



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΠΕΡΙΒΑΛΟΝΤΟΣ

Ανάπτυξη μοντέλου υδρομετεωρολογικής πρόγνωσης στη χειμαρική λεκάνη του Σαρανταπόταμου

Διπλωματική εργασία

Ζαρκαδούλας Θεόδωρος-Πατάπιος

Επιβλέπων Καθηγητής: Δ. Κουτσογιάννης

Αθήνα, Ιούλιος 2014

Αντικείμενο της εργασίας

Η διερεύνηση πρόγνωσης πλημμύρας στη χειμαρρική λεκάνη του Σαρανταπόταμου, μέσω της βέλτιστης προσομοίωσης των μηχανισμών λειτουργίας της με τη βοήθεια του υδρολογικού μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ και ανάλυσης μετεωρολογικών προγνώσεων για συγκεκριμένο επεισόδιο βροχόπτωσης.

Σκοπός της εργασίας

- Διερεύνηση δυνατότητας μοντελοποίησης ελληνικών λεκανών χειμαρρικής διαίτας
- Ανάλυση και επεξεργασία μετεωρολογικών προγνώσεων βροχόπτωσης με διαφορετικές προσεγγίσεις
- Ανάπτυξη μεθοδολογίας υδρομετεωρολογικής πρόγνωσης με βάση πραγματικά δεδομένα βροχής, απορροής και πρόγνωσης βροχόπτωσης

Συστατικά στοιχεία για την πρόγνωση πλημμύρας

Φαινόμενο:
Βροχόπτωση (ή υετός)

Αιτία:
Συμπύκνωση υδρατμών
ατμόσφαιρας

Πρόγνωση με:
Μοντέλα πρόγνωσης καιρού
(αριθμητικά ή ensemble)

Φαινόμενο:
Πλημμύρα

Αιτία:
Έντονη βροχόπτωση
(συνήθως)

Πρόγνωση με:
Υδρολογικά μοντέλα

Συστήματα πλημμυρικής πρόγνωσης

Χρησιμοποίηση μετεωρολογικών παρατηρήσεων και προγνώσεων μαζί με υδρολογικά και υδραυλικά μοντέλα προσομοίωσης μιας περιοχής μελέτης για την ολοκληρωμένη πρόγνωση πλημμυρικών φαινομένων.

Συστήματα πλημμυρικής πρόγνωσης


Συνιστώσες συστήματος για μια δεδομένη περιοχή:

- ✓ πυκνό δίκτυο μετεωρολογικών και υδρομετρικών σταθμών με αυτόματη μετάδοση αποτελεσμάτων
- ✓ πρόσβαση στην έξοδο μετεωρολογικών προγνώσεων βροχόπτωσης (ή και θερμοκρασίας) για την ευρύτερη περιοχή
- ✓ κατάλληλο υδρολογικό μοντέλο προσομοίωσης της περιοχής με ενσωματωμένο μοντέλο διόδευσης που θα συλλέγει τα απαραίτητα δεδομένα εισόδου και θα εκτιμά την απορροή στην έξοδο της λεκάνης καθώς και την ενυπάρχουσα αβεβαιότητα (από την πρόγνωση βροχόπτωσης και το υδρολογικό μοντέλο)

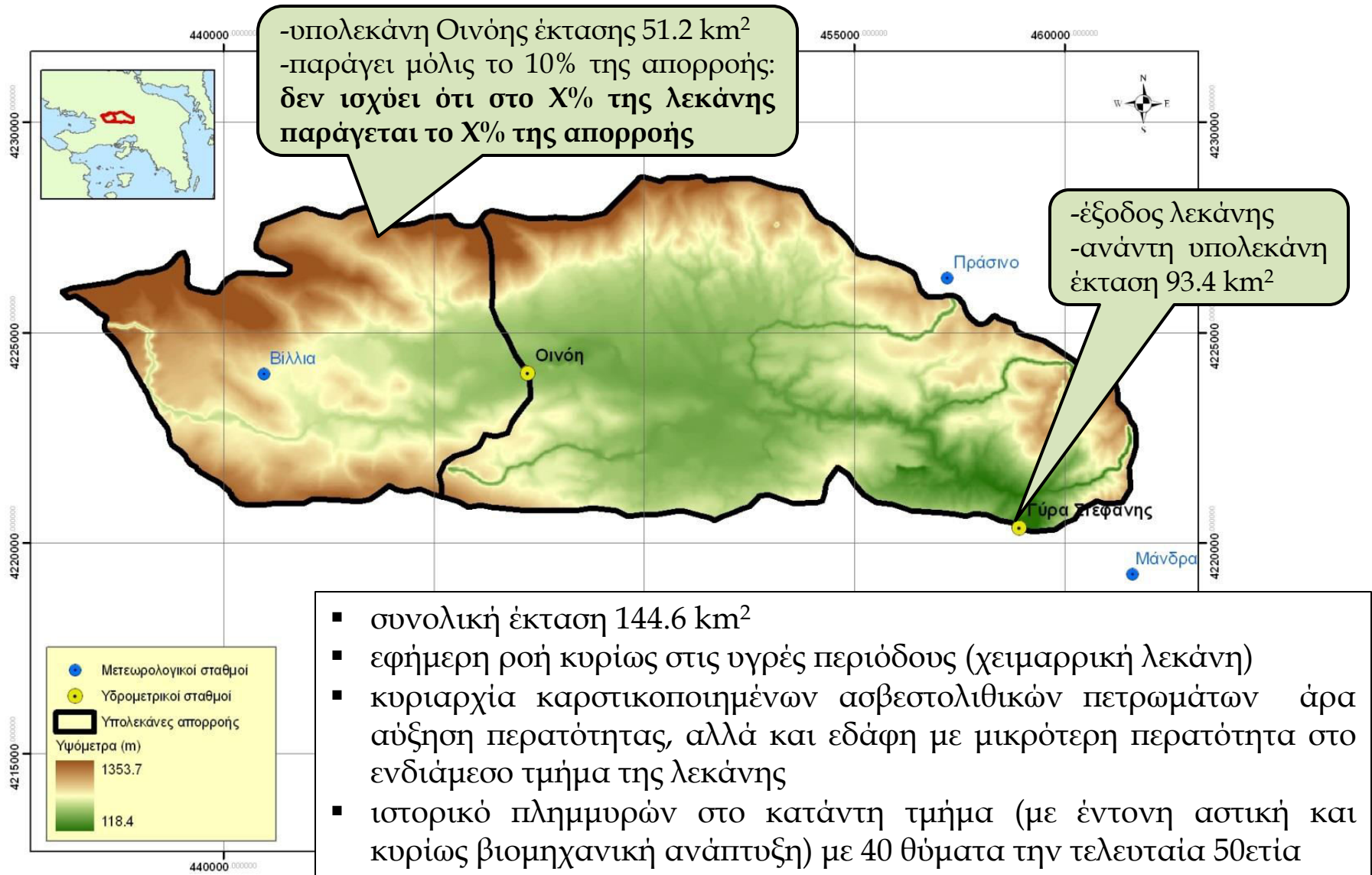
Λειτουργία:

συλλογή δεδομένων ➡ πρόγνωση απορροής ➡ εκτίμηση πλημμυρικών επιπτώσεων
(*): το τελικό αποτέλεσμα της διαδικασίας
εκφρασμένο σε ποιοτική κλίμακα επικινδυνότητας με **πλημμυρική προειδοποίηση**(*)

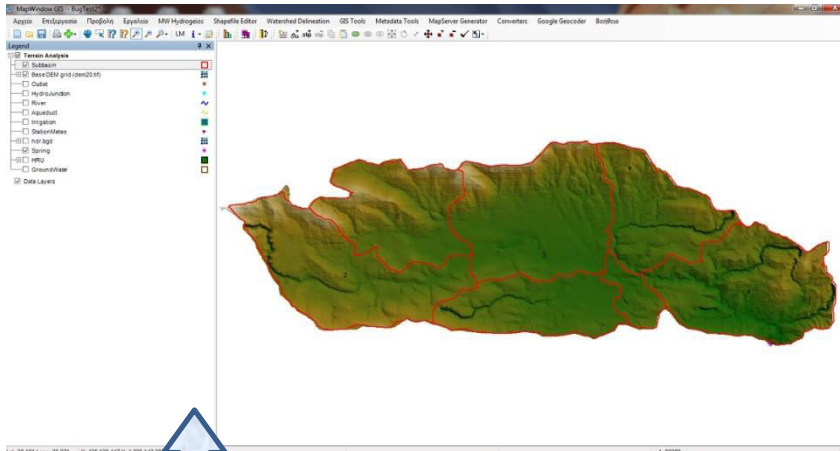
- **Στην Ευρώπη:** μεγάλες λεκάνες απορροής ποταμών άρα δυνατότητα για επαρκή πλημμυρική πρόγνωση ➡ ανάπτυξη EFAS (European Flood Alert System)
- **Στην Ελλάδα:** μικρές λεκάνες απορροής με εφήμερη ροή ➡ δημιουργία *flash floods*
απαιτούνται: (α) δεδομένα πρόγνωσης πολύ μικρής κλίμακας (1 ή 2 ημερών), (β) υδρολογικά μοντέλα με μεγάλη φειδωλότητα και (γ) αντιμετώπισή ως υδρο-μετεωρολογικό φαινόμενο λόγω της «αστραπιαίας» δράσης άρα συνεργασία μετεωρολογικών και υδρολογικών υπηρεσιών

