόγνωσης βροχής μέσω διαδοχικών προσομοιώσεων με το αριθμητικό μοντέλο WRF, με χρήση πλέγματος λεπτομερούς ανάλυσης (π.χ., 2×2 km) που καλύπτει όλη την περιοχή της Πελοποννήσου. Η παραγωγή δεδομένων θα πραγματοποιείται ανά έξι ώρες με χρόνο έναρξης τον πραγματικό χρόνο εκτέλεσης της πρόγνωσης και χρόνο λήξης 48, 42, 36 και 30 ώρες μετά το χρόνο έναρξης.
5. Αξιολόγηση μετεωρολογικών προγνώσεων ώστε σε περίπτωση που κριθεί ότι υπάρχει ενδεχόμενο σημαντικού επεισοδίου βροχής να συνεχίζεται η διαδικασία των επόμενων βημάτων.
6. Συγκέντρωση ανά έξι ώρες των προγνώσεων με ίδιο χρόνο λήξης και υλοποίηση ensemble προγνώσεων μέσω των ίδιων των προσομοιώσεων (μια ολοκληρωμένη εφαρμογή ensemble πρόγνωσης θα έχει διάρκεια 24 ώρες και θα περιλαμβάνει πολλαπλά σενάρια πρόγνωσης βροχόπτωσης, με αρχικές συνθήκες που θα αναθεωρούνται ανά 48, 42, 36 και 30 ώρες).
7. Επιφανειακή ολοκλήρωση των προγνώσεων βροχόπτωσης στις δύο λεκάνες.
8. Εφαρμογή μοντέλων με είσοδο τα σενάρια πρόγνωσης της βροχόπτωσης και παραγωγή αντίστοιχων σεναρίων πλημμυρικών παροχών.
9. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων έτσι ώστε σε περίπτωση που ένα ή περισσότερα σενάρια πρόγνωσης υπερβαίνουν τα εκ των προτέρων καθορισμένα κρίσιμα όρια πλημμυρικής επικινδυνότητας να γίνεται άμεση ενημέρωση των αρμόδιων αρχών (π.χ. δήμοι, υπηρεσίες πολιτικής προστασίας κτλ).

Βέβαια, είναι δεδομένο ότι η εφαρμογή ενός τέτοιου επιχειρησιακού συστήματος απαιτεί πρώτα από όλα τη δημιουργία ενός φορέα παρακολούθησης του μετρητικού δικτύου και λειτουργίας του συστήματος πλημμυρικών προγνώσεων, με την συνεργασία και άλλων υπηρεσιών. Επίσης είναι απαραίτητη η δημιουργία νέων υποδομών για την διευκόλυνση της άμεσης μετάδοσης των μετεωρολογικών και υδρομετρικών μετρήσεων και η ανάπτυξη τεχνολογιών με στόχο την εκτέλεση των υπολογισμών σε σχεδόν πραγματικό χρόνο, διαδικασία που απαιτεί σημαντικό υπολογιστικό φόρτο.

7.3 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

1. Οι λεκάνες του Νέδοντα και του Λούσιου είναι ορεινές λεκάνες και κυρίως αυτή του Λούσιου κατά τη διάρκεια του χειμώνα πλήττεται από σημαντικές χιονοπτώσεις. Προτείνεται, λοιπόν, η ανάπτυξη ολοκληρωμένων υδρολογικών μοντέλων για τις λεκάνες του Λούσιου και του Νέδοντα, που θα εμπεριέχει και την απορροή από την τήξη του χιονιού.
2. Η χρήση των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας για τον καθορισμό των ορίων επικινδυνότητας για της πλημμύρες, τα οποία δεν έχουν καθοριστεί λόγω και της καθυστέρησης της εφαρμογής της Οδηγίας Πλαίσιο 2007/60/EK για τις Πλημμύρες. Η ολοκληρωμένη υδραυλική προσομοίωση των δυο λεκανών, θα μπορούσε να οδηγήσει στην κατασκευή των χαρτών επικινδυνότητας πλημμύρας (flood hazard maps) και των χαρτών κινδύνων πλημμύρας (flood risk maps) ώστε να επιτευχθούν οι στόχοι για την πλημμυρική προστασία των περιοχών.

3. Η πιο λεπτομερής ανάλυση του μοντέλου του Νέδοντα, έτσι ώστε συμπεριληφθούν στους κόμβους ελέγχου και οι ανάντη υδρομετρικοί σταθμοί, που είναι ήδη τοποθετημένοι στην λεκάνη στις θέσεις Αλαγονία, Καρβελιώτης και Νέδουσα. Η ανάπτυξη ενός τέτοιου μοντέλου είναι απαραίτητη, καθώς επιτρέπει την καλύτερη κατανόηση των μηχανισμών γέννησης της απορροής, που διαφοροποιούνται σημαντικά λόγω της μεγάλης έκτασης και της έντονης ανομοιογένειας των φυσιογραφικών χαρακτηριστικών της λεκάνης.

4. Η βελτίωση της μεθόδου των μετεωρολογικών προγνώσεων με χρήση της μεθόδου αφομοίωσης δεδομένων (data assimilation). Η μέθοδος της αφομοίωσης δεδομένων ουσιαστικά συνδυάζει τις παρατηρημένες τιμές του παρόντος ή του κοντινού παρελθόντος με τις τιμές που παράγει το επιλεγμένο αριθμητικό μοντέλο πρόγνωσης καιρού με σκοπό την διόρθωση της πρόγνωσης, μειώνοντας το σφάλμα μεταξύ των τιμών. Αυτή η μέθοδος έχει μεγάλο υπολογιστικό φόρτο, αφού κάνει υπολογισμούς σε πραγματικό χρόνο, αλλά δίνει πιο αξιόπιστες προβλέψεις των μετεωρολογικών δεδομένων.

Βιβλιογραφία

Ευρωπαϊκή Επιτροπή, Οδηγία 2007/60/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23ης Οκτωβρίου 2007 για την αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας, Επίσημη Εφημερίδα των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων, 8 σελίδες, ΕΛ, 6/11/2007: L288/27-L288/34

Ευστρατιάδης, Α., Μη γραμμικές μέθοδοι σε πολυκριτηριακά προβλήματα βελτιστοποίησης υδατικών πόρων, με έμφαση στη βαθμονόμηση υδρολογικών μοντέλων, Διδακτορική Διατριβή, 391 σελίδες, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, Αθήνα, 2008

Ευστρατιάδης, Α., Α. Κουκοβίνος, Π. Δημητριάδης, Π. Κοσσιέρης, και Α. Κούσης, Ανάπτυξη φυσικά εδραιωμένων εργαλείων υδρολογίας πλημμύρων, ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ – Εκτίμηση πλημμυρικών ροών στην Ελλάδα σε συνθήκες υδροκλιματικής μεταβλητότητας: Ανάπτυξη φυσικά εδραιωμένου εννοιολογικού-πιθανολογικού πλαισίου και υπολογιστικών εργαλείων, 108 σελίδες, Ανάδοχοι: Γραφείο Μελετών ΕΤΜΕ – Πέππας και Συνεργάτες Ε.Ε., Γραφείο Μαχαίρα Α.Ε., Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών – Ινστιτούτο Ερευνών Περιβάλλοντος και Βιώσιμης Ανάπτυξης, Αθήνα, 2014

Ευστρατιάδης, Α., Α. Κουκοβίνος, Ν. Μαμάσης και Δ. Κουτσογιάννης, Μεθοδολογία εκτίμησης πλημμυρογραφημάτων σχεδιασμού, 13 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Μάιος 2014

Ευστρατιάδης, Α., Δ. Κουτσογιάννης, Ν. Μαμάσης, Π. Δημητριάδης, και Α. Μαχαίρας, Βιβλιογραφική επισκόπηση υδρολογίας πλημμύρων και συναφών εργαλείων, ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ – Εκτίμηση πλημμυρικών ροών στην Ελλάδα σε συνθήκες υδροκλιματικής μεταβλητότητας: Ανάπτυξη φυσικά εδραιωμένου εννοιολογικού-πιθανοτικού πλαισίου και υπολογιστικών εργαλείων, Ανάδοχοι: ΕΤΜΕ: Πέππας & Συν/τες Ε.Ε., Γραφείο Μαχαίρα, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, 115 σελίδες, Οκτώβριος 2012, Αθήνα

Ευστρατιάδης, Α., και Μαμάσης, Η Οδηγία πλαίσιο 2007/60 για την εκτίμηση και διαχείριση της πλημμυρικής διακινδύνευσης, Παρουσίαση για το μάθημα «Διαχείριση Υδατικών Πόρων» του μεταπτυχιακού προγράμματος ΔΠΜΣ Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων, 17 σελίδες, Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2011

Ευστρατιάδης, Α., Ε. Ρόζος, και Α. Κουκοβίνος, Υδρόγειος: Μοντέλο υδρολογικής και υδρογεωλογικής προσομοίωσης – Θεωρητική Τεκμηρίωση, 139 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2009

Ζαρκαδούλας, Α., Ανάπτυξη μοντέλου υδρομετεωρολογικής πρόγνωσης στη χειμναρική λεκάνη του Σαρανταπόταμου, Διπλωματική Εργασία, 197 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιούλιος 2014

Ζωγάκης, Χ., Σύγκριση Μοντέλων Γεγονότος και Συνεχούς Προσομοίωσης για την εκτίμηση πλημμυρικών μεγεθών: Εφαρμογή στη λεκάνη του Νέδοντα, Μεταπτυχιακή Εργασία, 190 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Μάρτιος 2013

Κοτρώνη, Β., Εισαγωγή στην Αριθμητική Πρόγνωση Καιρού – Μετεωρολογικά Μοντέλα, Παρουσίαση για το μάθημα «Υδρομετεωρολογία» του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων», 55 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2010

Κοτρώνη, Β., Κωλέτσης Ι., Λαγουβάρδος Κ., Τεχνική έκθεση θεωρητικής τεκμηρίωσης μοντέλων πρόγνωσης καταιγίδων, ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ – Εκτίμηση πλημμυρικών ροών στην Ελλάδα σε συνθήκες υδροκλιματικής μεταβλητότητας: Ανάπτυξη φυσικά εδραιωμένου εννοιολογικού-πιθανολογικού πλαισίου και υπολογιστικών εργαλείων, Ανάδοχοι: Γραφείο Μελετών ΕΤΜΕ – Αντωνίου – Πέππας και Συνεργάτες, Γραφείο Μαχαίρα, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, 16 σελίδες, Ιούλιος 2014 (εκκρεμεί)

Κουκοβίνος, Α., Γεωγραφικά δεδομένα και επεξεργασίες, ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ – Εκτίμηση πλημμυρικών ροών στην Ελλάδα σε συνθήκες υδροκλιματικής μεταβλητότητας: Ανάπτυξη φυσικά εδραιωμένου εννοιολογικού-πιθανολογικού πλαισίου και υπολογιστικών εργαλείων, Ανάδοχοι: Γραφείο Μελετών ΕΤΜΕ – Αντωνίου – Πέππας και Συνεργάτες, Γραφείο Μαχαίρα, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, 36 σελίδες, Μάρτιος 2012

Κούσης, Α. Δ., Σ. Λυκούδης και Γ. Καραβοκυρός, Τεχνική έκθεση περιγραφής μετρητικού συστήματος τηλεμετάδοσης - επεξεργασίας δεδομένων, ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ – Εκτίμηση πλημμυρικών ροών στην Ελλάδα σε συνθήκες υδροκλιματικής μεταβλητότητας: Ανάπτυξη φυσικά εδραιωμένου εννοιολογικού-πιθανολογικού πλαισίου και υπολογιστικών εργαλείων, Ανάδοχοι: Γραφείο Μελετών ΕΤΜΕ – Αντωνίου – Πέππας και Συνεργάτες, Γραφείο Μαχαίρα, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, 77 σελίδες, Μάρτιος 2012

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

Μαμάσης, Ν., και Δ. Κουτσογιάννης, Σημειώσεις Υδρομετεωρολογίας - Μέρος 2, Έκδοση 2, 176 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2000

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

Bartholmes J. C., Thielen J., Ramos M. H., and Gentilini S., The european flood alert system EFAS – Part 2: Statistical skill assessment of probabilistic and deterministic operational forecasts, *Hydrology and Earth System Sciences*, 13, 141-153, 2009

Buizza, R., Hollingsworth, A., Lalauette F., and Ghelli A., Probabilistic Predictions of Precipitation Using the ECMWF Ensemble Prediction System, *Weather and Forecasting*, 14, 168-189, 1999

Efstratiadis, A., and D. Koutsoyiannis, One decade of multi-objective calibration approaches in hydrological modeling: a review, *Hydrological Sciences Journal*, 55(1), 58-78, 2010

Koutsoyiannis, D., N. Mamassis, A. Efstratiadis, N. Zarkadoulas, and Y. Markonis, Floods in Greece, Changes of Flood Risk in Europe, edited by Z. W. Kundzewicz, Chapter 12, 238–256, IAHS Press, Wallingford – International Association of Hydrological Sciences, 2012.

Tegos, A., Efstratiadis A., and Koutsoyiannis D., A parametric model for potential evapotranspiration estimation based on a simplified formulation of the Penman-Monteith equation, *Evapotranspiration: An Overview*, edited by S.G. Alexandris, 143-166, InTech, 2013

World Meteorological Organisation, *International Glossary of Hydrology*, No. 385, 2012

World Meteorological Organisation, *Manual on Flood Forecasting and Warning*, No. 1072, 2011

Zarkadoulas A., Mantesi K., Efstratiadis D., Koussis A., Mazi A., Katsanos D., Koukouvinos A. & Koutsoyiannis D., A hydrometeorological forecasting approach for basins with complex flow regime, European Geosciences Union General Assembly 2015, Department of Water Resources & Environmental Engineering, National Technical University of Athens, Institute of Environmental Research and Sustainable Development, National Observatory of Athens, 2015

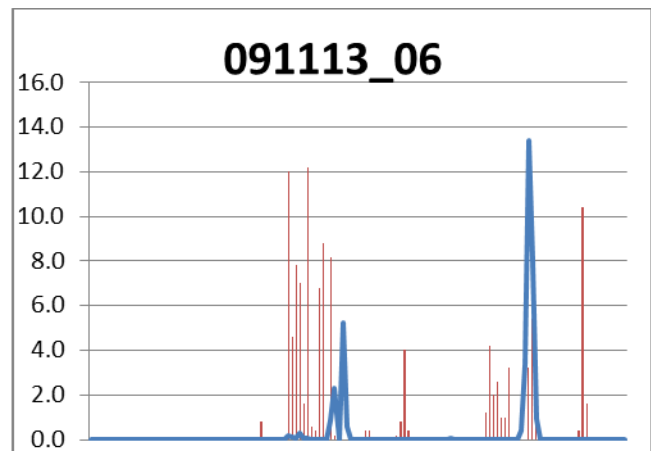
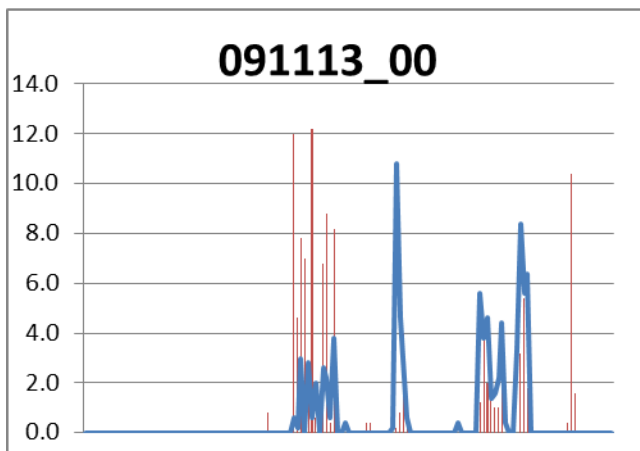
Παράρτημα Α: Διαγράμματα από τις αναλύσεις μετεωρολογικής πρόγνωσης

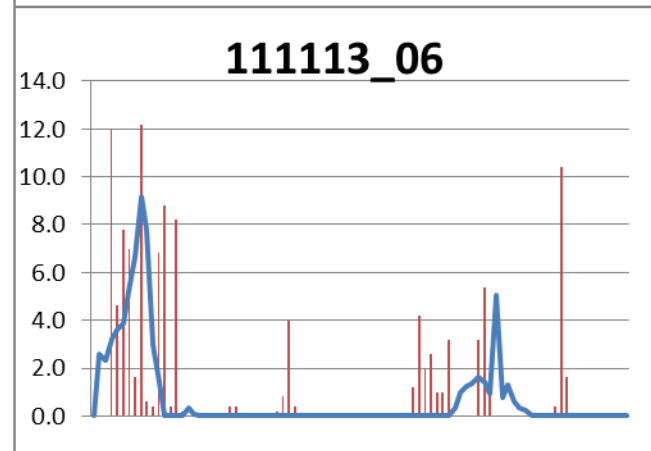
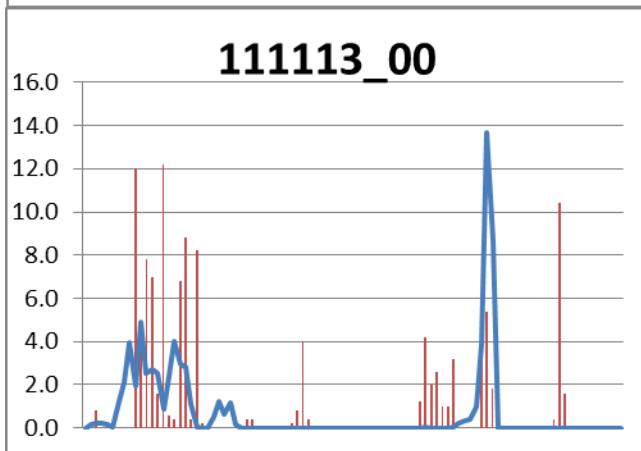
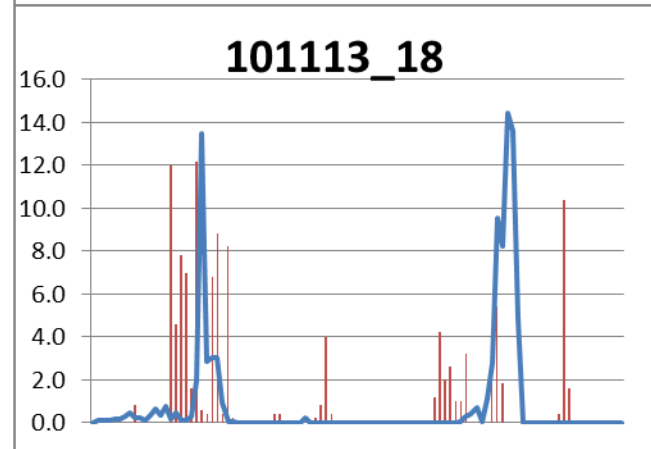
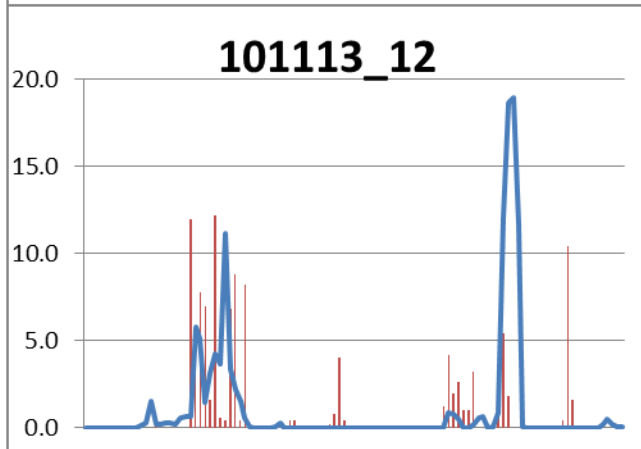
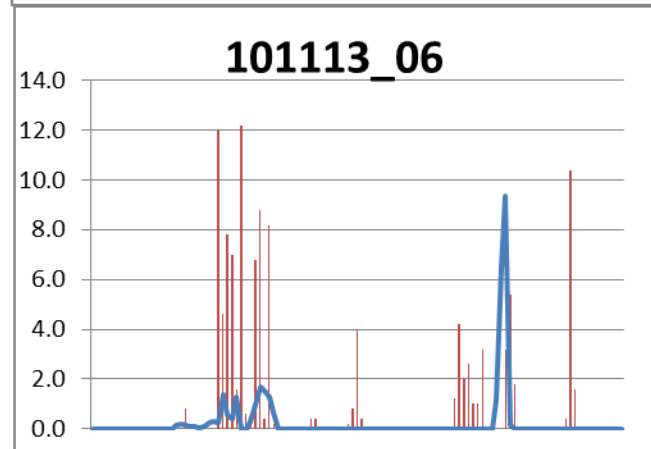
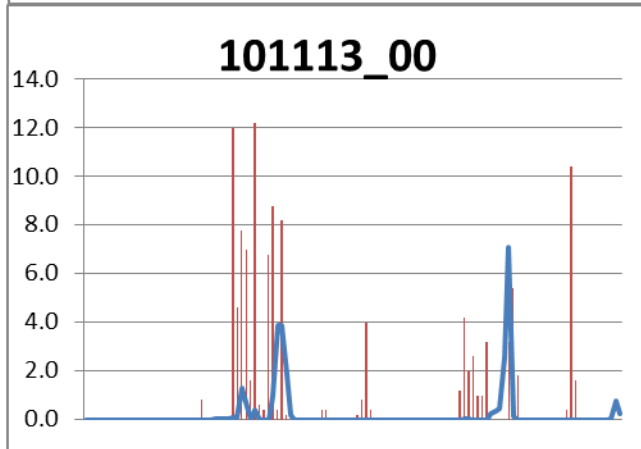
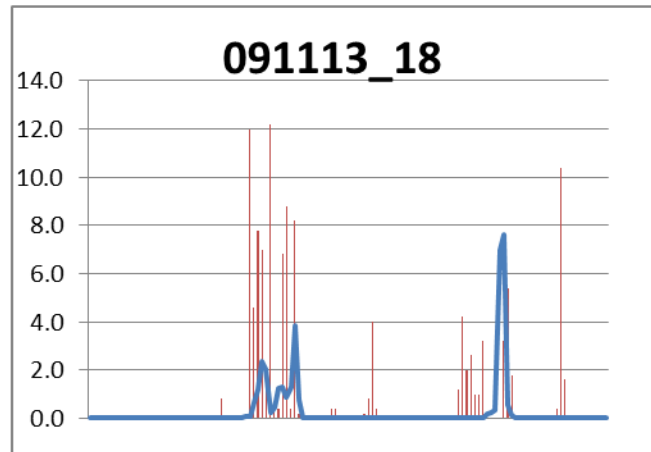
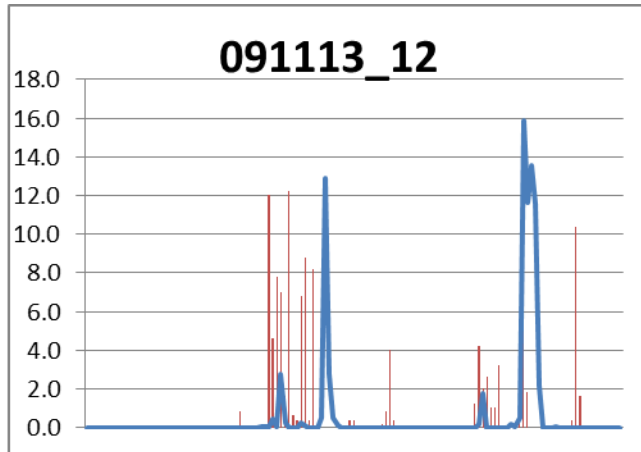
Στο Παράρτημα Α παρουσιάζονται τα διαγράμματα από την εξέλιξη της πρόγνωσης με σημειακή και επιφανειακή ανάλυση για όλους τους μετεωρολογικούς σταθμούς στη λεκάνη του Νέδοντα και του Λούσιου.

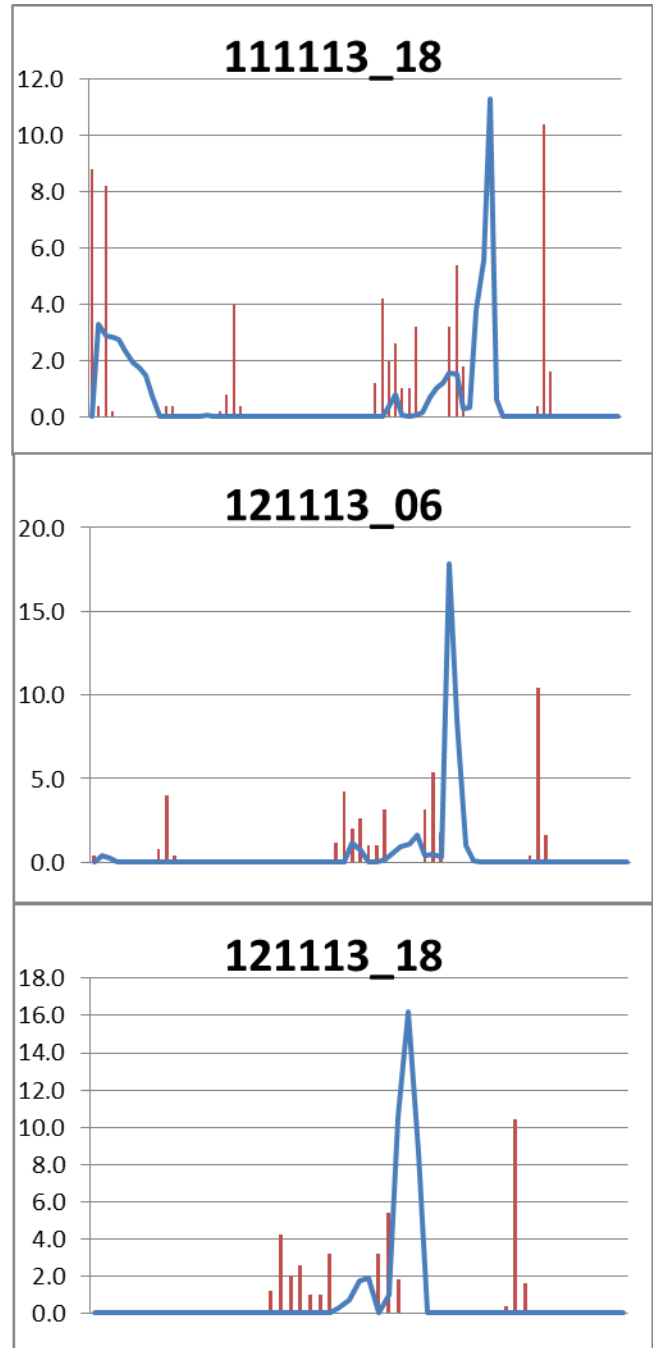
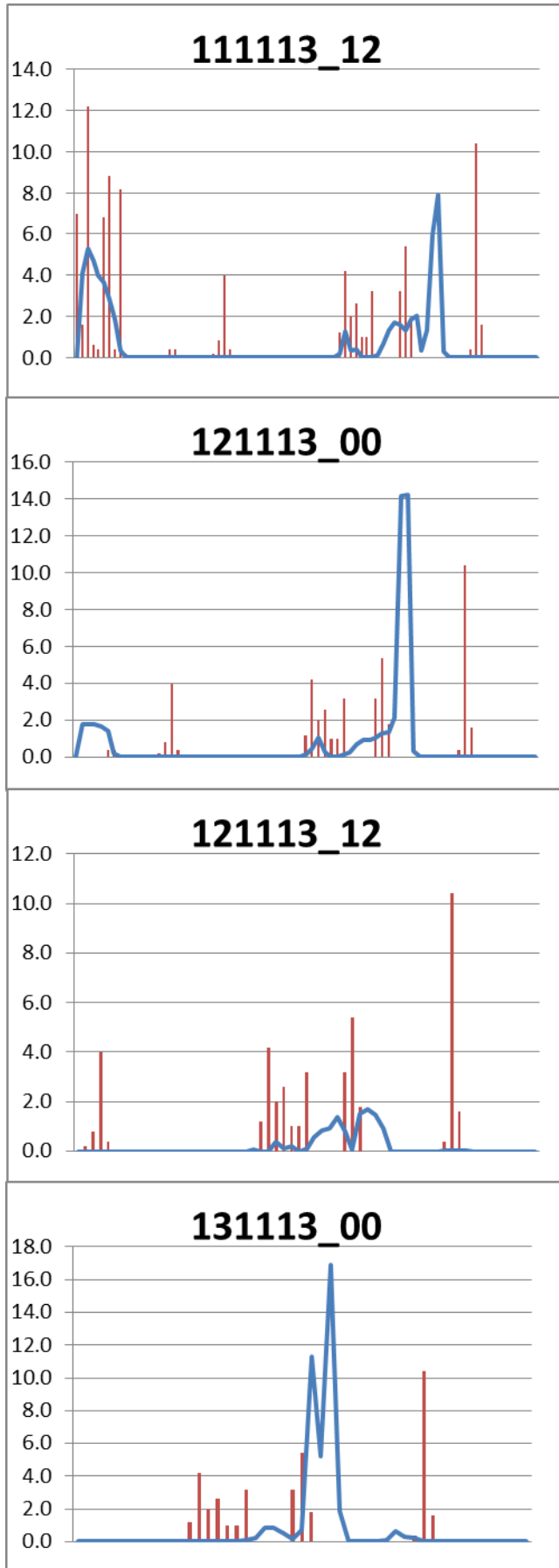
1. Σημειακή ανάλυση με βελτιστοποίηση της συμμετοχής των γειτονικών διακριτών σημείων

Λεκάνη Νέδοντα

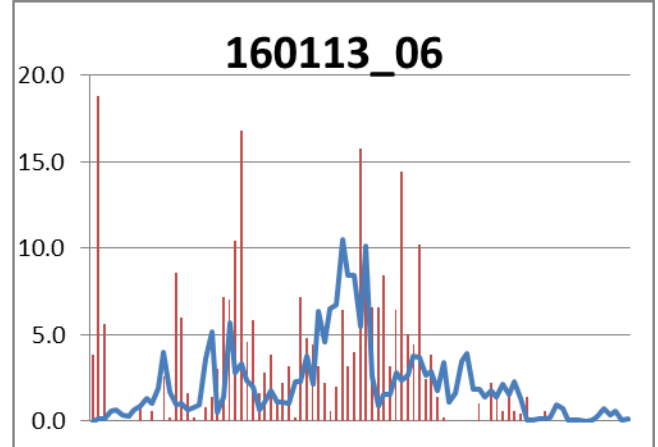
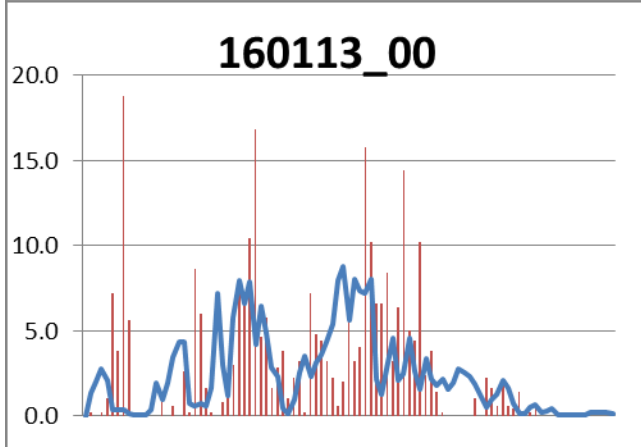
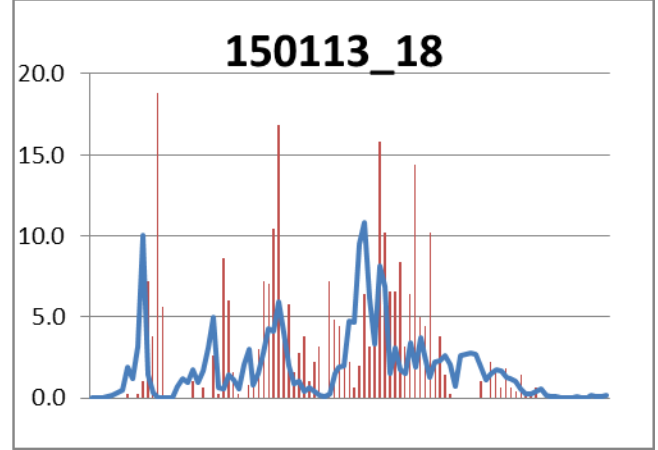
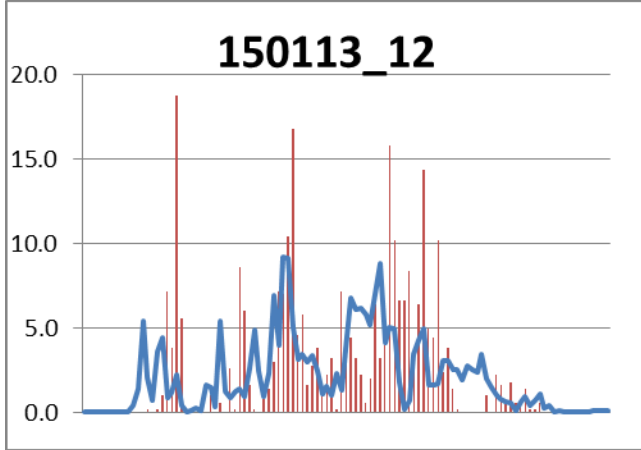
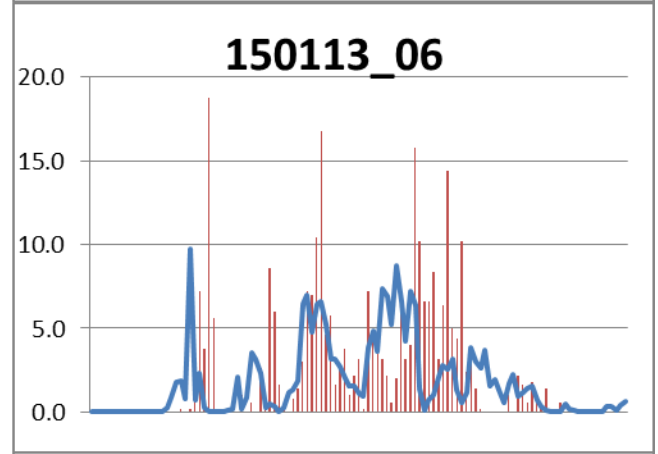
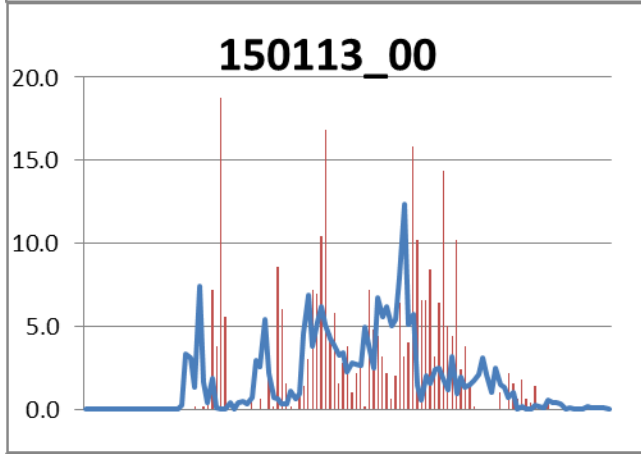
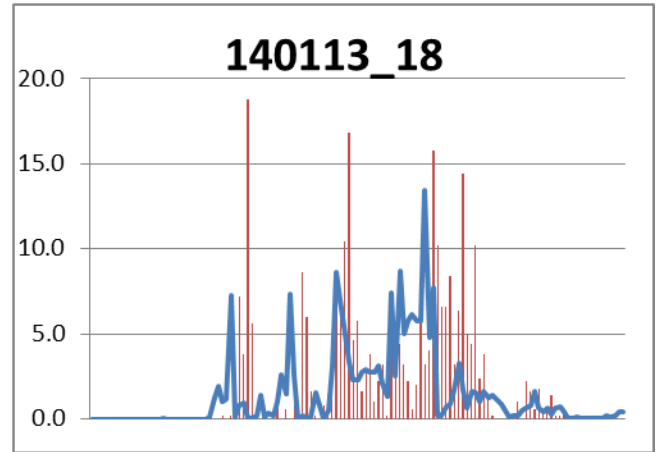
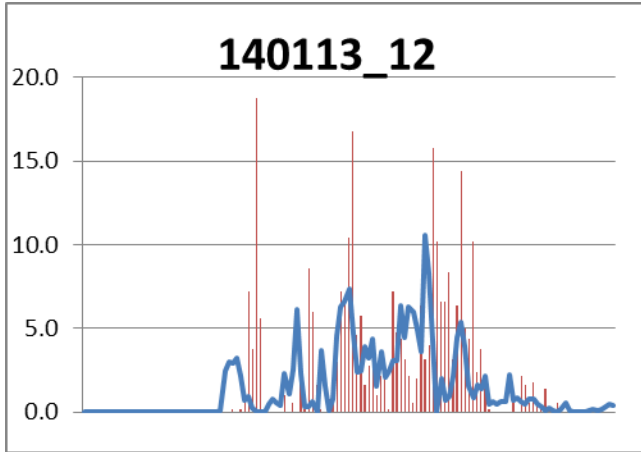
➤ Αλαγονία

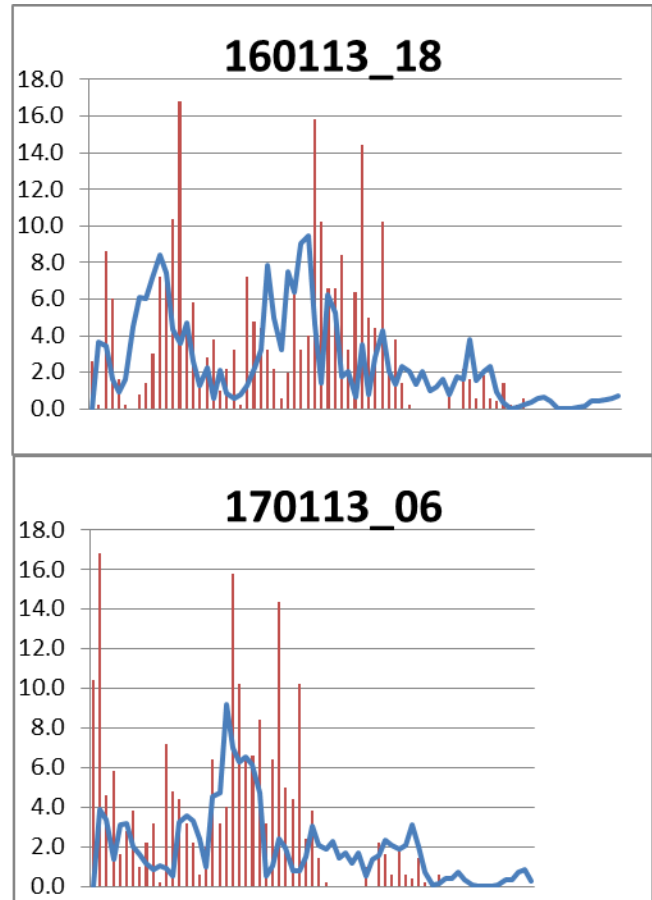
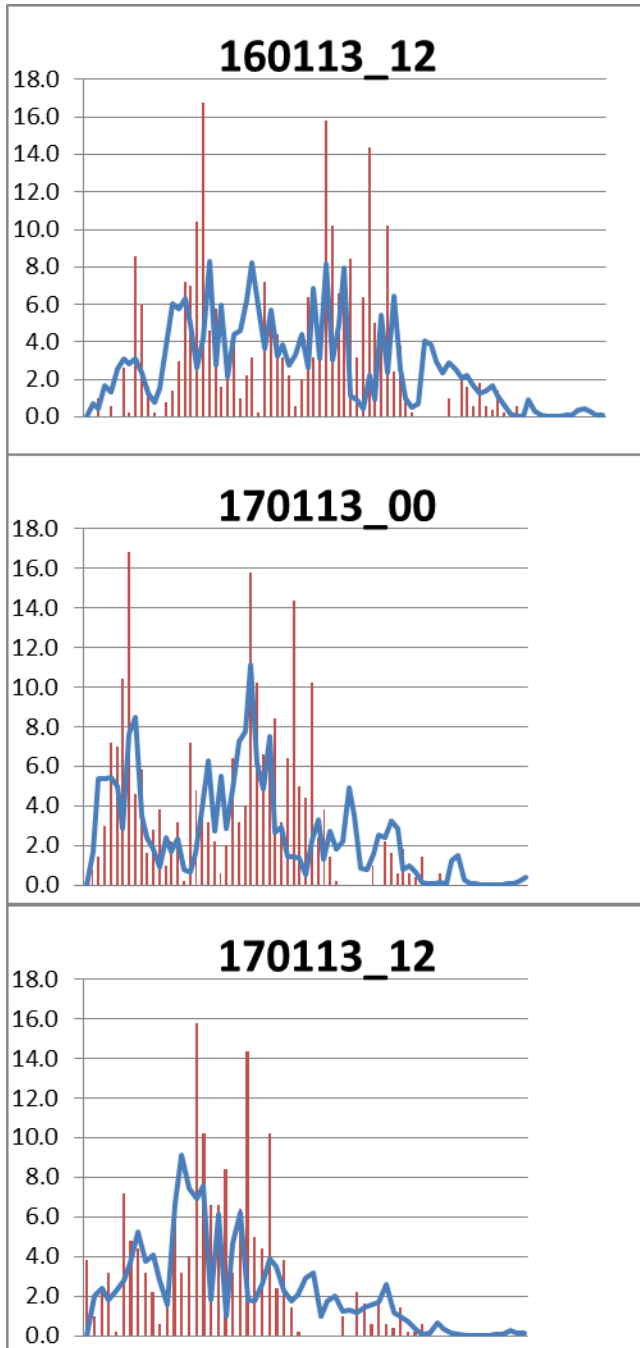






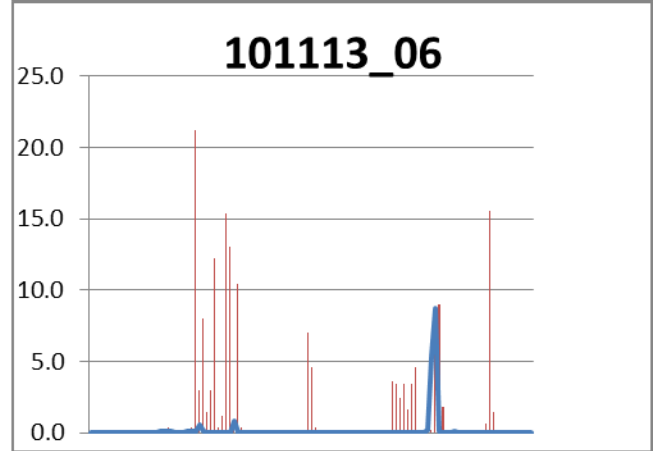
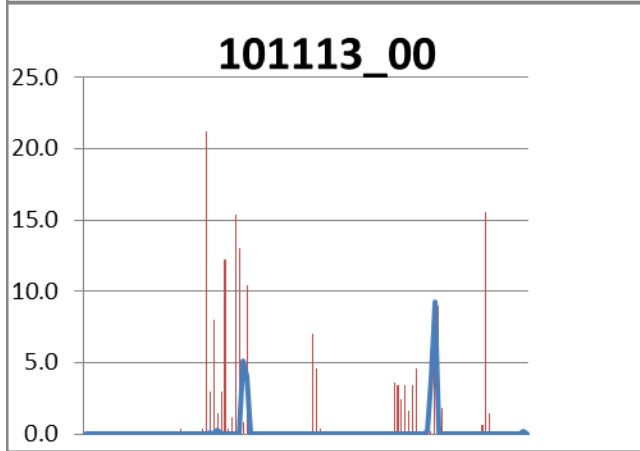
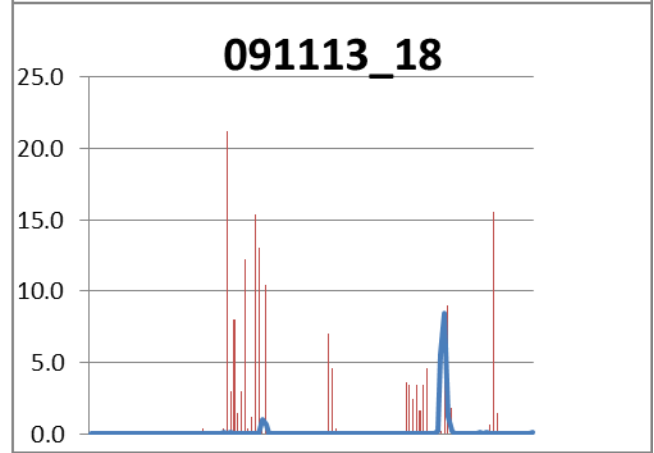
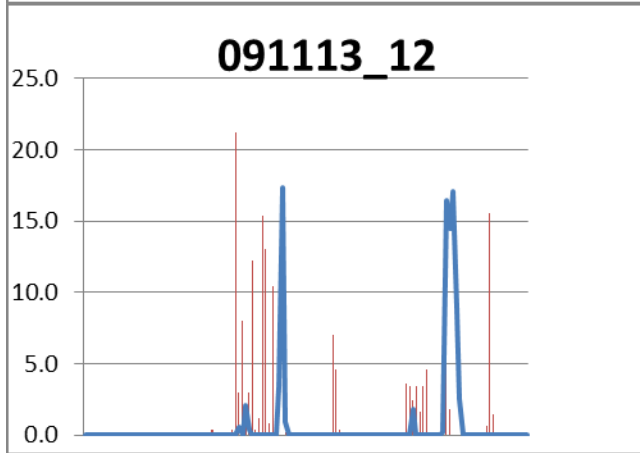
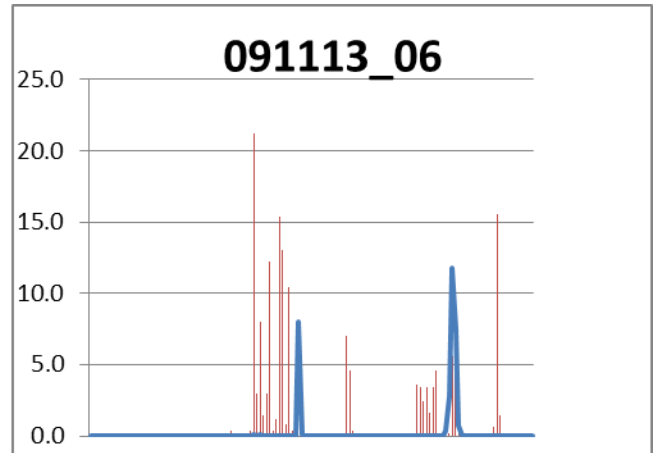
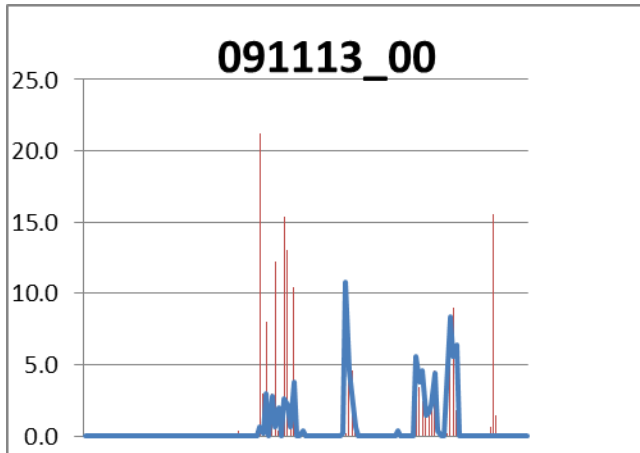
Σχήμα 1: Η εξέλιξη της πρόγνωσης στον σταθμό Αλαγονία για το επεισόδιο βροχής **131113**. Με κόκκινες ράβδους απεικονίζεται η παρατηρημένη βροχόπτωση. Με μπλε συνεχή γραμμή η πρόγνωση.