 η έρευνα υπολείπεται αρκετά της αντίστοιχης σε ευρωπαϊκό επίπεδο

Περιοχή μελέτης: η λεκάνη του Σαρανταπόταμου



Το υδρολογικό μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ

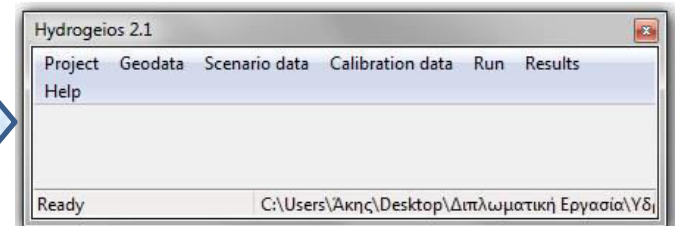
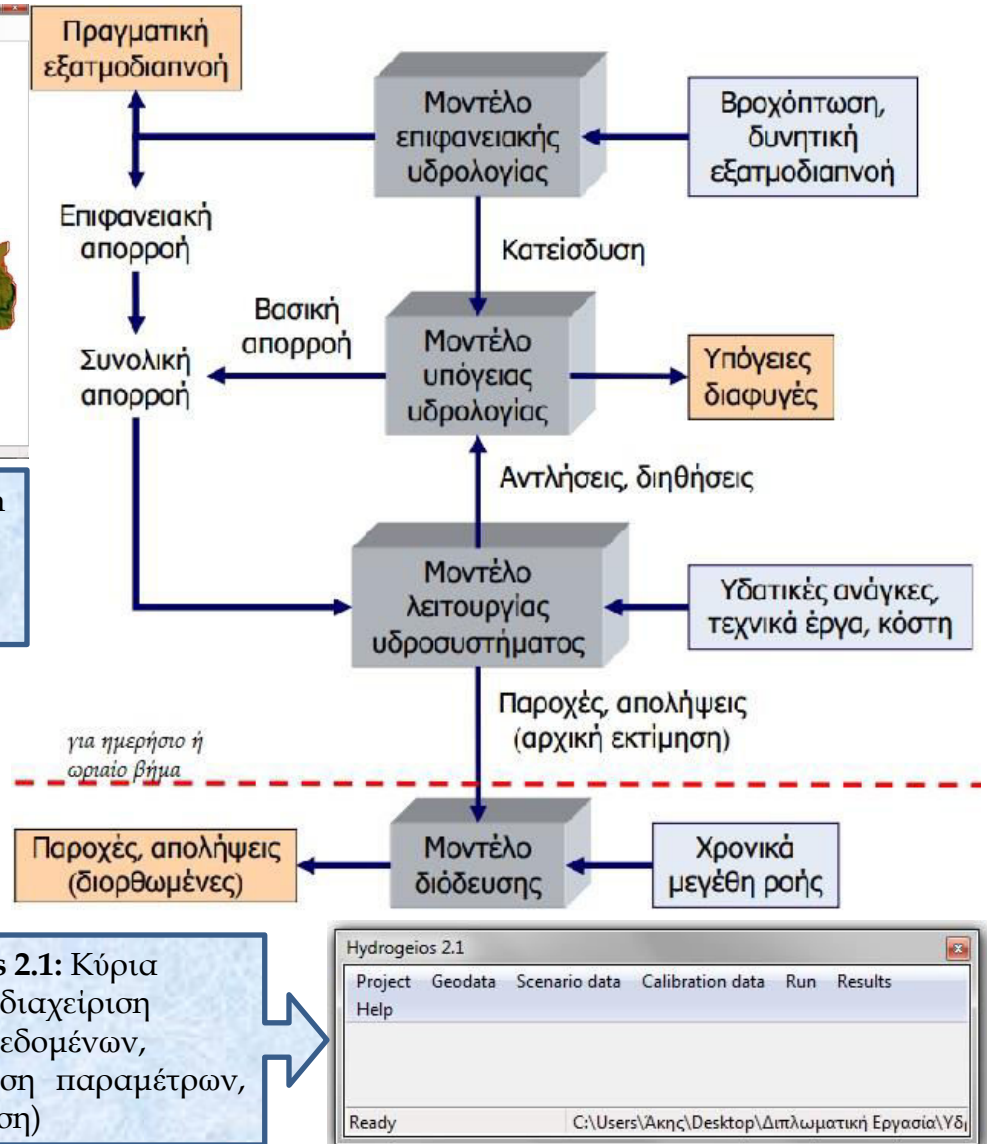


MapWindow: ΣΓΠ για την οπτικοποίηση και επεξεργασία των χωρικών δεδομένων

MW-HYDROGEIOS: Plug-in στο MapWindow, για την παραγωγή των χωρικών δεδομένων του μοντέλου



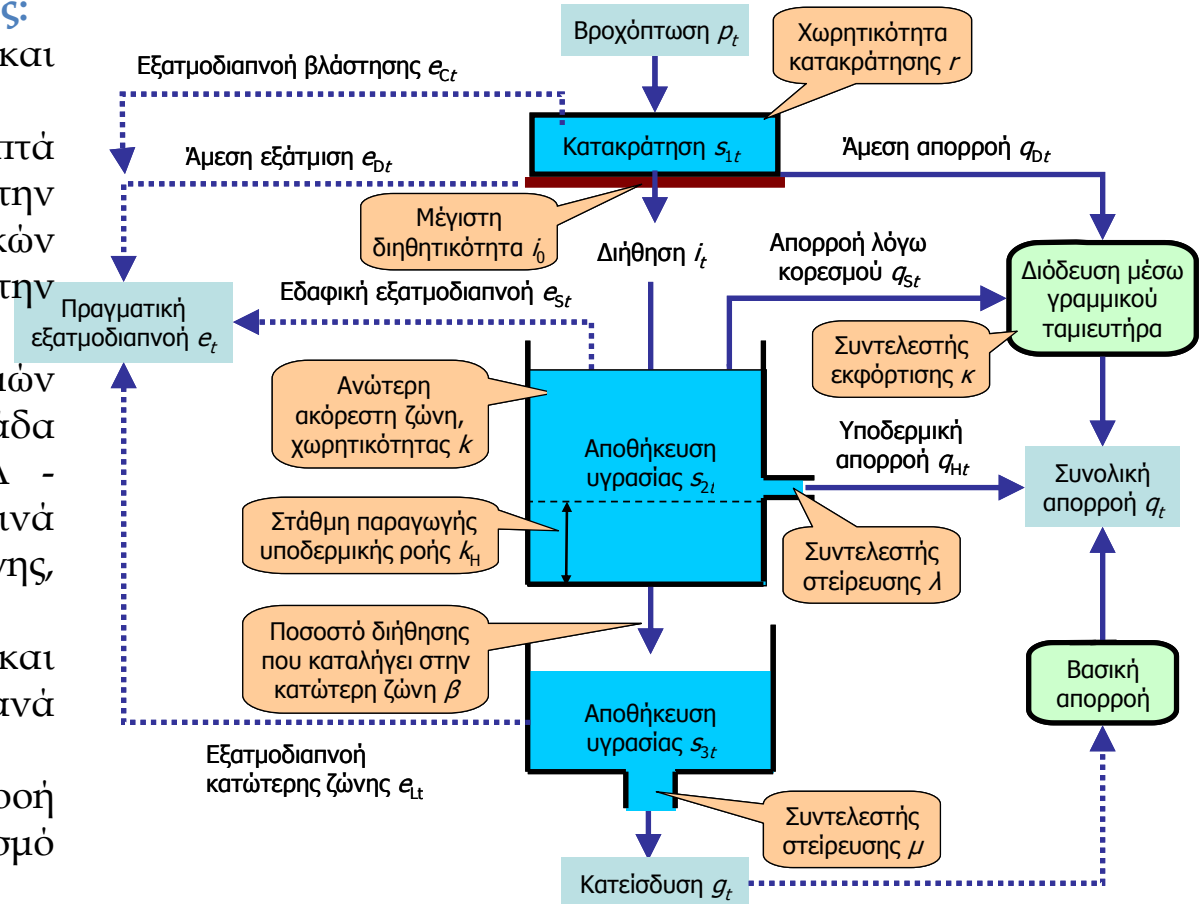
Hydrogeios 2.1: Κύρια εφαρμογή (διαχείριση σεναρίων-δεδομένων, βαθμονόμηση παραμέτρων, προσομοίωση)



Το υδρολογικό μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ (2)

Μοντέλο επιφανειακής υδρολογίας:

- Σχηματοποίηση σε υπολεκάνες και κλάδους υδρογραφικού δικτύου
- Εννοιολογικό μοντέλο επτά παραμέτρων, για την αναπαράσταση των υδρολογικών διεργασιών στο έδαφος και την ακόρεστη ζώνη
- Εφαρμογή κοινών τιμών παραμέτρων ανά μονάδα υδρολογικής απόκρισης (ΜΥΑ - τύποι εδαφών με κοινά χαρακτηριστικά χρήσεων γης, περατότητας, κλίσεων εδάφους)
- Είσοδοι μοντέλου: βροχόπτωση και δυνητική εξατμοδιαπνοή, ανά υπολεκάνη
- Έξοδοι: εξατμοδιαπνοή, απορροή και κατείδυση, ανά συνδυασμό υπολεκάνης και ΜΥΑ



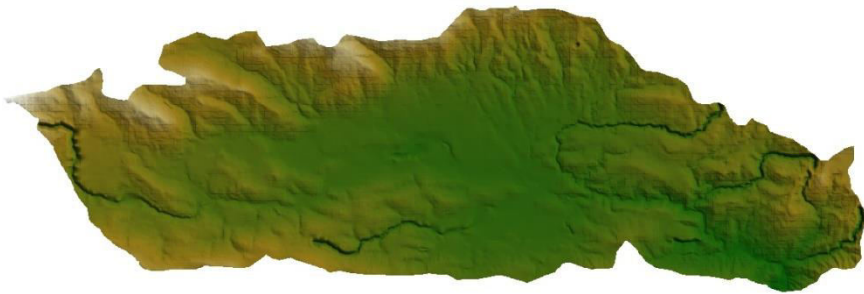
Μοντέλο υπόγειας υδρολογίας:

- Διακριτοποίηση υδροφορέα σε μικρό αριθμό πολυγωνικών κυττάρων ακανόνιστης γεωμετρίας
- Είσοδοι μοντέλου: κατείδυση (υπολεκάνες), διήθηση (ποτάμια)
- Παράμετροι: υδραυλική αγωγιμότητα (ταχύτητα υπόγειας ροής), ειδική απόδοση (πορώδες)
- Έξοδοι: στάθμες υπόγειων δεξαμενών, εκφορτίσεις πηγών (βασική ροή), υπόγειες διαφυγές

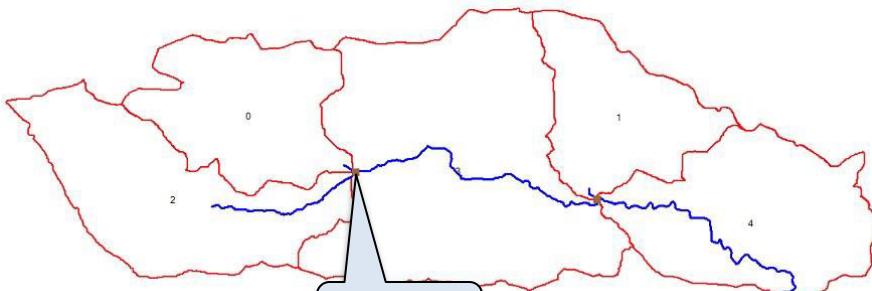
Γενική διαδικασία εκπόνησης εργασίας

1. σχηματοποίηση της λεκάνης μέσω χρήσης κατάλληλου συστήματος γεωγραφικής πληροφορίας
2. συλλογή και επεξεργασία χρονοσειρών βροχόπτωσης, θερμοκρασίας (για την εξατμοδιαπνοή) και απορροής από τους εγκατεστημένους σταθμούς στη λεκάνη του Σαρανταπόταμου
3. εισαγωγή χρονοσειρών στο υδρολογικό μοντέλο προσομοίωσης ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ και βαθμονόμηση (εύρεση βέλτιστων τιμών) των παραμέτρων του επιφανειακού και υπόγειου συστήματος, όπως αυτές ορίζονται στο εν λόγω μοντέλο και εξαγωγή των βέλτιστων προσομοιωμένων χρονοσειρών απορροής
4. επεξεργασία πολλών σετ μετεωρολογικών προγνώσεων βροχόπτωσης του Εθνικού Αστεροσκοπείου για συγκεκριμένο επεισόδιο βροχής και σύγκριση με τις παρατηρημένες τιμές
5. εισαγωγή δεδομένων πρόγνωσης στο υδρολογικό μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ ως χρονοσειρές βροχόπτωσης, με χρήση του βέλτιστου σετ παραμέτρων, με εξαγωγή των αντίστοιχων προγνώσεων απορροής και ανάλυσή τους
6. υπόδειξη μεθοδολογίας πλημμυρικής πρόγνωσης με βάση τα τελικά αποτελέσματα

1. Σχηματοποίηση λεκάνης απορροής



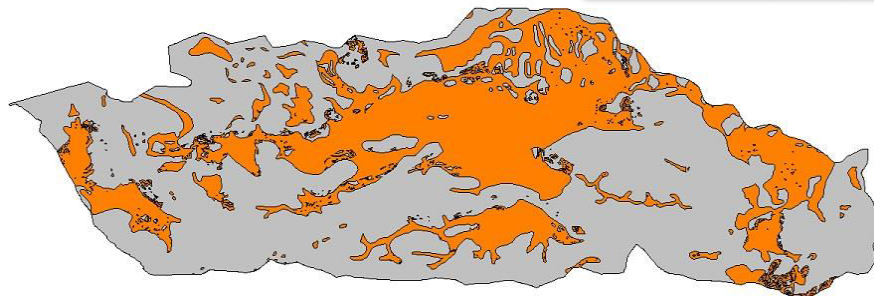
ψηφιακό μοντέλο
εδάφους



Οινόη

Γύρα Στεφάνης

διακριτοποίηση της λεκάνης σε **5 υπολεκάνες** έκτασης μεγαλύτερης των 15 km² που αντιστοιχούν σε 5 κλάδους του υδρογραφικού δικτύου καθώς και του υπόγειου υδροφορέα σε **2 πολυγωνικά κύτταρα** ένα για κάθε υδρομετρικό σταθμό



ΜΥΑ με βάση τον αριθμό καμπύλης απορροής CN (της μεθόδου SCS-CN). Διαχωρισμός σε 2 κατηγορίες με όριο την τιμή CN=50 για περισσότερα περατά εδάφη (ΜΥΑ 1) με γκρι χρώμα και για λιγότερα περατά (ΜΥΑ 2) με πορτοκαλί.

2. Συλλογή και επεξεργασία χρονοσειρών

- Το χρησιμοποιούμενο διάστημα δεδομένων είναι από 01/10/2011 έως και 01/05/2014.
- Οι χρονοσειρές απορροής σε m³/sec με 15-λεπτο χρονικό βήμα σε Οινόη και Γύρα Στεφάνης καθώς και οι χρονοσειρές βροχόπτωσης σε mm με 10-λεπτο χρονικό βήμα σε Βίλια, Πράσινο και Μάνδρα ανάγονται με συνάθροιση σε ωριαίο χρονικό βήμα.
- Οι χρονοσειρές ημερήσιας θερμοκρασίας σε °C σε Βίλια, Πράσινο και Μάνδρα μετατρέπονται σε χρονοσειρές ημερήσιας δυνητικής εξατμοδιαπνοής σε mm μέσω της **παραμετρικής μεθόδου** (Tegos et al., 2013), η οποία απαιτεί τη γνώση μόνο της θερμοκρασίας, του γεωγραφικού πλάτους (ήτοι 38°) και 3 παραμέτρων που έχουν προκύψει με βάση τα ελληνικά δεδομένα και ανάγονται σε ωριαίο βήμα με ισομερισμό των ημερήσιων τιμών τους.
- Οι τελικές χρονοσειρές βροχόπτωσης και δυνητικής εξατμοδιαπνοής ανά μετεωρολογικό σταθμό ανάγονται σε αντίστοιχες χρονοσειρές για κάθε μία από τις 5 σχηματοποιημένες υπολεκάνες με βάση τη **μέθοδο των πολυγώνων Thiessen**.

συντελεστές
Thiessen ανά
υπολεκάνη



3. Βαθμονόμηση παραμέτρων

Ορισμός: 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.

Αξιοπιστία βαθμονόμησης:

- (α) αναπαραγωγή όλων των αποκρίσεων μιας λεκάνης με ικανοποιητική ακρίβεια
- (β) απόδοση φυσικού νοήματος στις βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων

Λογισμός ως πρόβλημα ολικής βελτιστοποίησης: εύρεση ελάχιστης τιμής της στοχικής συνάρτησης που είναι το σταθμισμένο άθροισμα επιλεγμένων κριτηρίων καλής προσαρμογής ➡ **Στην ΥΔΡΟΓΕΙΟ:** Εξελκτικός αλγόριθμος ανόπτησης-απλόκου

Χρησιμοποιούμενα κριτήρια καλής προσαρμογής για στοχική συνάρτηση:

- Αποτελεσματικότητα: μέτρο «απόστασης» μεταξύ των παρατηρημένων και των προσομοιωμένων τιμών απόκρισης, για όλη την περίοδο ελέγχου (επίδοση)
- Αποτελεσματικότητα υψηλών παροχών: ορίζεται όπως και η αποτελεσματικότητα για τις τιμές μεγαλύτερες από τη μέση τιμή (κατάλληλο για πλημμυρικές μελέτες)
- Σφάλμα τάσεων: έλεγχος της υπερετήσιας τάσης ανύψωσης ή ταπείνωσης της στάθμης των υπόγειων δεξαμενών, ώστε να είναι συνεπής με τις πιεζομετρικές παρατηρήσεις στη λεκάνη με χρήση μέτρων ποιότης



Διαδικασία «ημιαυτόματης» βαθμονόμησης: επέμβαση του χρήστη ώστε να «κατευθυνθεί» η αναζήτηση στις πρόσφορες τιμές του πεδίου ορισμού με συνεχείς διαδοχικές δοκιμές λίγων παραμέτρων κάθε φορά με στόχο τη συνεχή ελαχιστοποίηση της στοχικής συνάρτησης

3. Βαθμονόμηση παραμέτρων (2)

Σημεία Προσοχής: (α) μηδενικές αρχικές στάθμες δεξαμενών εδαφικής υγρασίας αφού εκκινούμε στην αρχή του υδρολογικού έτους (β) καθορισμός ορίων παραμέτρων με βάση τη φυσική σημασία και συνεχής διερεύνηση προσέγγισής τους για επανακαθορισμό τους, (γ) μείωση του συνολικού αριθμού παραμέτρων για μείωση υπολογιστικού φόρτου και κινδύνου υπερπροσαρμογής

Αποτελέσματα Βαθμονόμησης

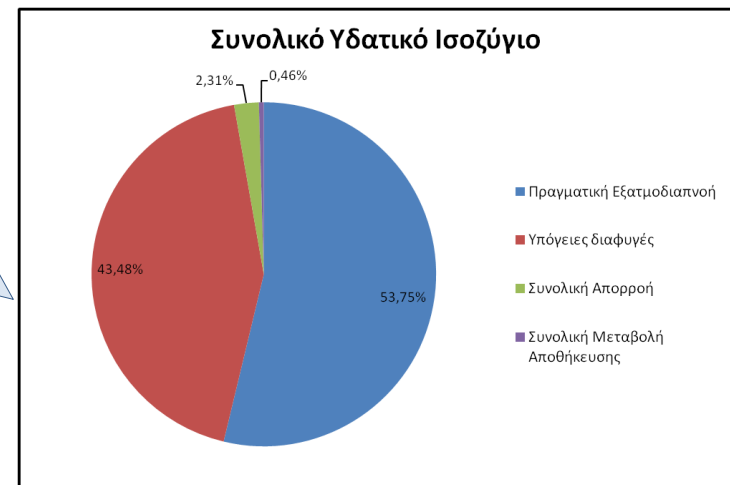
Α. Κριτήρια καλής προσαρμογής

Θέση μέτρησης	Συντελεστής βάρους	Βαθμονόμηση		Επαλήθευση	
		Αποτελεσματικότητα	Αποτελεσματικότητα Υψηλών Παρόχων	Αποτελεσματικότητα	Αποτελεσματικότητα Υψηλών Παρόχων
Γύρα Στεφάνης	2,000	0,697	0,742	0,528	0,324
Οινόη	1,000	0,614	0,335	0,412	0,203