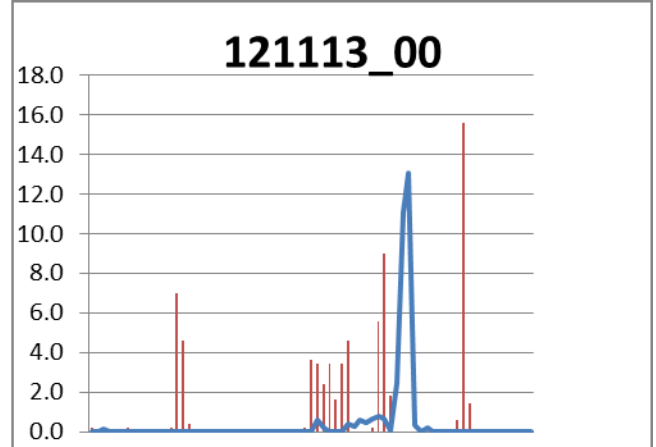
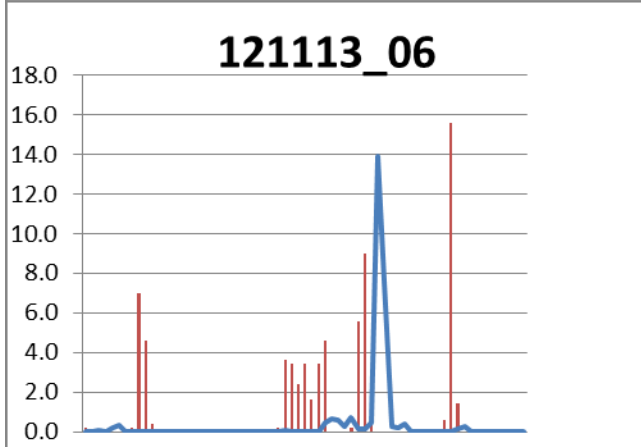
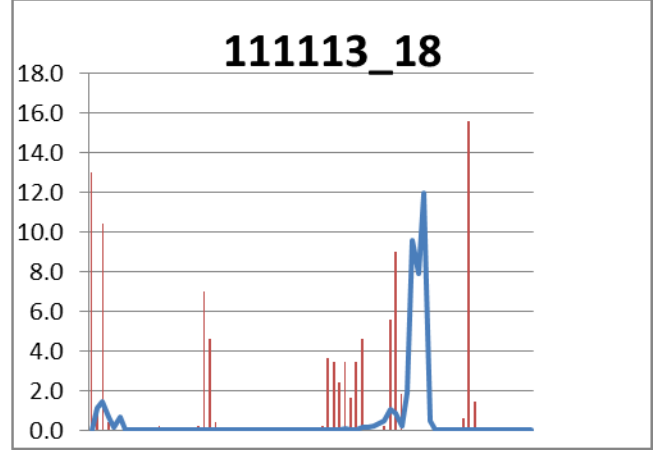
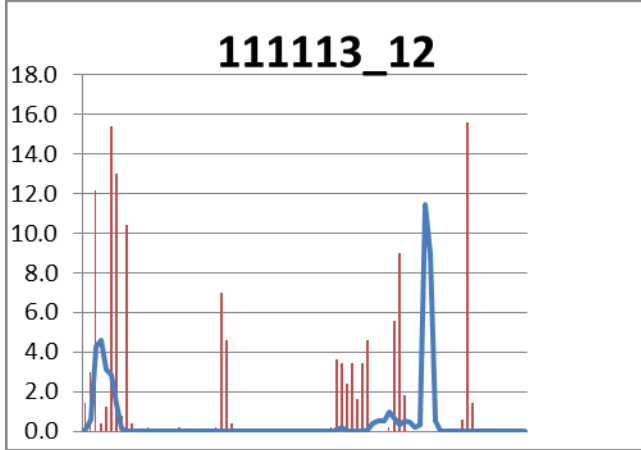
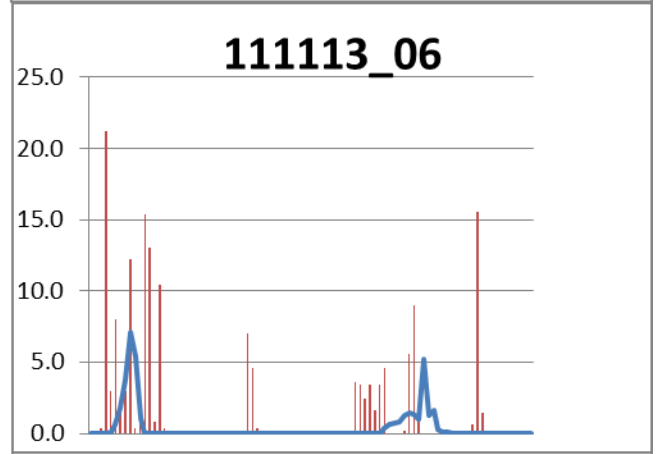
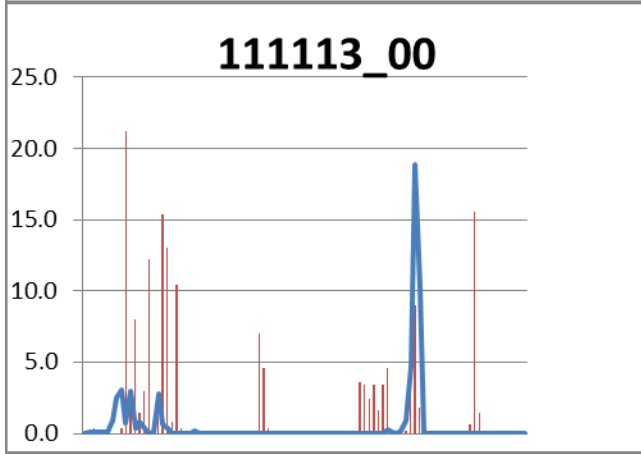
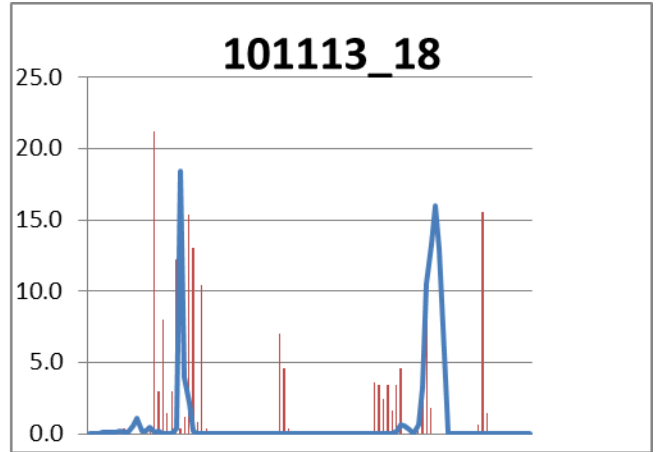
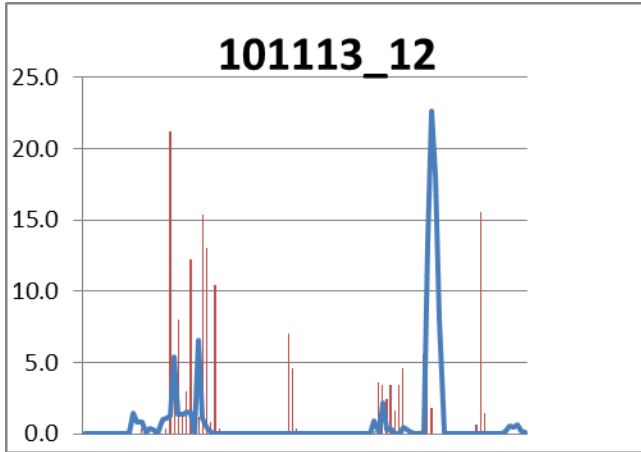


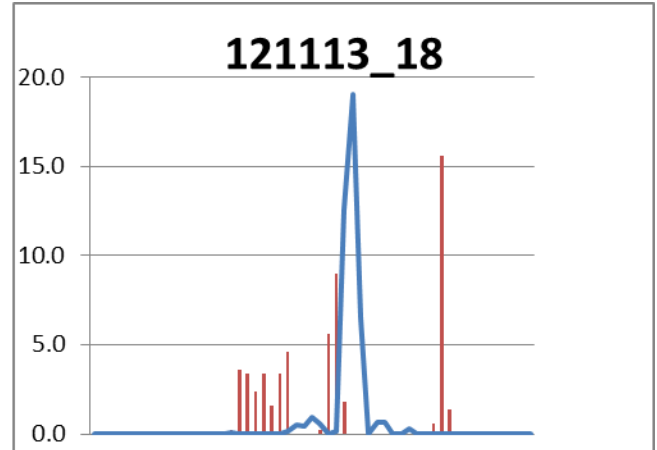
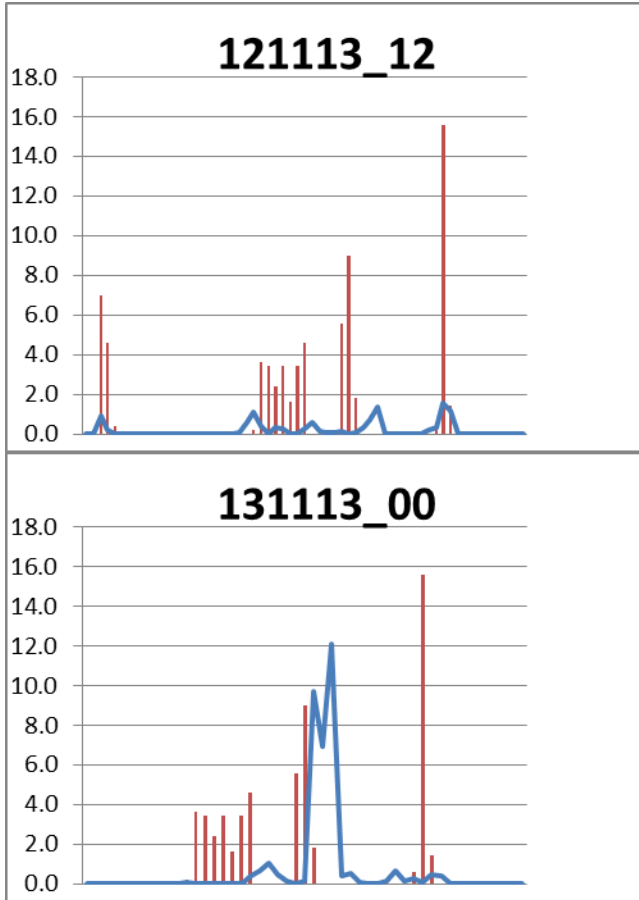


*Σχήμα 2: Η εξέλιξη της πρόγνωσης στον σταθμό Αλαγονία για το επεισόδιο βροχής **170113**. Με κόκκινες ράβδους απεικονίζεται η παρατηρημένη βροχόπτωση. Με μπλε συνεχή γραμμή η πρόγνωση.*

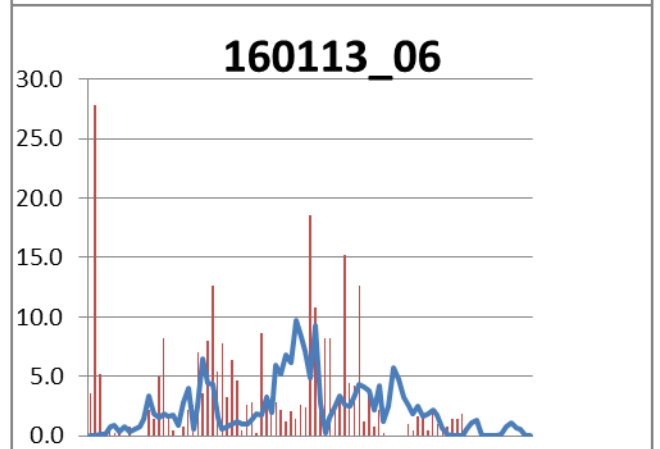
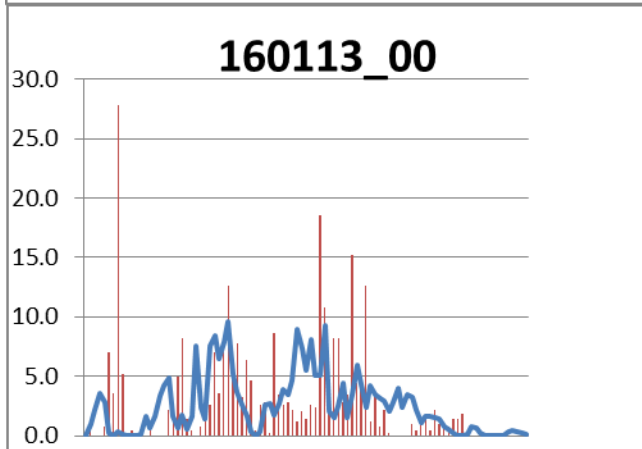
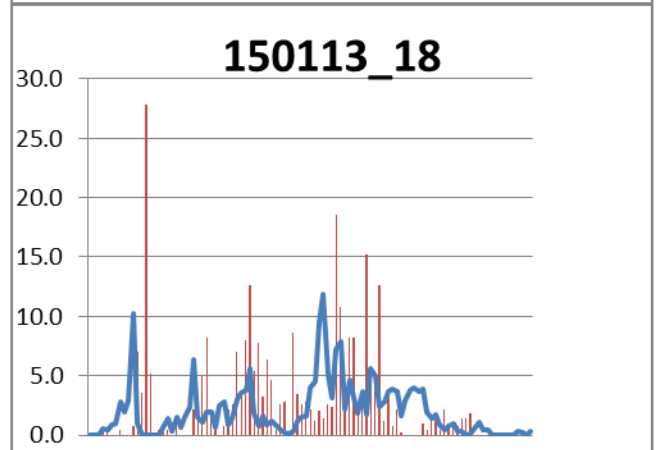
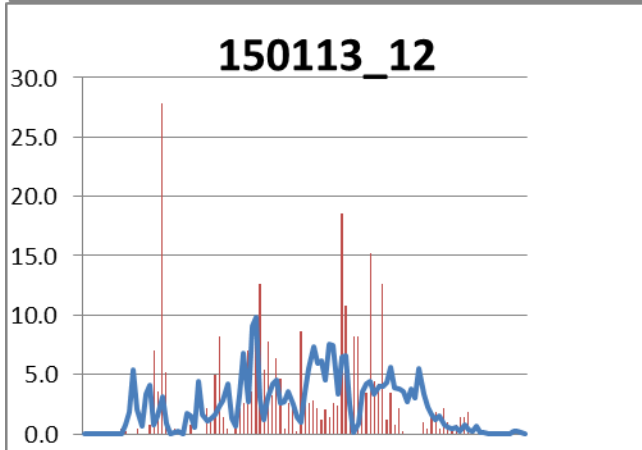
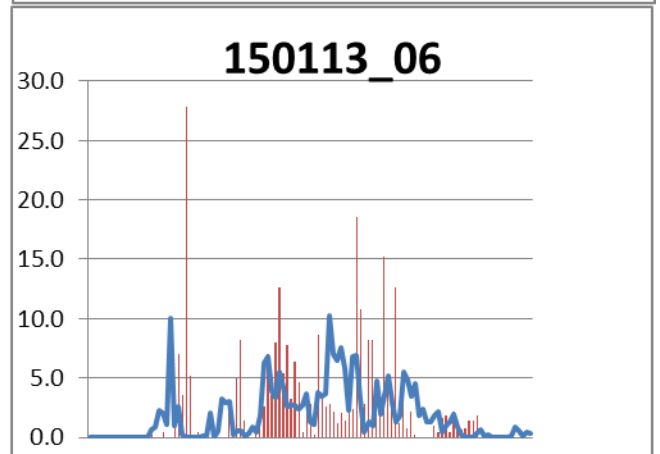
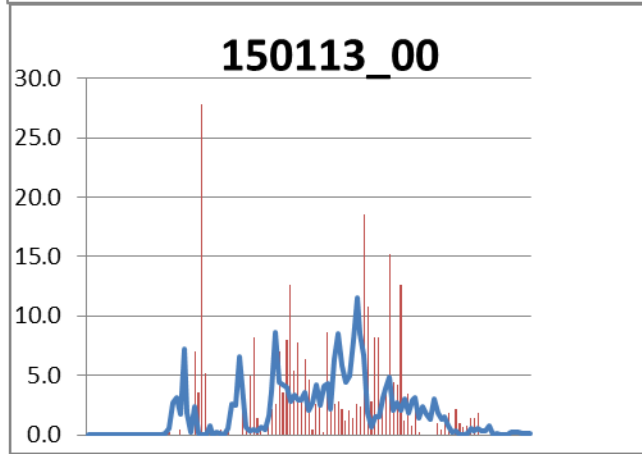
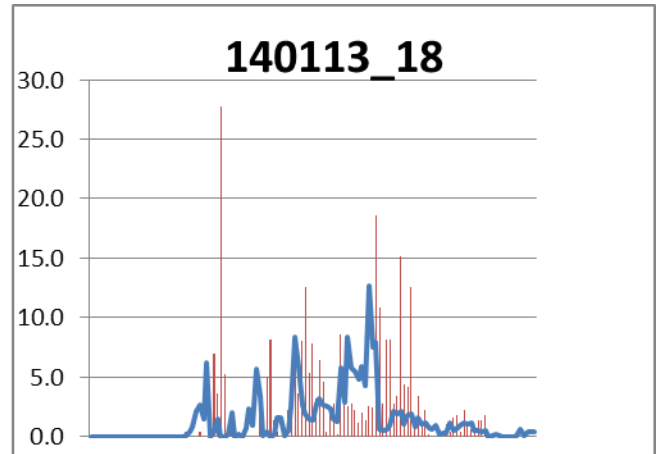
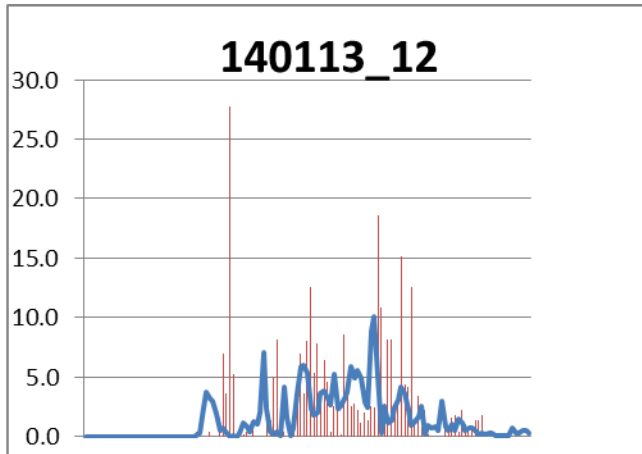
➤ Καρβελιώτης

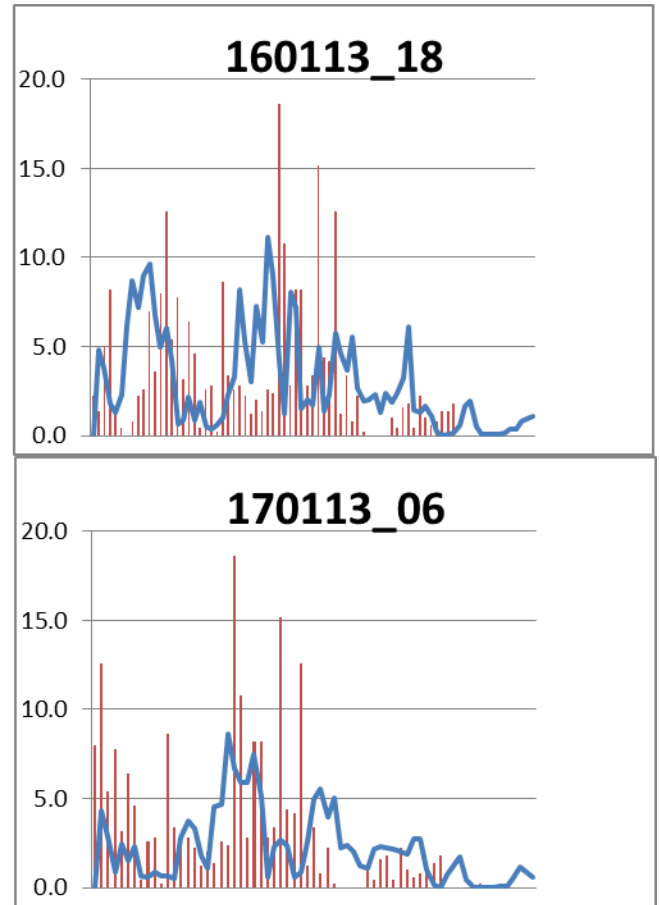
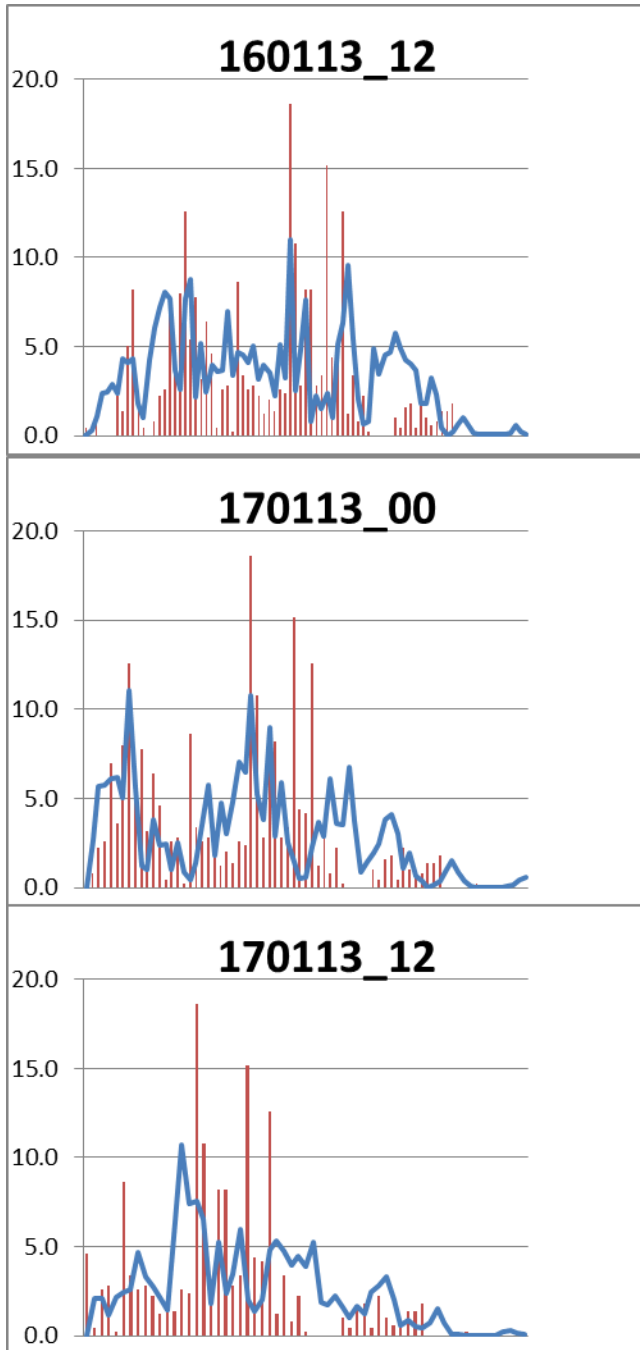






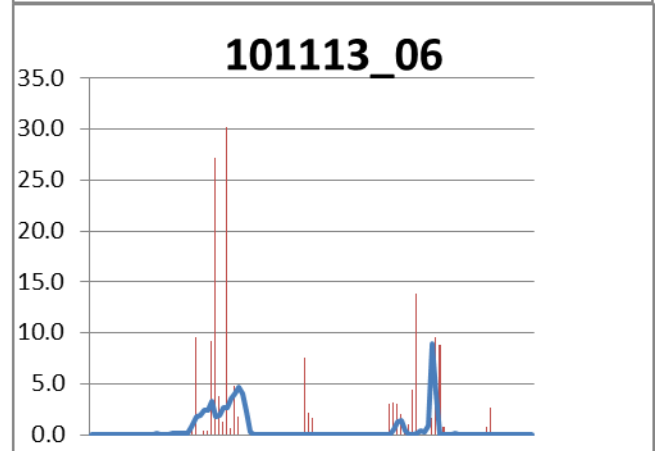
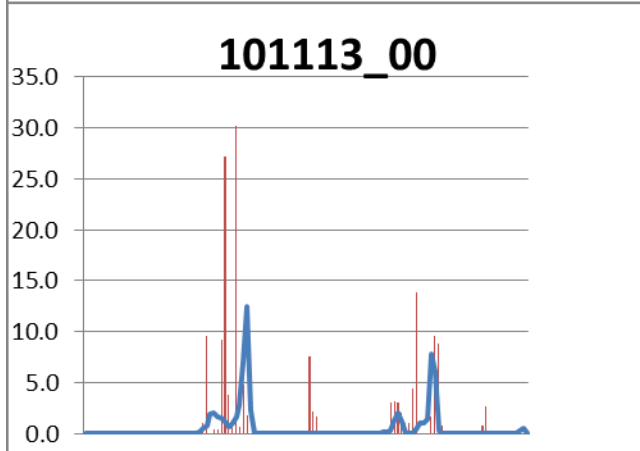
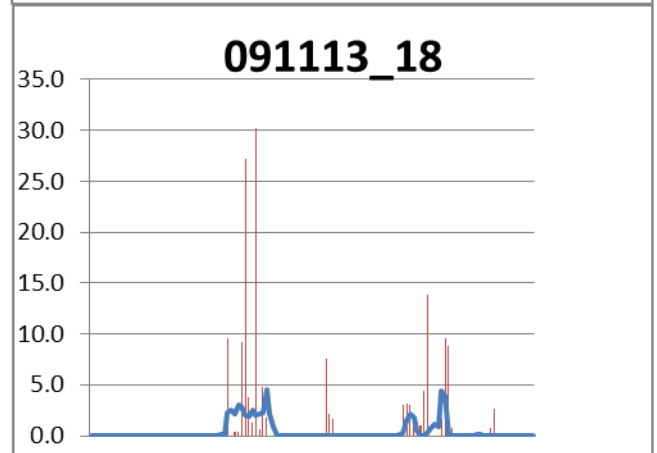
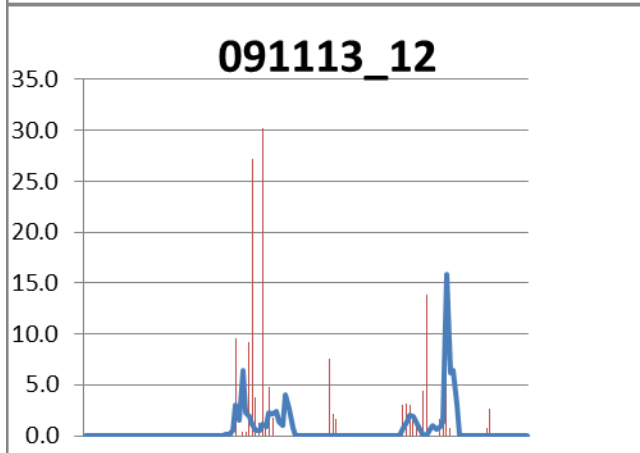
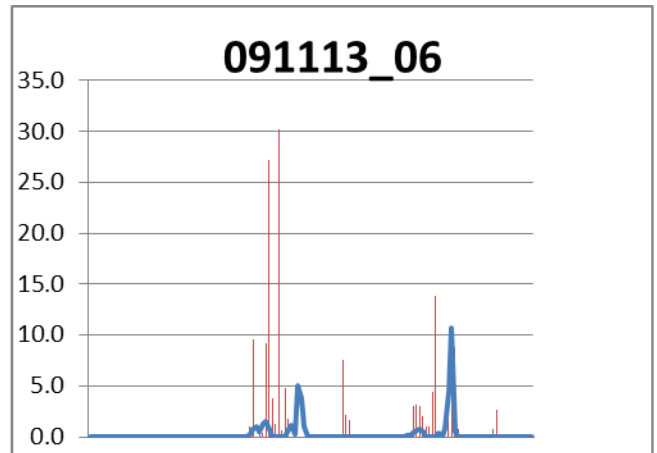
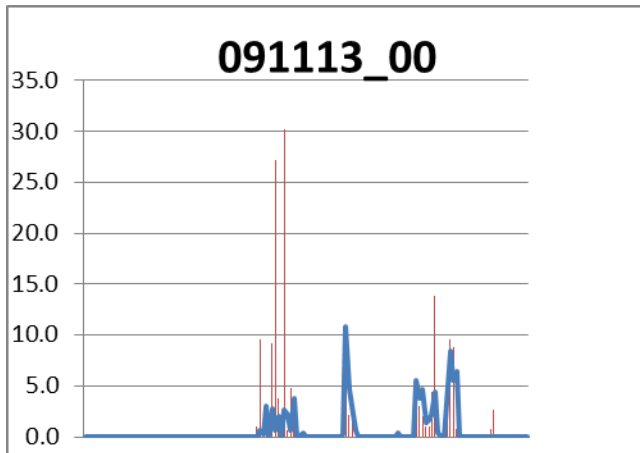
Σχήμα 3: Η εξέλιξη της πρόγνωσης στον σταθμό Καρβελιώτη για το επεισόδιο βροχής **131113**. Με κόκκινες ράβδους απεικονίζεται η παρατηρημένη βροχόπτωση. Με μπλε συνεχή γραμμή η πρόγνωση.

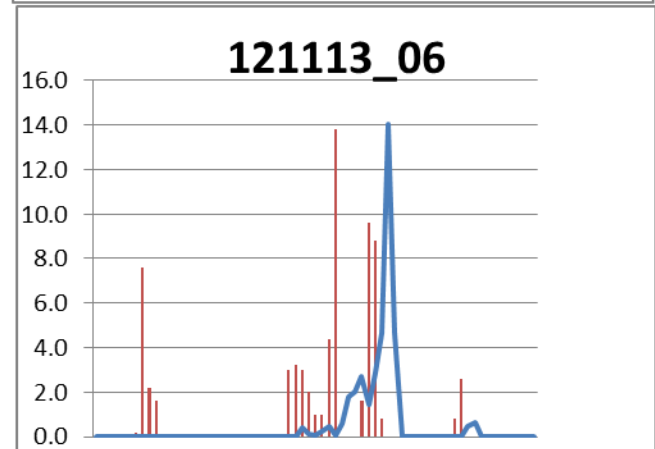
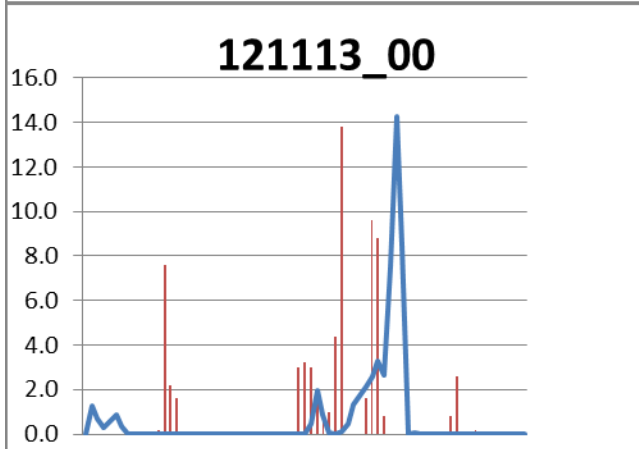
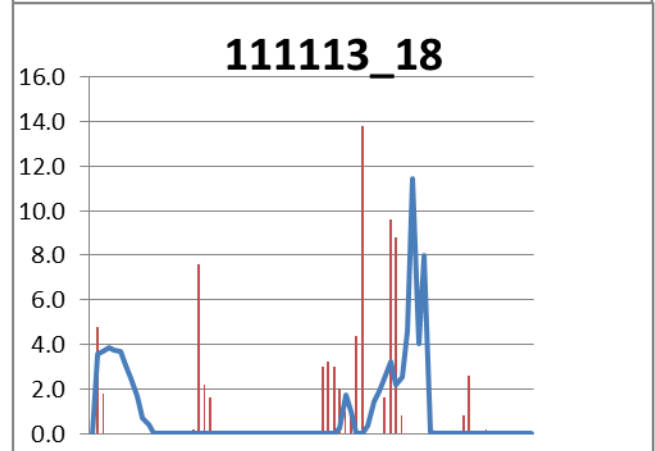
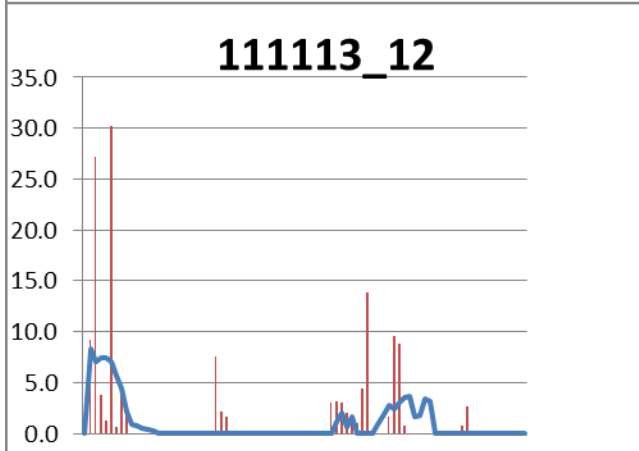
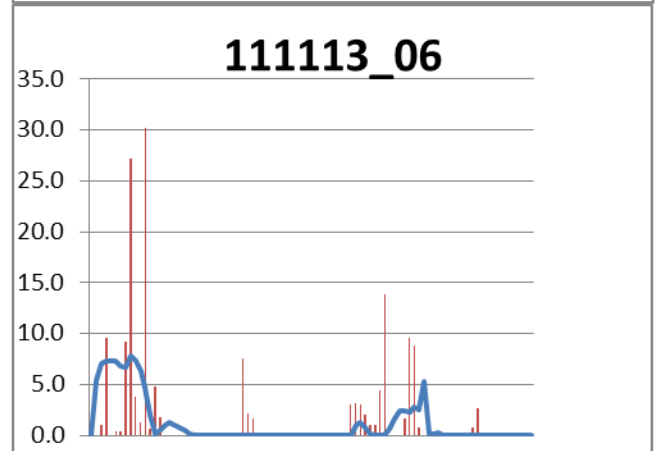
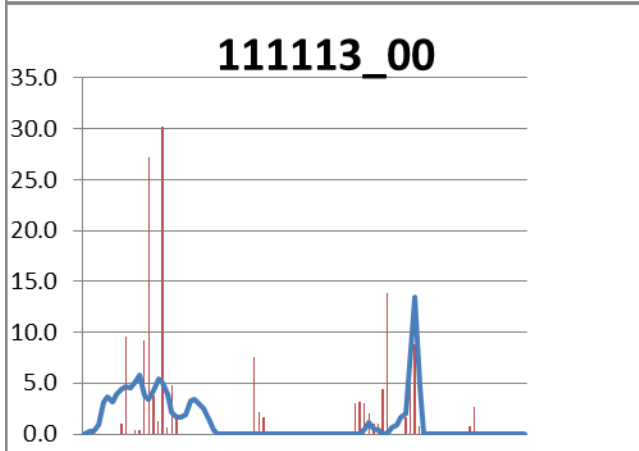
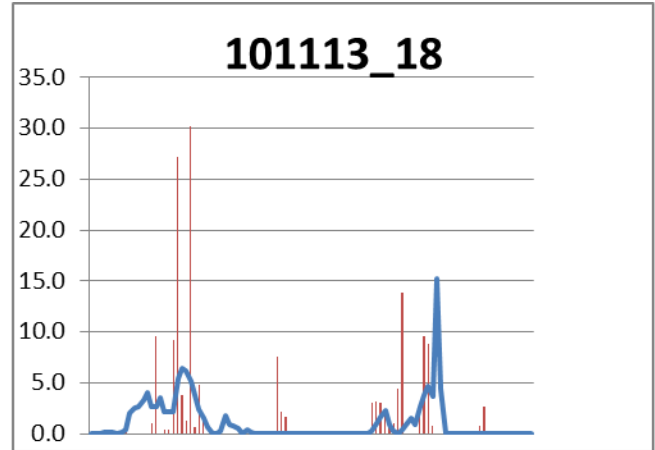
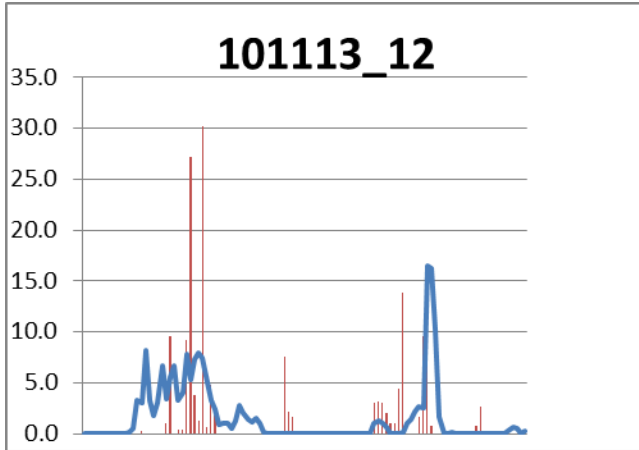


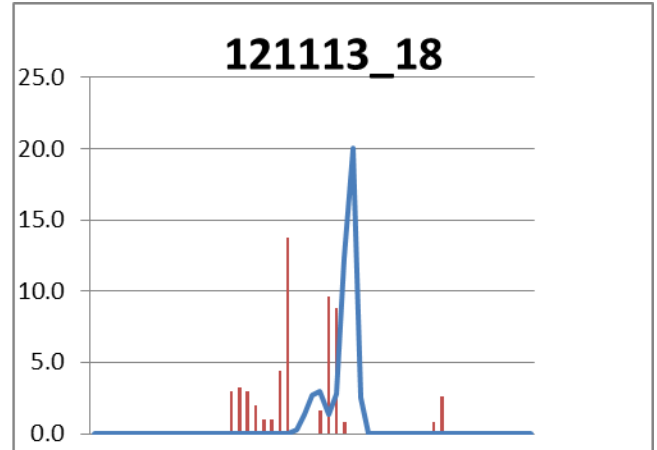
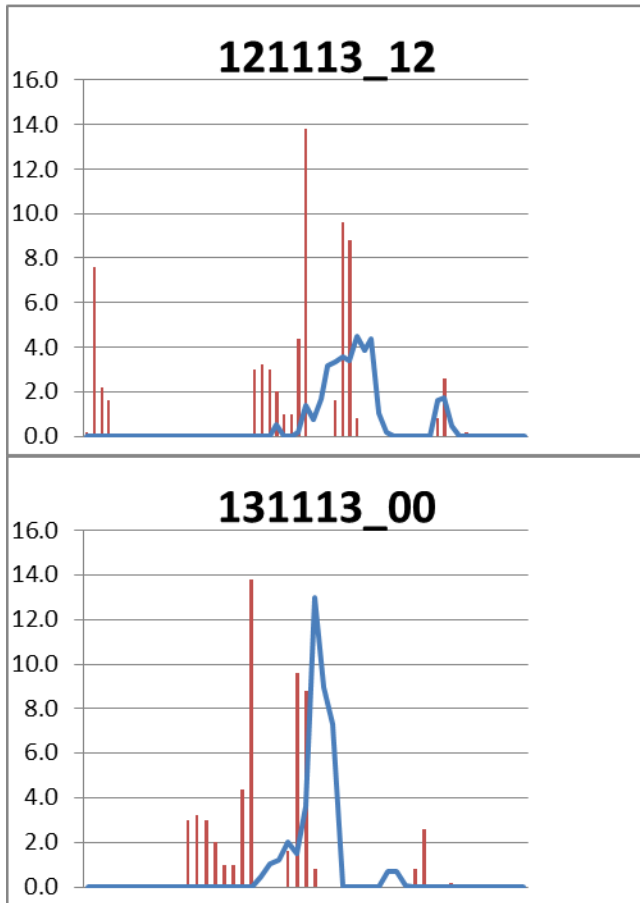


Σχήμα 4: Η εξέλιξη της πρόγνωσης στον σταθμό Καρβελιώτη για το επεισόδιο βροχής **170113**. Με κόκκινες ράβδους απεικονίζεται η παρατηρημένη βροχόπτωση. Με μπλε συνεχή γραμμή η πρόγνωση.

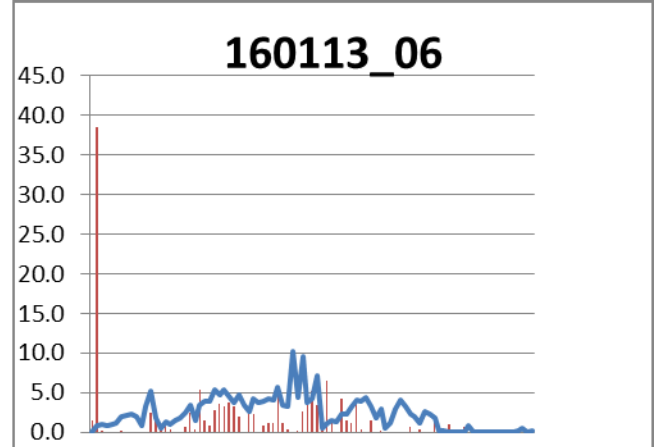
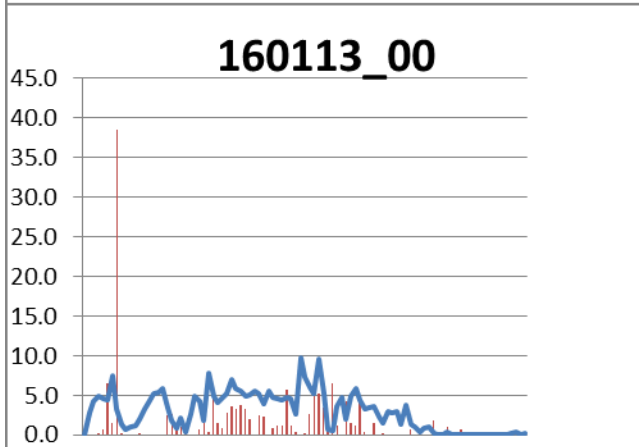
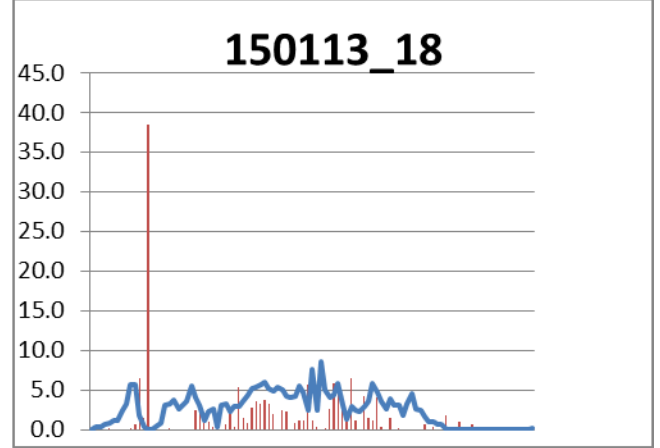
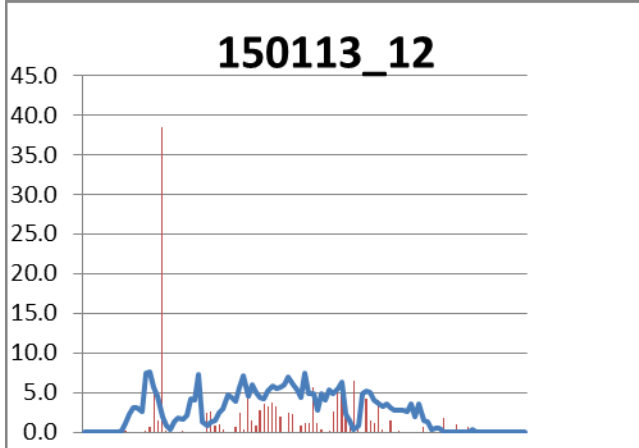
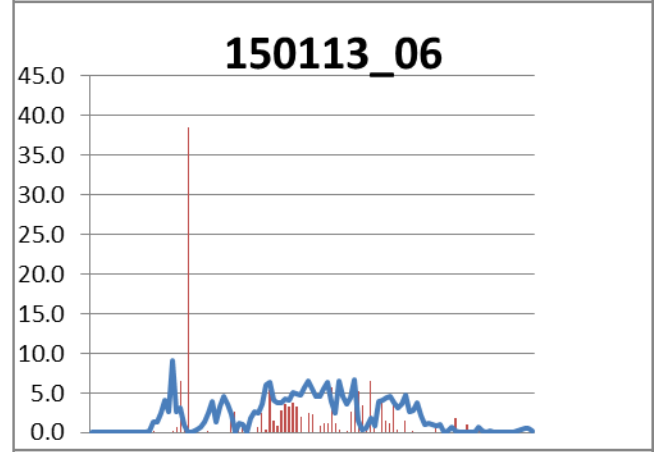
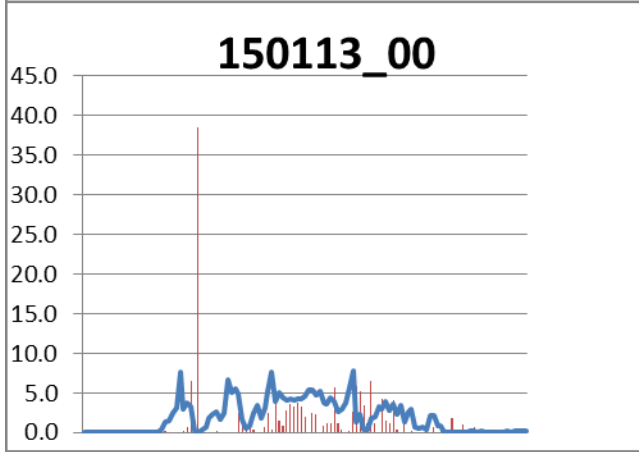
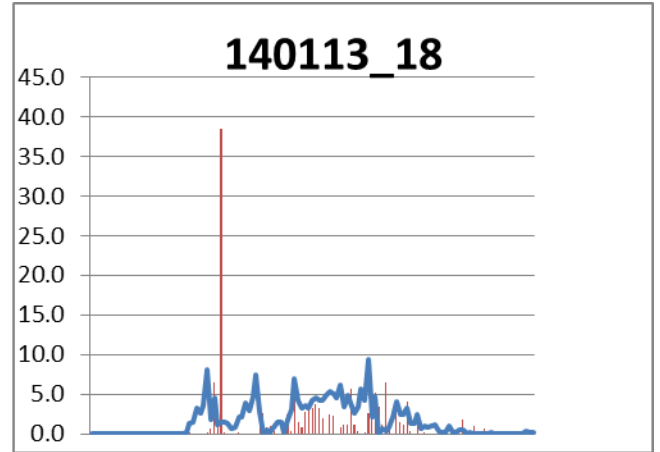
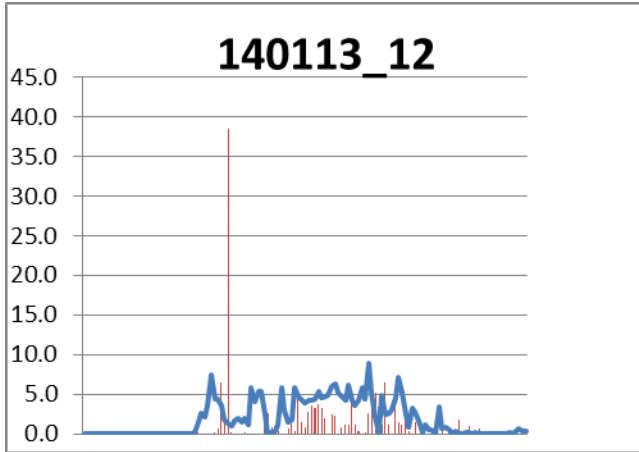
➤ Καλαμάτα-Μπάκας

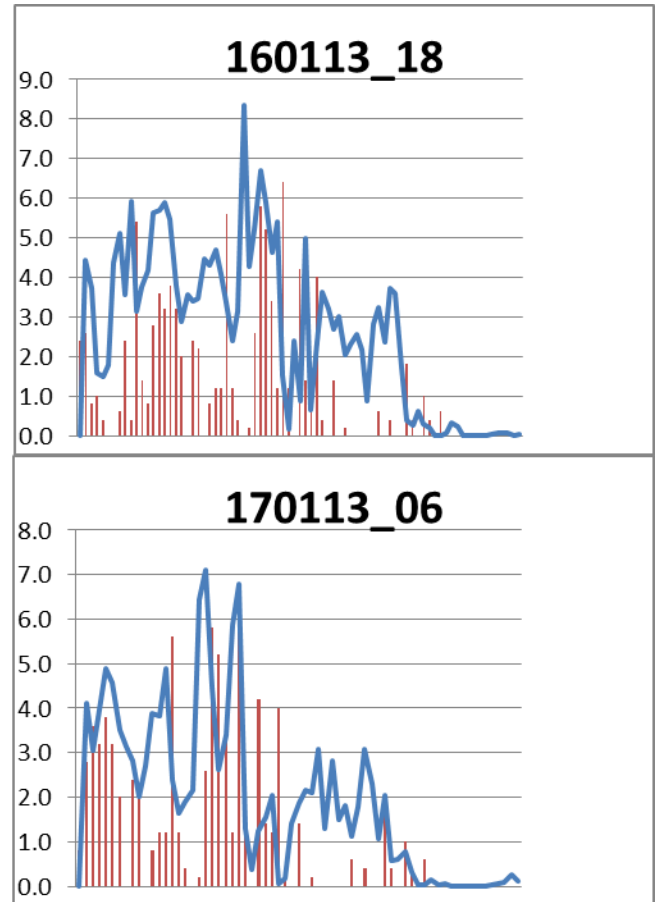
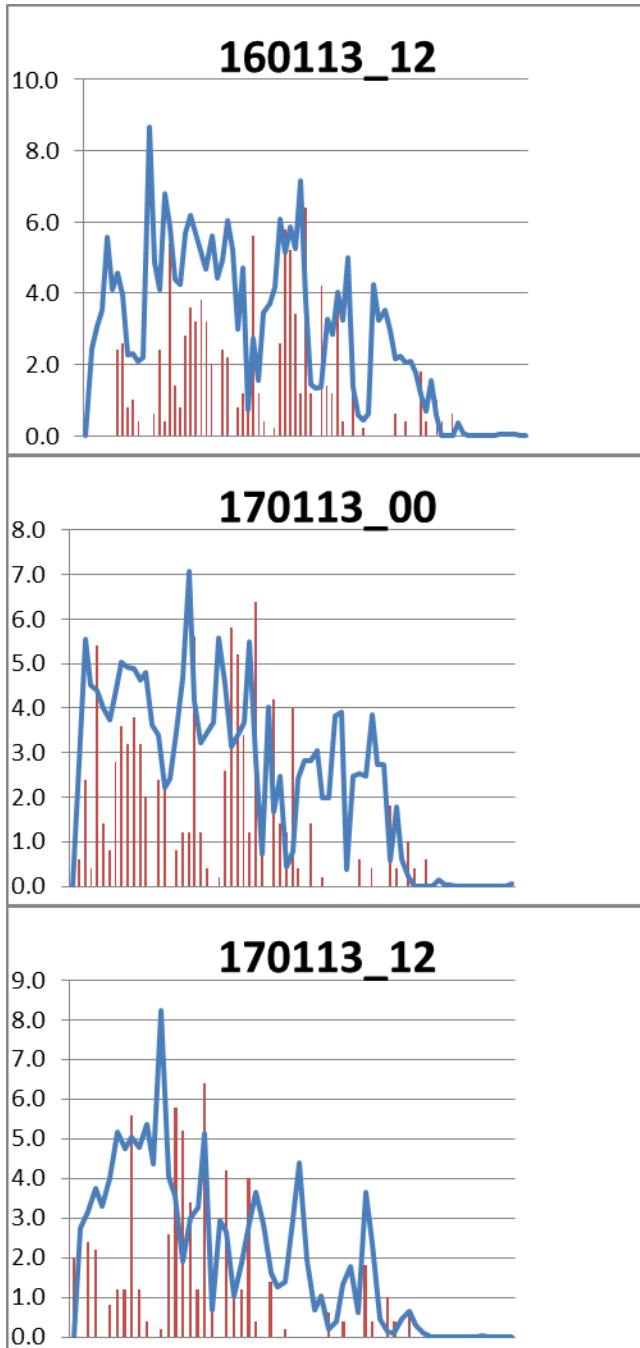






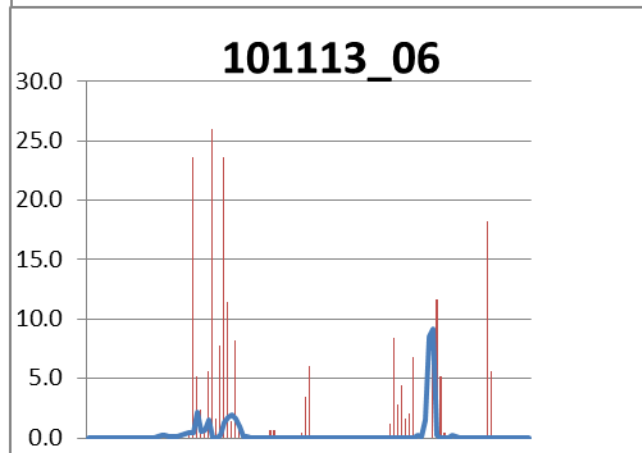
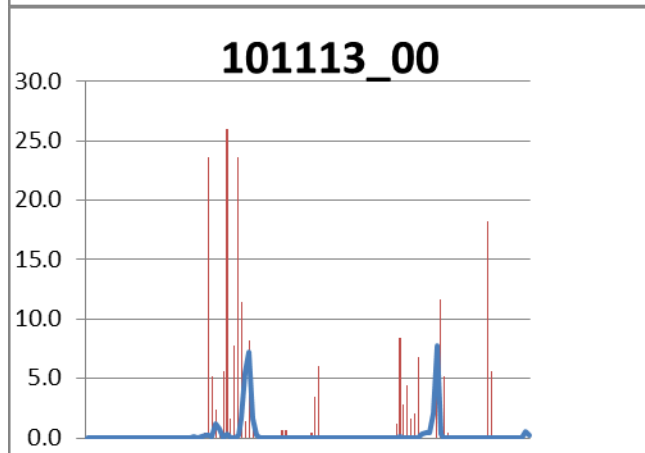
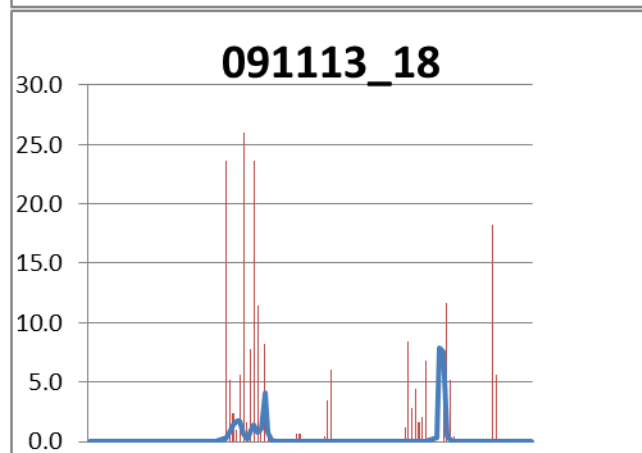
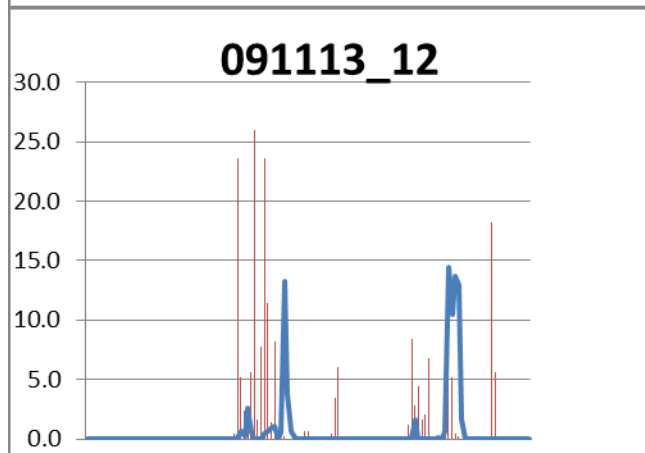
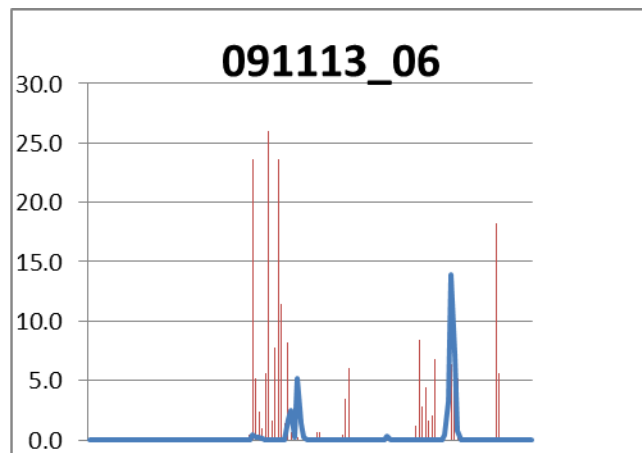
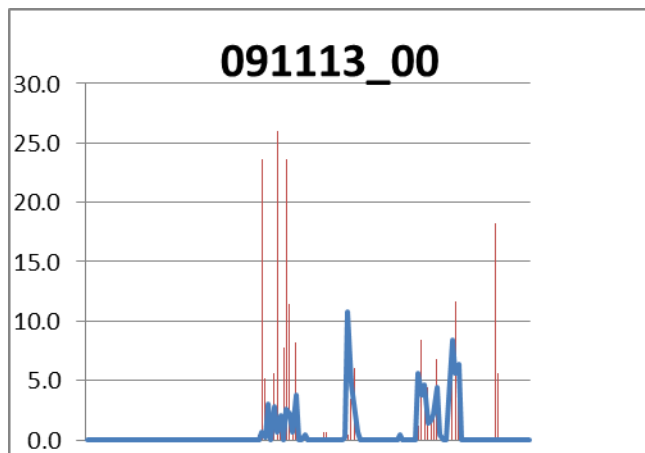
*Σχήμα 5: Η εξέλιξη της πρόγνωσης στον σταθμό Καλαμάτα-Μπάκας για το επεισόδιο βροχής **131113**. Με κόκκινες ράβδους απεικονίζεται η παρατηρημένη βροχόπτωση. Με μπλε συνεχή γραμμή η πρόγνωση.*

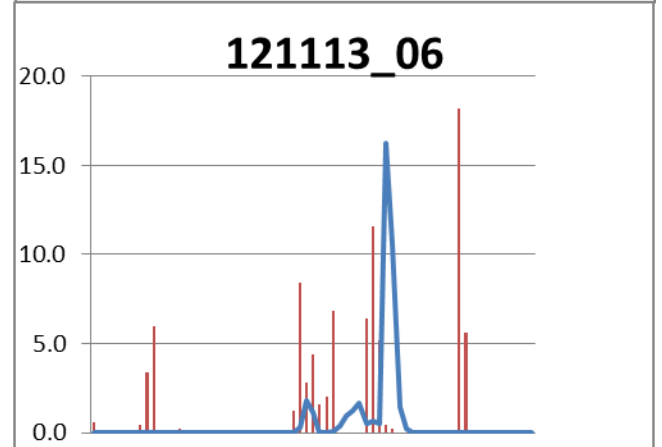
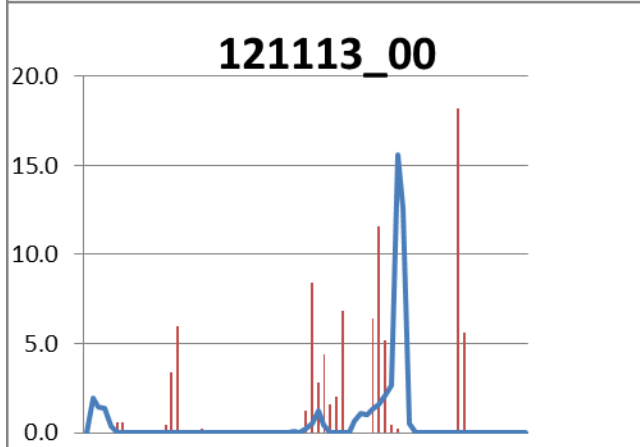
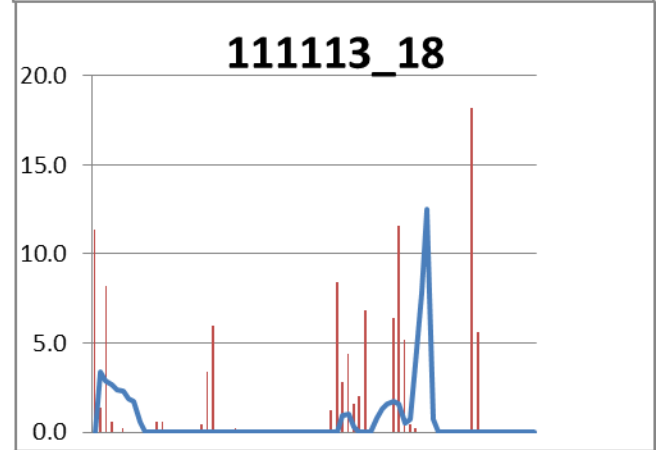
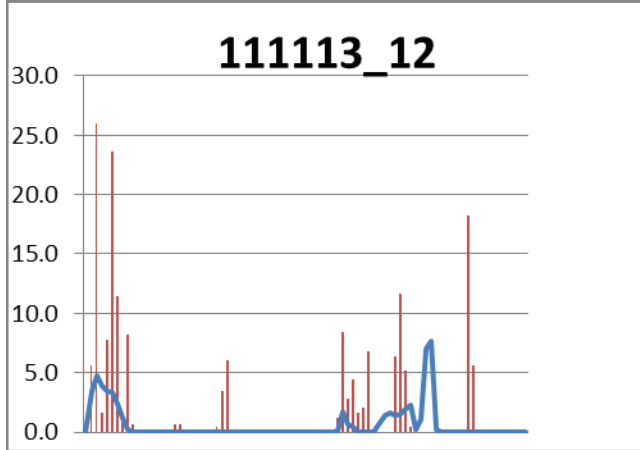
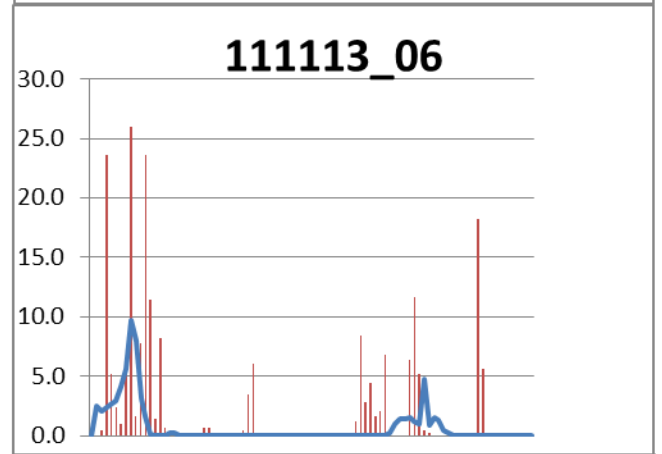
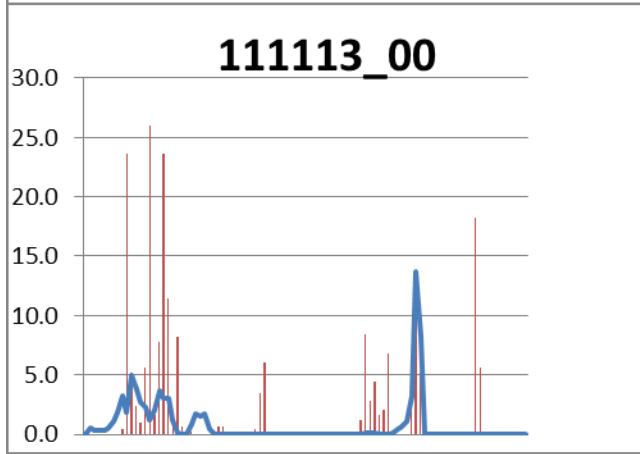
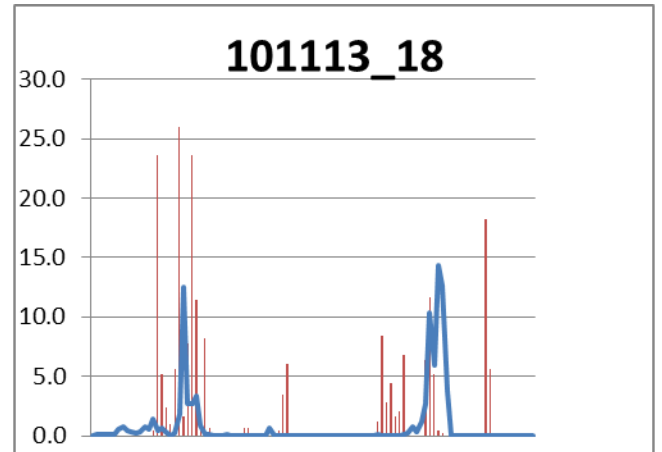
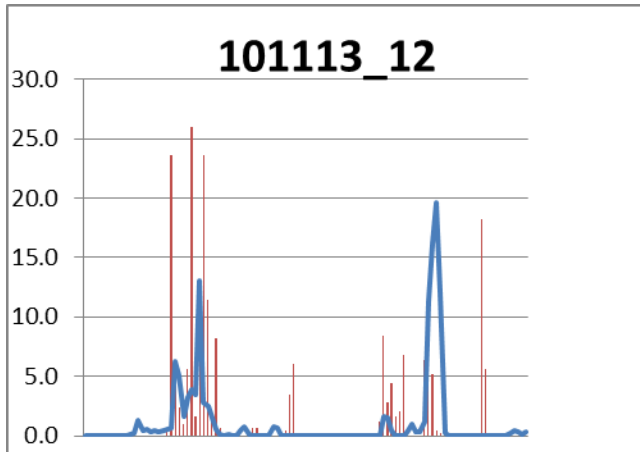


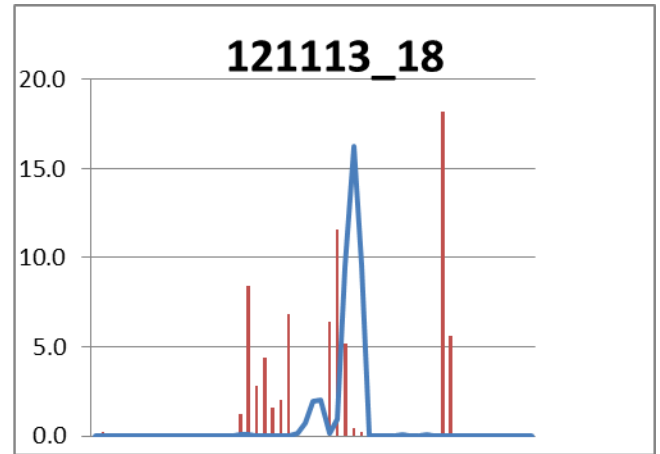
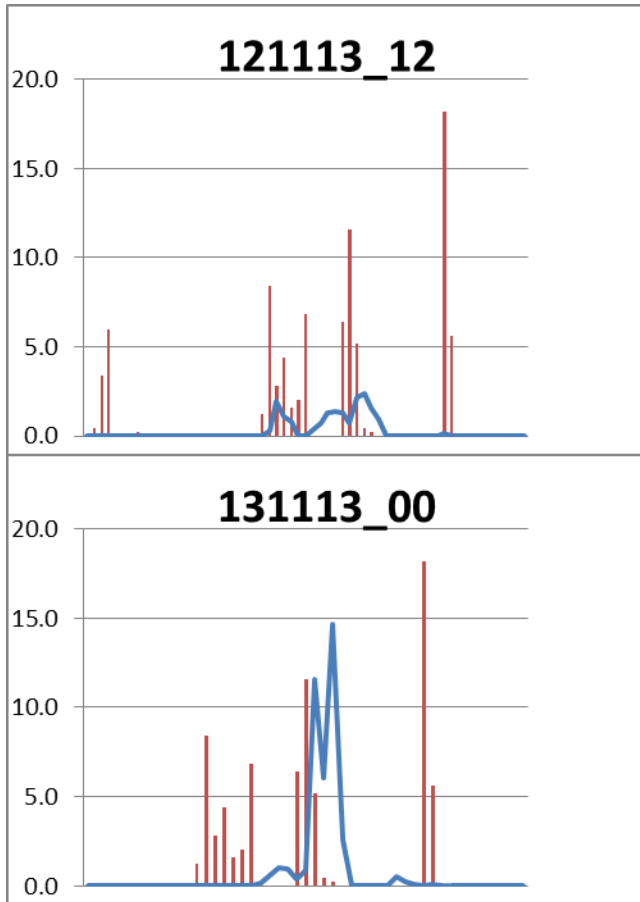


Σχήμα 6: Η εξέλιξη της πρόγνωσης στον σταθμό Καλαμάτα-Μπάκας για το επεισόδιο βροχής **170113**. Με κόκκινες ράβδους απεικονίζεται η παρατηρημένη βροχόπτωση. Με μπλε συνεχή γραμμή η πρόγνωση.

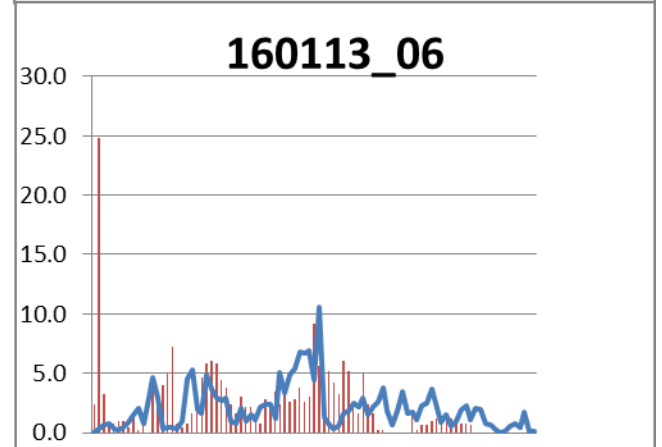
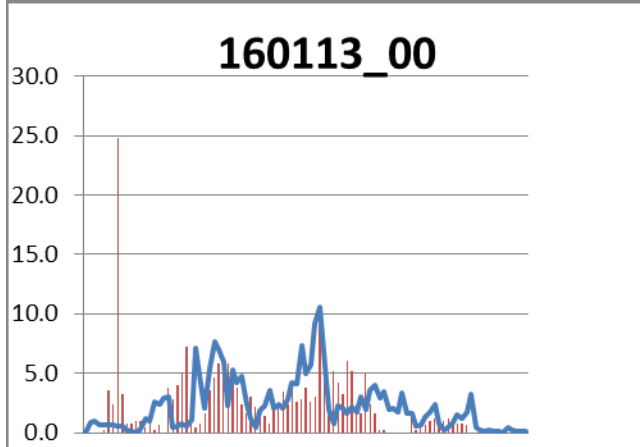
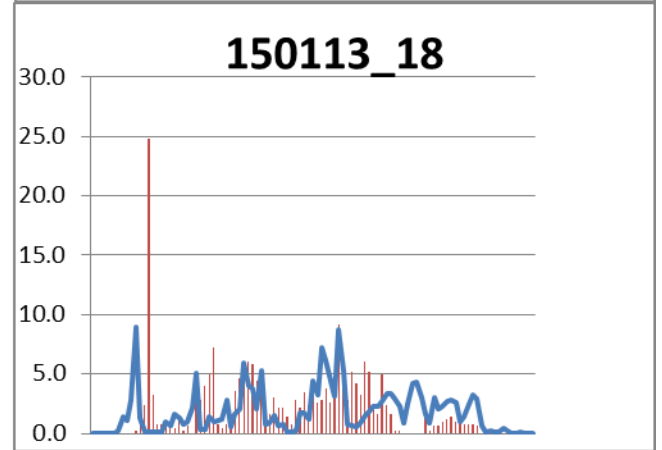
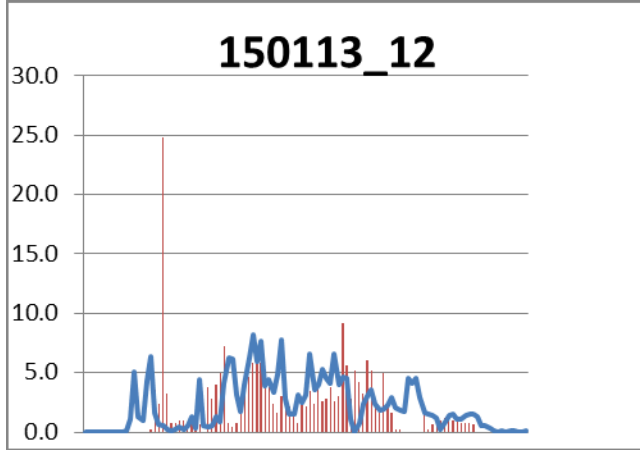
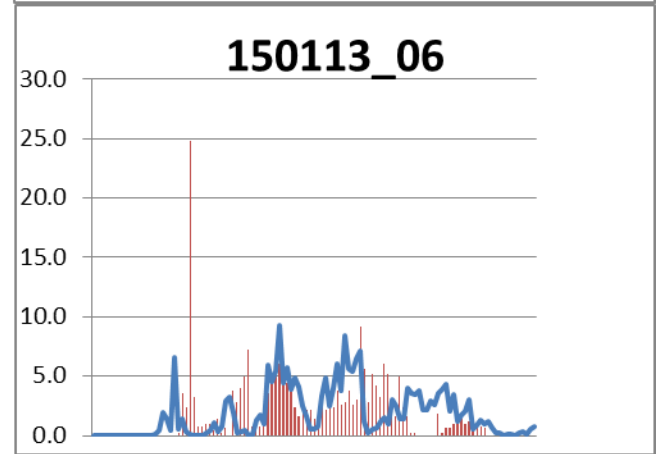
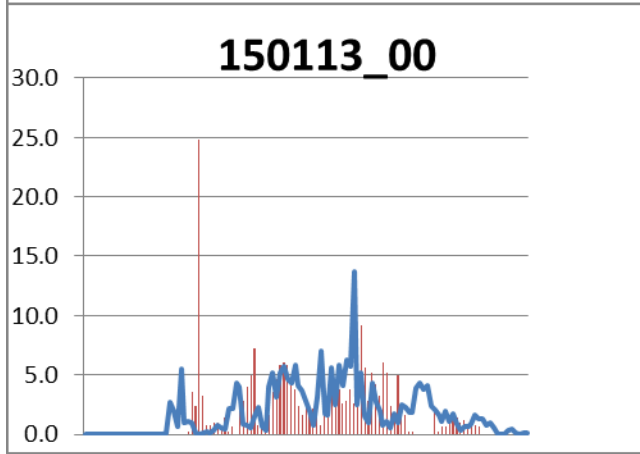
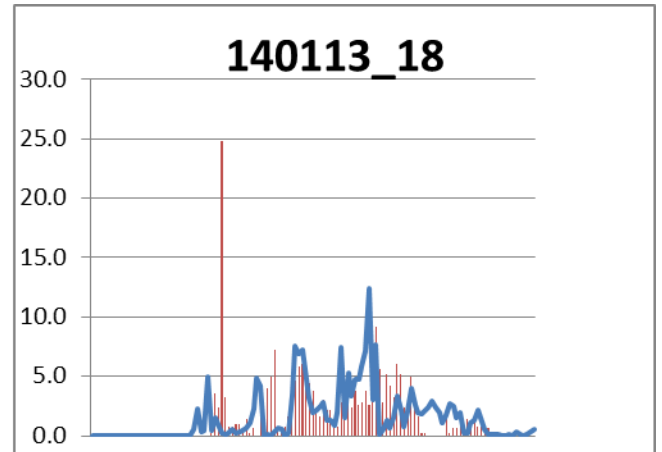
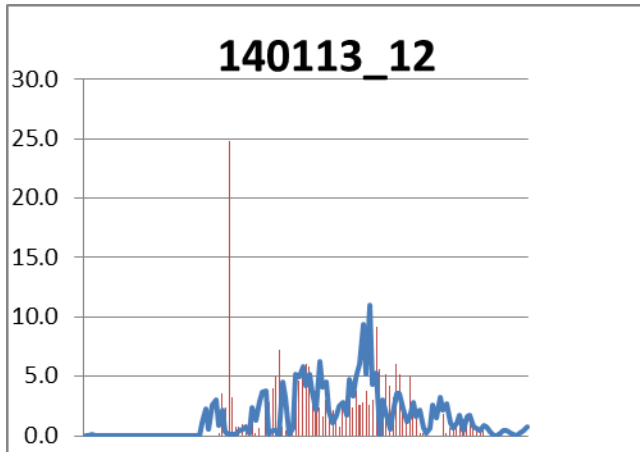
➤ Νέδουσα

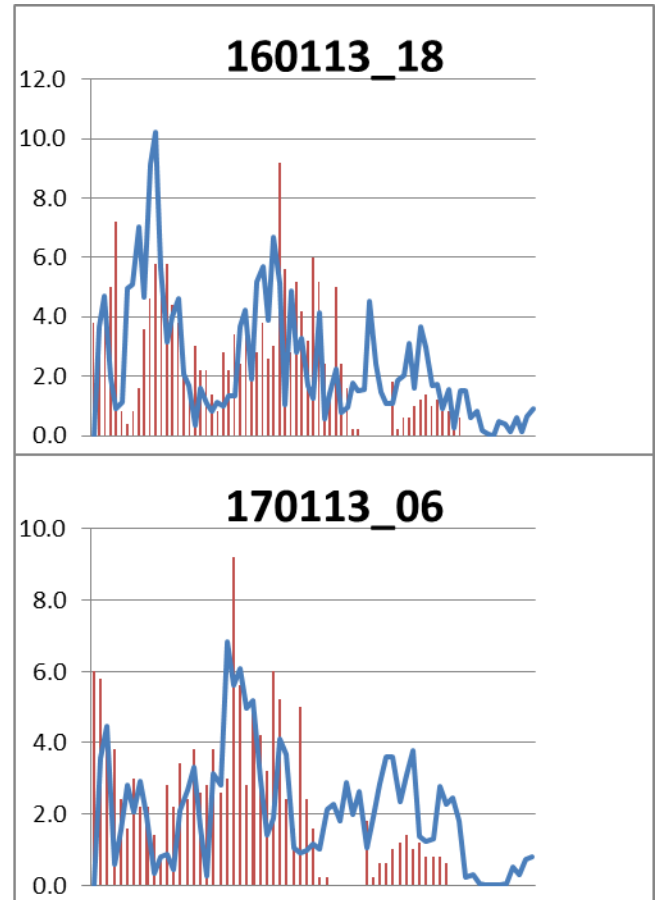
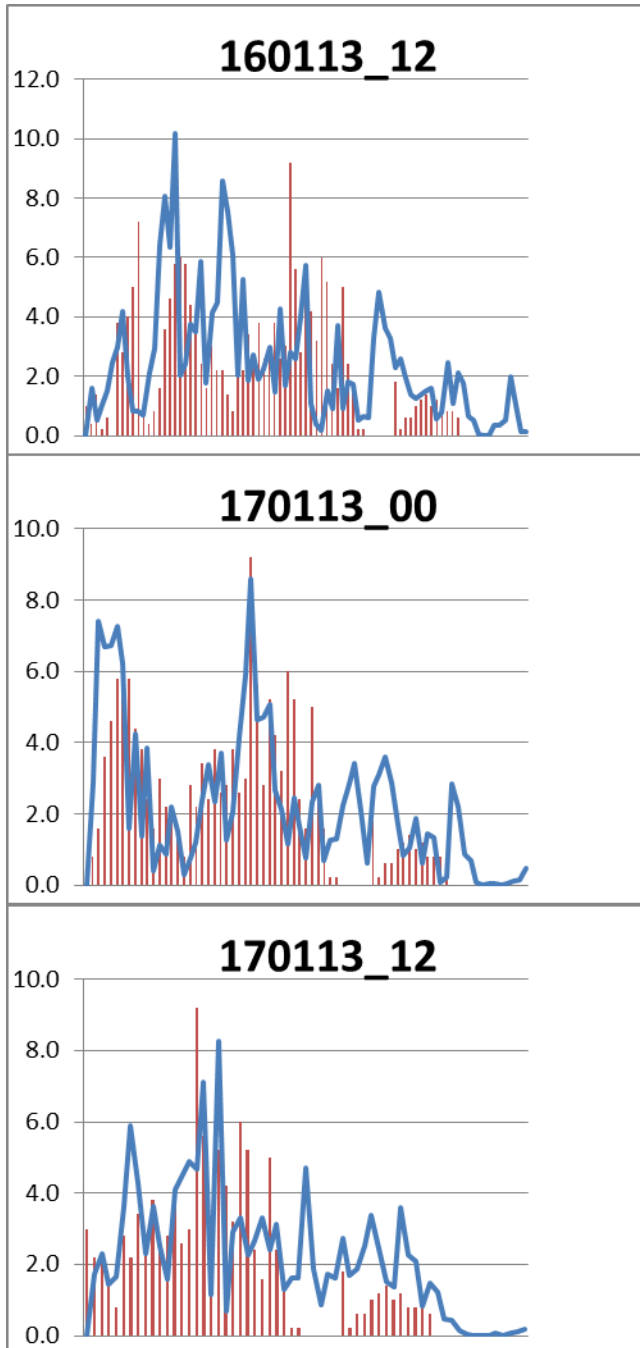






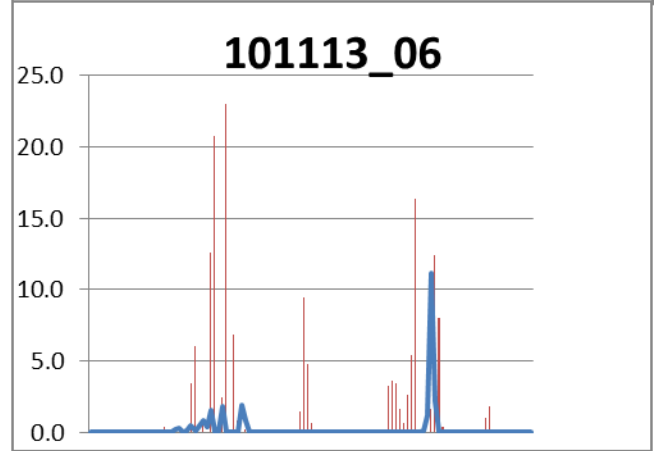
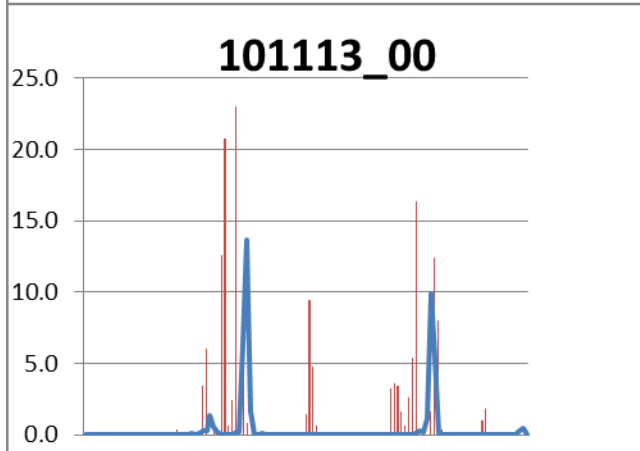
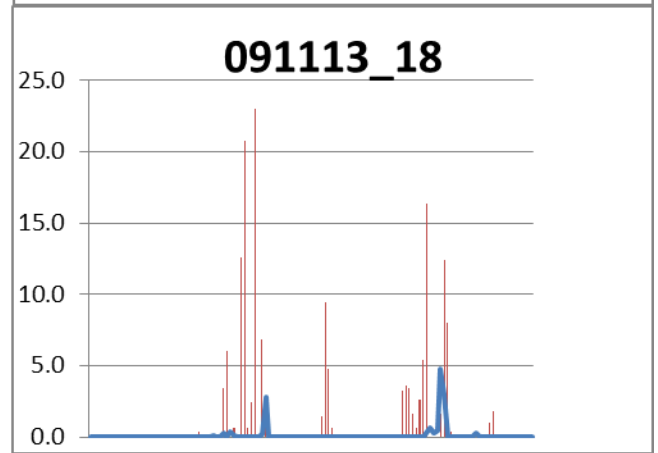
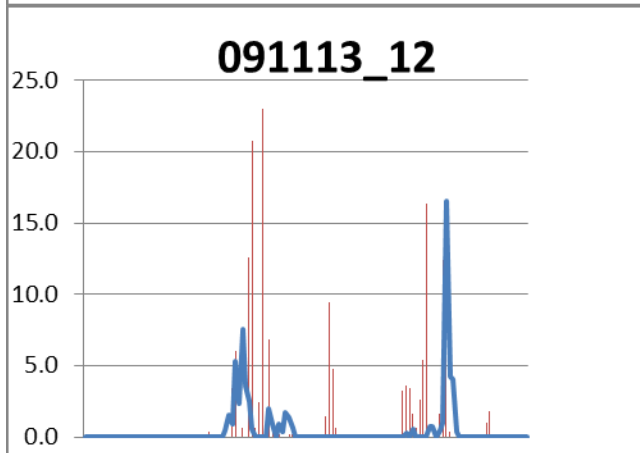
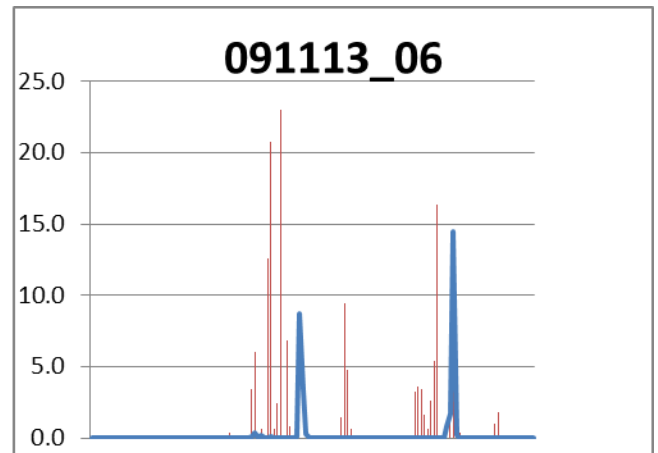
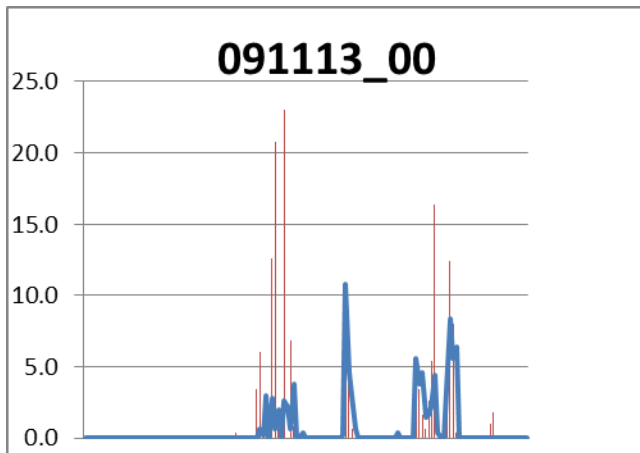
Σχήμα 7: Η εξέλιξη της πρόγνωσης στον σταθμό Νέδουσα για το επεισόδιο βροχής **131113**. Με κόκκινες ράβδους απεικονίζεται η παρατηρημένη βροχόπτωση. Με μπλε συνεχή γραμμή η πρόγνωση.