-καλύτερα αποτελέσματα στη Γύρα Στεφάνης από ότι στην Οινόη
-καλύτερες επιδόσεις στην περίοδο βαθμονόμησης από ότι στην περίοδο επαλήθευσης
-πολύ καλή επίδοση της αποτελεσματικότητας υψηλών παροχών στη Γύρα Στεφάνης κατά τη βαθμονόμηση

Β. Υδατικό Ισοζύγιο

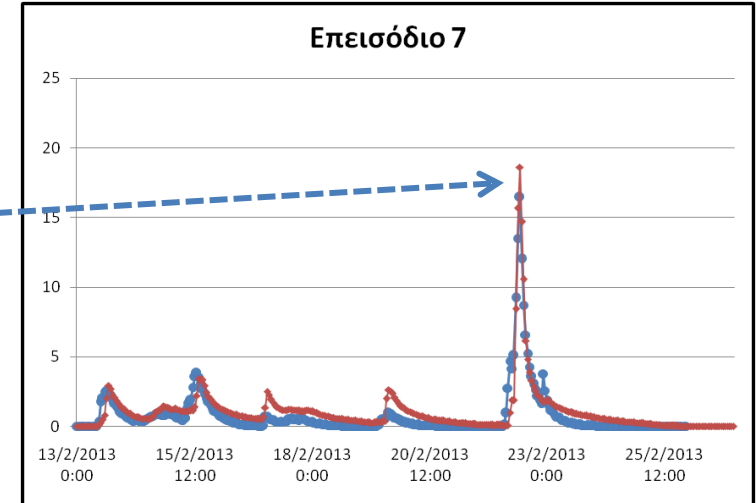
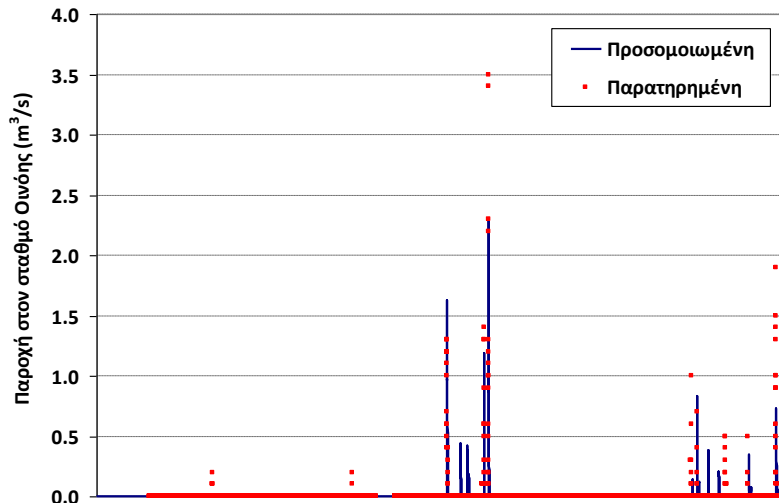
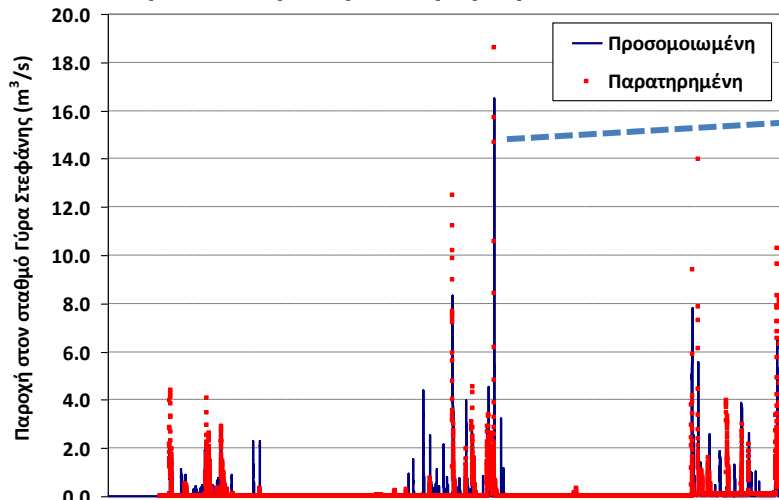
Ο συντελεστής απορροής σε χειμαρρικές λεκάνες όπως του Σαρανταπόταμου, είναι περίπου 2-3% και το μεγαλύτερο μέρος της βροχόπτωσης είτε εξατμίζεται είτε διαφεύγει μέσω του υπόγειου υδροφορέα, διαδικασία που υποβοηθείται από την ύπαρξη έντονα καρστικοποιημένων ασβεστολιθικών πετρωμάτων που επιτείνουν τη διήθηση και κατεισδυση του νερού.



3. Βαθμονόμηση παραμέτρων (3)

Γ. Διαγράμματα προσομοιωμένων χρονοσειρών

- Περίοδος προσομοίωσης: 1/10/2011-01/5/2014
- Περίοδος βαθμονόμησης: 13/12/2011-30/4/2013



- ικανοποιητική προσέγγιση των περισσότερων περιόδων με έντονη παροχή, όμως αδυναμία αναπαραγωγής αρκετών μέγιστων παροχών
- όμως για το επεισόδιο 7 η προσομοιωμένη αντιστοιχεί περίπου στο 90% της παρατηρημένης μέγιστης παροχής
- η μορφή των υδρογραφημάτων γενικώς αναπαράγεται

Σε σχεδόν όλα τα υδρογραφήματα παρατηρείται ένας οριακά κατακόρυφος ανοδικός και ένας εκθετικός καθοδικός κλάδος.

3. Βαθμονόμηση παραμέτρων (4)

Συμπεράσματα από τη βαθμονόμηση:

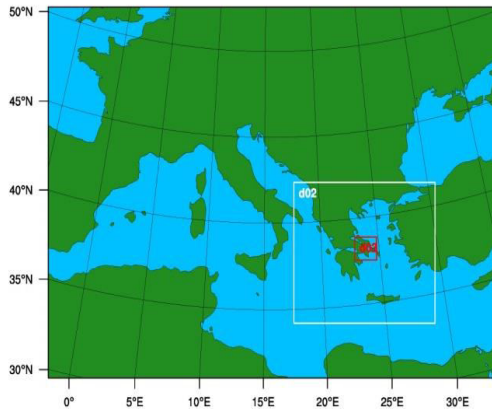
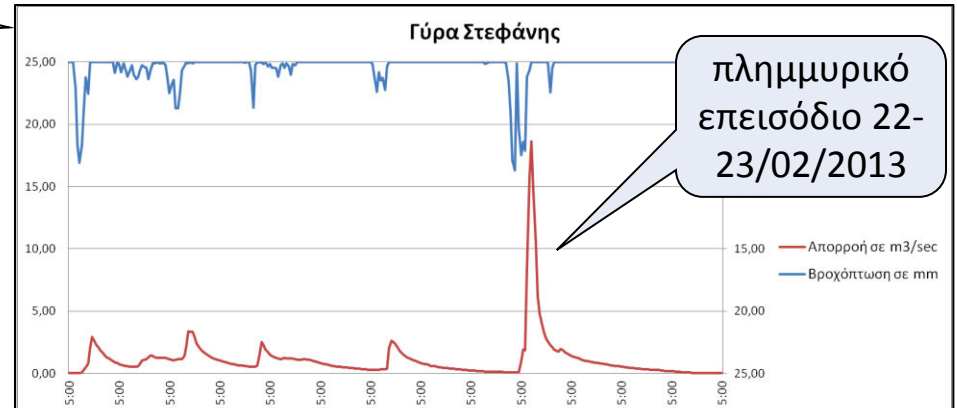
- Η επίδοση του υδρολογικού μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ σε μία λεκάνη χειμαρρικής διαίτας, όπως αυτή του Σαρανταπόταμου, αν και υστερεί σε σχέση με αντίστοιχες επιδόσεις του εν λόγω μοντέλου σε λεκάνες με μόνιμη απορροή, όπου συμπεριφέρονται πολύ πιο «γραμμικά», εντούτοις **κρίνεται αρκετά ικανοποιητική** αν συνυπολογιστεί η χρήση ενός μικρού δείγματος πραγματικών δεδομένων για τη βαθμονόμηση των παραμέτρων.
- Η σχηματοποίηση του πεδίου εφαρμογής για την ανάπτυξη υδρολογικών μοντέλων πρέπει να διακρίνεται από τη **μέγιστη δυνατή φειδωλότητα** τόσο στη χωρική διακριτοποίηση του επιφανειακού συστήματος, των ΜΥΑ και του υπόγειου συστήματος όσο και στην επιλογή παραμέτρων, ώστε αφενός να μειώνεται ο υπολογιστικός φόρτος και αφετέρου να αποφεύγεται ο κίνδυνος υπερπροσαρμογής του μοντέλου με συνέπεια να λάβει χαρακτηριστικά μοντέλου «μαύρου κουτιού».
- Η φυσική σημασία των επιλεγμένων παραμέτρων του επιφανειακού συστήματος αποδίδεται σε μεγάλο βαθμό από τις τιμές του βέλτιστου σετ παραμέτρων. Αυτό αποδεικνύει τόσο την αποτελεσματική προσομοίωση του μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ ως **εννοιολογικού μοντέλου με προσέγγιση φυσικής βάσης**, όσο και τον επιτυχημένο ορισμό των Μονάδων Υδρολογικής Απόκρισης μέσω του συντελεστή καμπύλης απορροής CN, της μεθόδου SCS-CN.

4. Ανάλυση μετεωρολογικών προγνώσεων

γενικώς το προφίλ της απορροής ακολουθεί αυτό της βροχοπτώσης

Περιγραφή μεθοδολογίας:

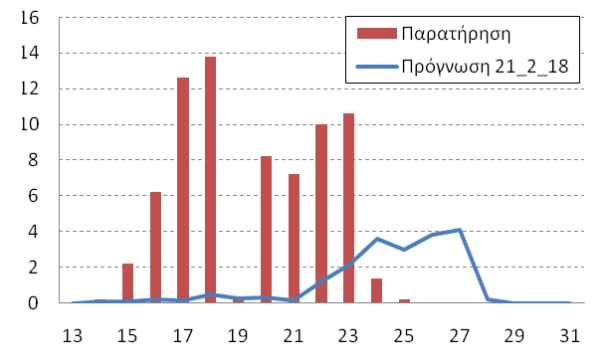
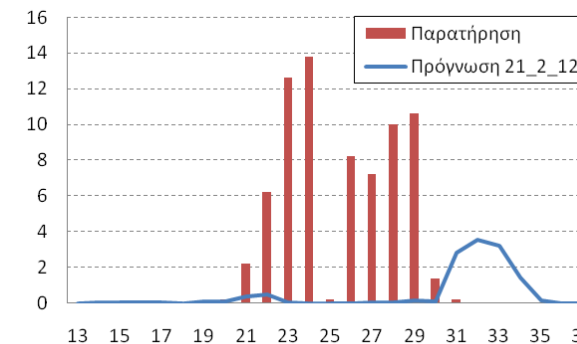
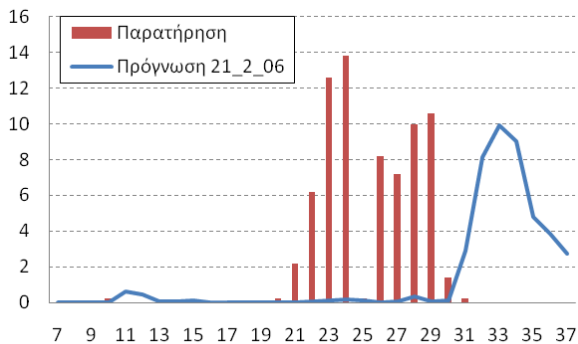
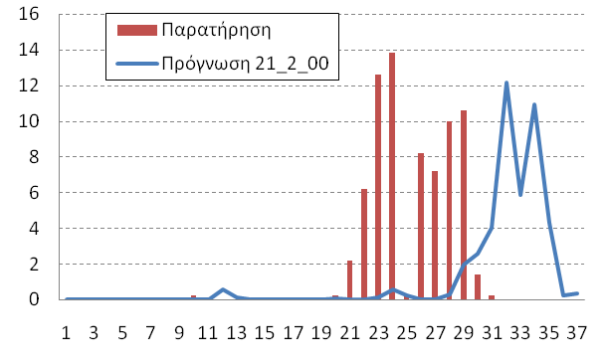
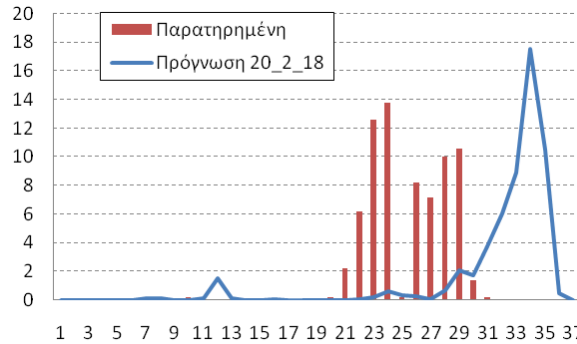
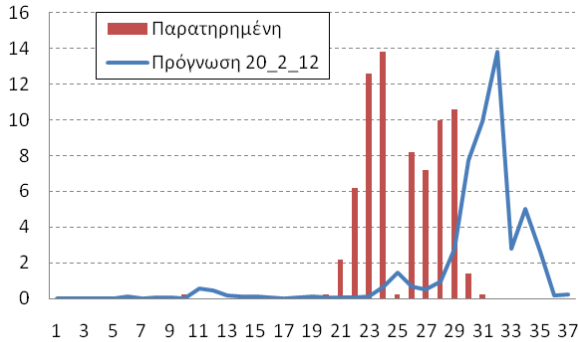
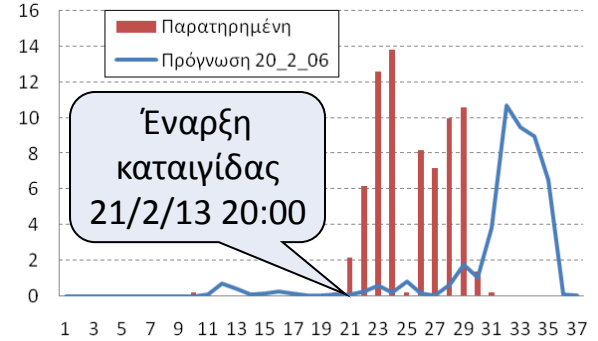
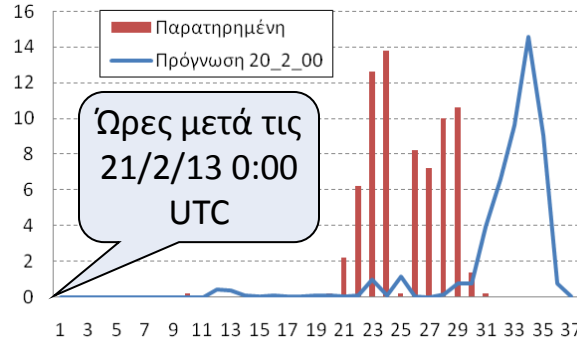
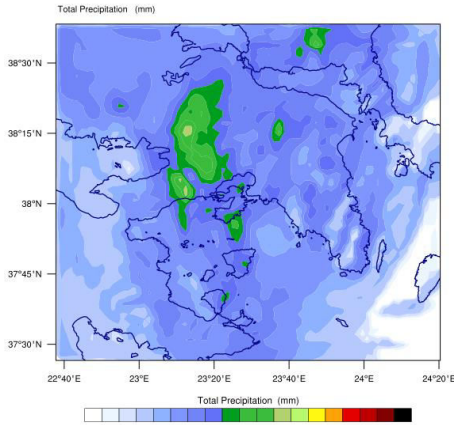
- Εφαρμογή αριθμητικού μοντέλου καιρού WRF σε τρία επάλληλα πλέγματα, χωρικής διακριτότητας 18x18, 6x6 και 2x2 km, με δεδομένα από το NCEP (κέντρο περιβαλλοντικής πρόγνωσης των ΗΠΑ)



- Προσομοίωση βροχοπτώσης με διαφορετικό χρόνο έναρξης (άρα διαφορετικές αρχικές συνθήκες) και ίδιο χρόνο λήξης 22/2/13 12:00 (άρα διαφορετική διάρκεια), και παραγωγή οκτώ διαδοχικών (ανά 6 h) σεναρίων πρόγνωσης, από 20/2/13 00:00 έως 21/2/13 18:00.
- Εκτίμηση σημειακής βροχοπτώσης στους μετεωρολογικούς σταθμούς Βίλια, Πράσινο και Μάνδρα, ως σταθμισμένου μέσου όρου των τιμών των εγγύτερων τους κόμβων του πλέγματος (grid points) με χρήση του MS Excel Solver με βάση τα προηγούμενα σεναρία.
- Παράγωγή επτά επιπλέον σεναρίων με διαδοχικούς μέσους όρους ανά προσομοίωση μαζί με τις προγνώσεις που έχουν προέλθει από προσομοιώσεις με νωρίτερο χρόνο έναρξης, άρα δημιουργούμε συνολικά 15 σεναρία πρόγνωσης (ensemble πρόγνωση).
- Εκτίμηση επιφανειακής βροχοπτώσης ανά υπολεκάνη ως μέσος όρος των τιμών όλων των κόμβων του πλέγματος που βρίσκονται εντός της κάθε μίας με βάση τα προηγούμενα 15 σεναρία.
- Αντικατάσταση «παρατηρημένων» τιμών επιφανειακής βροχοπτώσης υπολεκανών από τις αντίστοιχες προγνώσεις με σημειακή και επιφανειακή ανάλυση, για την παραγωγή των αντίστοιχων σεναρίων πρόγνωσης της παροχής με το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ.