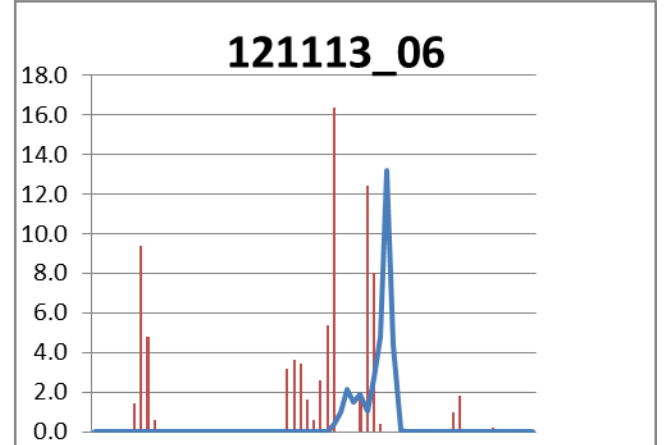
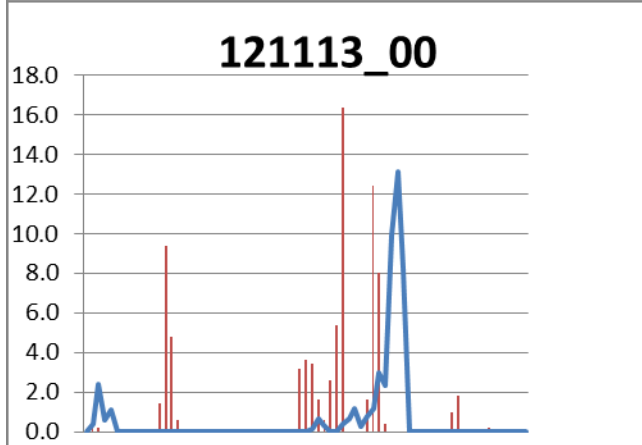
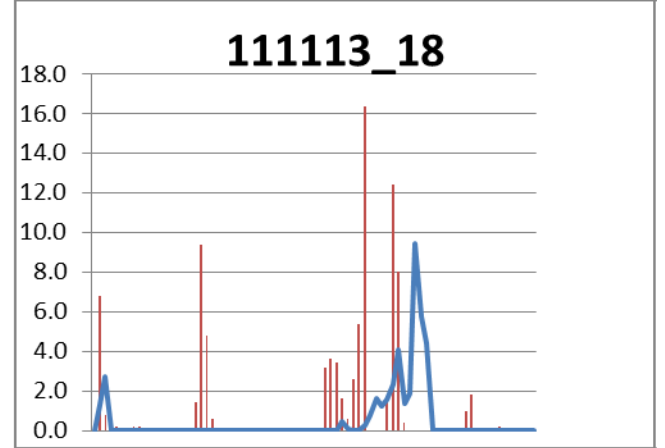
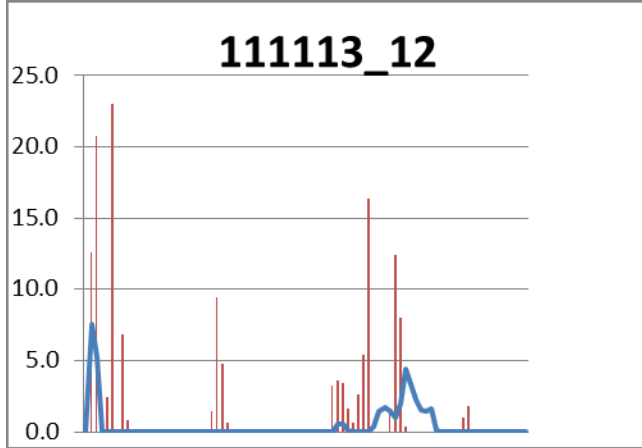
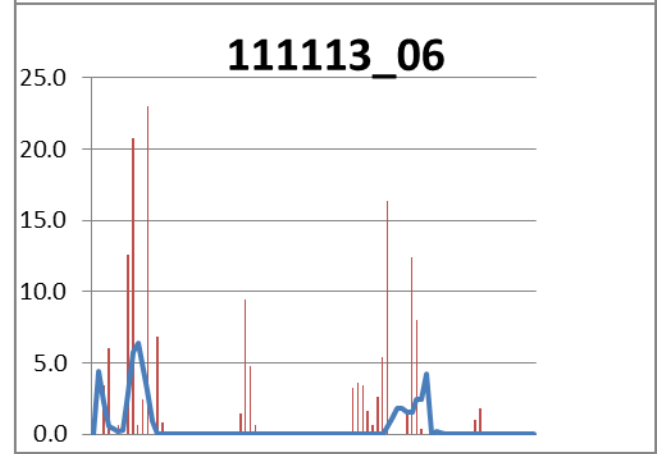
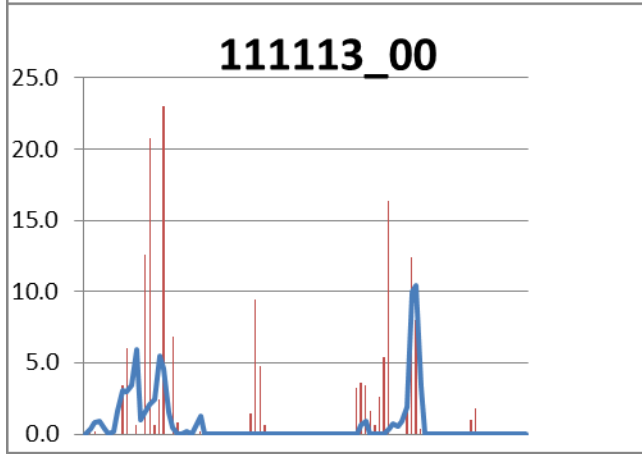
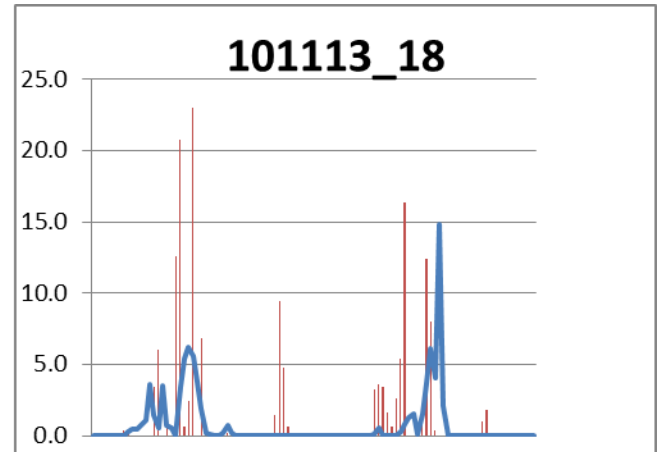
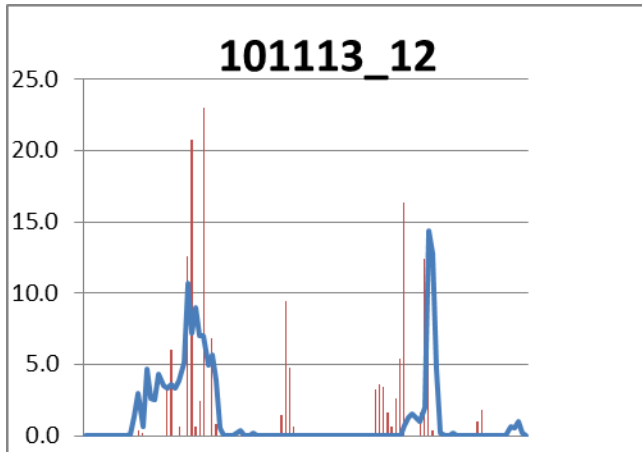


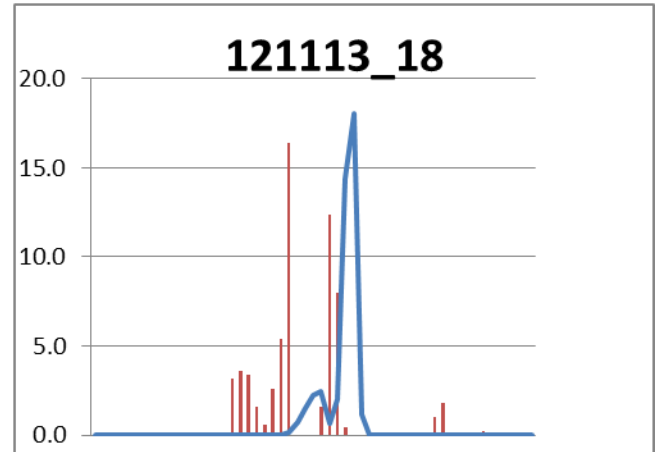
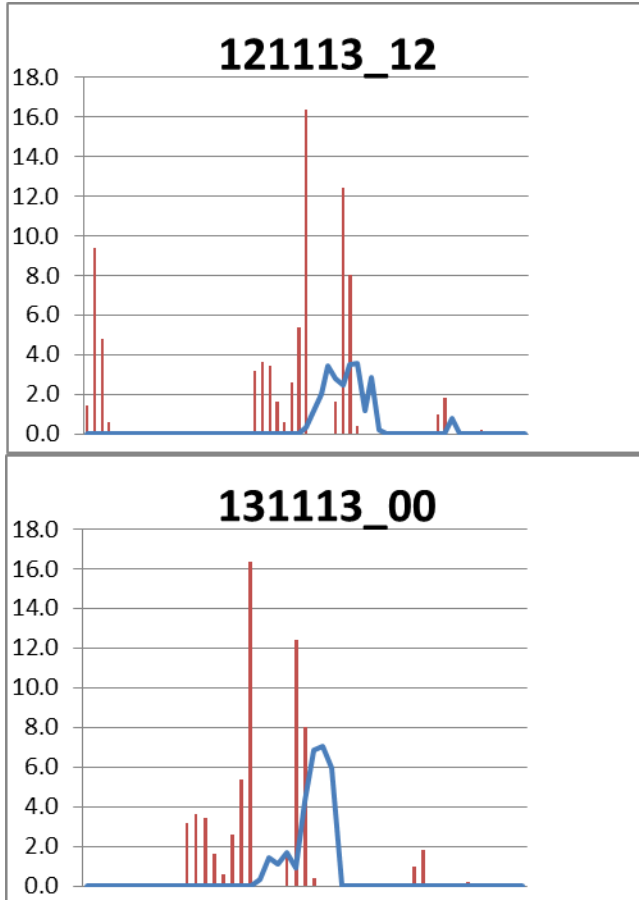


Σχήμα 8: Η εξέλιξη της πρόγνωσης στον σταθμό Νέδουσα για το επεισόδιο βροχής **170113**. Με κόκκινες ράβδους απεικονίζεται η παρατηρημένη βροχόπτωση. Με μπλε συνεχή γραμμή η πρόγνωση.

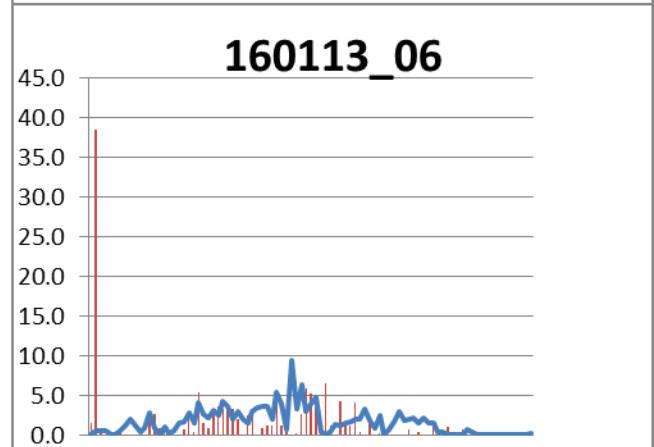
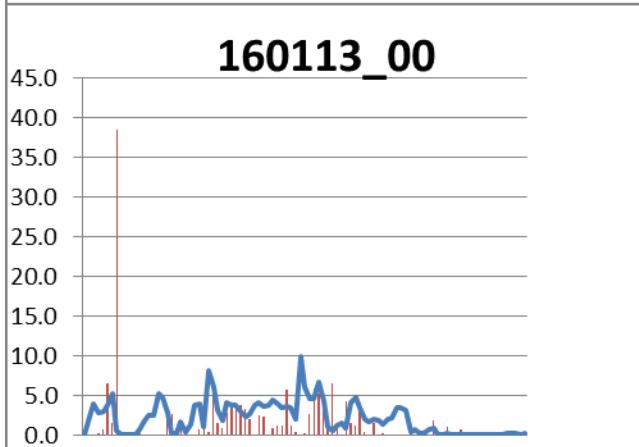
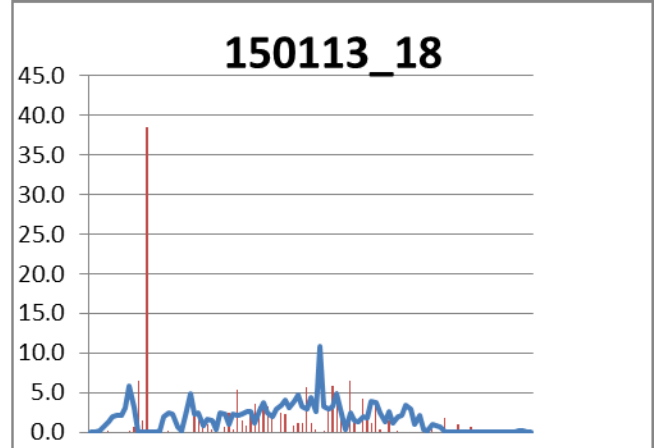
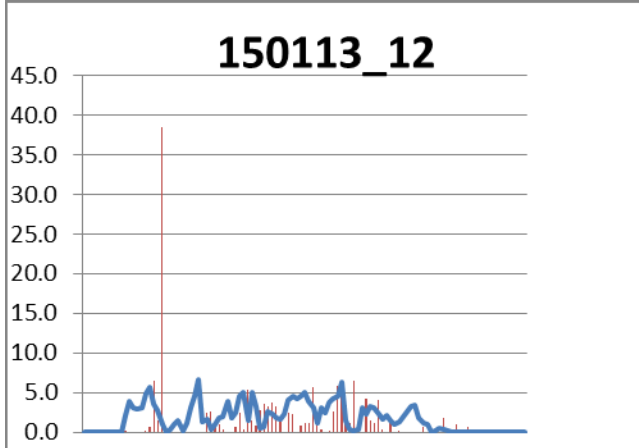
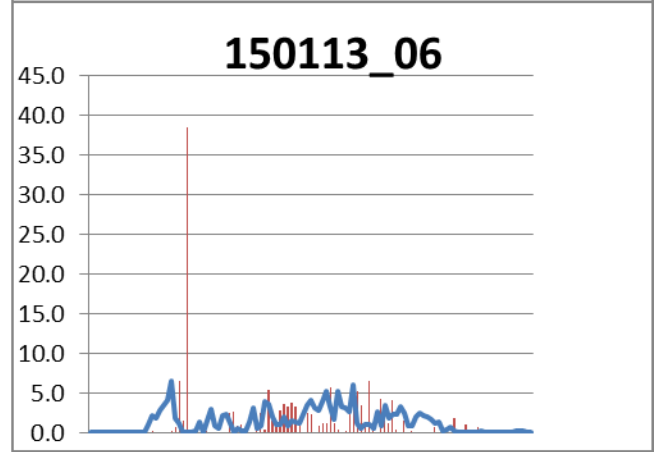
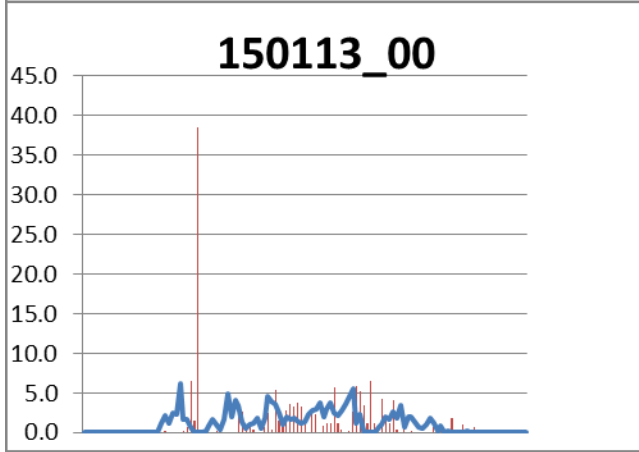
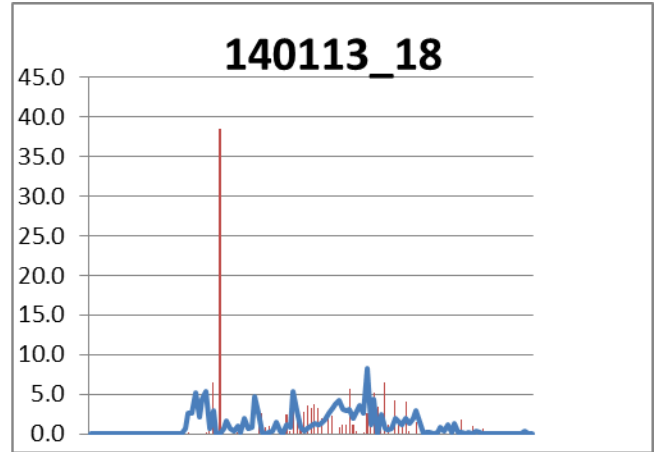
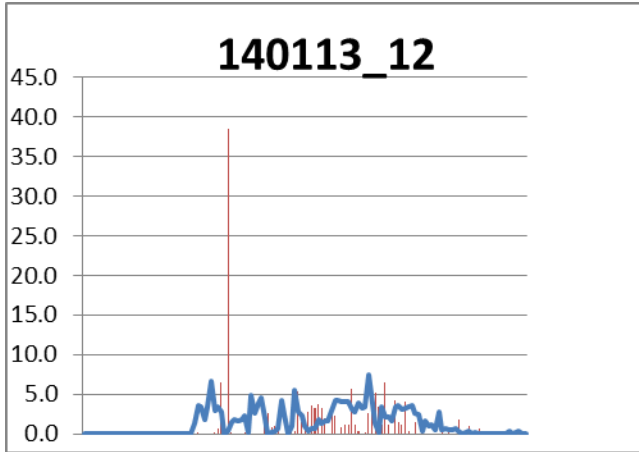
➤ Καλαμάτα-Νησάκι

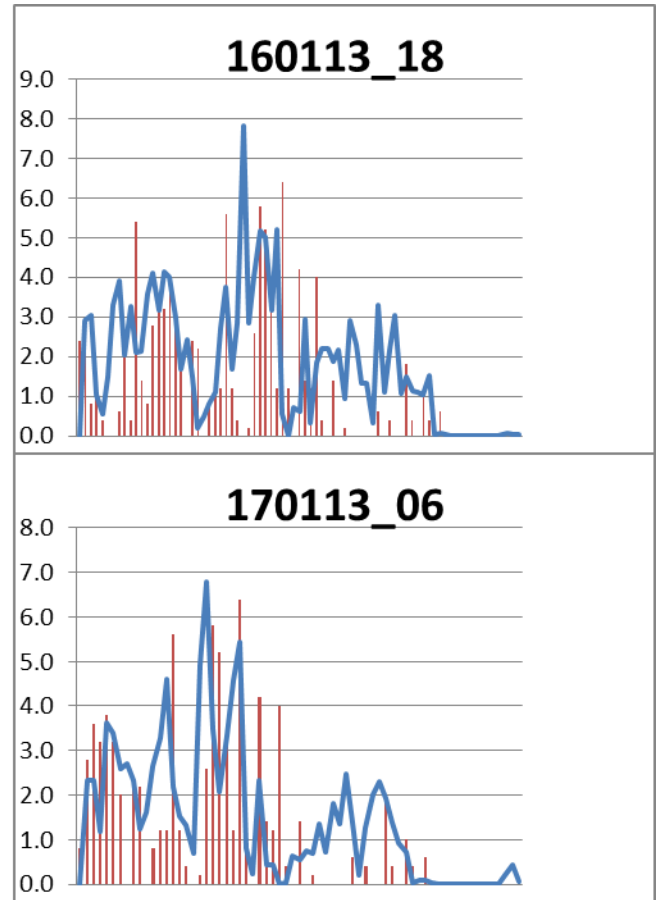
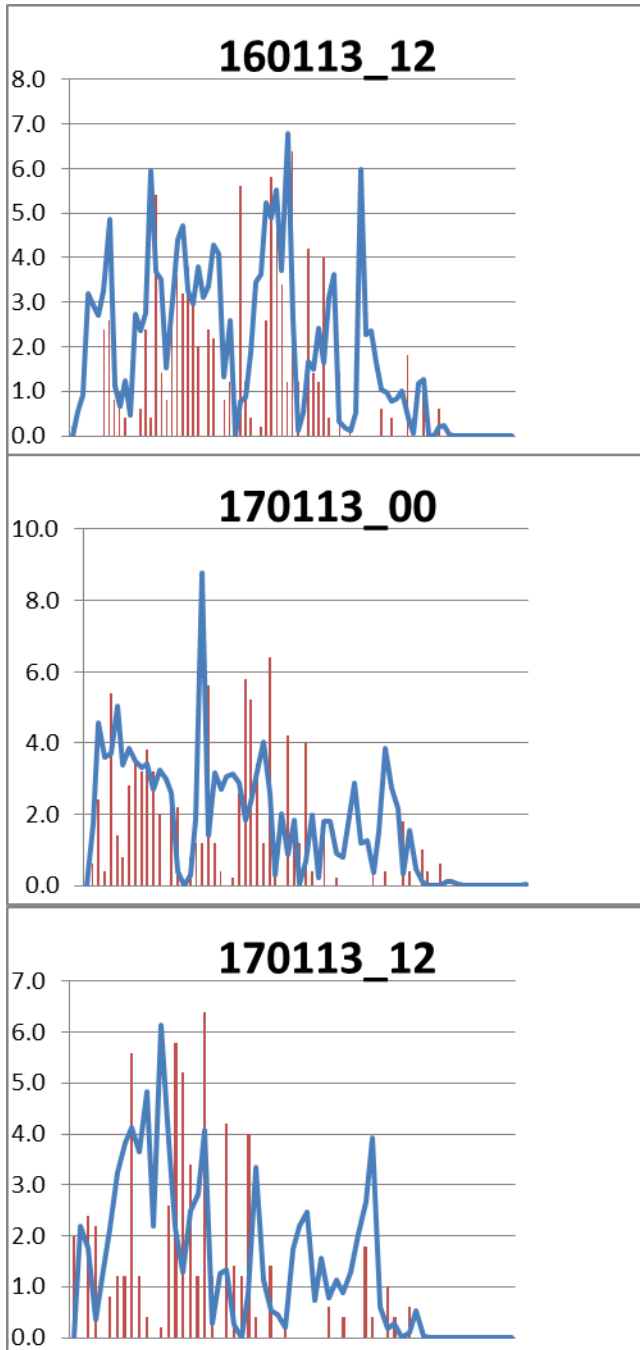






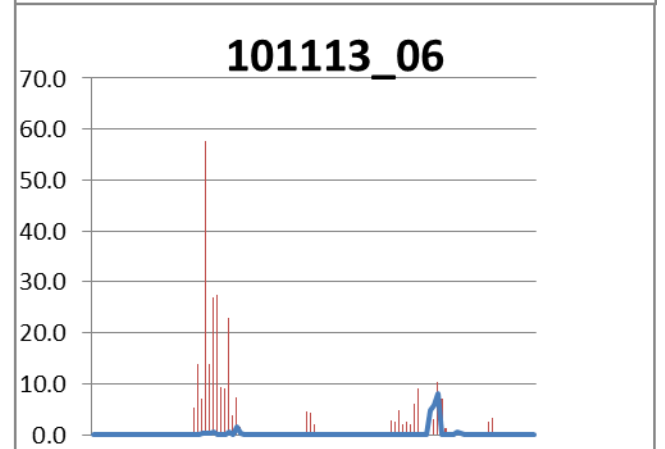
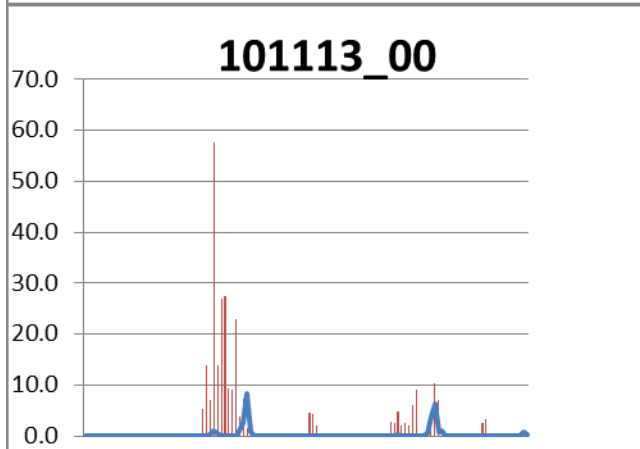
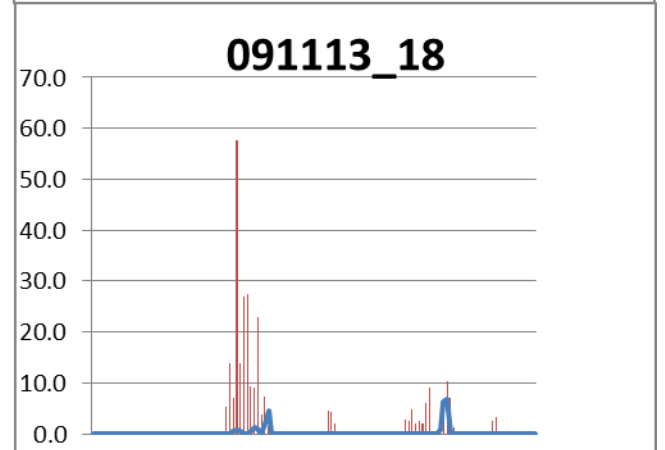
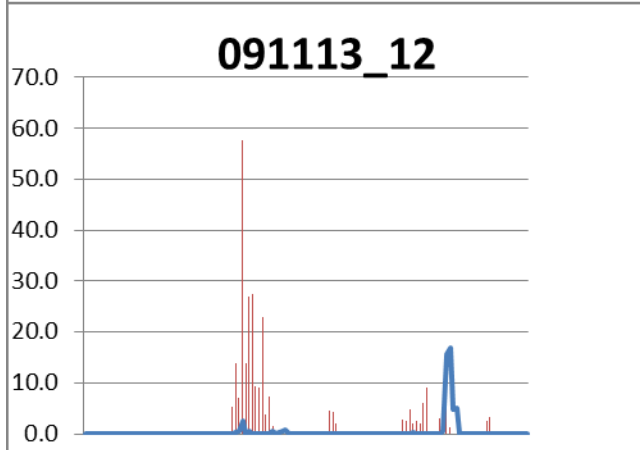
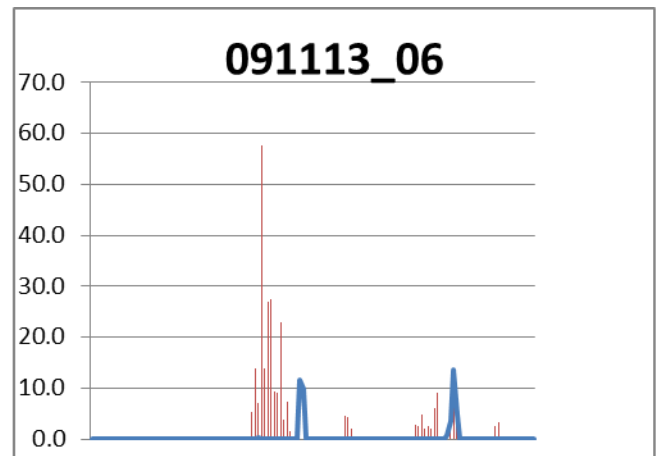
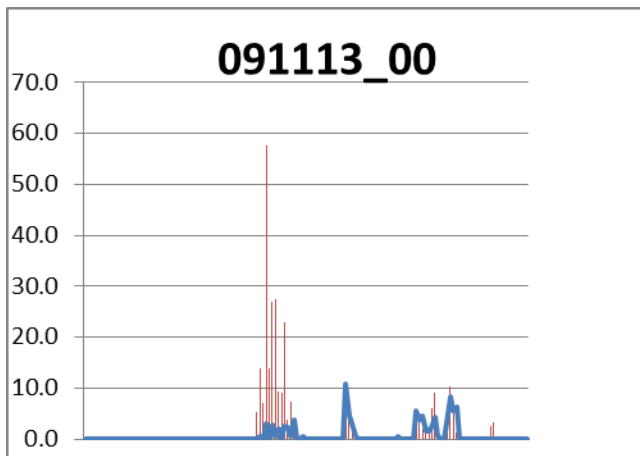
*Σχήμα 9: Η εξέλιξη της πρόγνωσης στον σταθμό Καλαμάτα-Νησάκι για το επεισόδιο βροχής **131113**. Με κόκκινες ράβδους απεικονίζεται η παρατηρημένη βροχόπτωση. Με μπλε συνεχή γραμμή η πρόγνωση.*

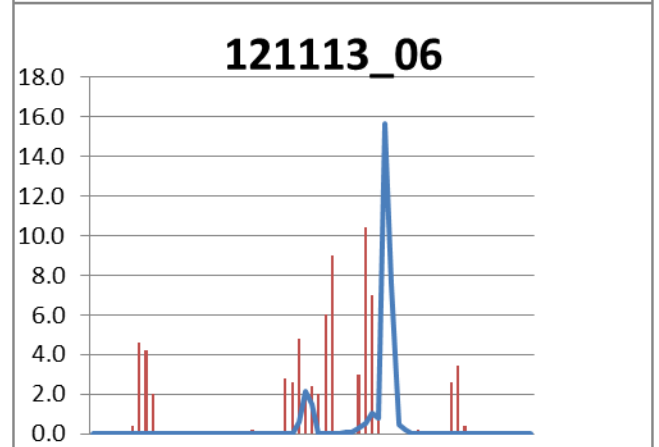
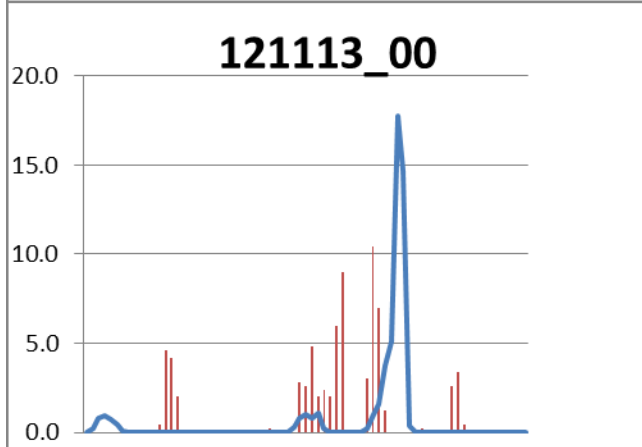
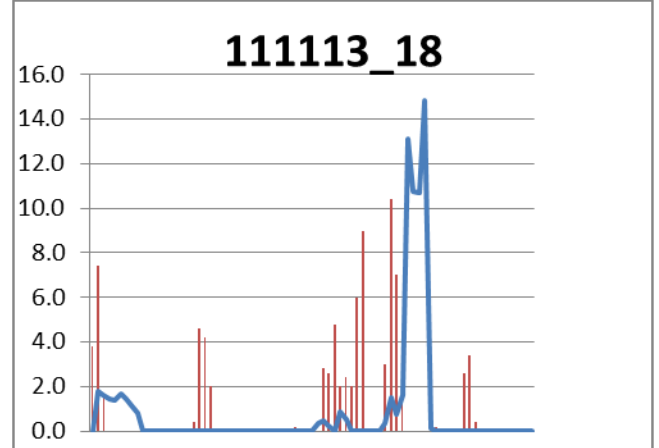
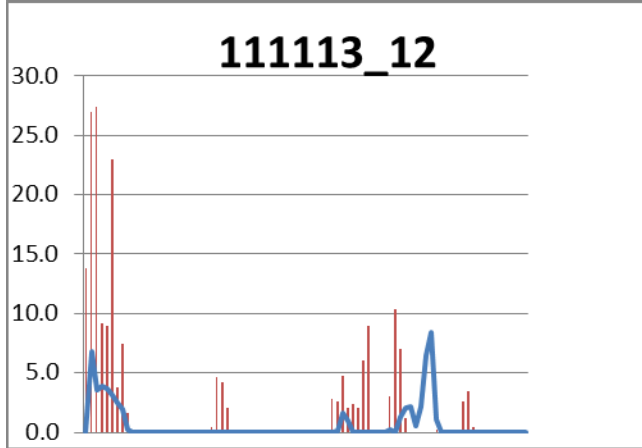
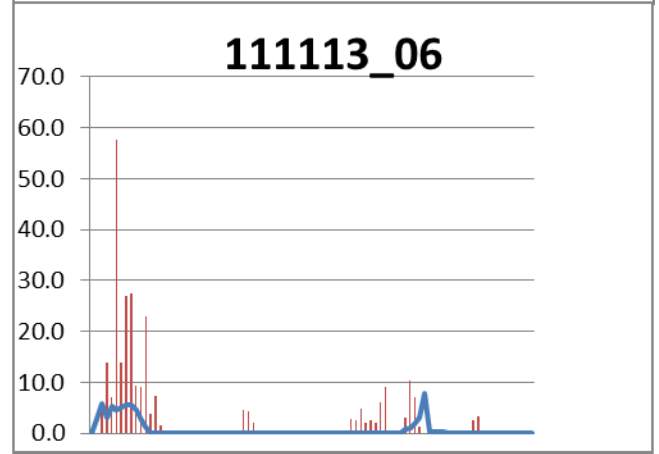
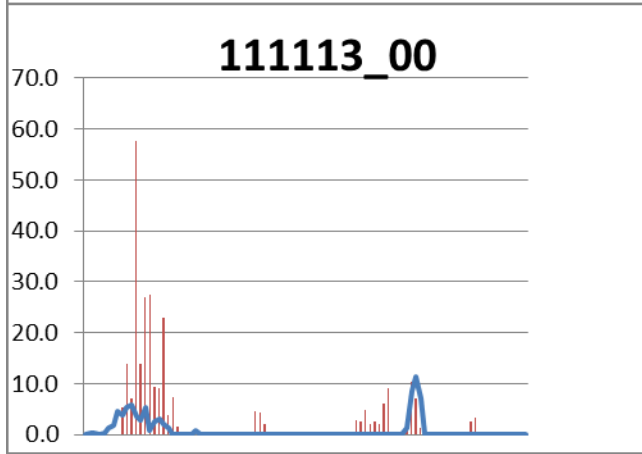
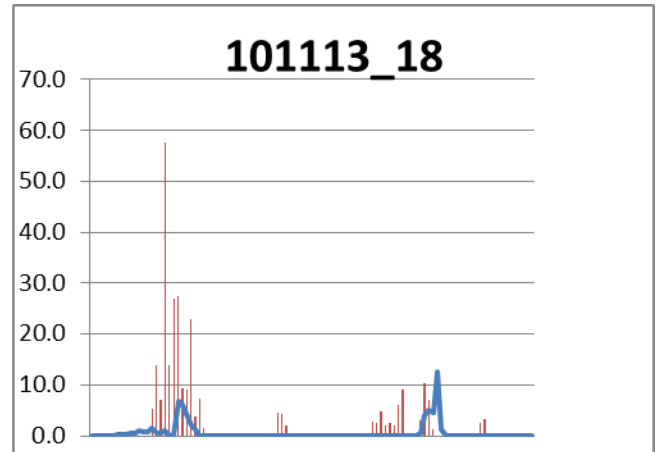
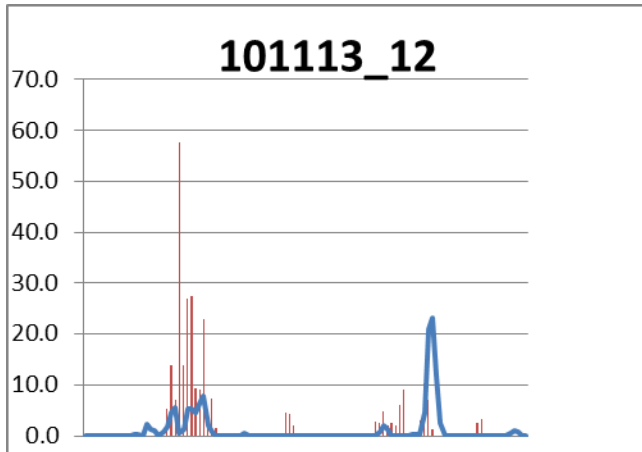


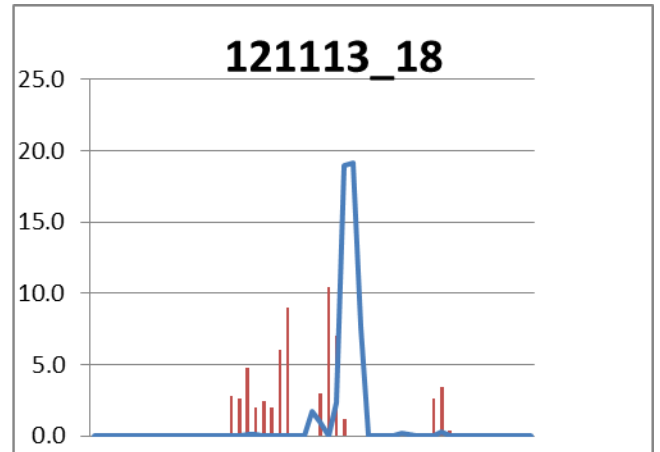
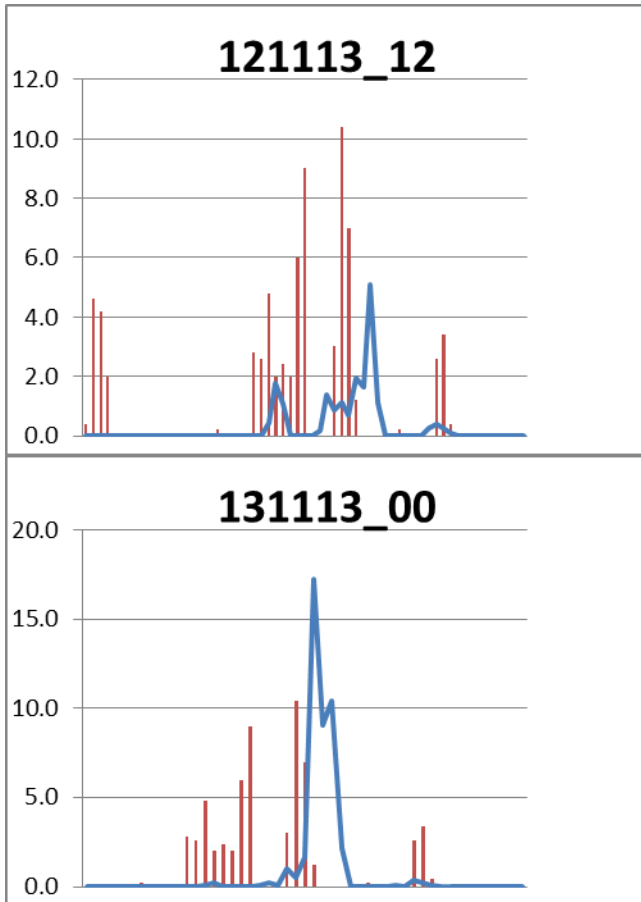


Σχήμα 10: Η εξέλιξη της πρόγνωσης στον σταθμό Καλαμάτα-Νησάκι για το επεισόδιο βροχής **170113**. Με κόκκινες ράβδους απεικονίζεται η παρατηρημένη βροχόπτωση. Με μπλε συνεχή γραμμή η πρόγνωση.