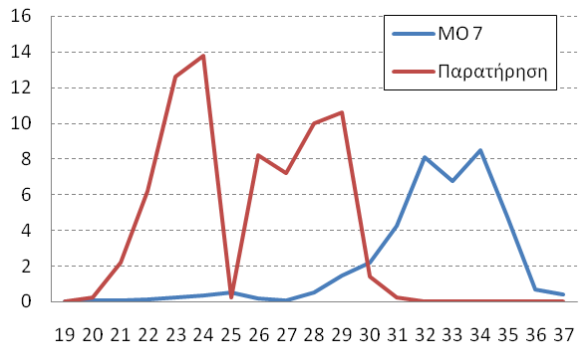
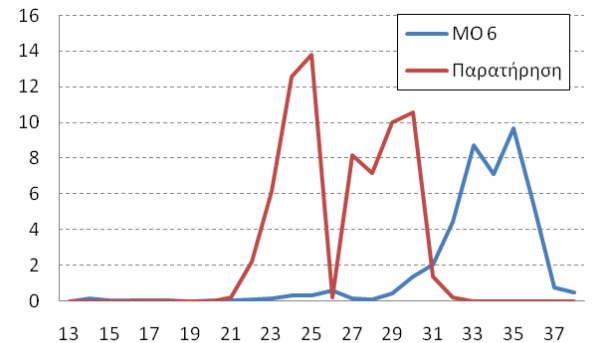
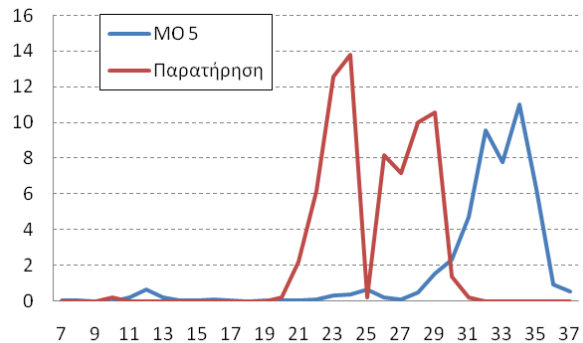
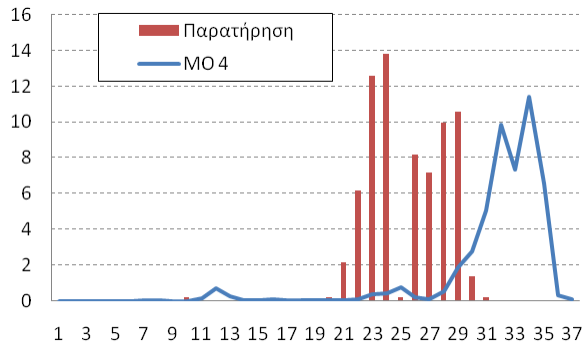
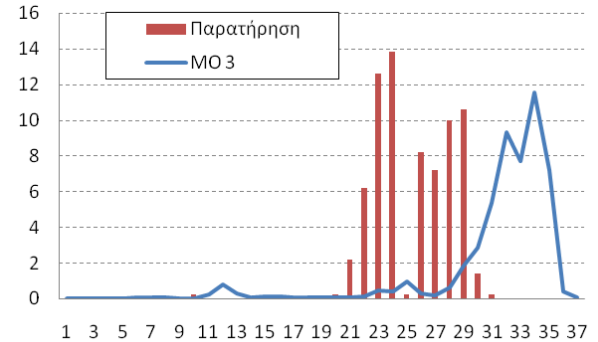
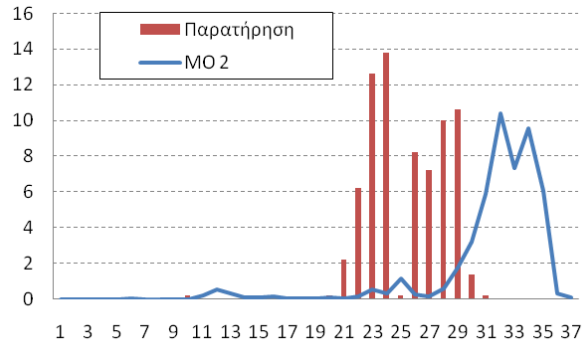
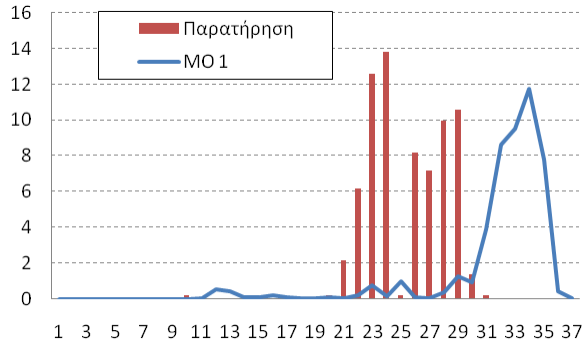
4. Ανάλυση μετεωρολογικών προγνώσεων (2)

Σενάρια πρόγνωσης βροχόπτωσης με σημειακή ανάλυση για το σταθμό στα Βίλια



4. Ανάλυση μετεωρολογικών προγνώσεων (3)

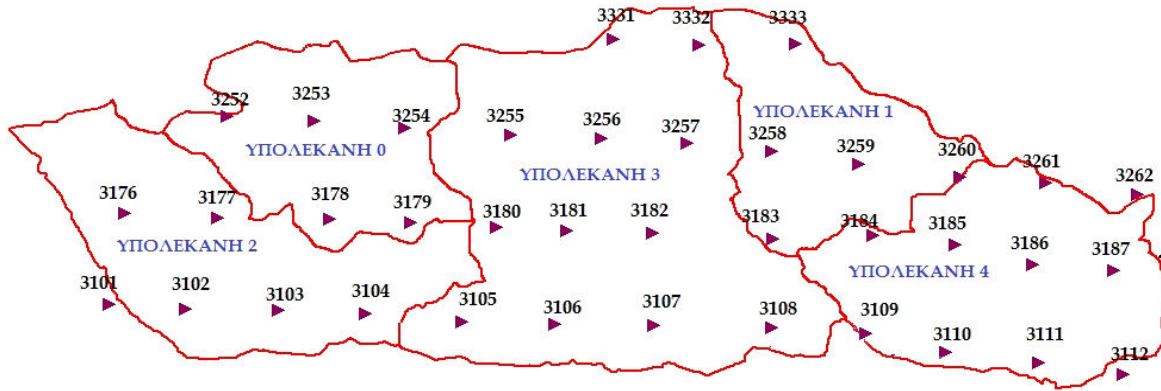
Σενάρια πρόγνωσης βροχόπτωσης με σημειακή ανάλυση για το σταθμό στα Βίλια (συνέχεια)



- προσομοίωση μόνο του ενός από τους δύο κλάδους βροχόπτωσης
- υστέρηση γενικώς 8 ωρών μετά της προσομοιωμένης σε σχέση με την παρατηρημένη αιχμή
- ποσοτική προσέγγιση της αιχμής της βροχόπτωσης από όλα τα σενάρια εκτός από τα 21_2_12, 21_2_18 δηλαδή εκείνα των πιο κοντινών χρονικά στο παρατηρημένο επεισόδιο βροχόπτωσης

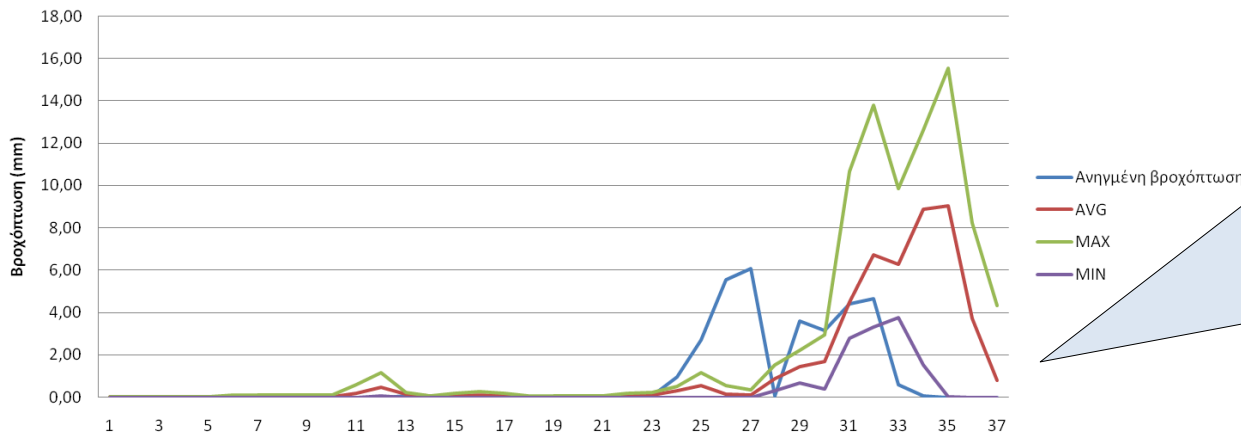
4. Ανάλυση μετεωρολογικών προγνώσεων (4)

Επιφανειακή ανάλυση προγνώσεων βροχόπτωσης



Χρησιμοποιούμενα grid points για την εξαγωγή πρόγνωσης βροχόπτωσης ανά υπολεκάνη

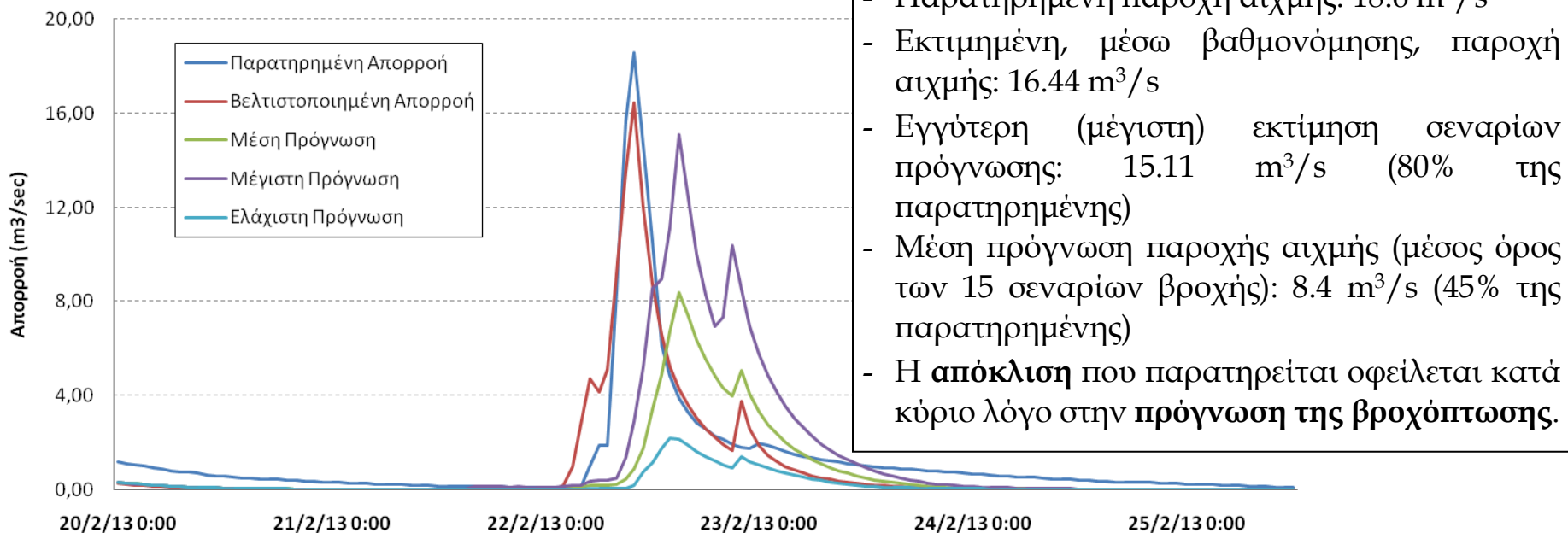
Προγνώσεις βροχόπτωσης στην υπολεκάνη 3



Η μέση (AVG), η μέγιστη (MAX), η ελάχιστη (MIN) πρόγνωση όλων των σεναρίων πρόγνωσης βροχόπτωσης με επιφανειακή ολοκλήρωσή τους και η ανηγμένη (μέσω Thiessen) βροχόπτωση στην υπολεκάνη 3