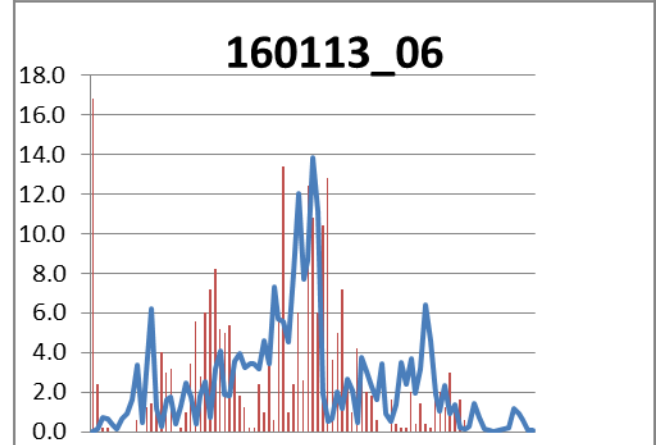
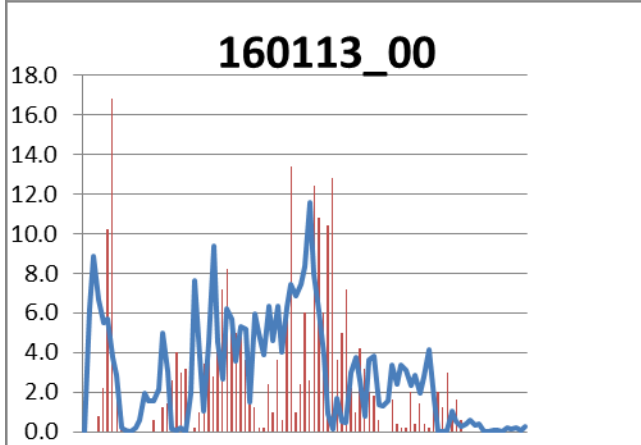
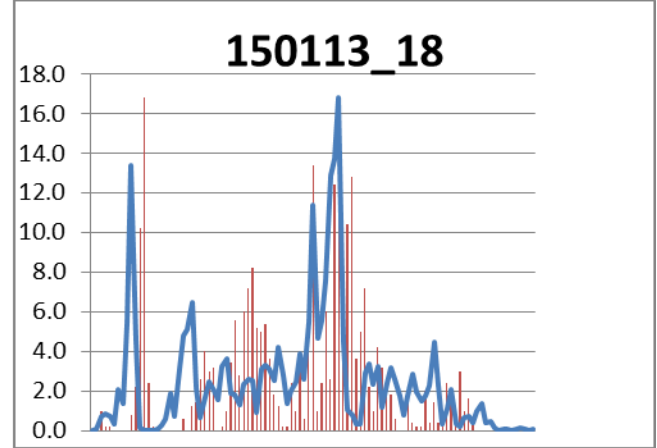
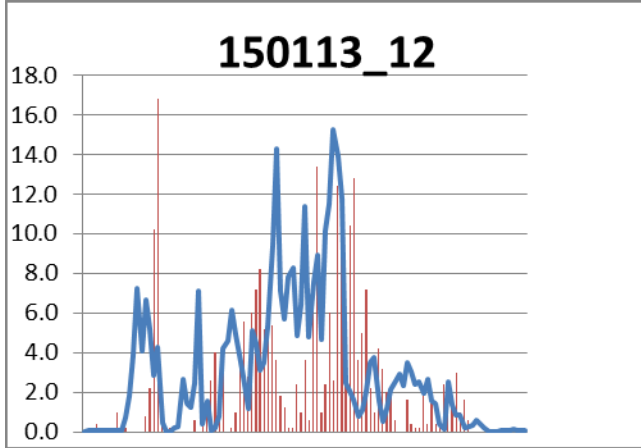
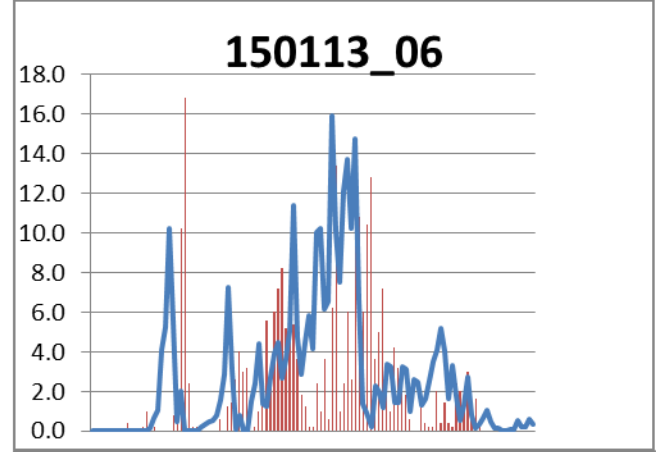
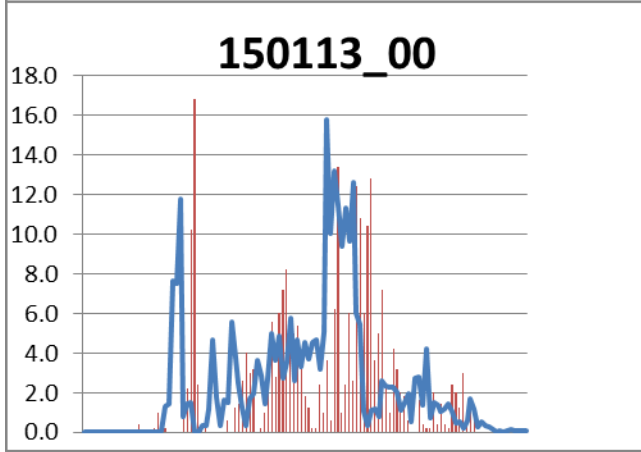
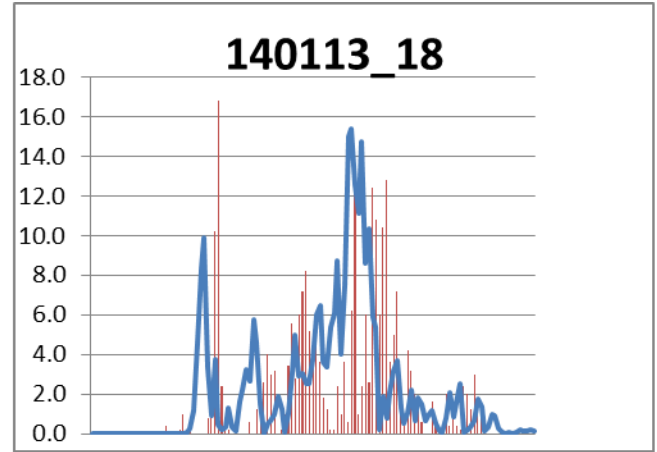
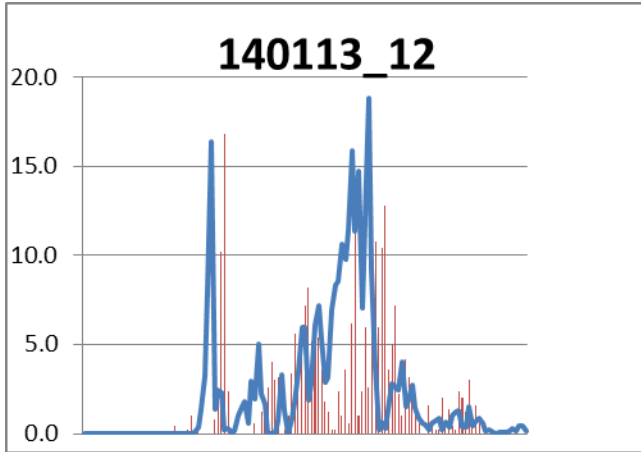
➤ Πολιανή

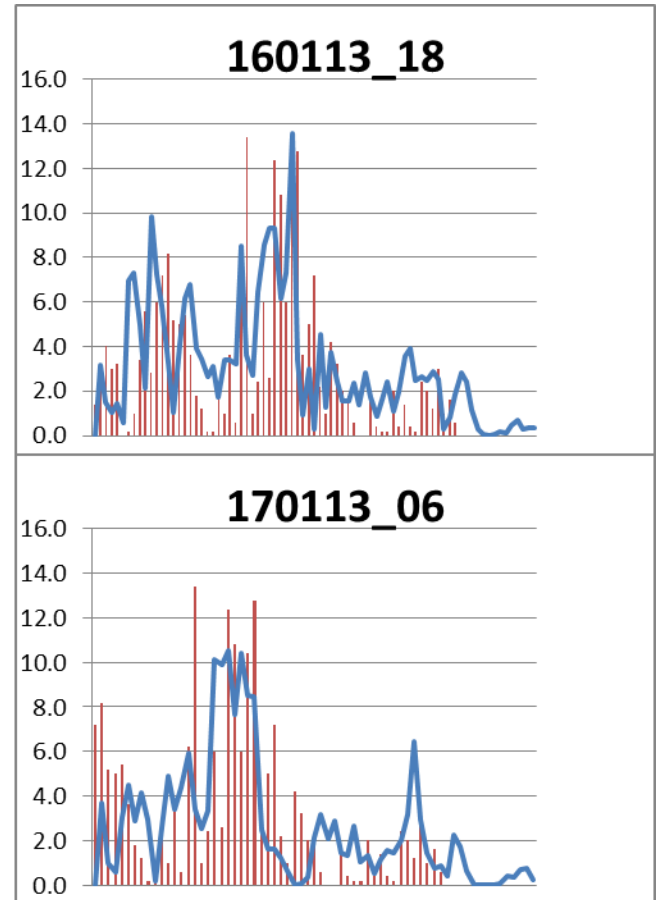
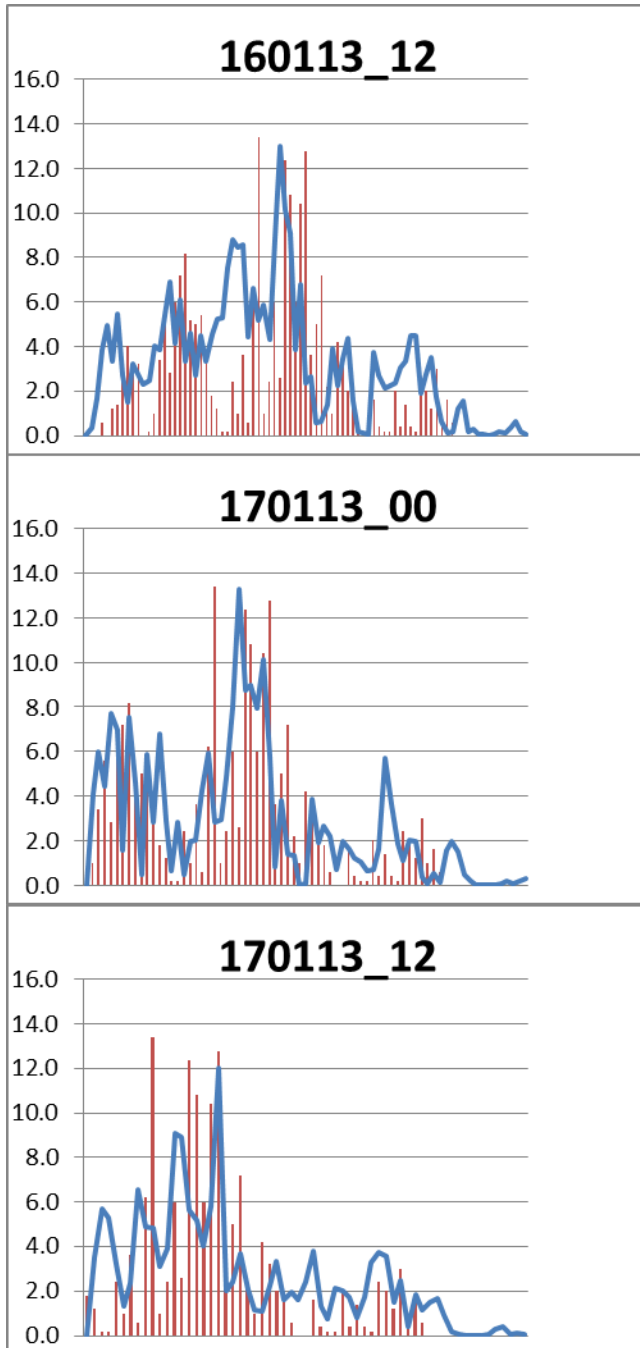






Σχήμα 11: Η εξέλιξη της πρόγνωσης στον σταθμό Πολιανή για το επεισόδιο βροχής **131113**. Με κόκκινες ράβδους απεικονίζεται η παρατηρημένη βροχόπτωση. Με μπλε συνεχή γραμμή η πρόγνωση.

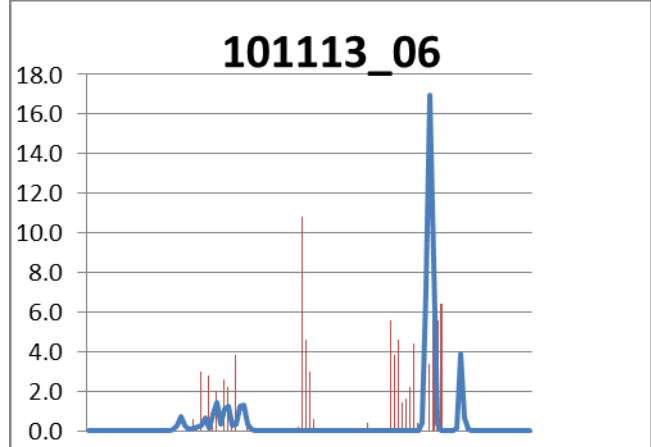
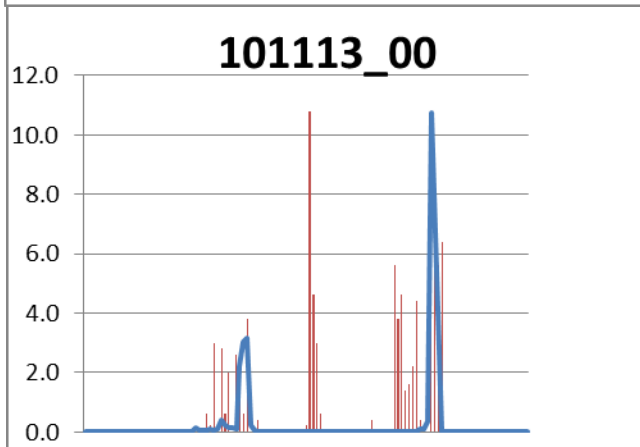
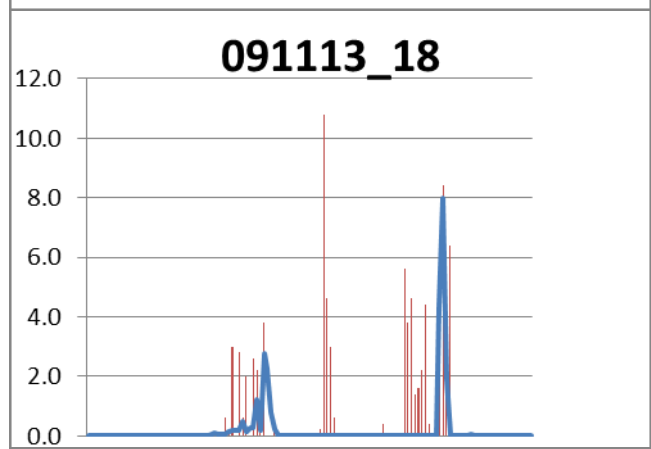
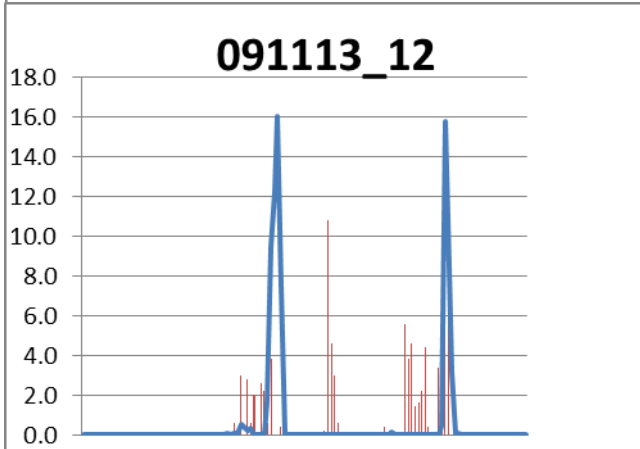
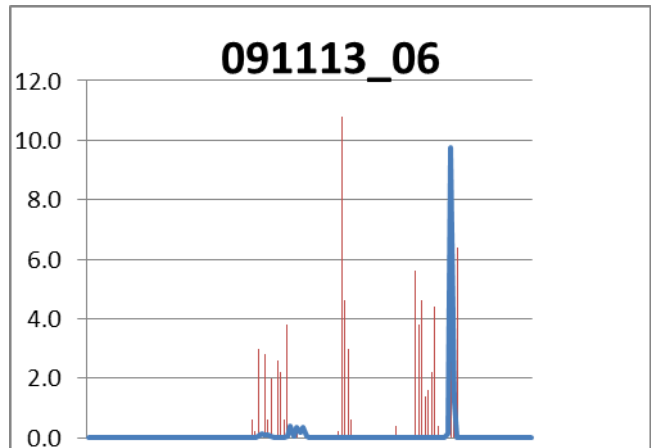
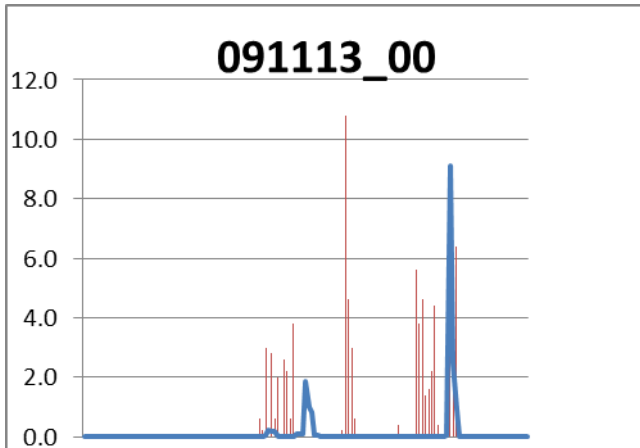


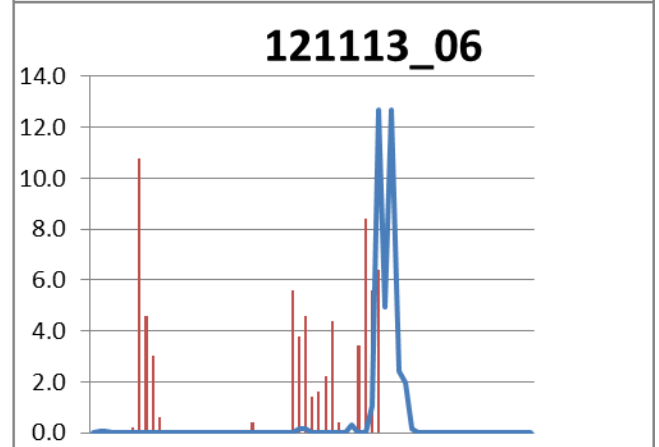
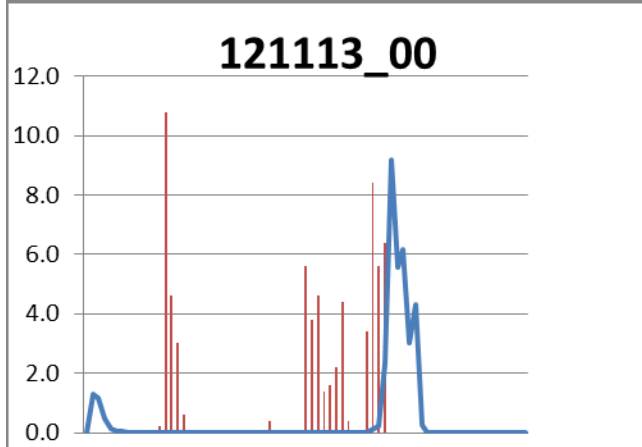
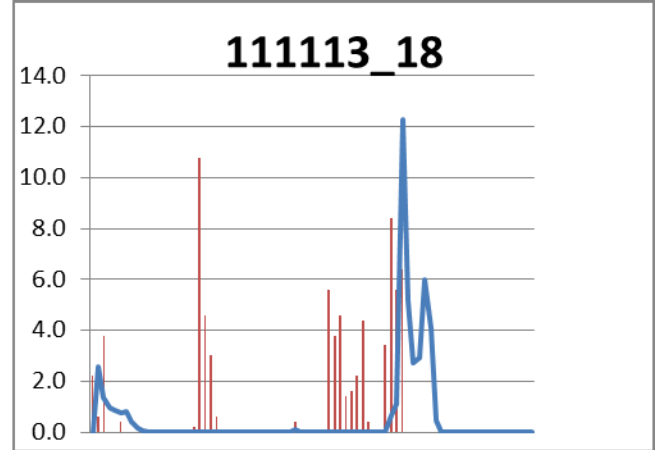
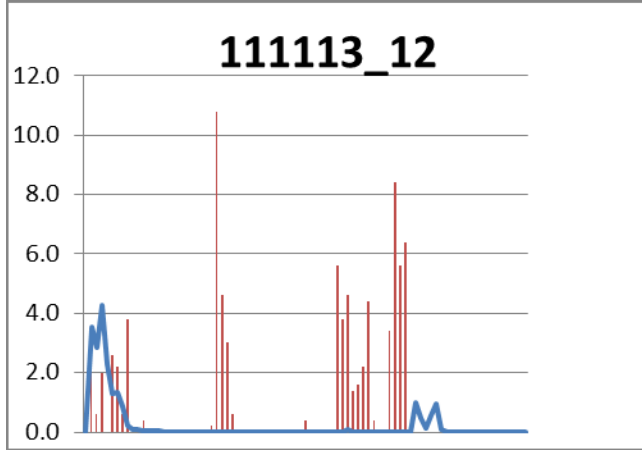
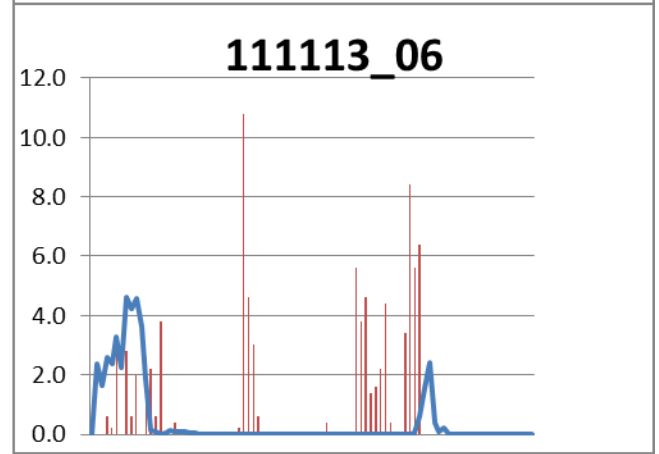
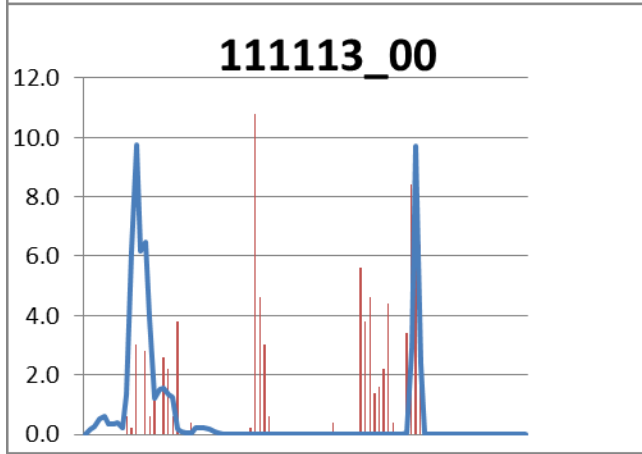
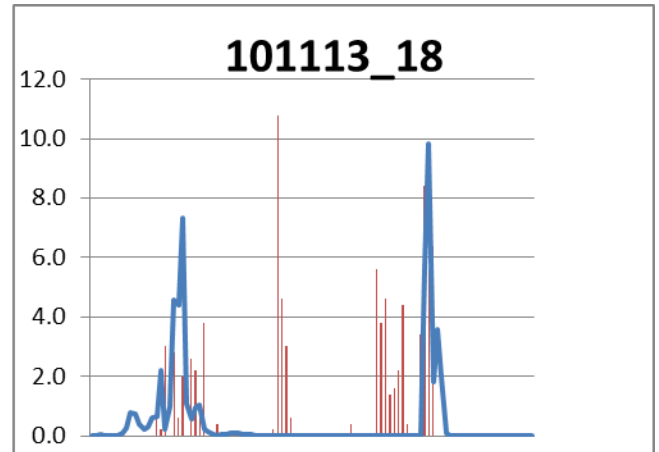
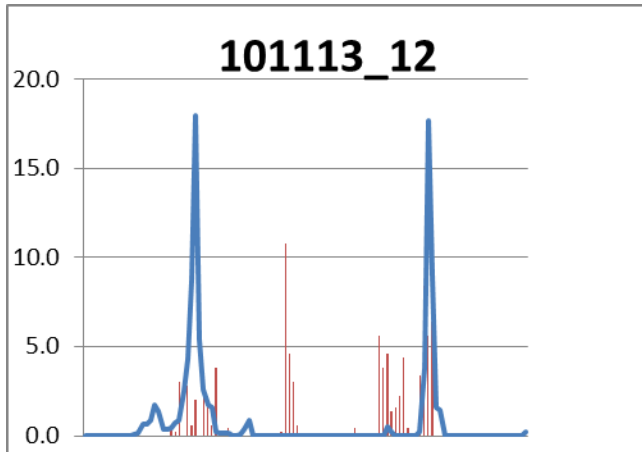


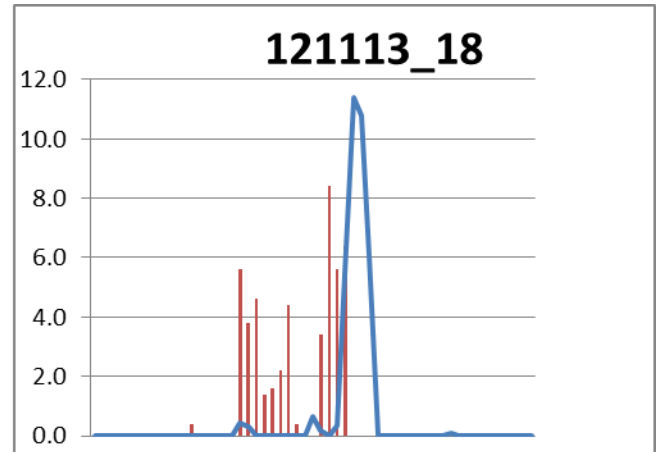
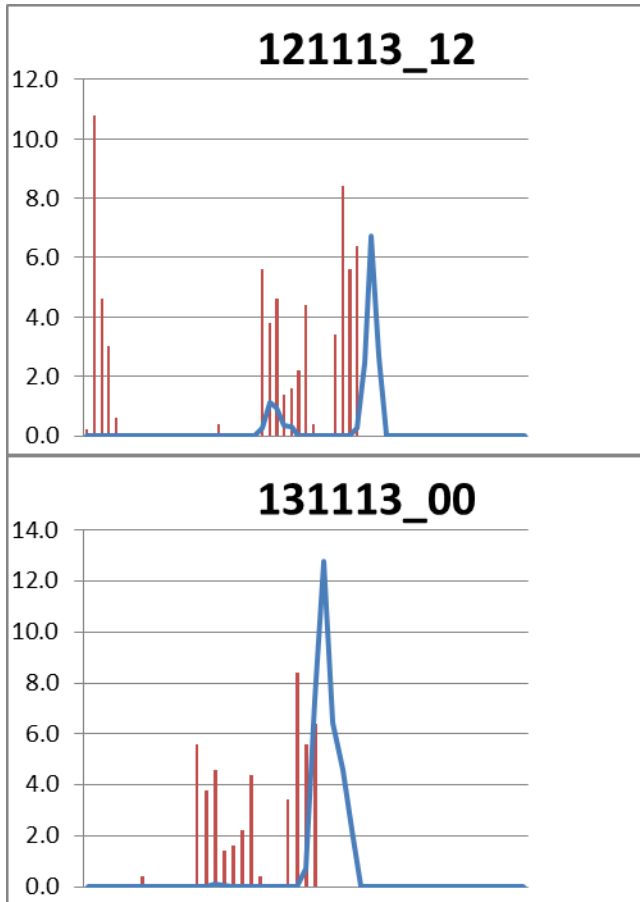
Σχήμα 12: Η εξέλιξη της πρόγνωσης στον σταθμό Πολιανή για το επεισόδιο βροχής **170113**. Με κόκκινες ράβδους απεικονίζεται η παρατηρημένη βροχόπτωση. Με μπλε συνεχή γραμμή η πρόγνωση.

1.2 Λεκάνη Λούσιου

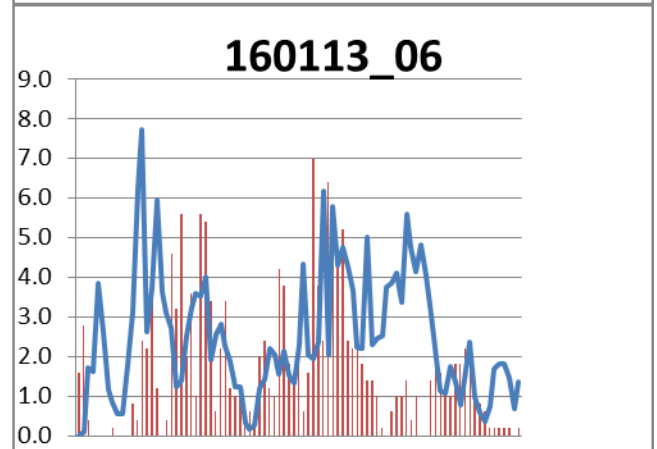
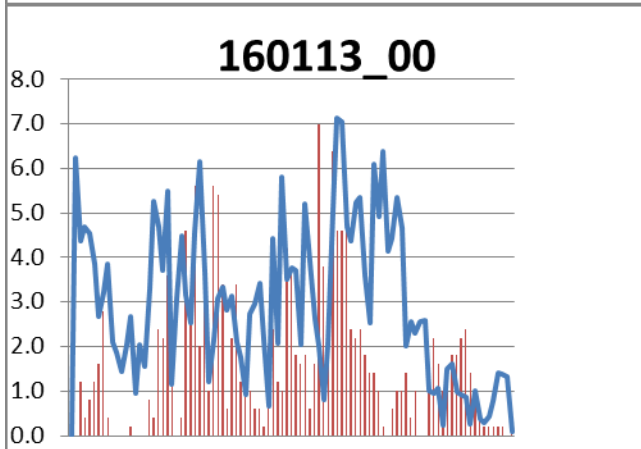
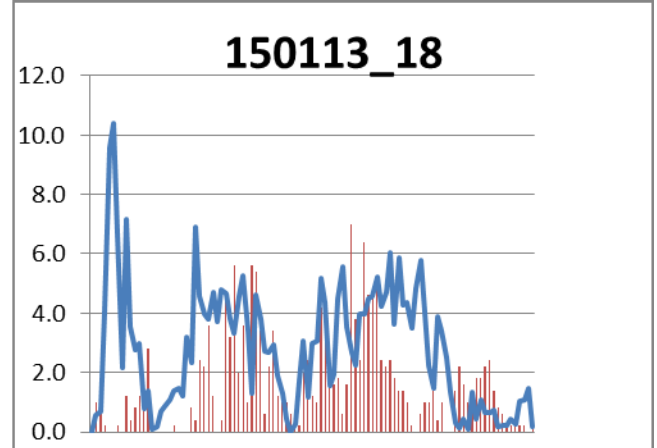
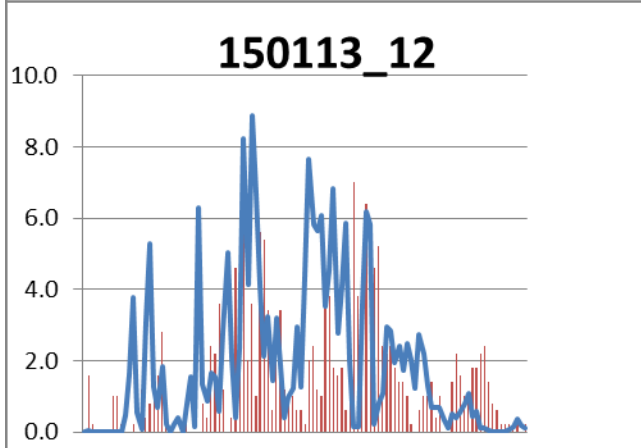
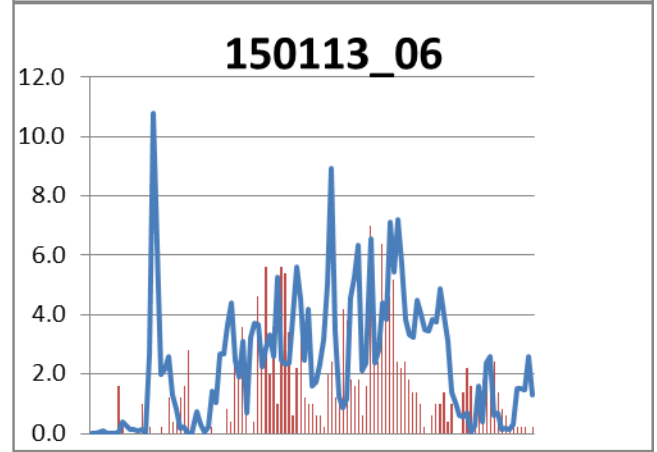
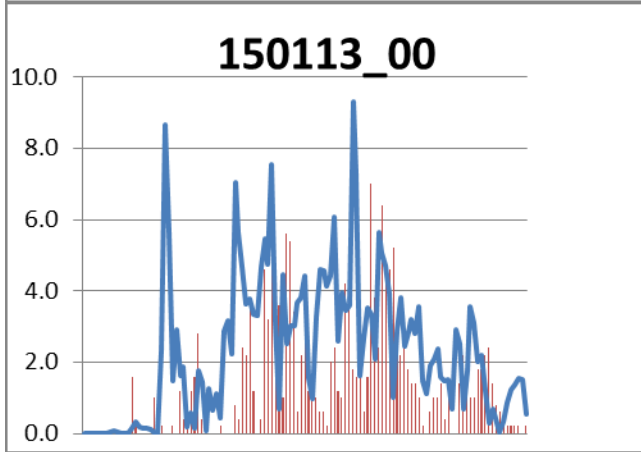
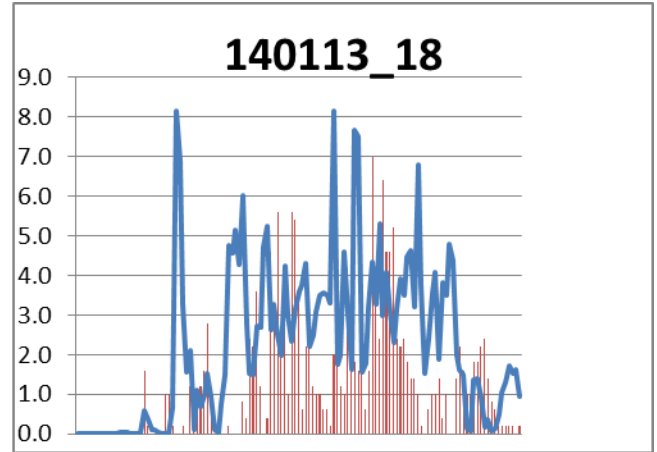
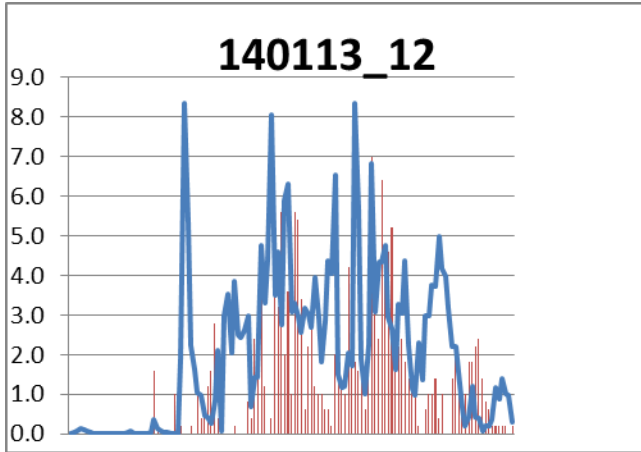
➤ Δημητσάνα

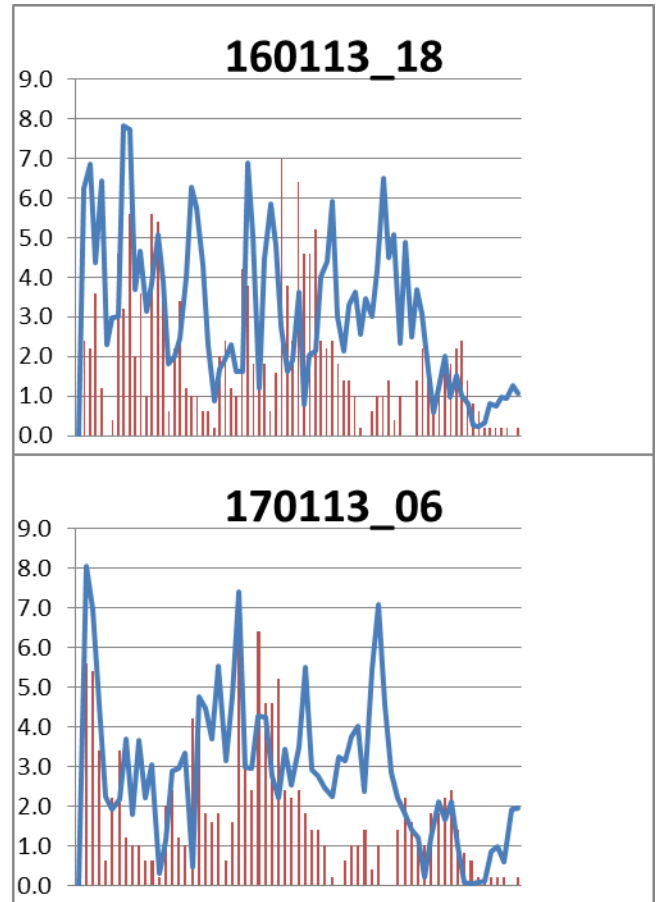
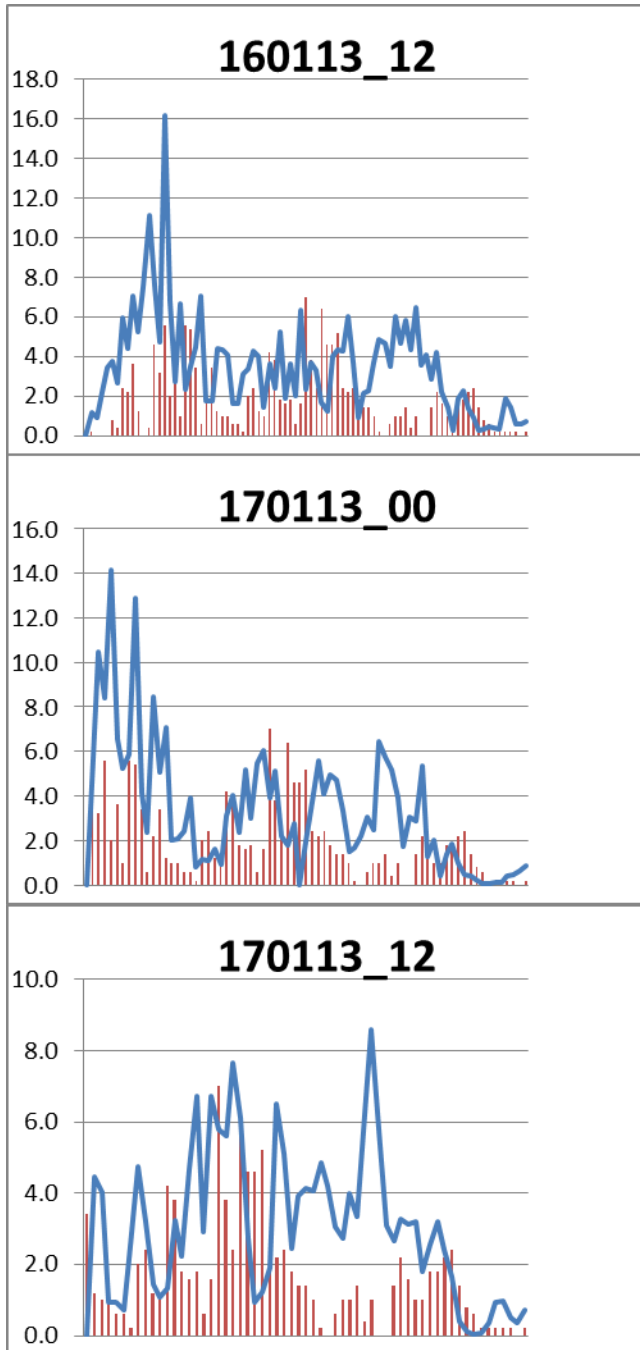






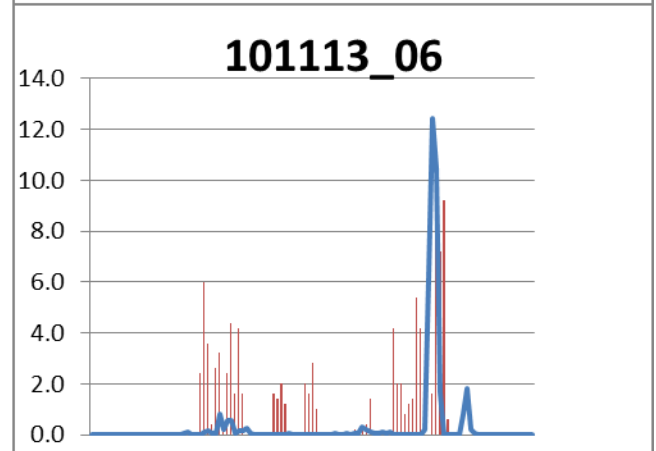
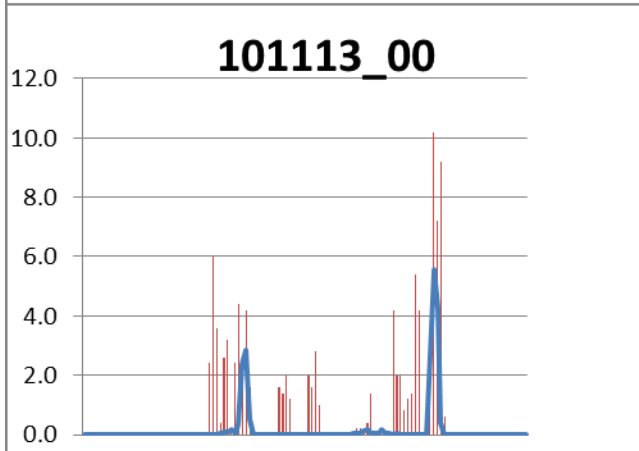
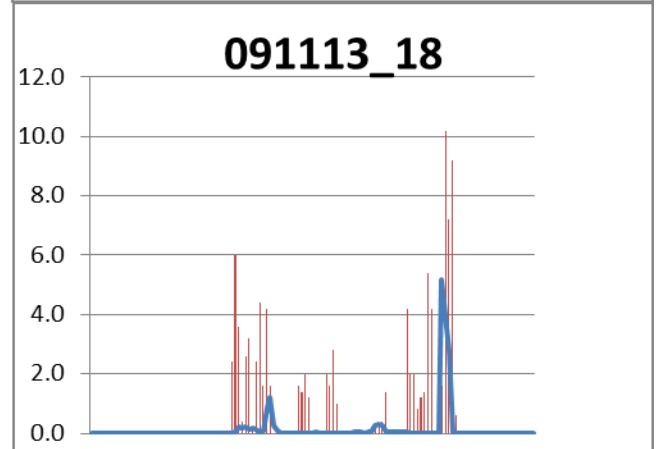
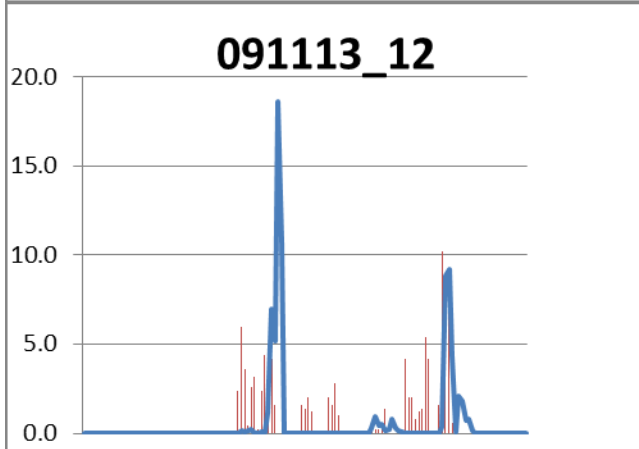
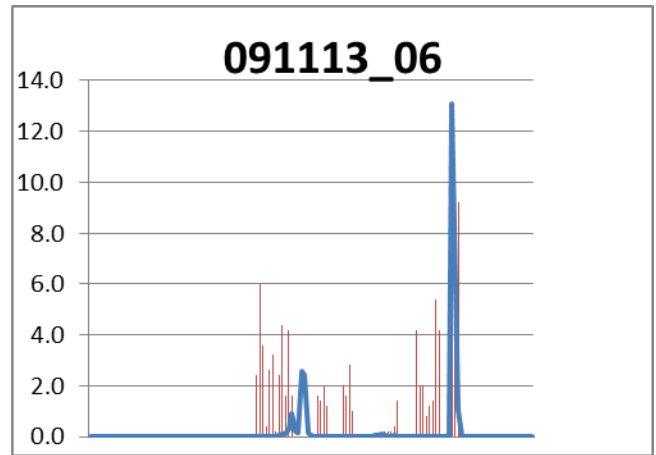
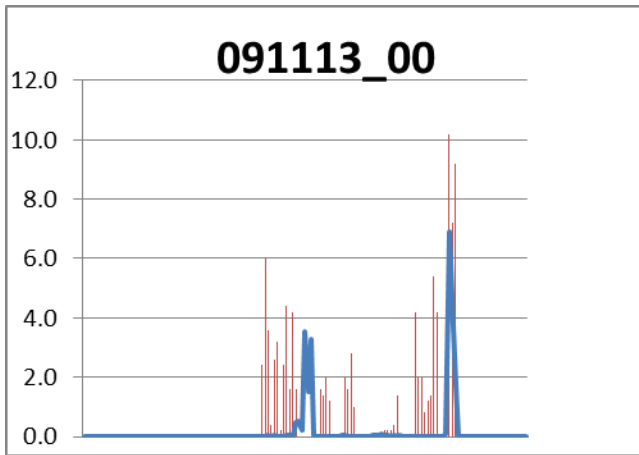
Σχήμα 13: Η εξέλιξη της πρόγνωσης στον σταθμό Δημητσάνα για το επεισόδιο βροχής **131113**. Με κόκκινες ράβδους απεικονίζεται η παρατηρημένη βροχόπτωση. Με μπλε συνεχή γραμμή η πρόγνωση.

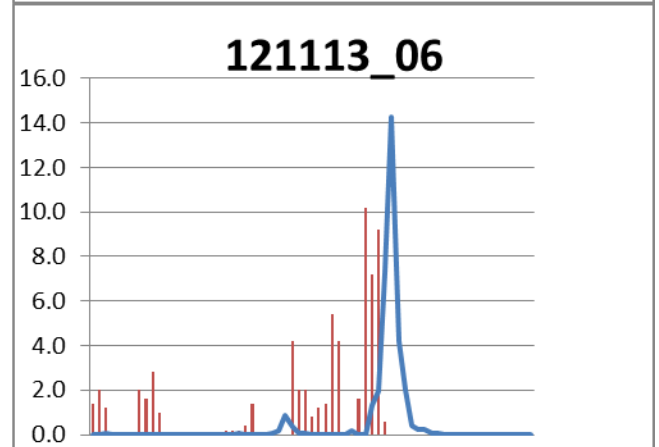
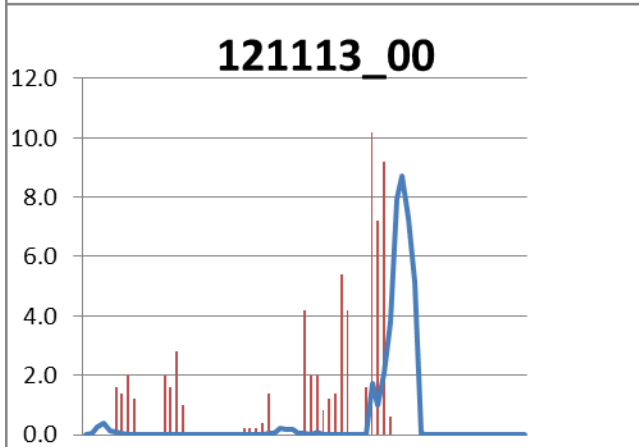
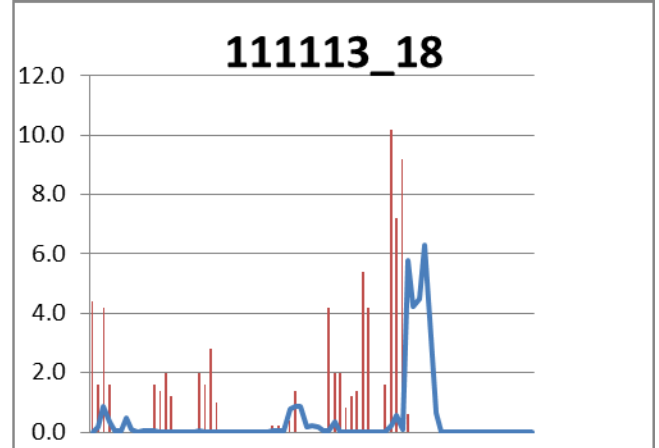
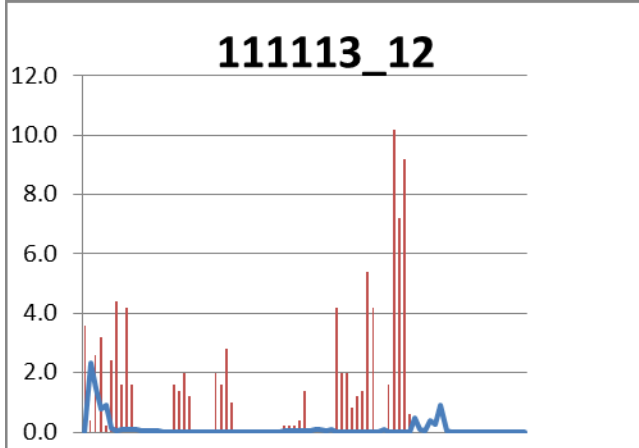
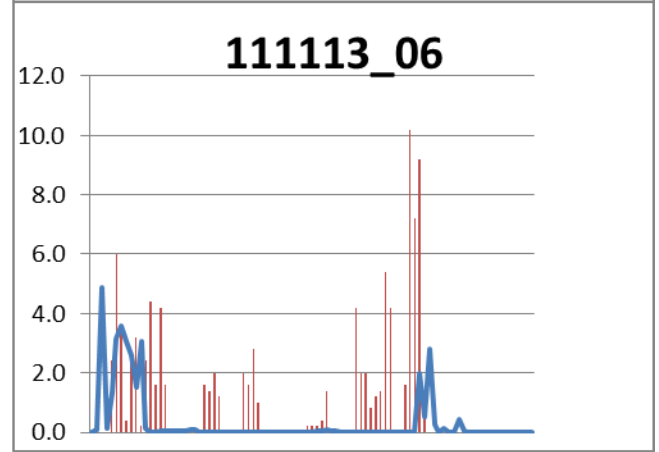
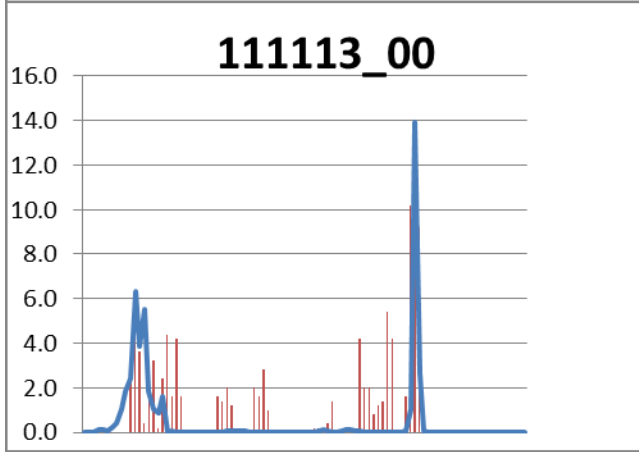
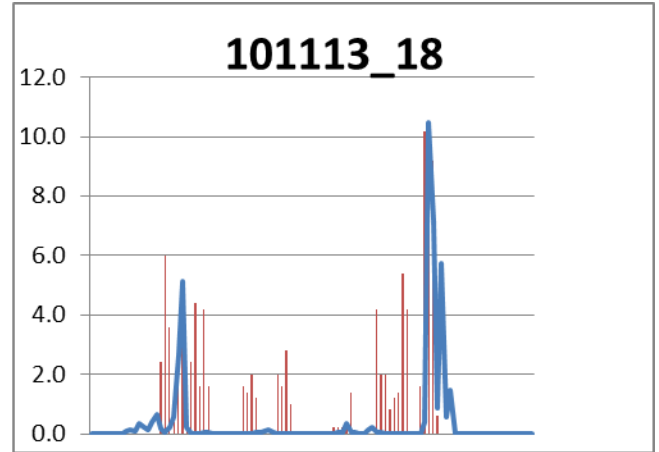
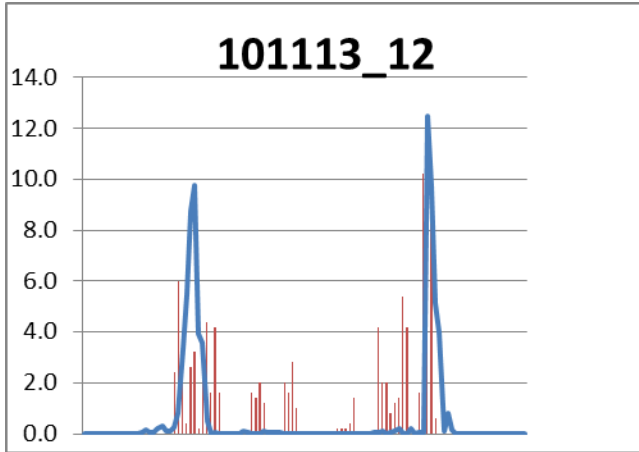


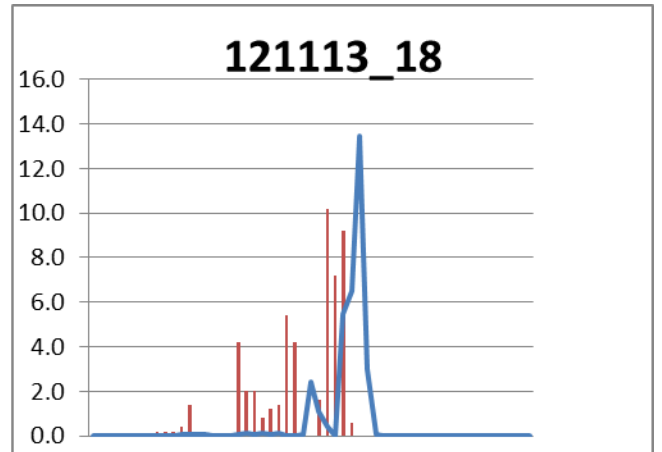
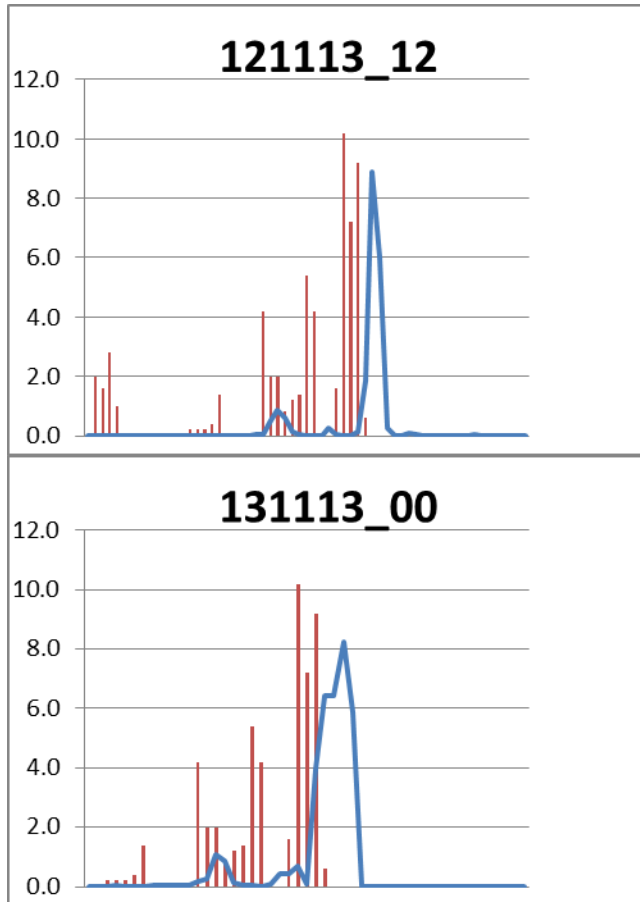


Σχήμα 14: Η εξέλιξη της πρόγνωσης στον σταθμό Δημητσάνα για το επεισόδιο βροχής **170113**. Με κόκκινες ράβδους απεικονίζεται η παρατηρημένη βροχόπτωση. Με μπλε συνεχή γραμμή η πρόγνωση.

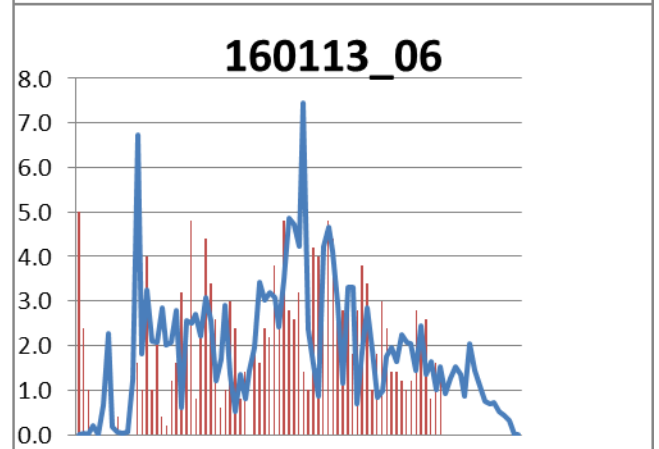
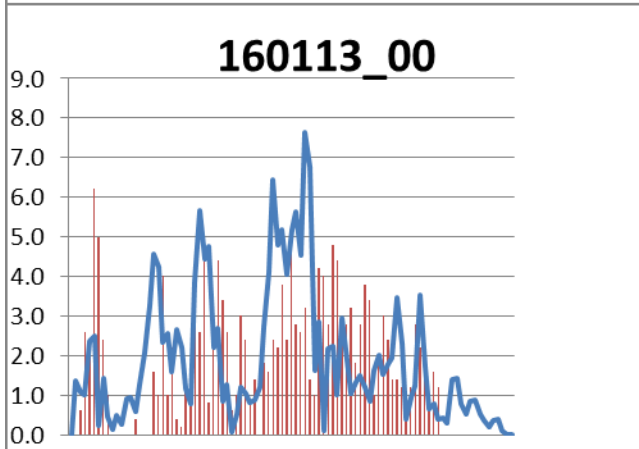
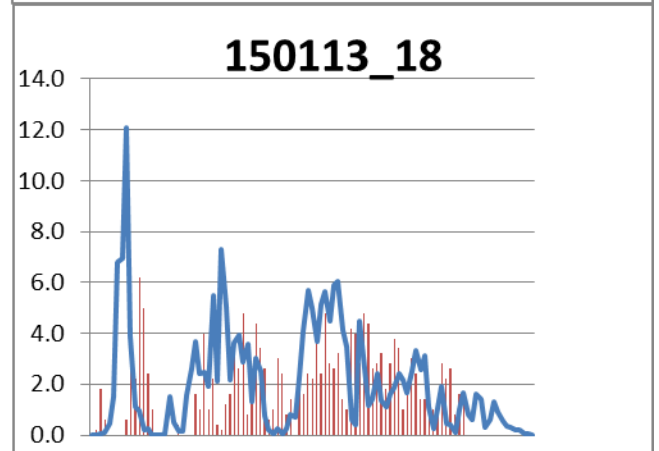
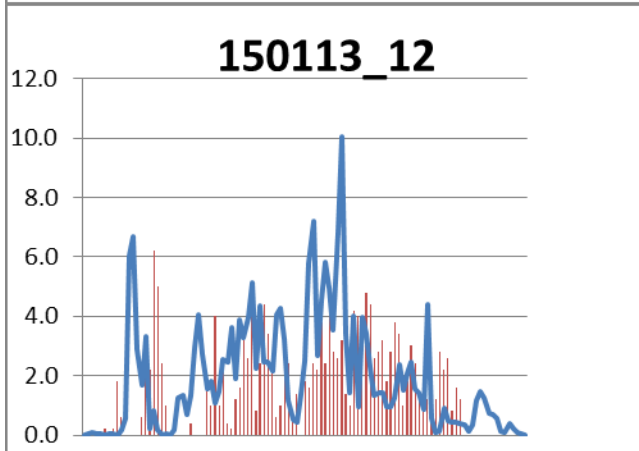
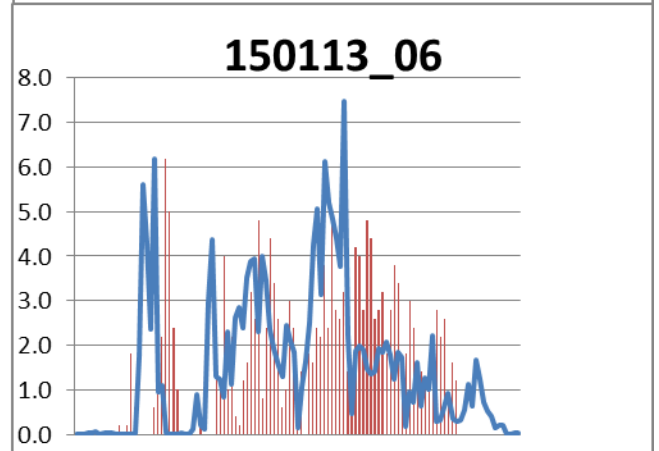
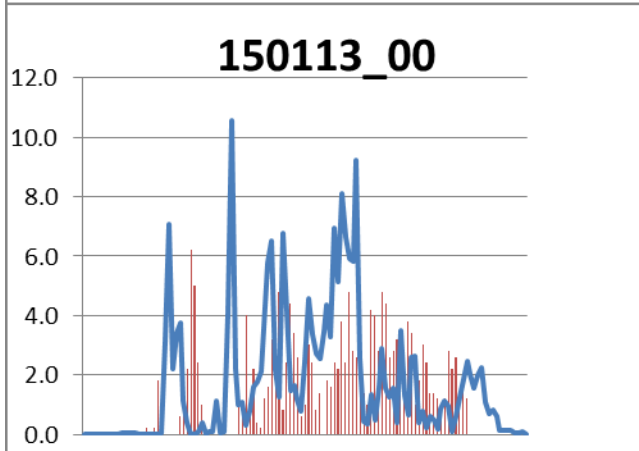
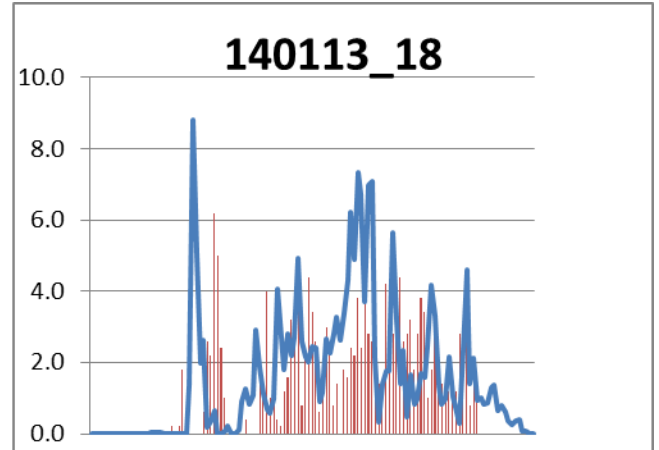
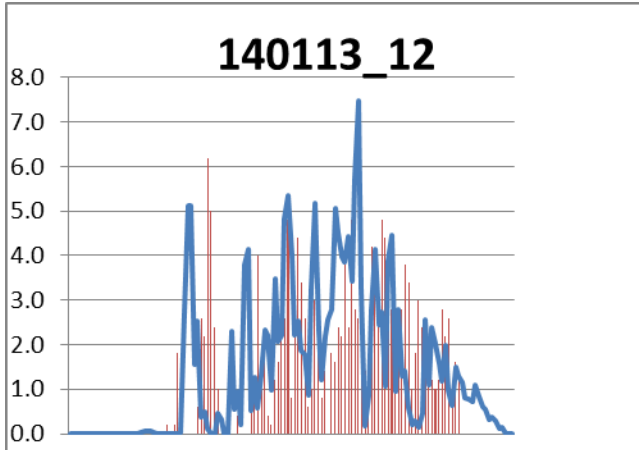
➤ Ελάτη

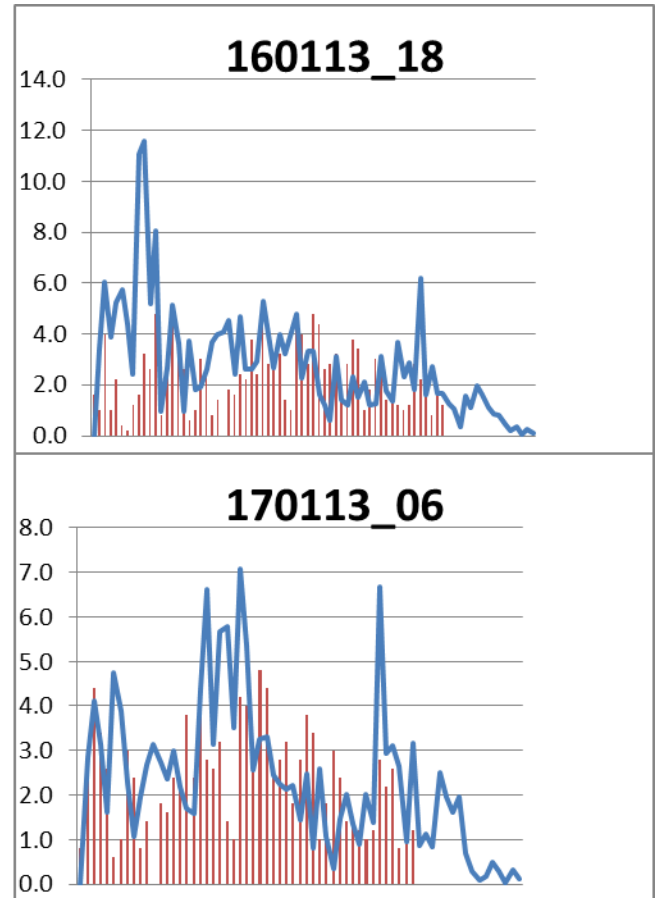
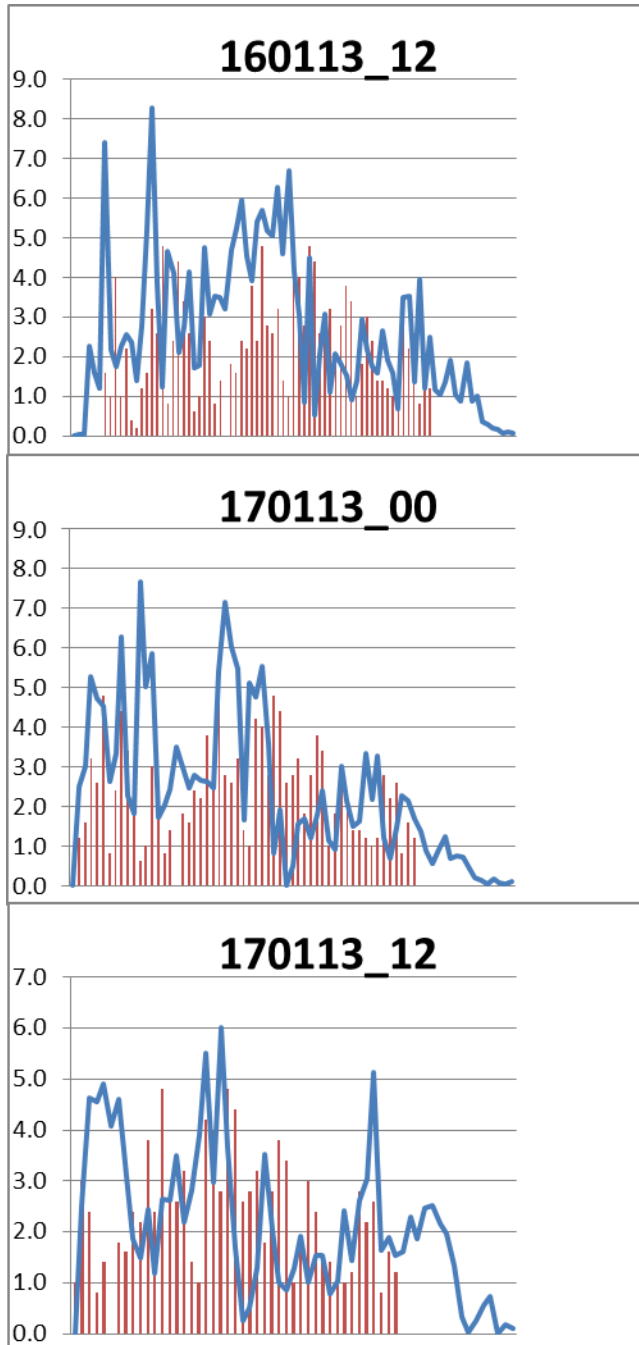






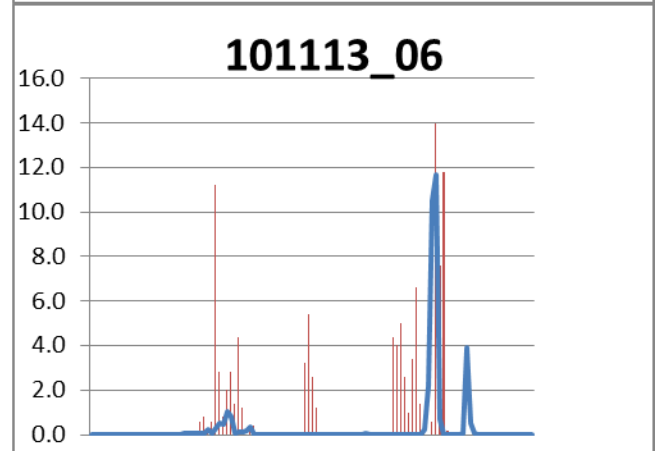
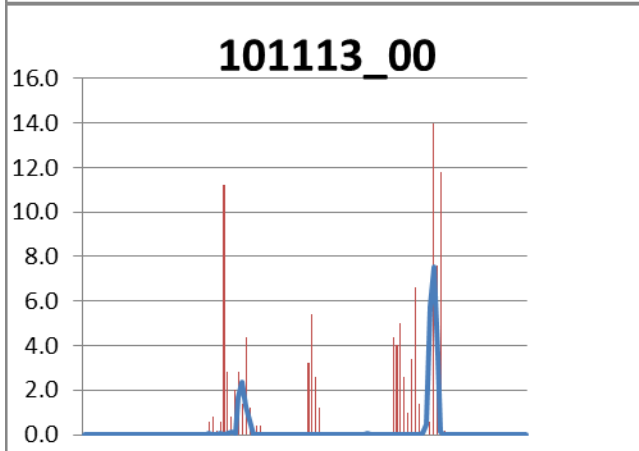
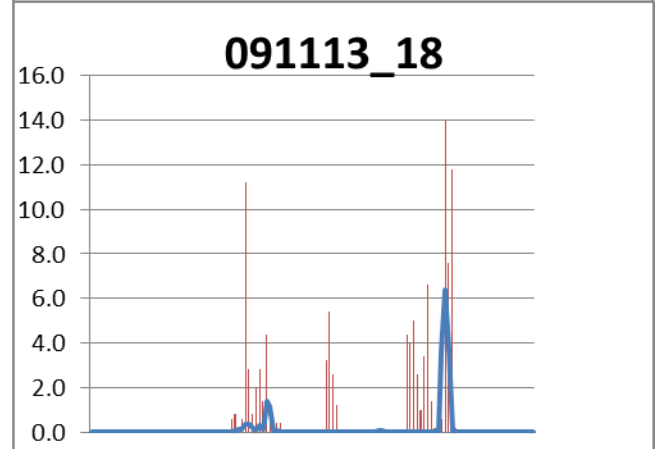
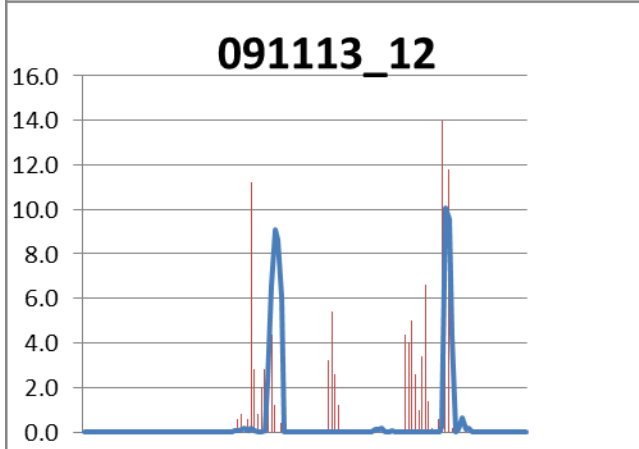
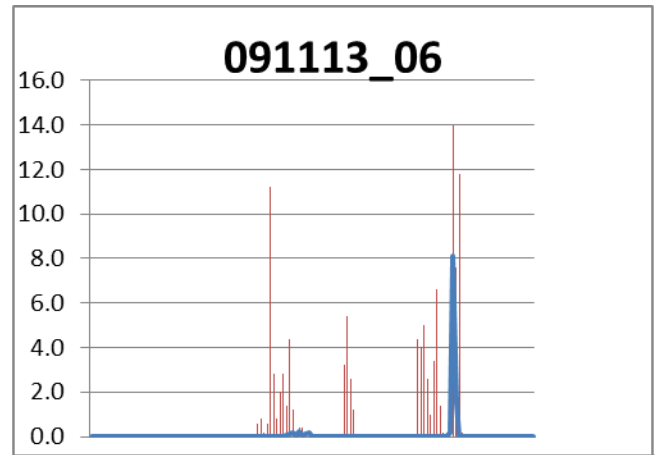
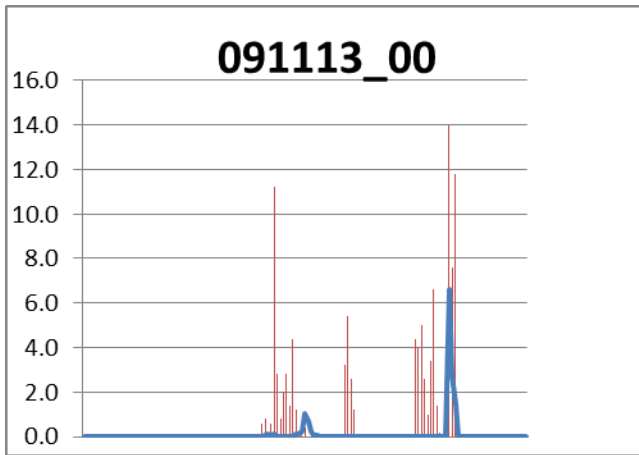
Σχήμα 15: Η εξέλιξη της πρόγνωσης στον σταθμό Ελάτη για το επεισόδιο βροχής **131113**. Με κόκκινες ράβδους απεικονίζεται η παρατηρημένη βροχόπτωση. Με μπλε συνεχή γραμμή η πρόγνωση.

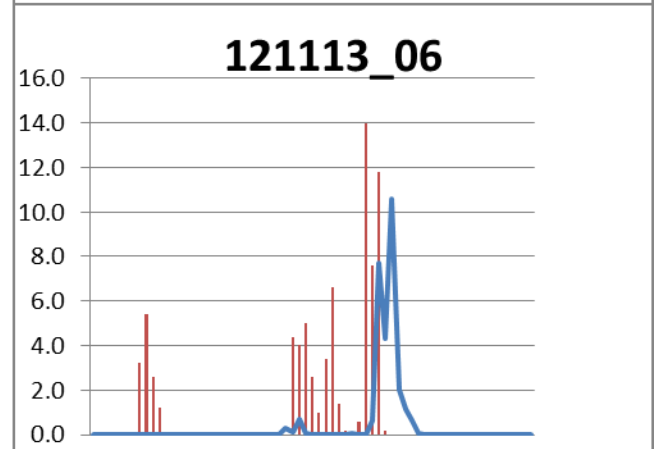
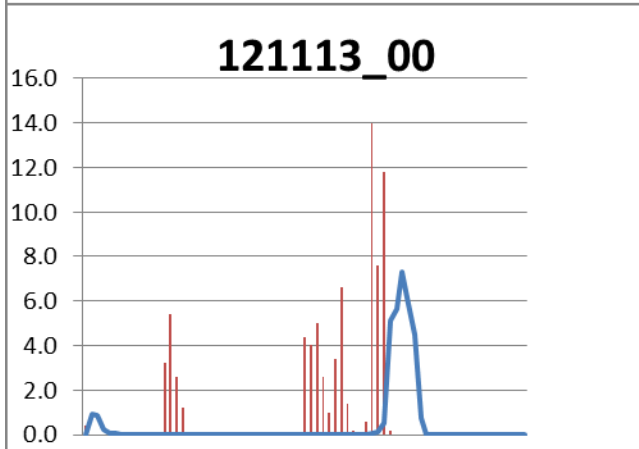
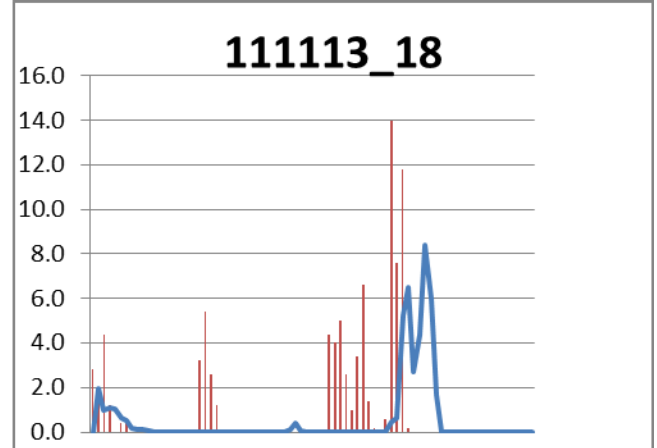
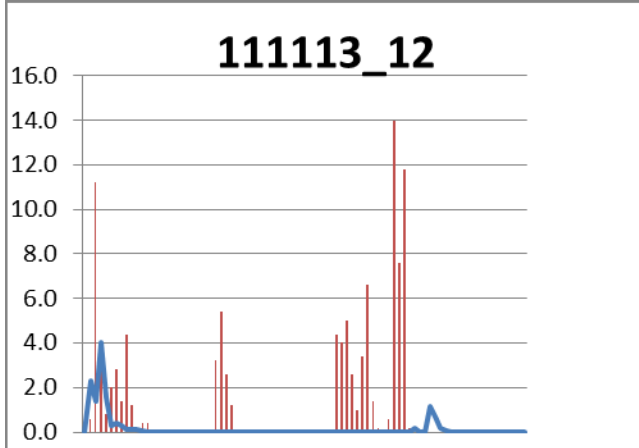
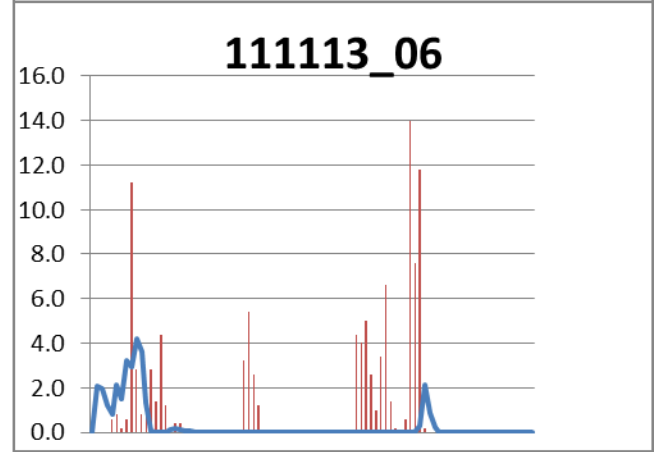
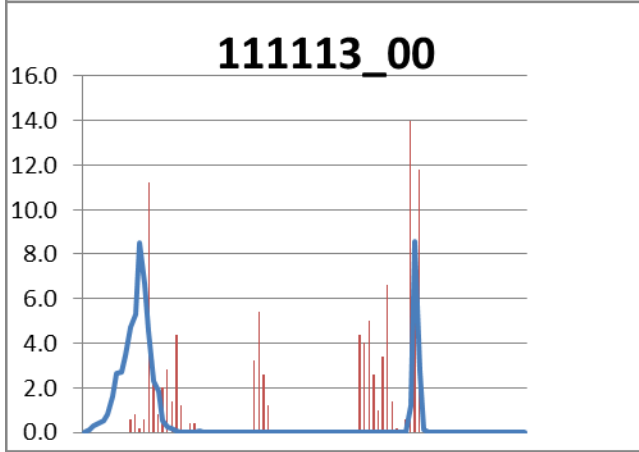
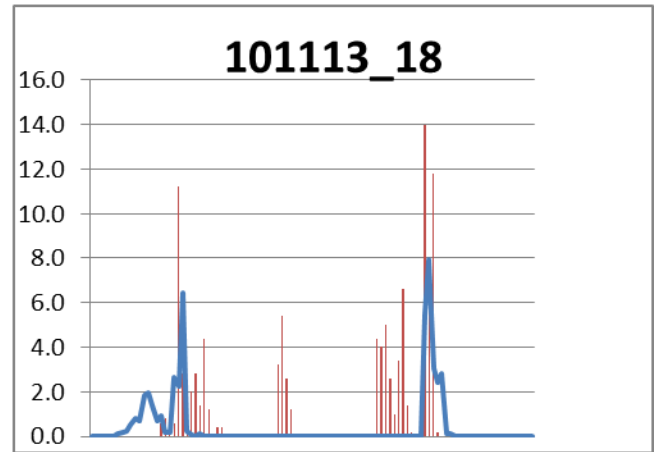
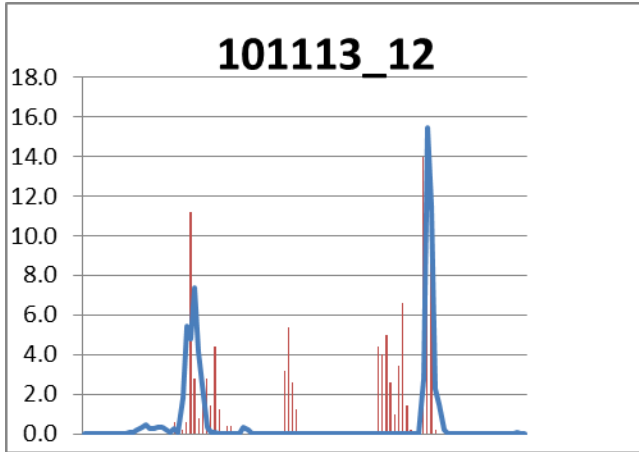


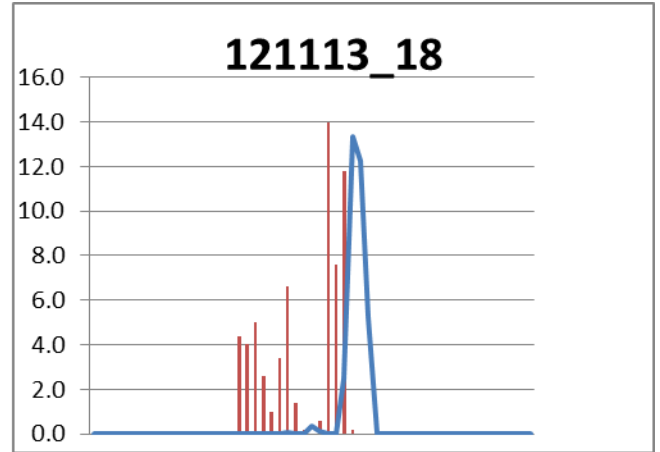
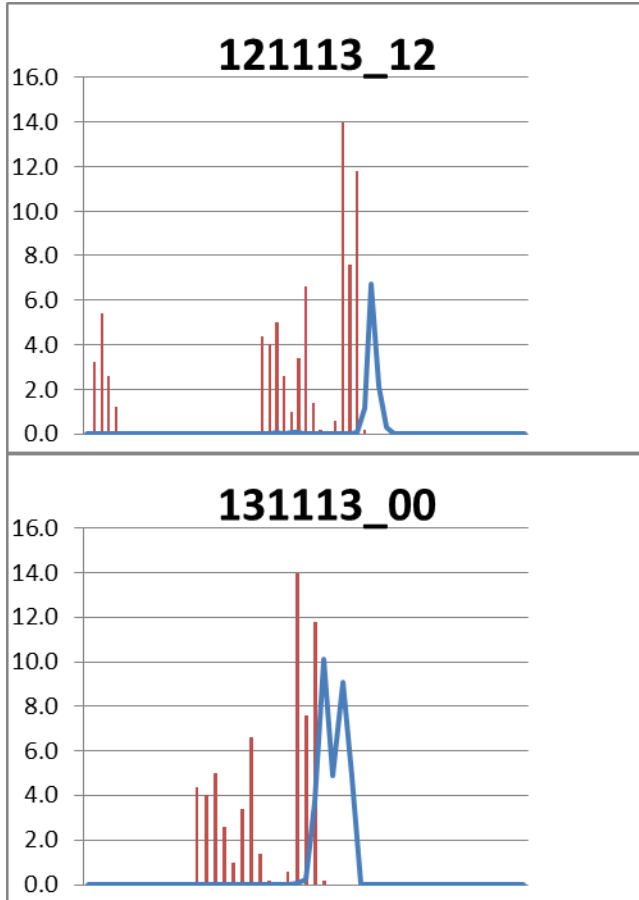


Σχήμα 16: Η εξέλιξη της πρόγνωσης στον σταθμό Ελάτη για το επεισόδιο βροχής **170113**. Με κόκκινες ράβδους απεικονίζεται η παρατηρημένη βροχόπτωση. Με μπλε συνεχή γραμμή η πρόγνωση.

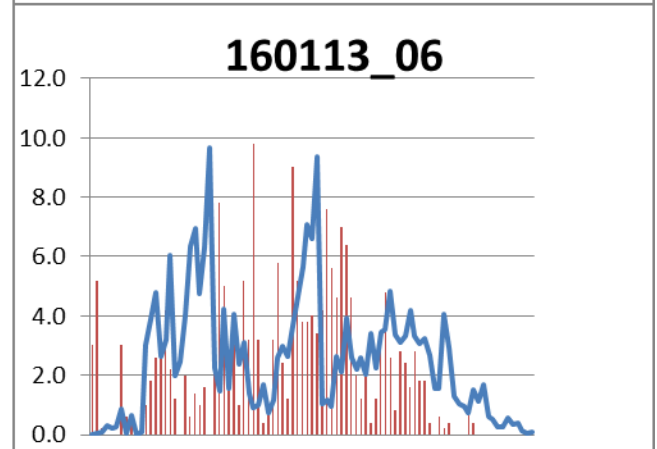
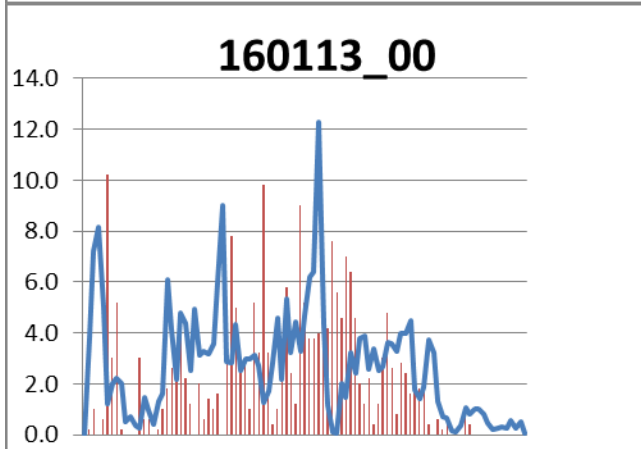
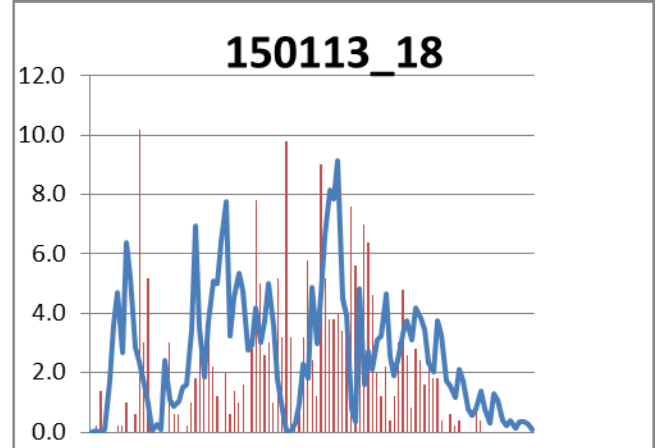
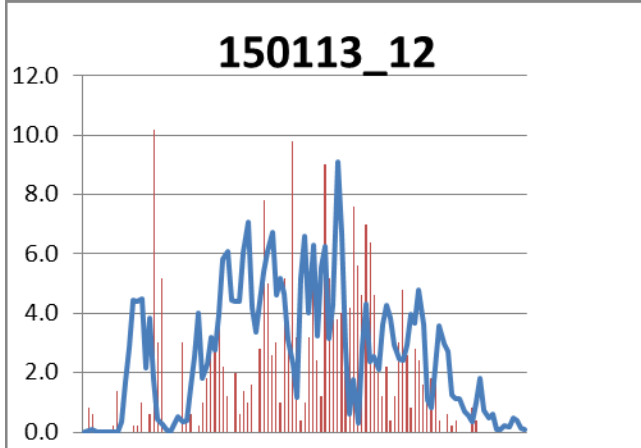
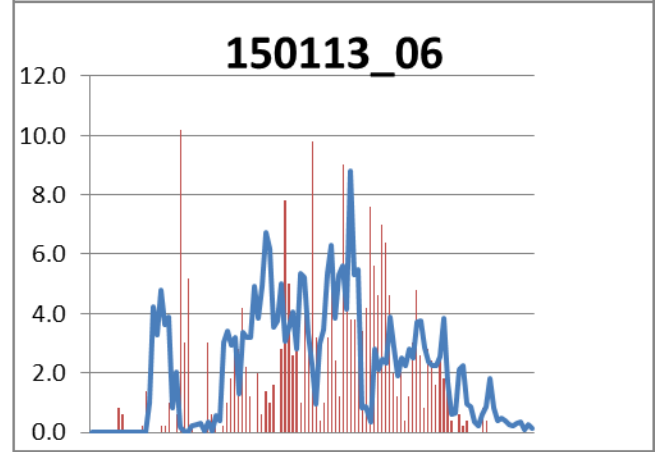
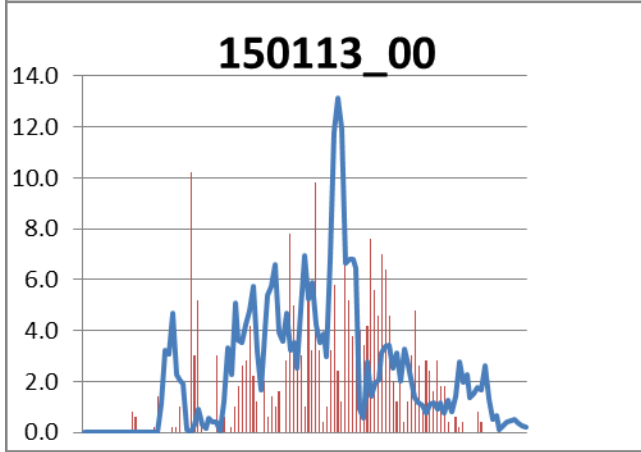
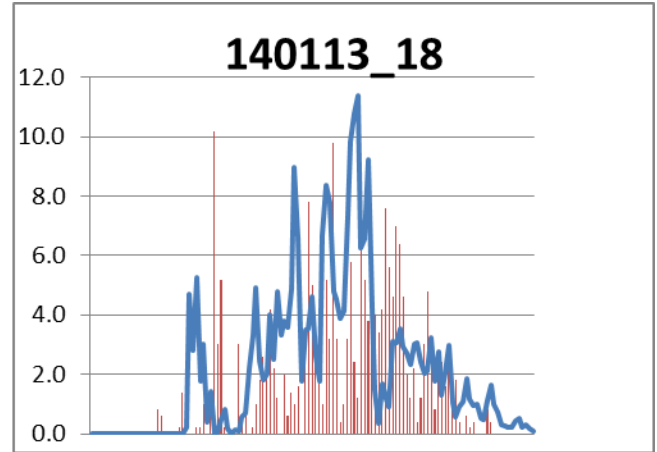
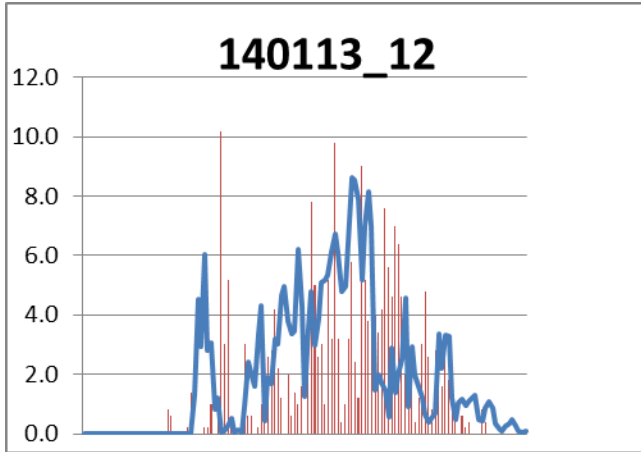
➤ Λαγκάδια