5. Αποτελέσματα για την πρόγνωση απορροής

Αποτελέσματα με σημειακή ανάλυση προγνώσεων βροχόπτωσης στη Γύρα Στεφάνης



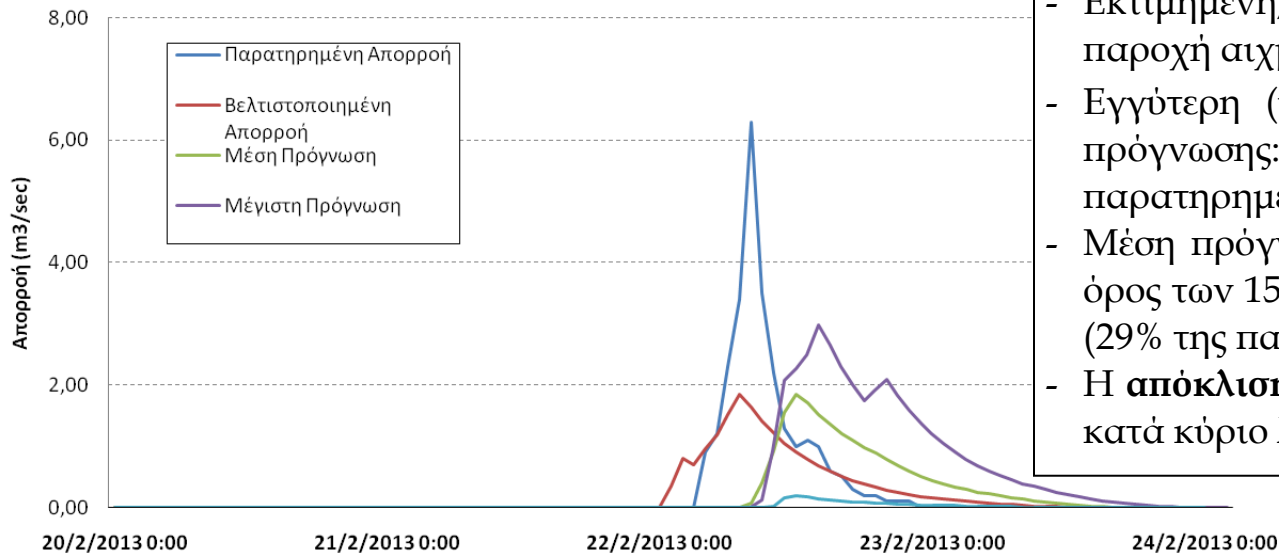
□ Η αποτελεσματικότερη (μέγιστη) πρόγνωση των παροχών της περιόδου 20-25/2/2013 προέρχεται από το σενάριο πρόγνωσης της βροχής που ξεκινά στις 20/2/13 18:00 UTC και στη συνέχεια το προηγούμενο (20/2/2013 12:00 UTC) και το επόμενο του (21/2/2013 00:00 UTC).

□ Τα σενάρια πρόγνωσης που εκκινούν στις 21/2/13 12:00 και 18:00 UTC αποτυγχάνουν πλήρως όπως και στην πρόγνωση βροχόπτωσης να προσομοιώσουν την παρατηρημένη απορροή.

□ Παρατηρείται υστέρηση 5 ωρών ανάμεσα στις αιχμές της παρατηρημένης και προσομοιωμένης απορροής αντί 8 στις αντίστοιχες αιχμές της πρόγνωσης βροχόπτωσης.

5. Αποτελέσματα για την πρόγνωση απορροής (2)

Αποτελέσματα με σημειακή ανάλυση προγνώσεων βροχόπτωσης στην Οινόη



- Παρατηρημένη παροχή αιχμής: 6.3 m³/s
- Εκτιμημένη, μέσω βαθμονόμησης, παροχή αιχμής: 1.85 m³/s
- Εγγύτερη (μέγιστη) εκτίμηση σεναρίων πρόγνωσης: 2.99 m³/s (47.5% της παρατηρημένης)
- Μέση πρόγνωση παροχής αιχμής (μέσος όρος των 15 σεναρίων βροχής): 1.85 m³/s (29% της παρατηρημένης)
- Η **απόκλιση** που παρατηρείται οφείλεται κατά κύριο λόγο στη **βαθμονόμηση**.

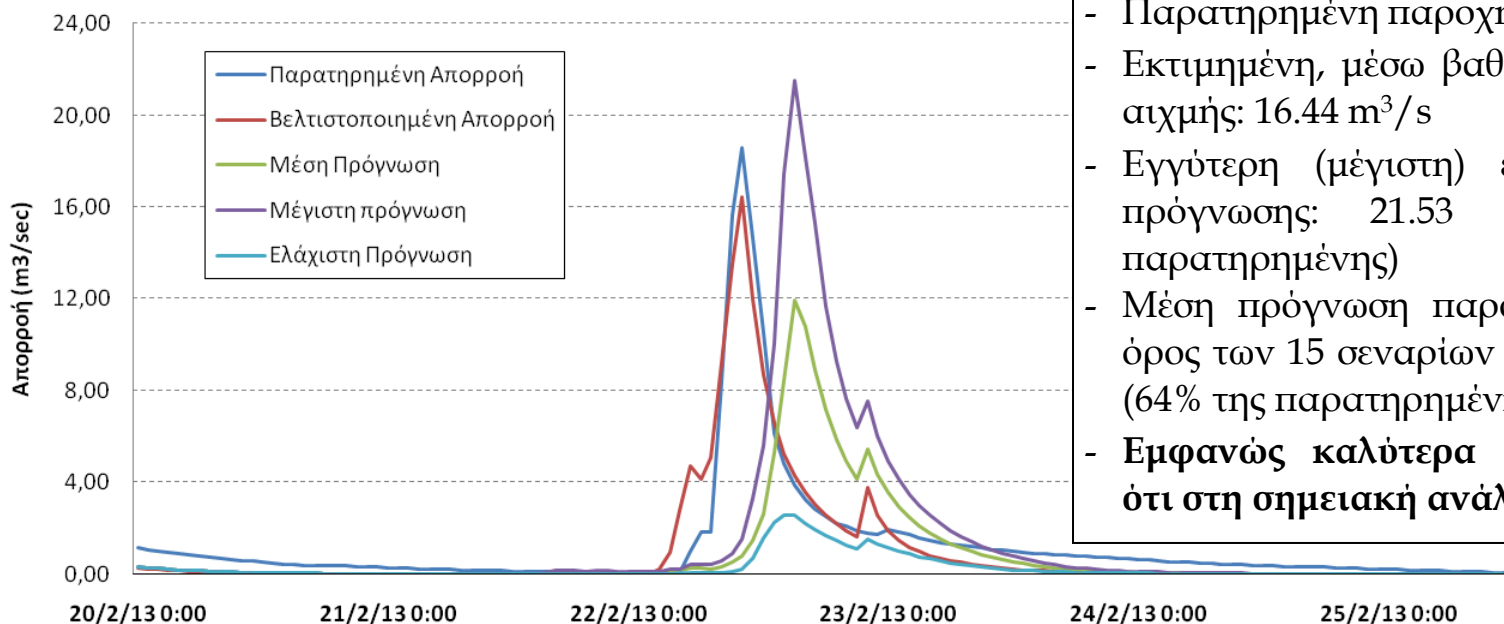
□ Η αποτελεσματικότερη (μέγιστη) πρόγνωση των παροχών προέρχεται ξανά από το σενάριο πρόγνωσης της βροχής που ξεκινά στις 20/2/13 18:00 UTC και στη συνέχεια το προηγούμενο και το επόμενο του, ενώ τα σενάρια πρόγνωσης που εκκινούν στις 21/2/13 12:00 και 18:00 UTC αποτυγχάνουν κι εδώ πλήρως να προσομοιώσουν την παρατηρημένη απορροή.

□ Παρατηρείται ξανά η ίδια υστέρηση των 5 ωρών.

□ Η μεγάλη απόκλιση που παρατηρείται εξηγείται από το γεγονός της κυριαρχίας των μηδενικών παροχών στη θέση μέτρηση στην Οινόη που καθιστά ιδιαίτερα δύσκολη την επαρκή μοντελοποίηση.