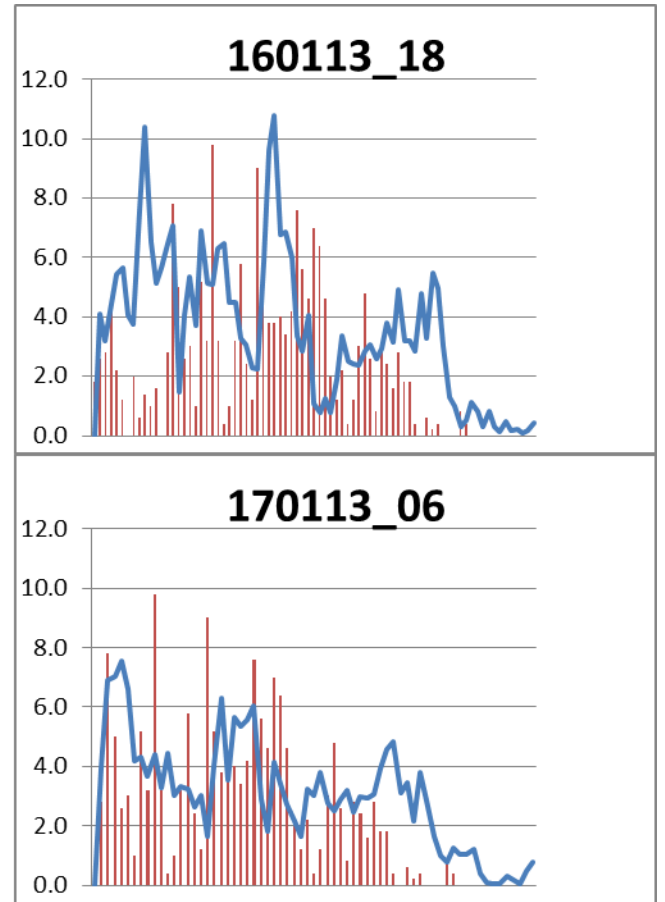
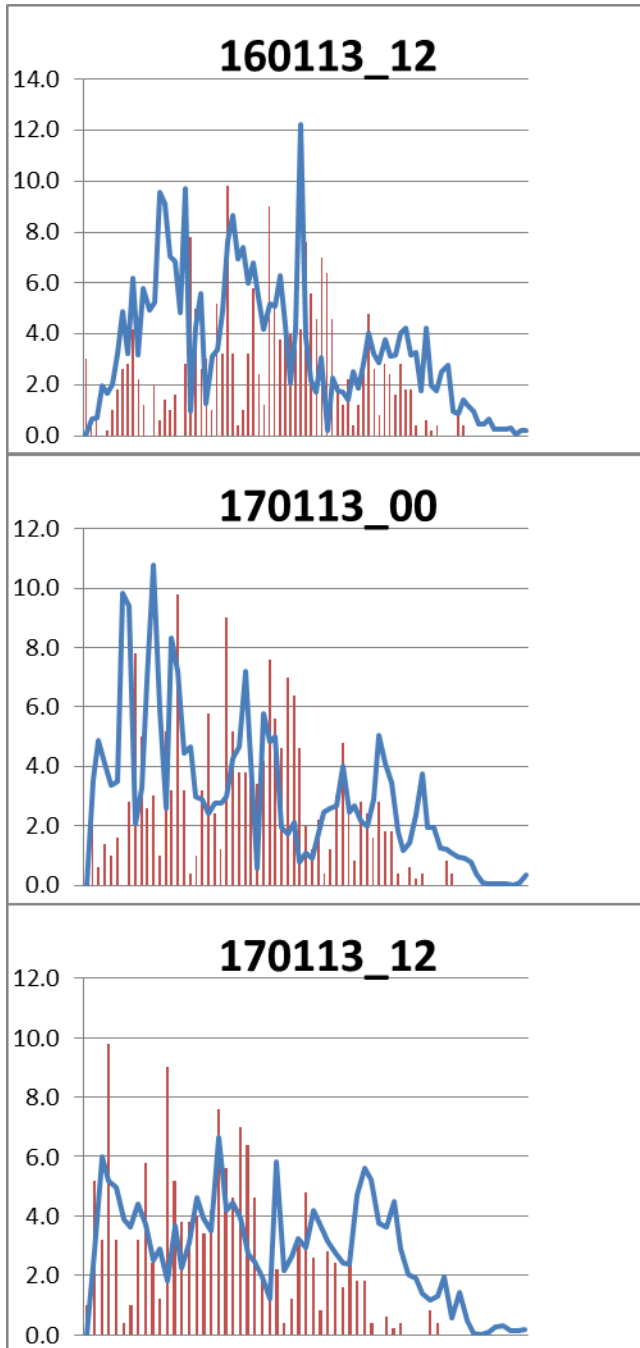






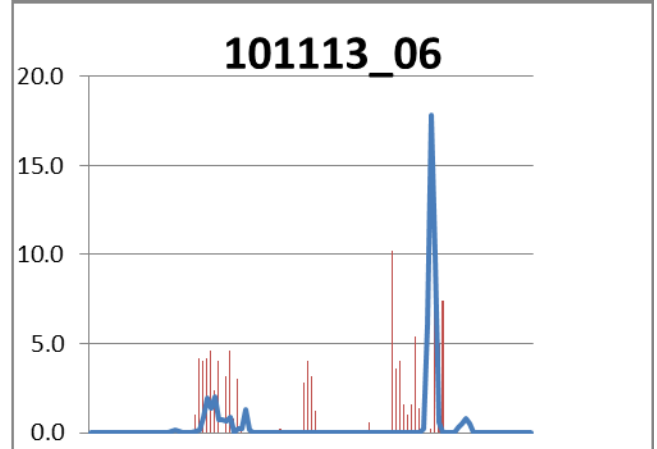
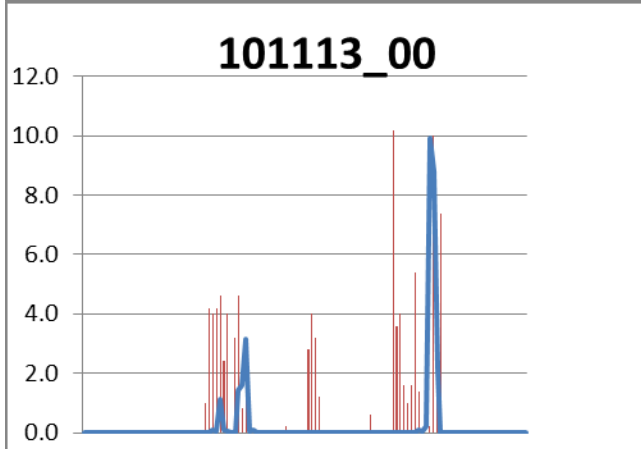
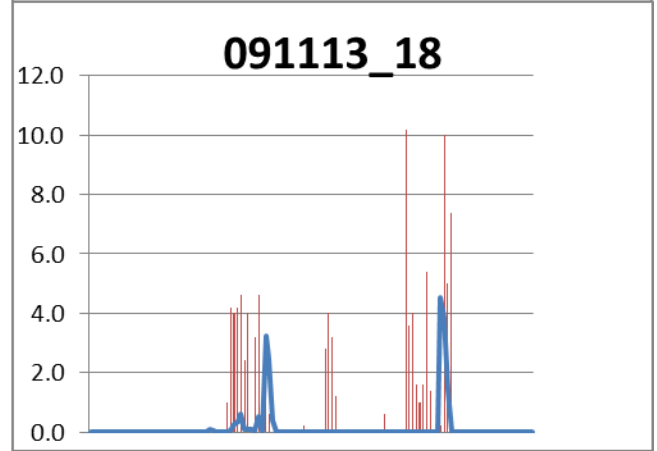
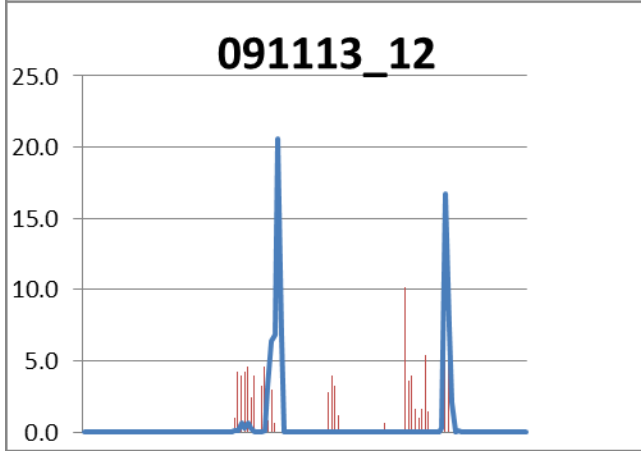
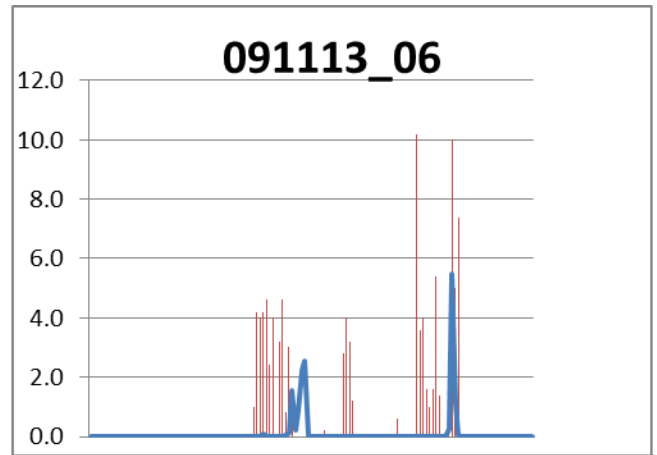
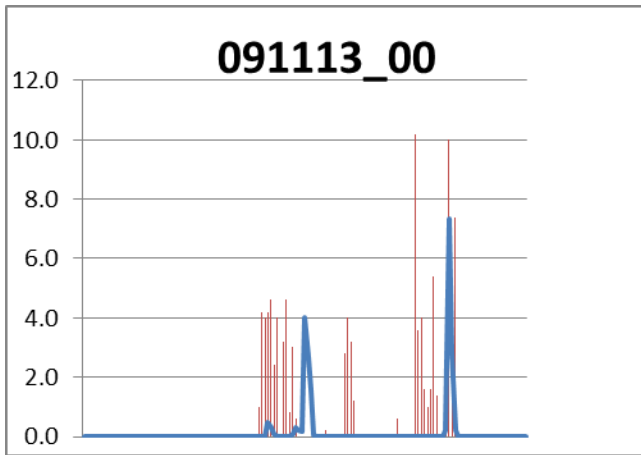
*Σχήμα 17: Η εξέλιξη της πρόγνωσης στον σταθμό Λαγκάδια για το επεισόδιο βροχής **131113**. Με κόκκινες ράβδους απεικονίζεται η παρατηρημένη βροχόπτωση. Με μπλε συνεχή γραμμή η πρόγνωση.*

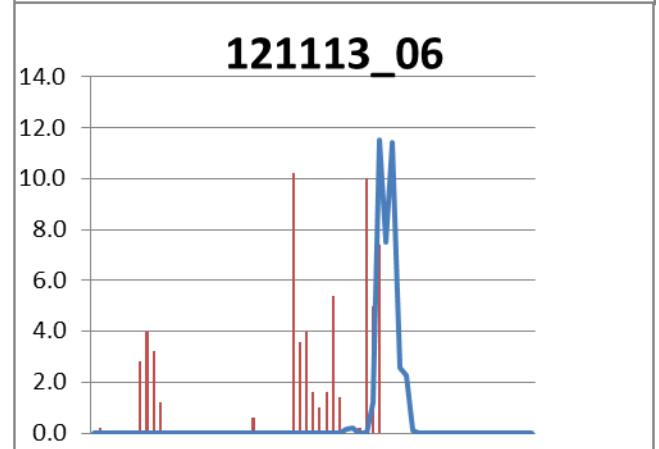
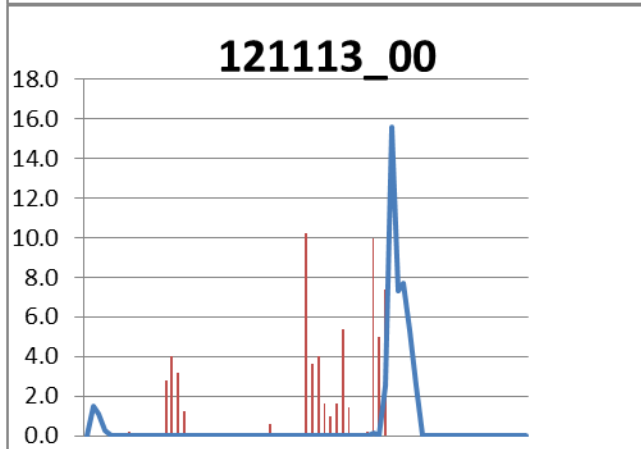
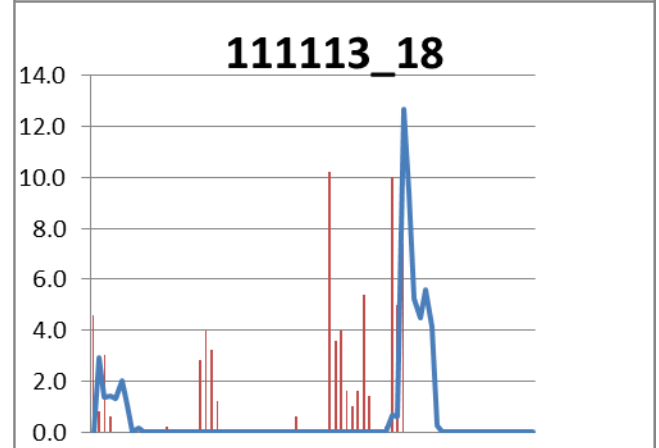
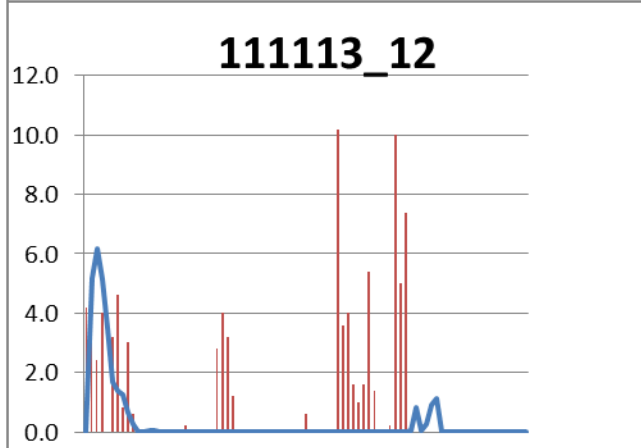
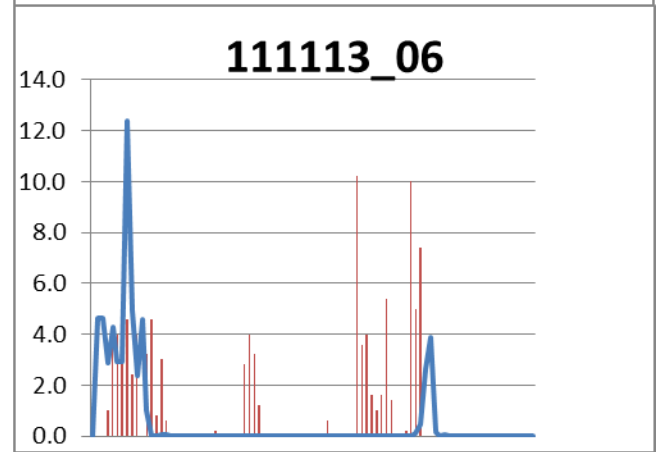
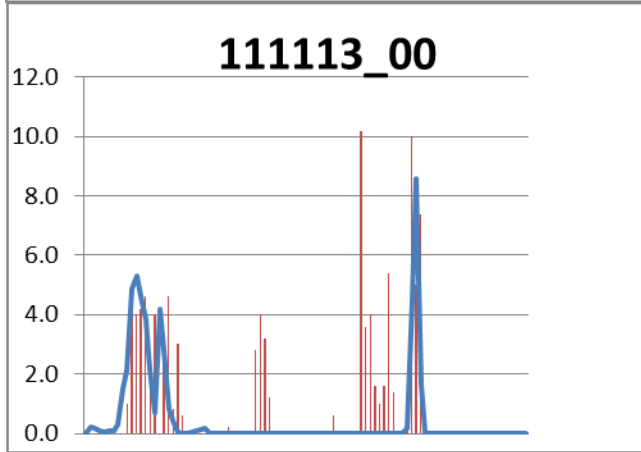
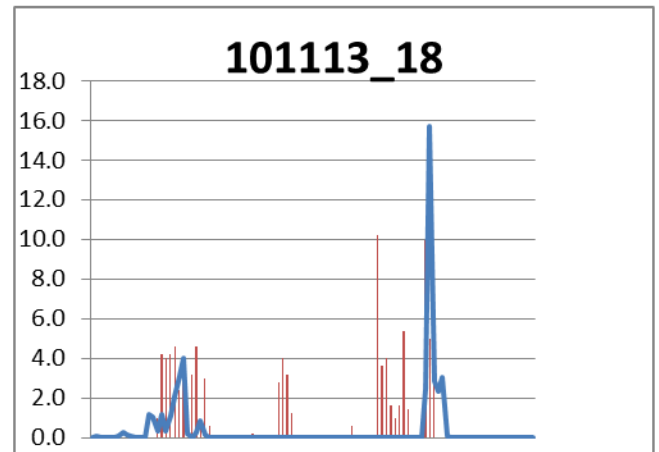
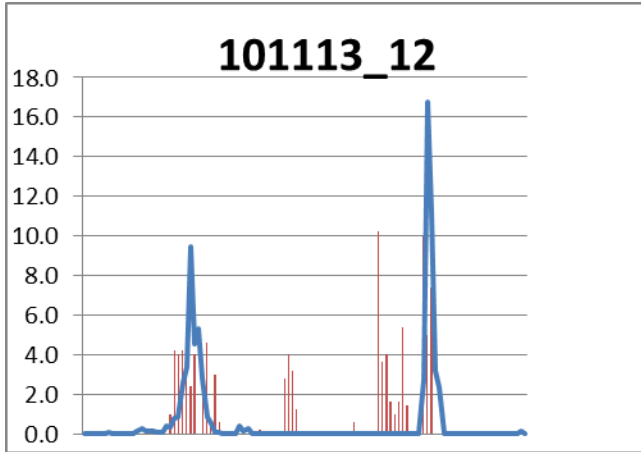


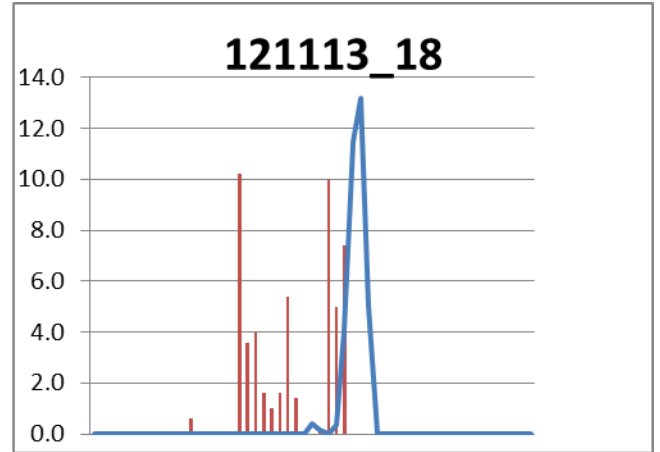
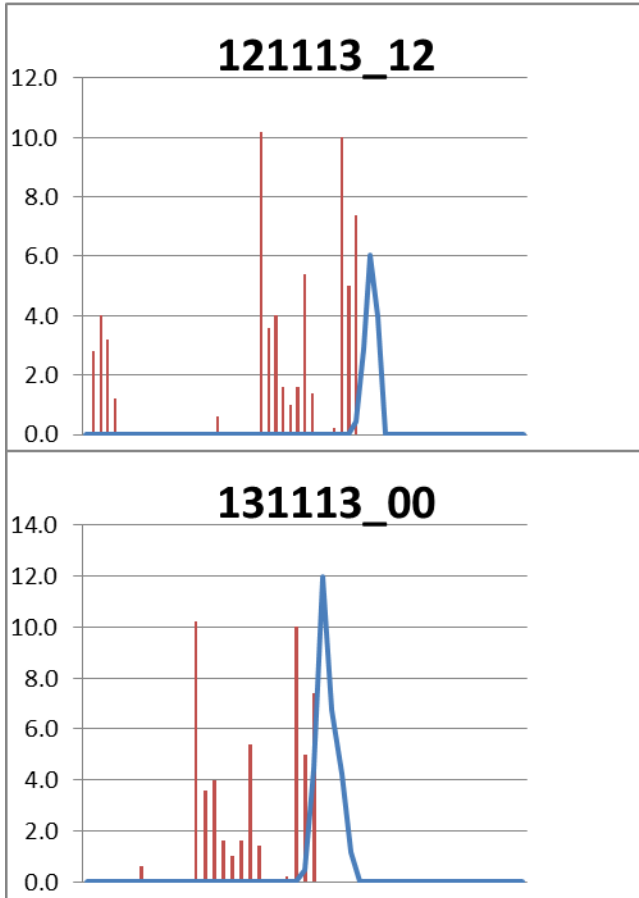


Σχήμα 18: Η εξέλιξη της πρόγνωσης στον σταθμό Λαγκάδια για το επεισόδιο βροχής **170113**. Με κόκκινες ράβδους απεικονίζεται η παρατηρημένη βροχόπτωση. Με μπλε συνεχή γραμμή η πρόγνωση.

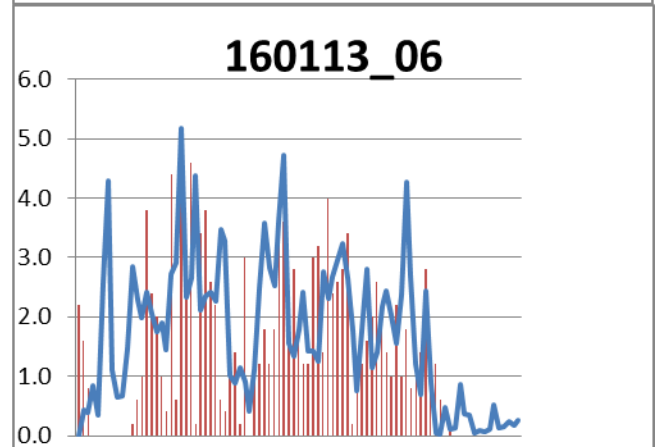
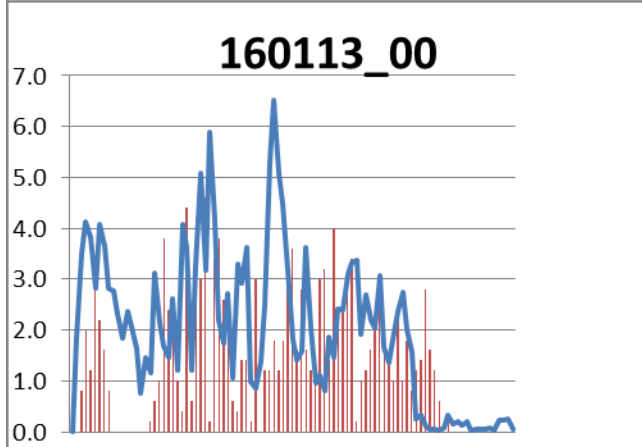
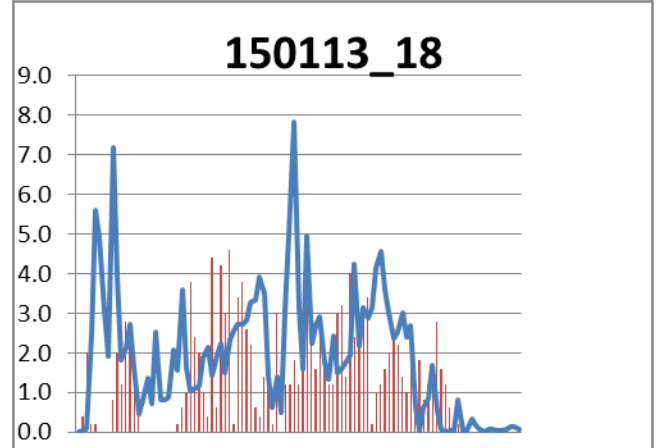
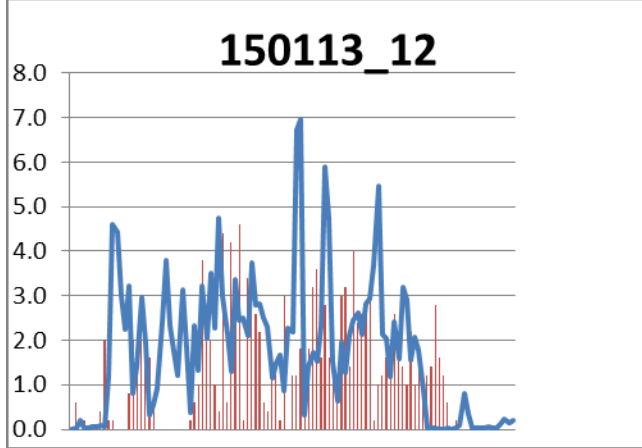
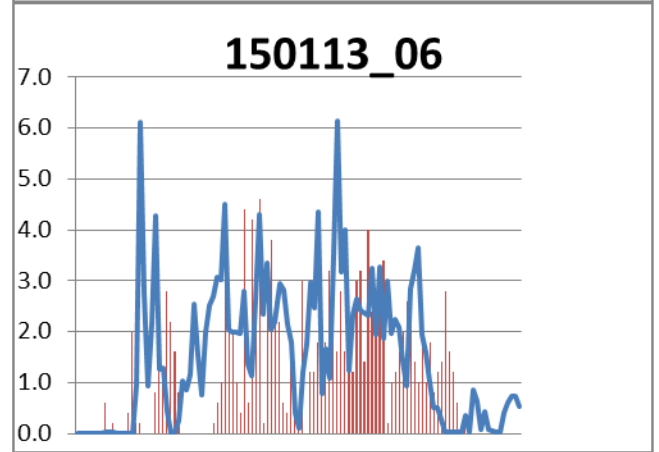
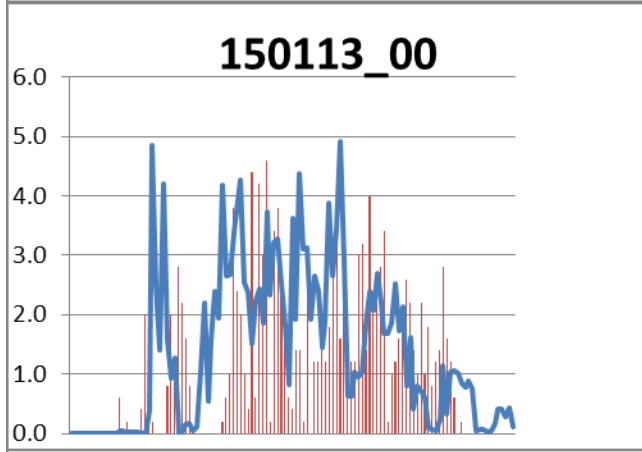
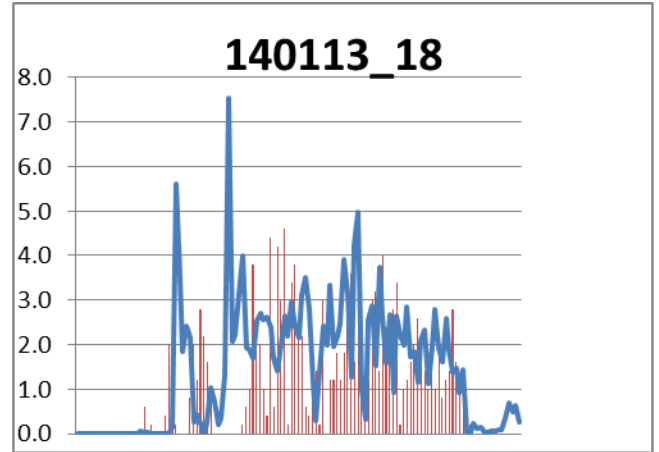
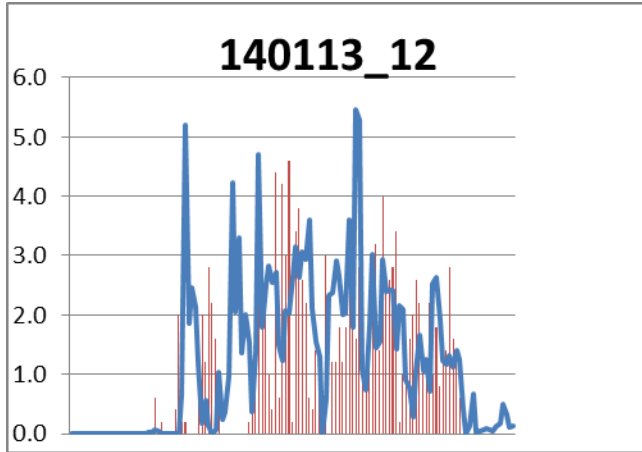
➤ Στεμνίτσα

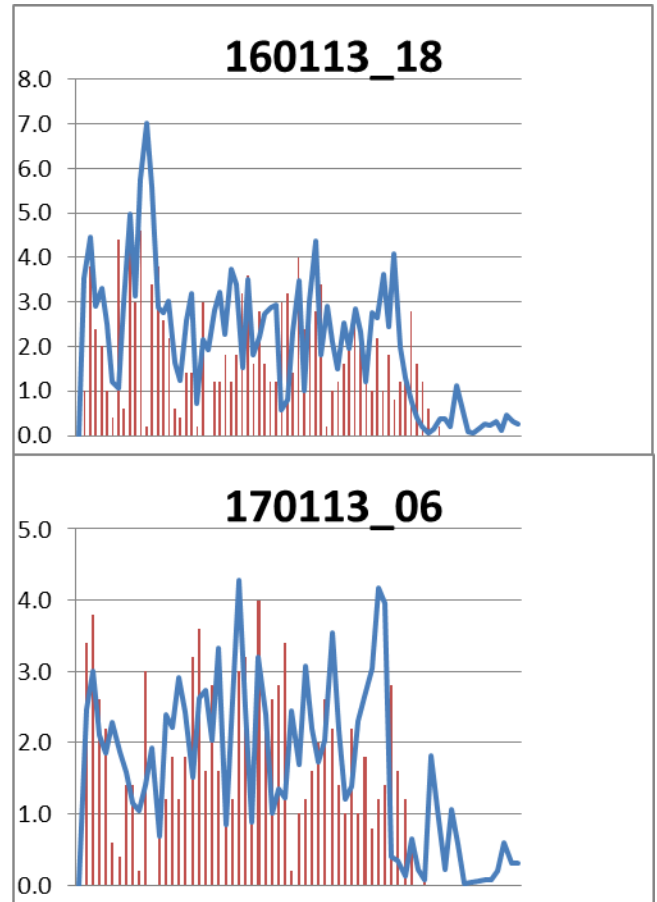
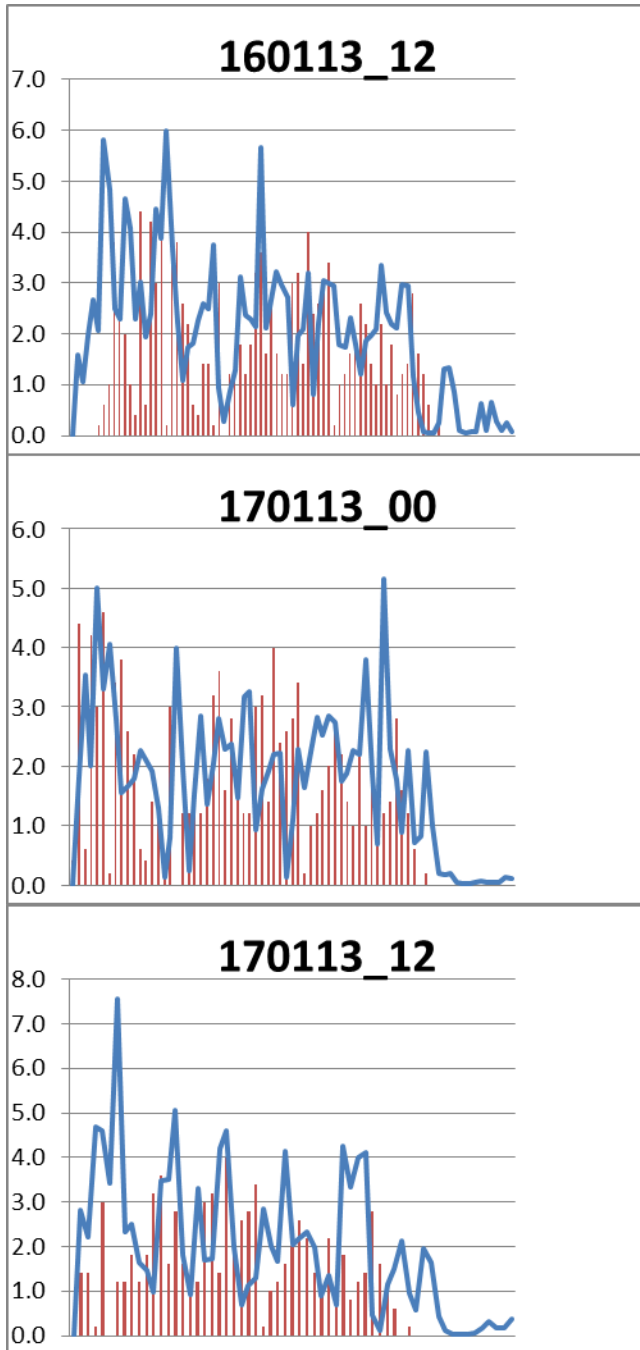






*Σχήμα 19: Η εξέλιξη της πρόγνωσης στον σταθμό Στεμνίτσα για το επεισόδιο βροχής **131113**. Με κόκκινες ράβδους απεικονίζεται η παρατηρημένη βροχόπτωση. Με μπλε συνεχή γραμμή η πρόγνωση.*

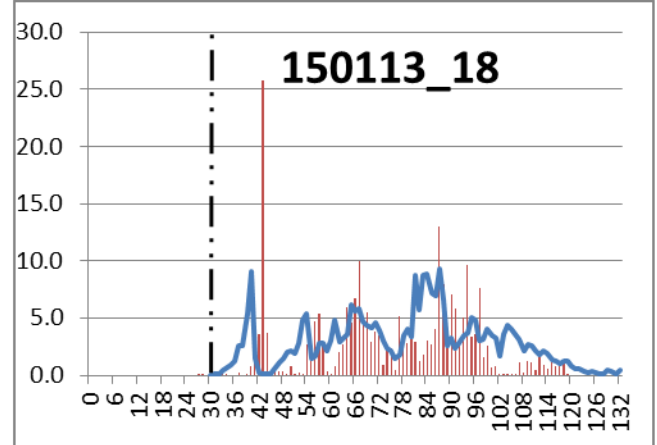
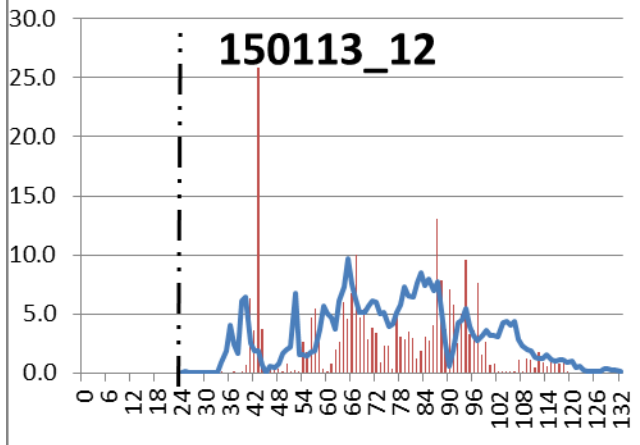
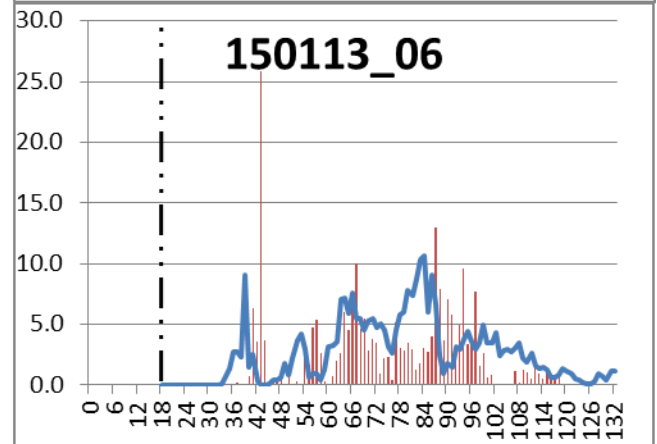
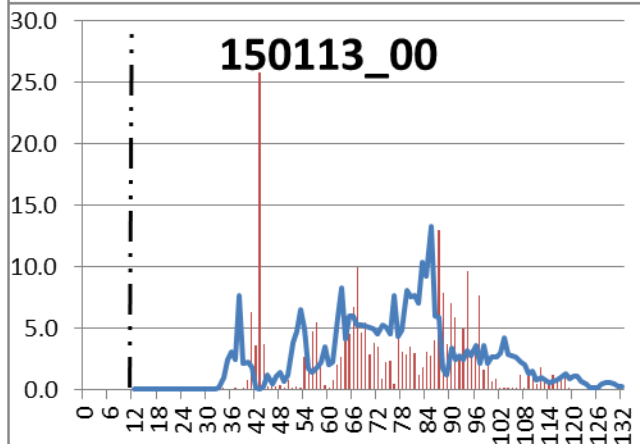
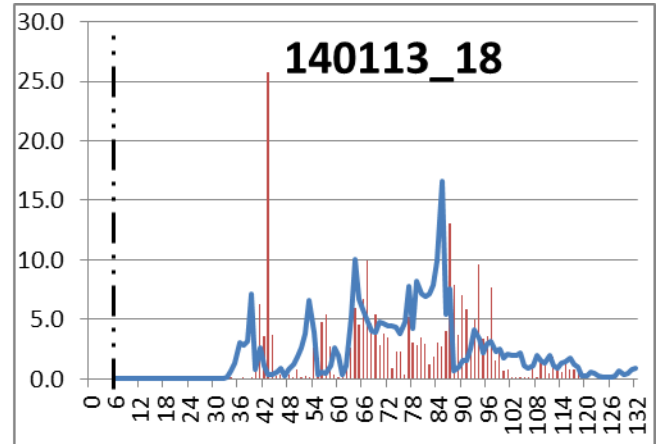
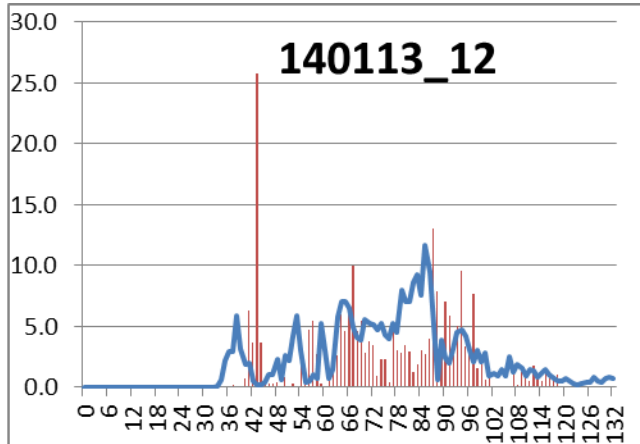


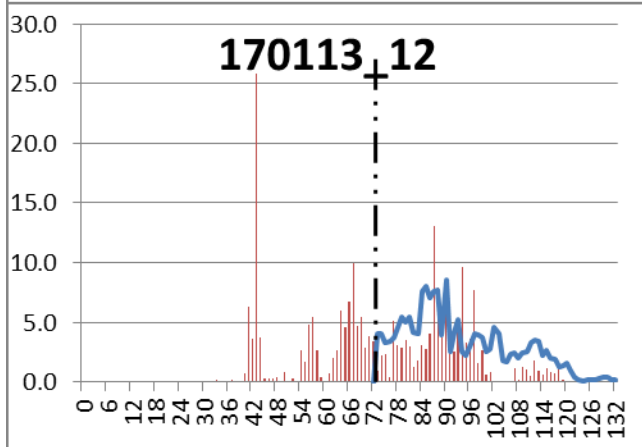
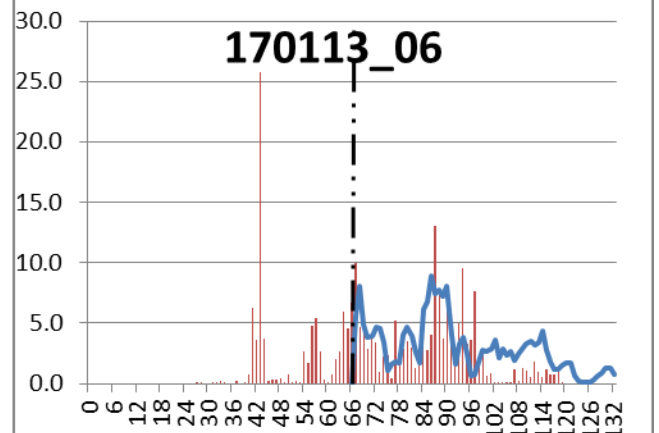
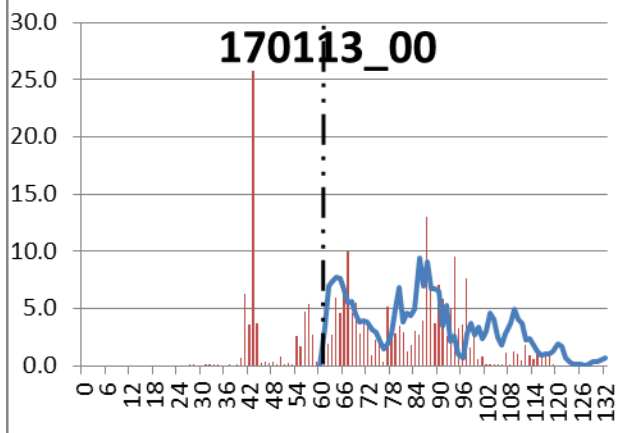
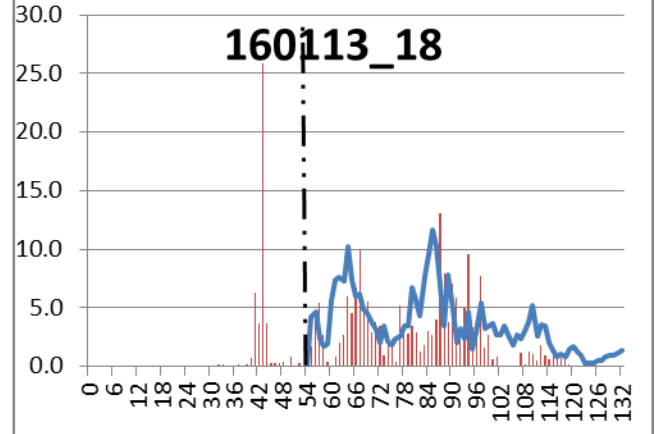
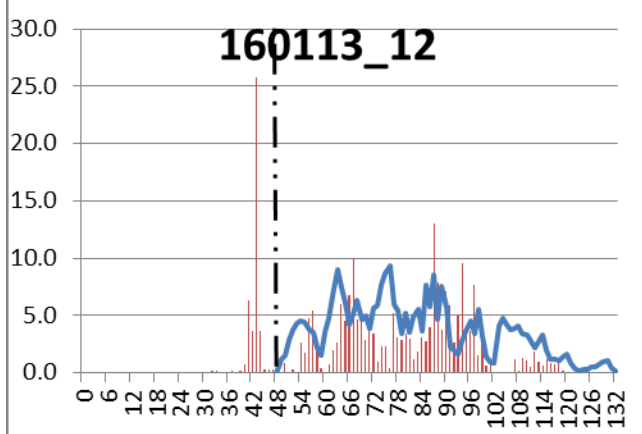
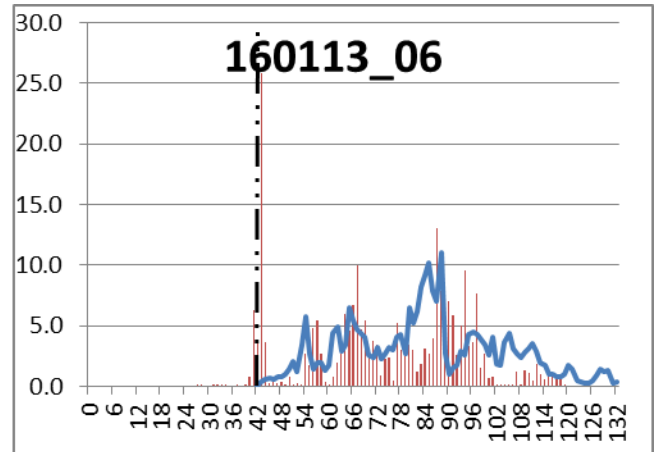
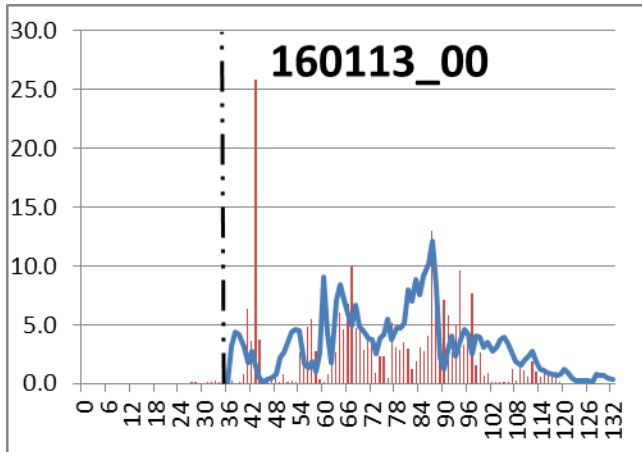


Σχήμα 20: Η εξέλιξη της πρόγνωσης στον σταθμό Στεμνίτσα για το επεισόδιο βροχής **170113**. Με κόκκινες ράβδους απεικονίζεται η παρατηρημένη βροχόπτωση. Με μπλε συνεχή γραμμή η πρόγνωση.

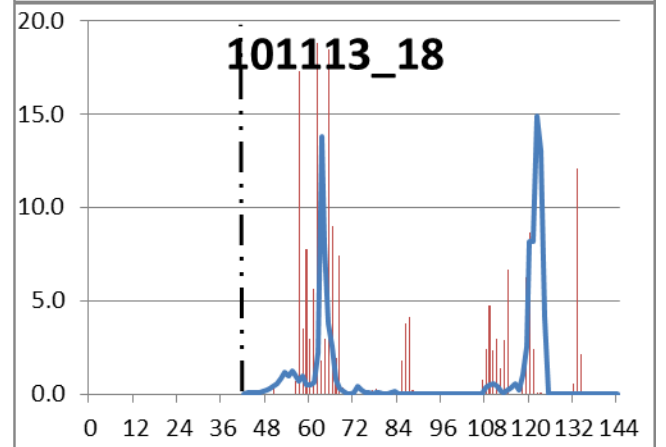
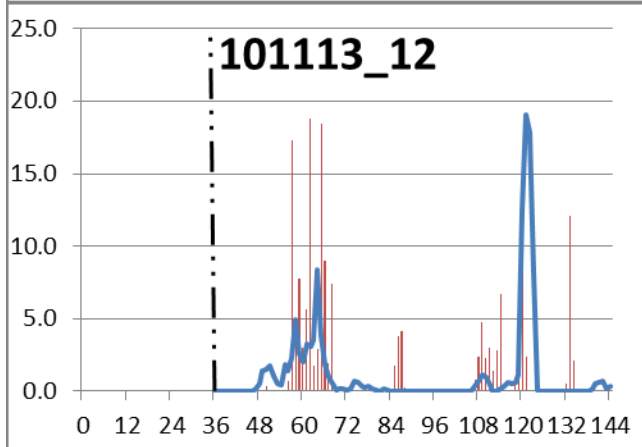
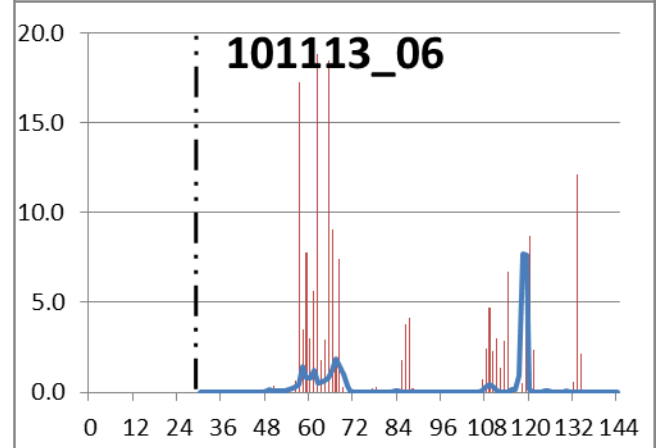
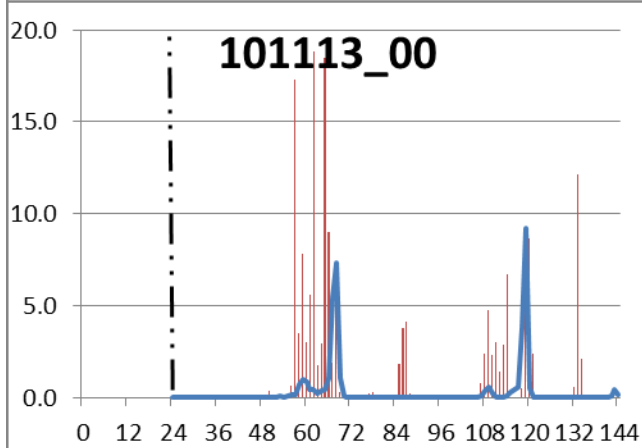
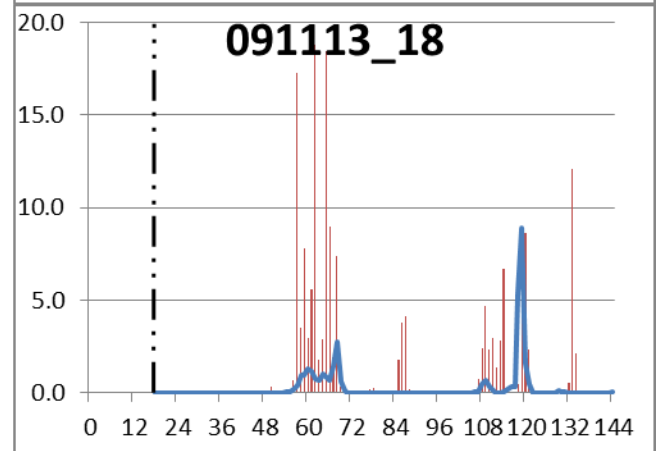
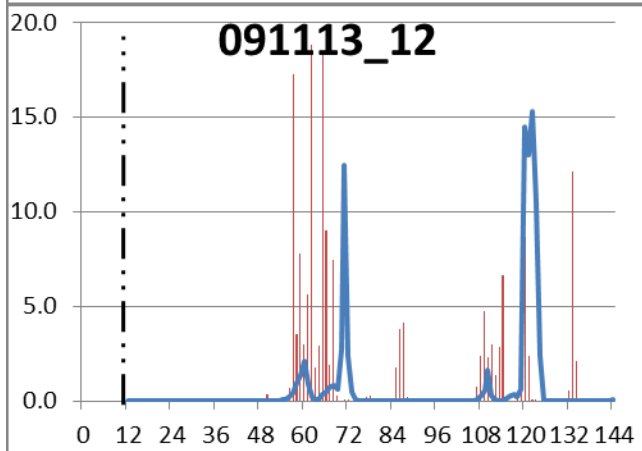
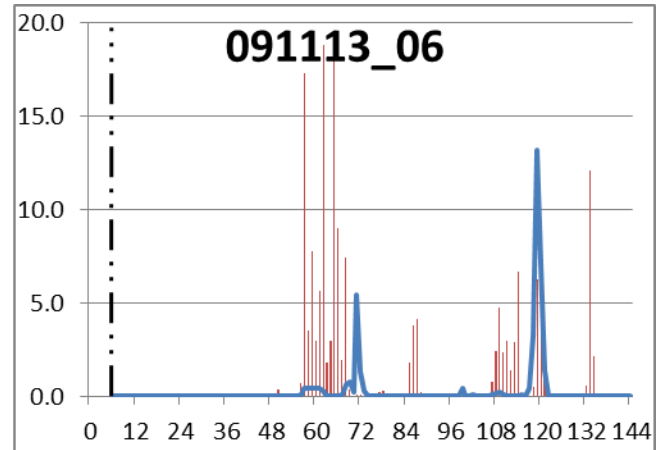
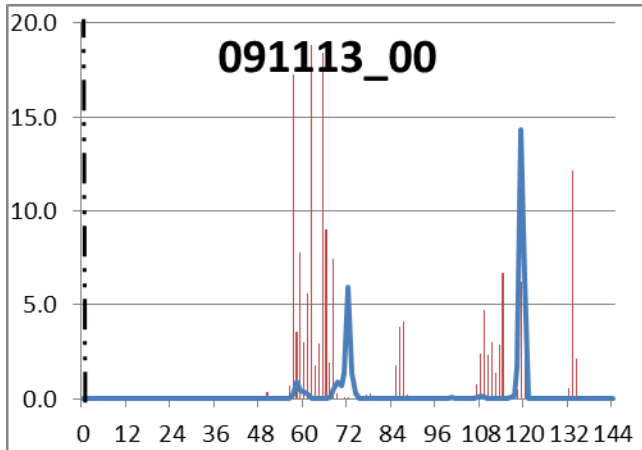
2. Επιφανειακή ανάλυση των προγνώσεων της βροχόπτωσης με βάση όλα τα διακριτά σημεία της περιοχής μελέτης

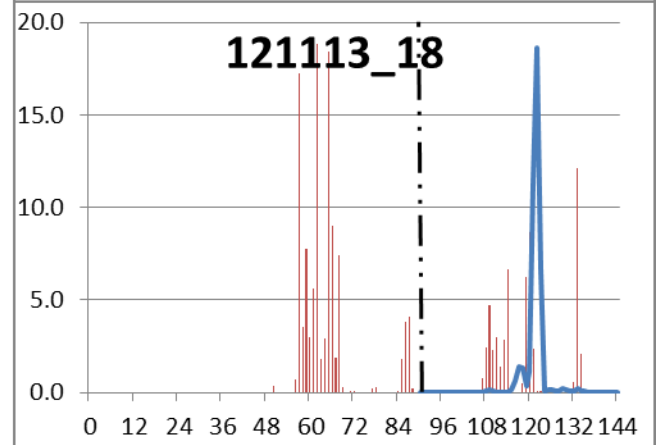
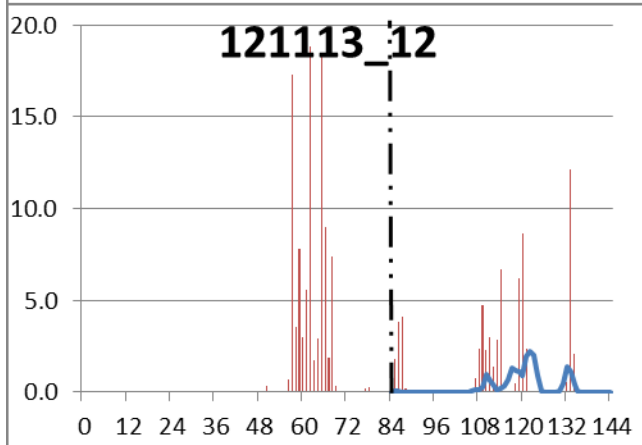
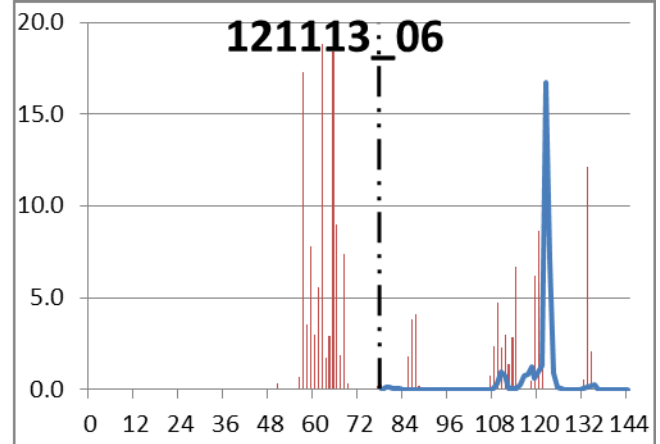
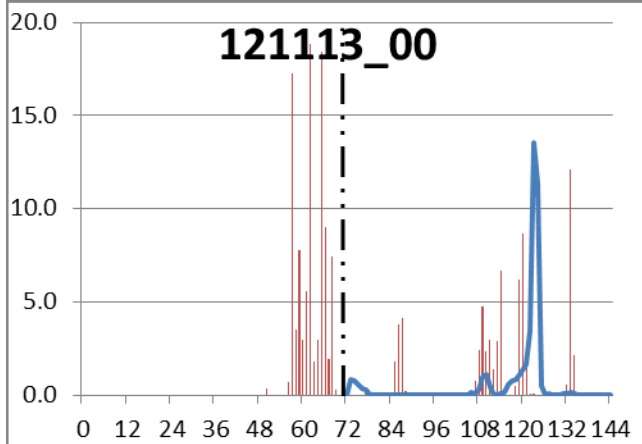
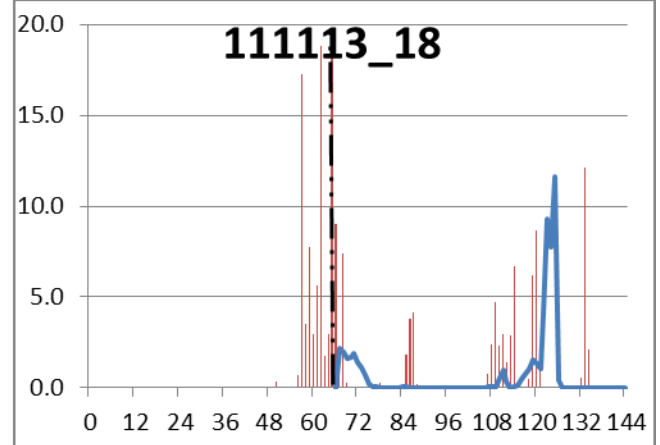
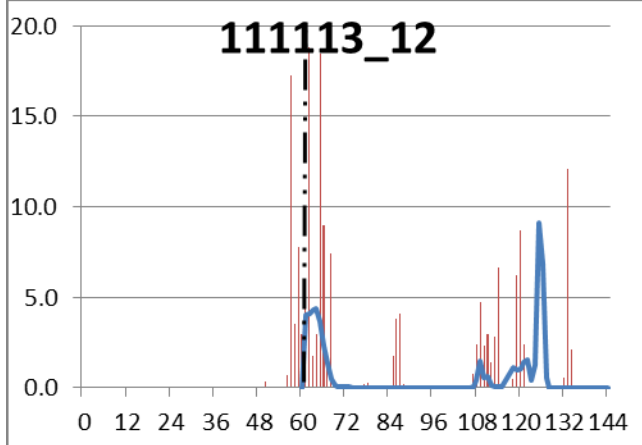
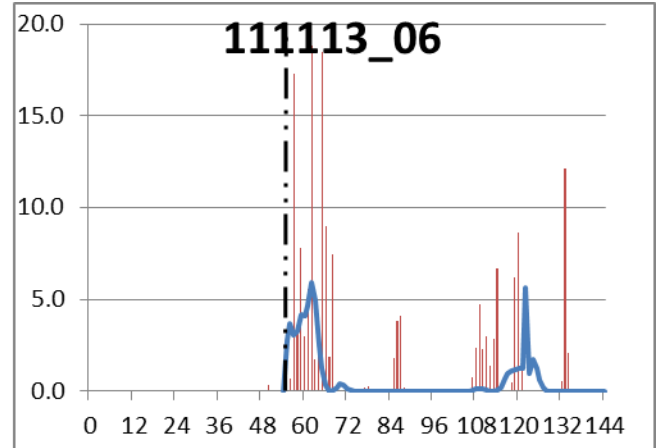
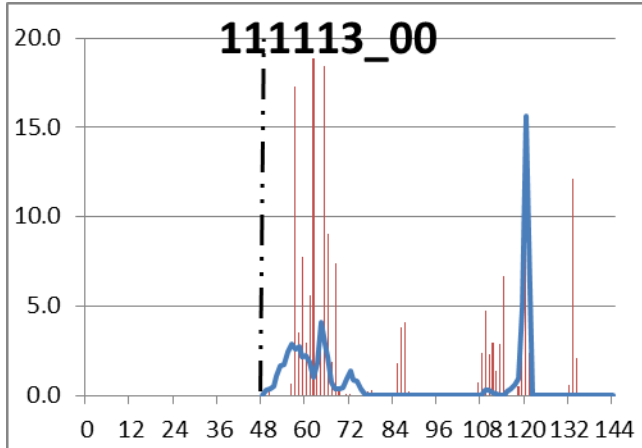
Λεκάνη Νέδοντα

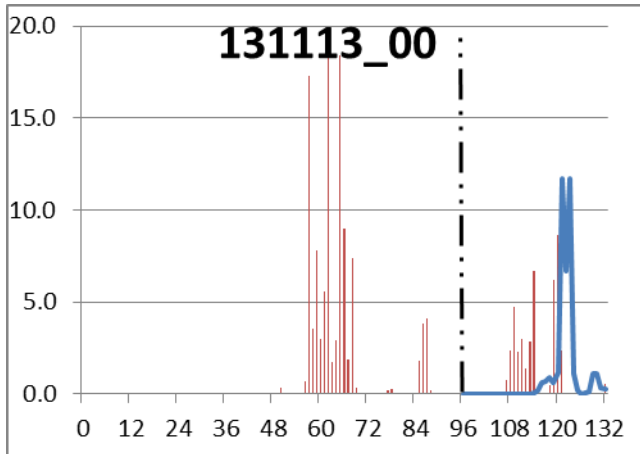




Σχήμα 21: Η εξέλιξη της πρόγνωσης με επιφανειακή ανάλυση στην λεκάνη του Νέδοντα για το επεισόδιο βροχής 170113. Με κόκκινες ράβδους απεικονίζεται η παρατηρημένη βροχοπτώση. Με μπλε συνεχή γραμμή η πρόγνωση. Η μαύρη διακεκομμένη γραμμή δείχνει την έναρξη της πρόγνωσης.

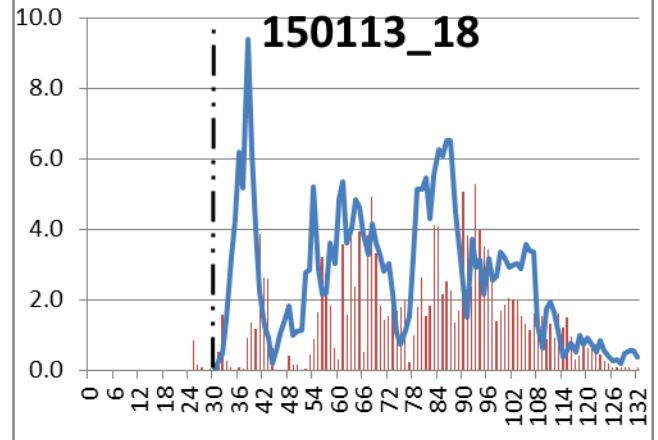
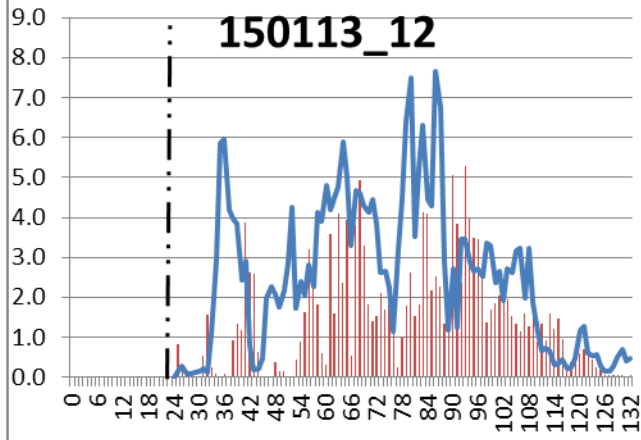
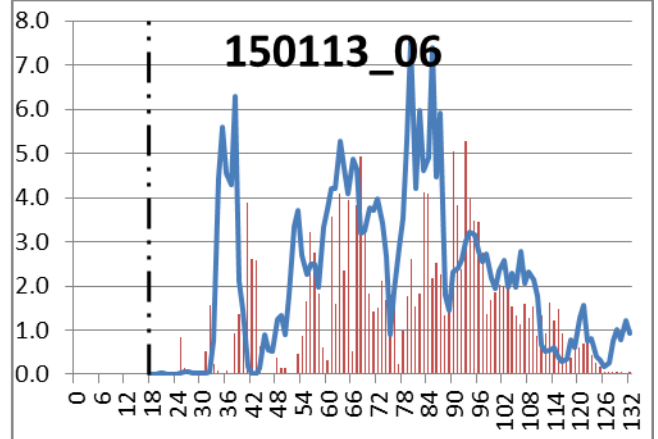
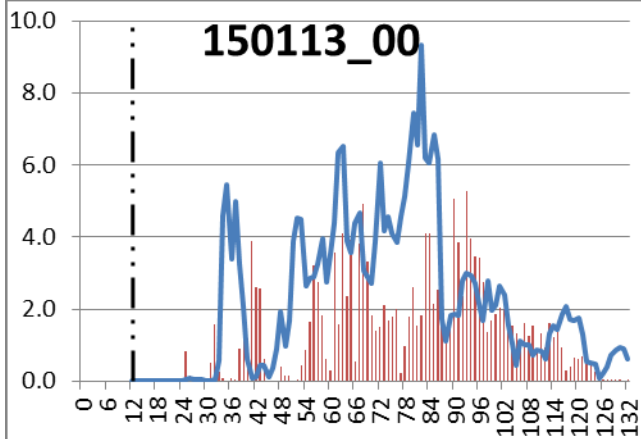
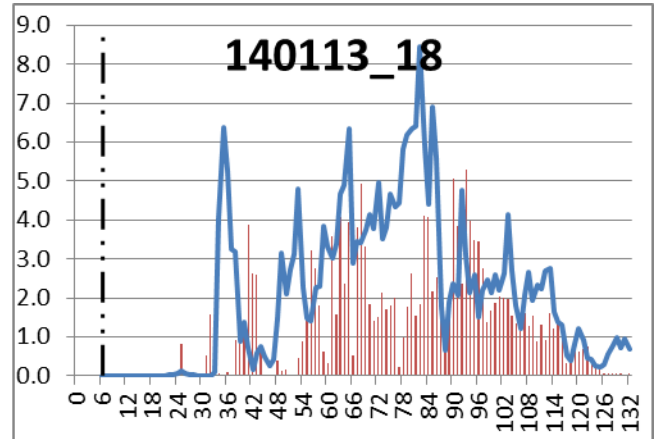
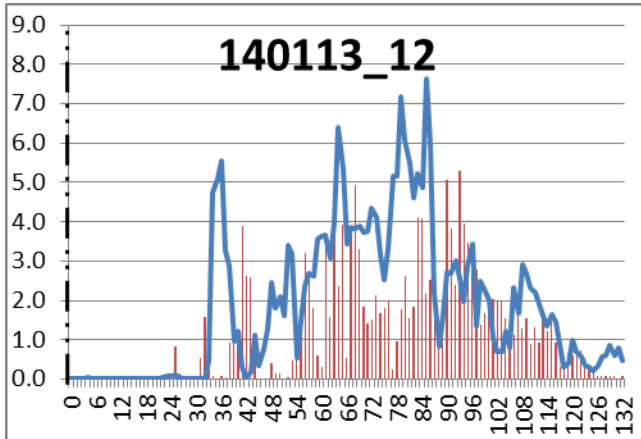


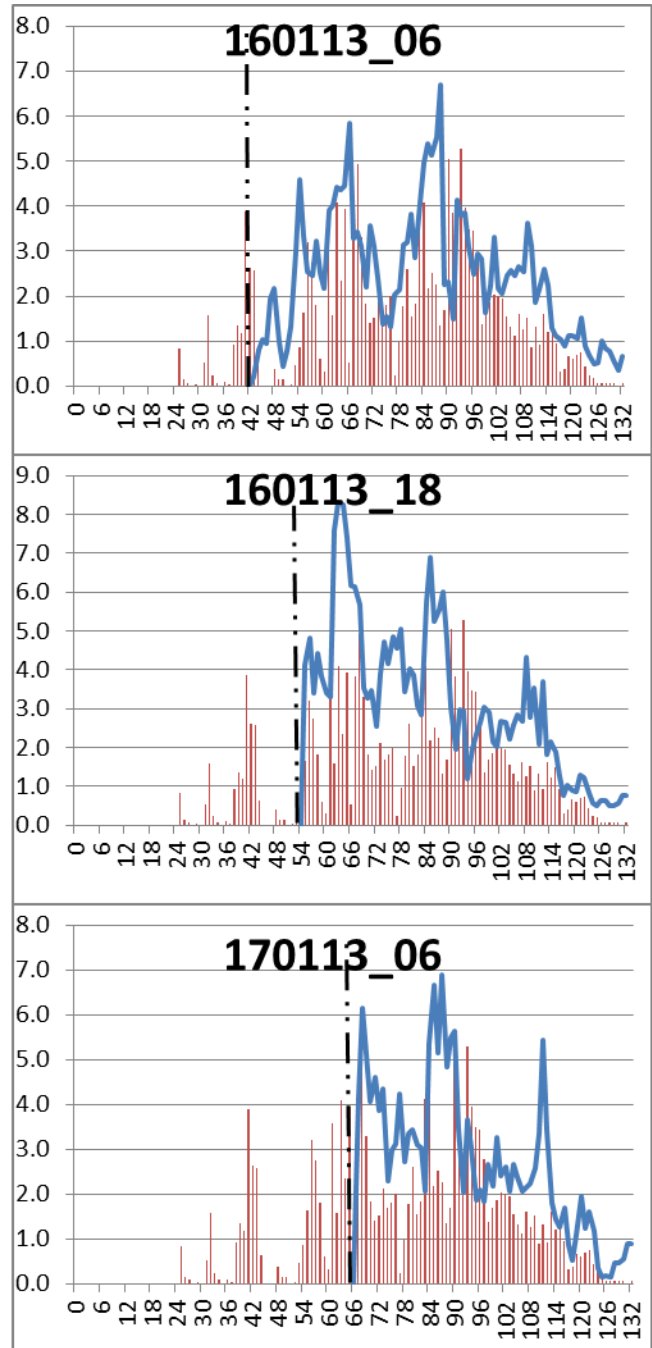
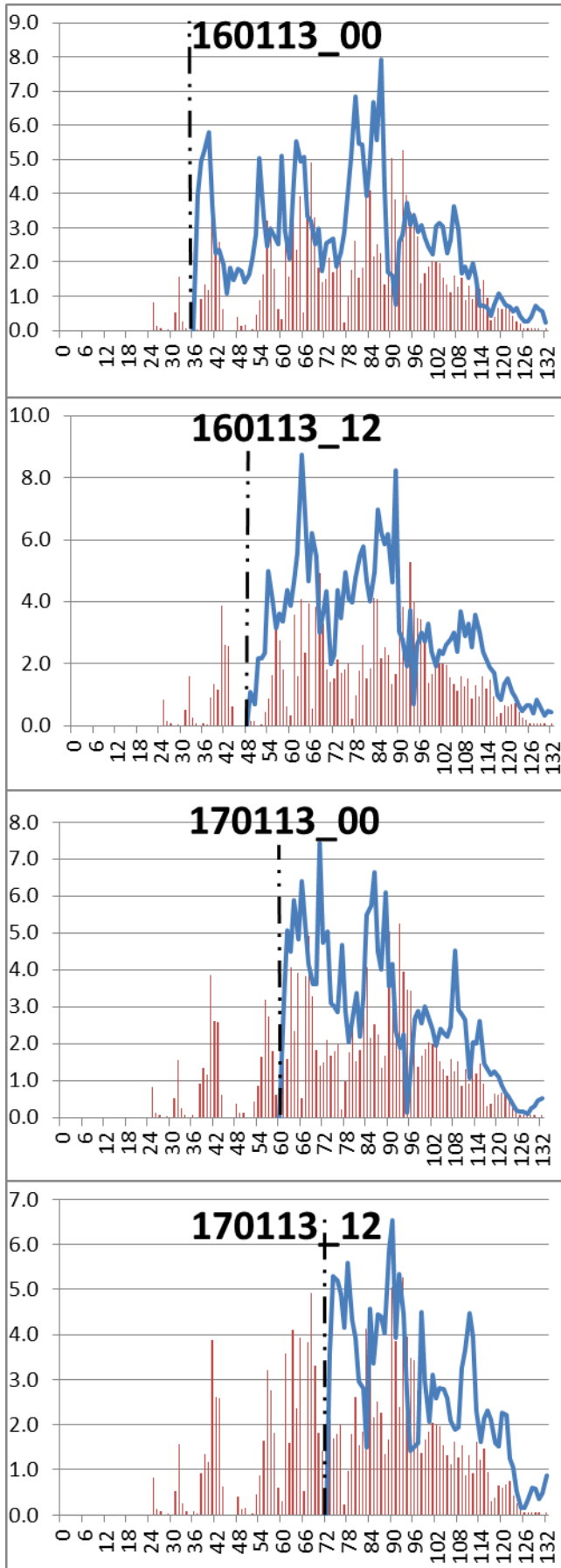




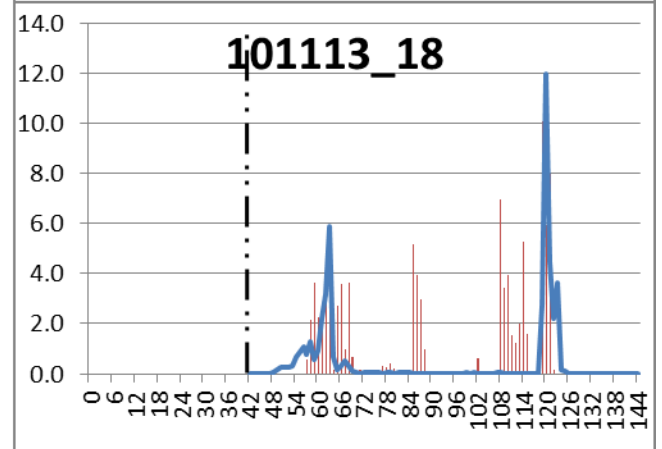
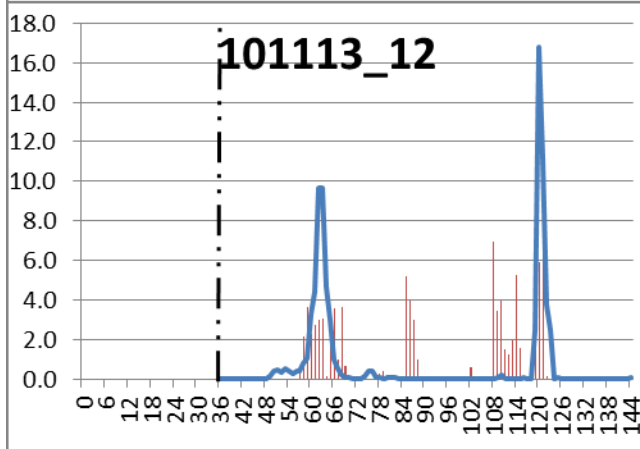
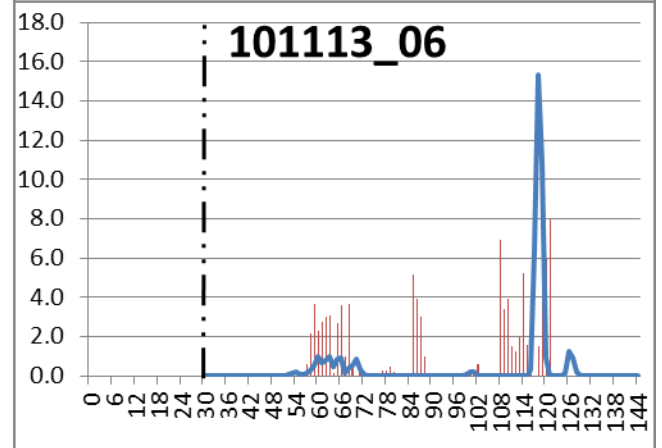
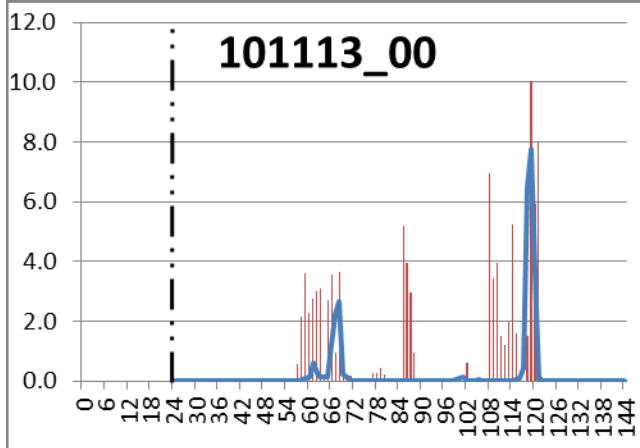
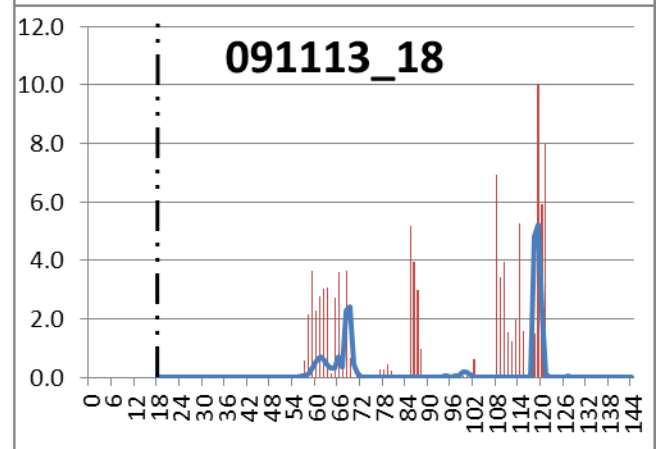
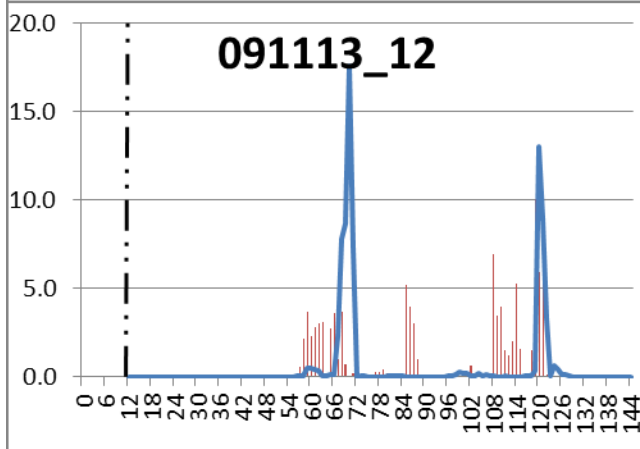
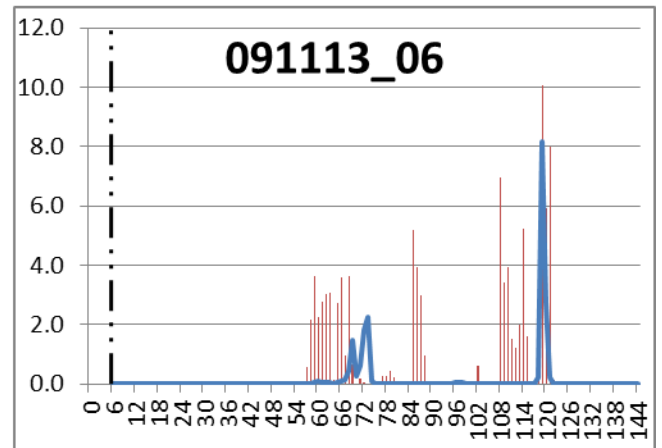
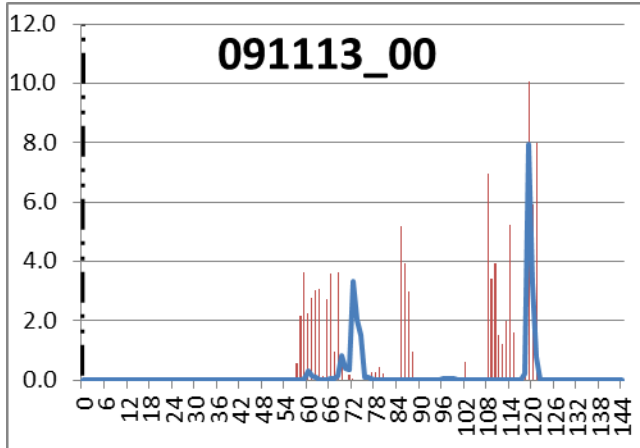
Σχήμα 22: Η εξέλιξη της πρόγνωσης με επιφανειακή ανάλυση στην λεκάνη του Νέδοντα για το επεισόδιο βροχής **131113**. Με κόκκινες ράβδους απεικονίζεται η παρατηρημένη βροχόπτωση. Με μπλε συνεχή γραμμή η πρόγνωση. Η μαύρη διακεκομμένη γραμμή δείχνει την έναρξη της πρόγνωσης.

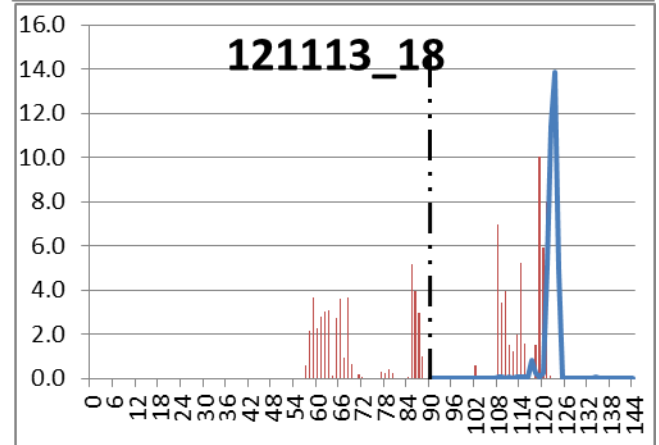
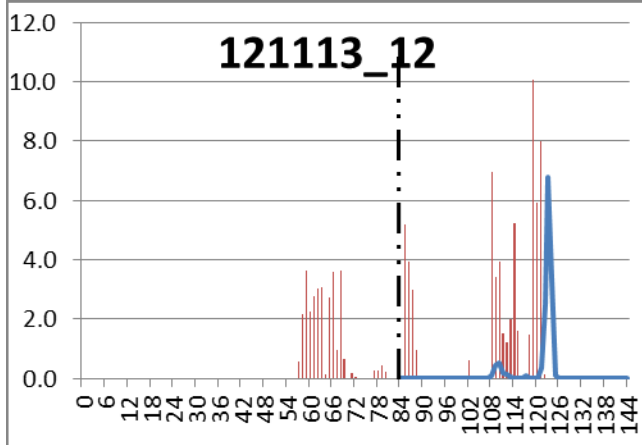
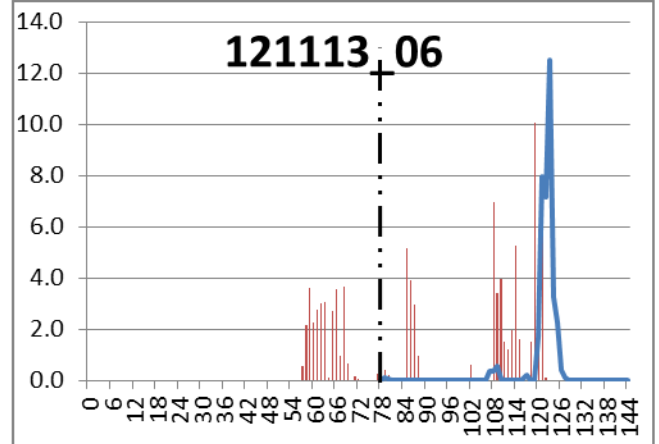
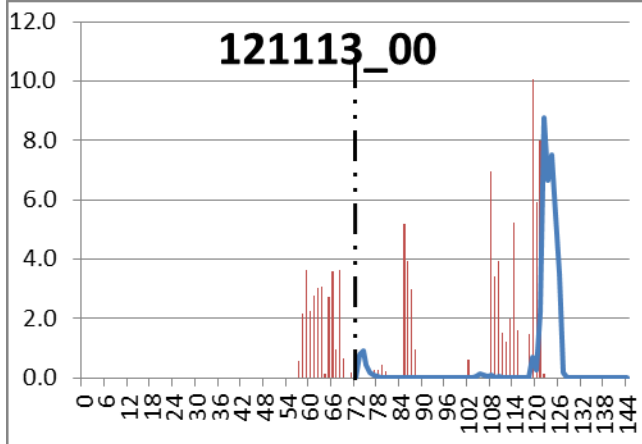
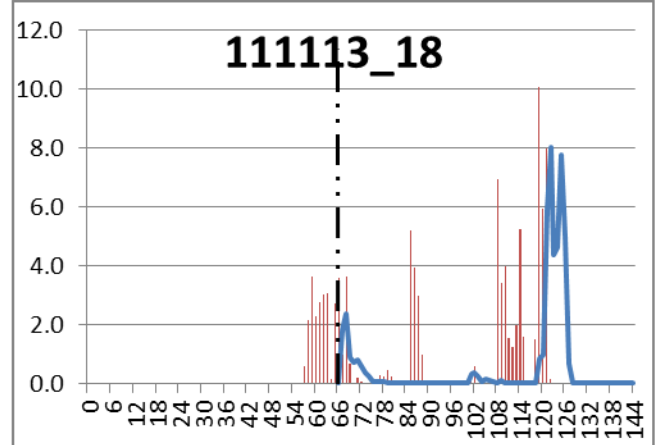
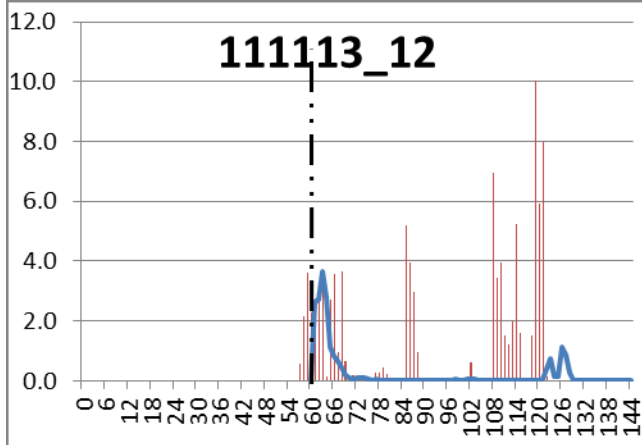
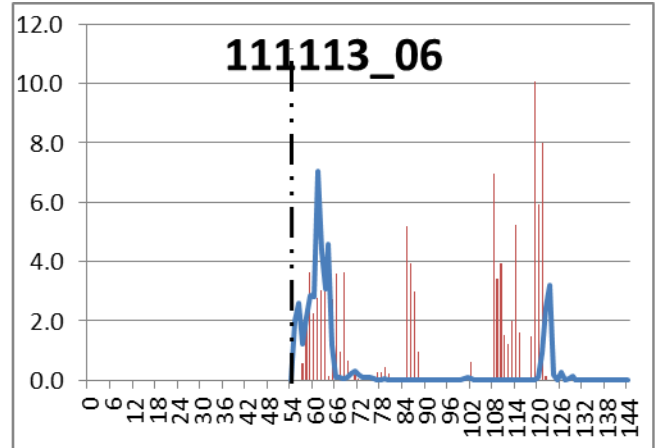
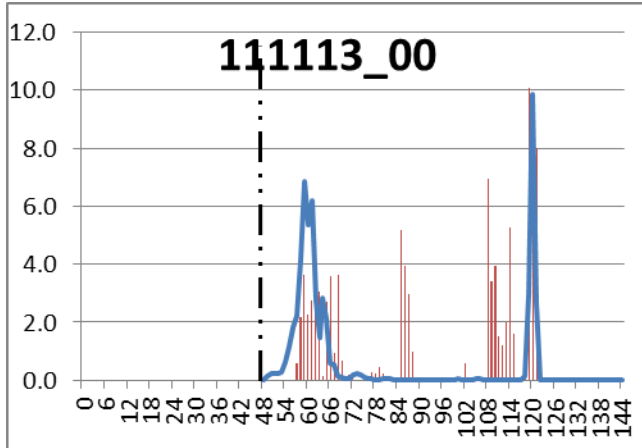
Λεκάνη Λούσιου

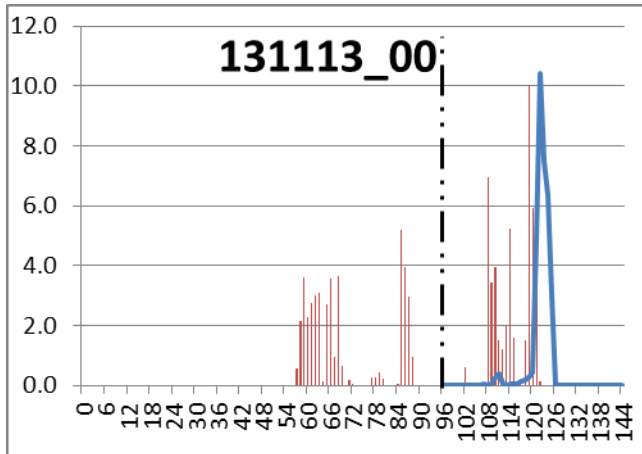




Σχήμα 23: Η εξέλιξη της πρόγνωσης με επιφανειακή ανάλυση στην λεκάνη του Λούσιου για το επεισόδιο βροχής **170113**. Με κόκκινες ράβδους απεικονίζεται η παρατηρημένη βροχοπτώση. Με μπλε συνεχή γραμμή η πρόγνωση. Η μαύρη διακεκομμένη γραμμή δείχνει την έναρξη της πρόγνωσης.







Σχήμα 24: Η εξέλιξη της πρόγνωσης με επιφανειακή ανάλυση στην λεκάνη του Λούσιου για το επεισόδιο βροχής **131113**. Με κόκκινες ράβδους απεικονίζεται η παρατηρημένη βροχόπτωση. Με μπλε συνεχή γραμμή η πρόγνωση. Η μαύρη διακεκομμένη γραμμή δείχνει την έναρξη της πρόγνωσης.