5. Αποτελέσματα για την πρόγνωση απορροής (3)

Αποτελέσματα με επιφανειακή ανάλυση προγνώσεων βροχόπτωσης στη Γύρα Στεφάνης



- Παρατηρημένη παροχή αιχμής: $18.6 \text{ m}^3/\text{s}$
- Εκτιμημένη, μέσω βαθμονόμησης, παροχή αιχμής: $16.44 \text{ m}^3/\text{s}$
- Εγγύτερη (μέγιστη) εκτίμηση σεναρίων πρόγνωσης: $21.53 \text{ m}^3/\text{s}$ (116% της παρατηρημένης)
- Μέση πρόγνωση παροχής αιχμής (μέσος όρος των 15 σεναρίων βροχής): $11.92 \text{ m}^3/\text{s}$ (64% της παρατηρημένης)
- Εμφανώς καλύτερα αποτελέσματα από ότι στη σημειακή ανάλυση.

□ Η μέγιστη πρόγνωση των παροχών προέρχεται ξανά από το σενάριο πρόγνωσης της βροχής που ξεκινά στις 20/2/13 18:00 UTC όπου υπερεκτιμάται η παρατηρημένη αιχμή απορροής, όπως και στο προηγούμενό του (20/2/2013 12:00 UTC), γεγονός πολύ θετικό για την πλημμυρική πρόγνωση, ενώ εξίσου ικανοποιητικό είναι και το επόμενο σενάριο (21/2/2013 00:00 UTC).

□ Τα σενάρια πρόγνωσης που εκκινούν στις 21/2/13 12:00 και 18:00 UTC αποτυγχάνουν κι εδώ πλήρως να προσομοιώσουν την παρατηρημένη απορροή.

□ Παρατηρείται γενικώς η ίδια 5ωρη υστέρηση.

□ Στην Οινόη η εικόνα βελτιώνεται ανεπαίσθητα.

□ Ο **βαθμός συσχέτισης** της πρόγνωσης της απορροής με εκείνη της βροχόπτωσης στις πιο ανάντη υπολεκάνες είναι **πάνω από 0,9**.

5. Αποτελέσματα για την πρόγνωση απορροής (4)

Συμπεράσματα από τη διερεύνηση της υδρομετεωρολογικής πρόγνωσης

- Το μέγεθος του ύψους βροχόπτωσης συνδέεται σε σημαντικό βαθμό με το μέγεθος του όγκου απορροής κατά την προσομοίωση με το υδρολογικό μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ, εφόσον παρατηρήθηκε μεγάλη συσχέτιση μεταξύ των δύο μεγεθών, γεγονός που «μεταφέρει» σε ένα βαθμό **την όποια αβεβαιότητα** της πρόγνωσης βροχόπτωσης σε μέγεθος, χρόνο έναρξης και χρονική διάρκεια και στα αντίστοιχα στοιχεία της πλημμυρικής πρόγνωσης.
- Το αριθμητικό μοντέλο πρόγνωσης καιρού WRF, προβλέπει ικανοποιητικά το ύψος βροχόπτωσης, ενδέχεται όμως να περιλαμβάνει σημαντικές αποκλίσεις ως προς τον χρόνο έναρξης των επεισοδίων βροχής (παρατηρήθηκε δωρη υστέρηση).
- Οι προγνώσεις βροχόπτωσης **πολύ μικρής κλίμακας** (12 ή 18 ώρες πριν το επεισόδιο βροχόπτωσης, όπως οι 21/2/13 12:00 και 18:00 UTC) **προβλέπουν ανεπαρκώς** το ύψος βροχόπτωσης, ενώ προγνώσεις **μεγαλύτερης κλίμακας** (1,5 με 2 ημέρες πριν το επεισόδιο βροχόπτωσης, όπως οι 20/2/13 12:00 και 18:00 UTC και η 21/2/2013 00:00 UTC) μπορούν **να προσεγγίσουν ικανοποιητικά** τα παρατημένα ύψη βροχόπτωσης. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην **αρχική αστάθεια** που παρατηρείται σε πολλά αριθμητικά μοντέλα.
- Η πρόγνωση απορροής για μία συγκεκριμένη περιοχή είναι **περισσότερο επιτυχημένη** όταν λαμβάνεται η **επιφανειακή βροχόπτωση ανά υπολεκάνη** παρά η σημειακή των μετεωρολογικών σταθμών.

6. Υπόδειξη μεθοδολογίας πλημμυρικής πρόγνωσης

- (1) Λήψη δεδομένων βροχόπτωσης και απορροής από τους εγκατεστημένους μετεωρολογικούς και υδρομετρικούς σταθμούς στην ανάντη λεκάνη του Σαρανταπόταμου ανά 6 ώρες. Συνεχής προσομοίωση της απορροής μέσω του υδρολογικού μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ με το βέλτιστο σετ παραμέτρων το οποίο μπορεί να αναθεωρείται ανά τακτά χρονικά διαστήματα.
- (2) Παραγωγή δεδομένων πρόγνωσης βροχής ανά 6ωρο μέσω προσομοίωσης με το αριθμητικό μοντέλο WRF και χωρική ανάλυση 2x2 km, με χρόνο έναρξης τον πραγματικό χρόνο εκτέλεσης της πρόγνωσης και χρόνο λήξης 48, 42, 36 και 30 ώρες μετά το χρόνο έναρξης. Αν η πρόγνωση για συνεχόμενες προσομοιώσεις είναι μηδενική ή πολύ μικρή μη εκτέλεση της υπόλοιπης διαδικασίας.
- (3) Συγκέντρωση ανά 6ωρο των προγνώσεων με ίδιο χρόνο λήξης και διενέργεια *ensemble* προγνώσεων. Μια ολοκληρωμένη διενέργεια *ensemble* πρόγνωσης για μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή θα περιλαμβάνει 7 σενάρια πρόγνωσης βροχόπτωσης, τέσσερα των προσομοιώσεων με αρχικές συνθήκες 48, 42, 36 και 30 ώρες πριν τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή και 3 μέσω των διαδοχικών μέσων όρων τους.
- (4) Παραγωγή προγνώσεων βροχόπτωσης για τις 5 υπολεκάνες, μέσω μέσου όρου των προγνώσεων όλων των διακριτών σημείων εντός της κάθε υπολεκάνης για τα 7 σενάρια πρόγνωσης.
- (5) Διόρθωση των δεδομένων πρόγνωσης βροχής σε περίπτωση όπου παρατηρούνται συστηματικές αποκλίσεις στο χρόνο έναρξης ή στην αιχμή της βροχόπτωσης σε σχέση με τις παρατηρημένες τιμές για συνεχόμενες προσομοιώσεις (για παράδειγμα για 5 και άνω προσομοιώσεις).
- (6) Εισαγωγή των 7 τελικών σεναρίων πρόγνωσης βροχόπτωσης στο υδρολογικό μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ με βάση το πιο πρόσφατο βέλτιστο σετ παραμέτρων, ως συνέχεια των σε πραγματικό χρόνο παρατηρημένων χρονοσειρών βροχόπτωσης και εξαγωγή των δεδομένων πρόγνωσης απορροής.
- (7) Αν η πρόγνωση απορροής υπερβαίνει κάποιο όριο πλημμυρικής επικινδυνότητας για τα περισσότερα σενάρια (που δεν έχουν καθοριστεί λόγω καθυστέρησης εφαρμογής της Οδηγίας Πλαίσιο 2007/60/ΕΚ για τις πλημμύρες) ενημέρωση των υπηρεσιών πολιτικής προστασίας.

Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

- Η επανάληψη των διαδικασιών προσομοίωσης με μεγαλύτερες χρονοσειρές πρωτογενών δεδομένων για την αποτελεσματικότερη βαθμονόμηση των παραμέτρων και την επαλήθευση των αναπτυσσόμενων μοντέλων.
- Η σύνδεση του υδρολογικού μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ με την παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών βροχόπτωσης μεγάλου μήκους μέσω κατάλληλου στοχαστικού μοντέλου, για τη βέλτιστη βαθμονόμηση των παραμέτρων του μοντέλου και την αποτελεσματικότερη προσομοίωση σε κλίμακα περιόδων επαναφοράς σχεδιασμού, γεγονός που θα βοηθήσει τον υδρολογικό σχεδιασμό.
- Η διερεύνηση και ανάπτυξη της επιχειρησιακής χρήσης του υδρολογικού μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ, ως πλήρους μοντέλου υδρομετεωρολογικής πρόγνωσης για τη λεκάνη του Σαρανταπόταμου, ή για άλλες ελληνικές λεκάνες με παρόμοια φυσιογραφικά χαρακτηριστικά, με τη συνεχή τροφοδοσία του με σενάρια βροχόπτωσης σε σχεδόν πραγματικό χρόνο. Η εξέταση των οικονομικών, τεχνικών και λειτουργικών απαιτήσεων μιας τέτοιας ενέργειας.
- Η χρήση των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας για την υποβοήθηση της εκτέλεσης της Οδηγίας 2007/60/ΕΚ για την εκτίμηση και τη διαχείριση της πλημμυρικής διακινδύνευσης με στόχο τη μείωση των κινδύνων από τις πλημμύρες και των συνεπειών τους, η οποία έχει εκδοθεί από το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο.

Βιβλιογραφικές Αναφορές

- 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. Κοσιέρης, 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*, Ανάδοχοι: Γραφείο Μελετών ΕΤΜΕ - Αντωνίου - Πέππας και Συνεργάτες, Γραφείο Μαχαίρα, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, Αθήνα, 2014
- 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
- 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
- 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
- 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
- Meon, G., *Past and Present Challenges in flood forecasting*, Presentation in the International Workshop on Flash Flood Forecasting, Costa Rica, 2006
- 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
- Thielen J., Bartholmes J., Ramos M. H., and De Roo A., *The European Flood Alert System - Part 1: Concept and development*, Hydrology and Earth System Sciences 13, 125-140, 2009
- World Meteorological Organisation, *Manual on Flood Forecasting and Warning*, No. 1072, 2011

Ευχαριστώ για την προσοχή σας

Καλό καλοκαίρι