



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ
ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗΣ
ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ

ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ – Εκτίμηση πλημμυρικών ροών στην Ελλάδα σε συνθήκες υδροκλιματικής μεταβλητότητας: Ανάπτυξη φυσικά εδραιωμένου εννοιολογικού-πιθανοτικού πλαισίου και υπολογιστικών εργαλείων

Συνεργαζόμενοι φορείς:



ΕΤΜΕ: Πέππας & Συνεργάτες Ε.Ε.



Γραφείο Μαχαίρα Α.Ε.



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο – Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος



Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών – Ινστιτούτο Ερευνών Περιβάλλοντος και Βιώσιμης Ανάπτυξης

Ενότητα Εργασίας 4, Παραδοτέο Π 4.3

Τεχνική έκθεση θεωρητικής τεκμηρίωσης συστήματος πρόγνωσης πλημμυρών

ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΟΥ ΕΑΑ:

ΑΝΤΩΝΗΣ Δ. ΚΟΥΣΗΣ

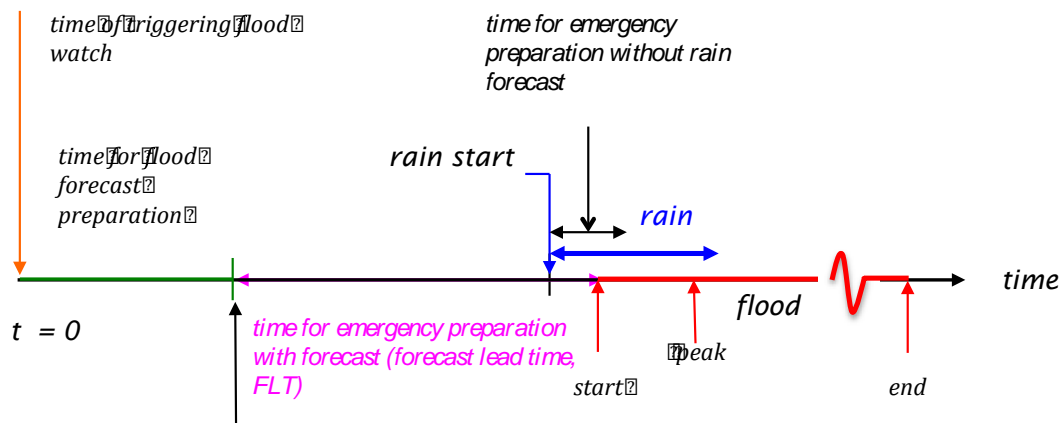
ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗ ΜΑΖΗ

1. Γενικό πλαίσιο

Η **ενότητα εργασίας 4** αφορά στη συνδυασμένη χρήση των μοντέλων βραχυπρόθεσμης πρόγνωσης καιρού που χρησιμοποιεί το ΕΑΑ και των υδρολογικών-υδραυλικών μοντέλων που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της ενότητας 3, με την δημιουργία ενός πιλοτικού συστήματος πρόγνωσης πλημμυρών, το οποίο θα μπορεί να προσαρμοσθεί για επιχειρησιακή χρήση για την εκτίμηση της εξέλιξης μιας πλημμύρας σε πραγματικό χρόνο. Η πρόγνωση των καταιγίδων γίνεται μέσω μιας αλυσίδας αριθμητικών μοντέλων πρόγνωσης καιρού στα οποία εφαρμόζονται επάλληλα χωρικά πλέγματα, τα οποία εντάσσονται διαδοχικά το ένα εντός του άλλου (Παραδοτέο Π 4.5). Στην βάση της αλυσίδας βρίσκεται το μοντέλο παγκόσμιας κλίμακας GFS (Global Forecast System) του National Centers for Environmental Prediction-NCEP/NOAA των ΗΠΑ για την μεσοπρόθεσμη πρόγνωση καιρού (οριζόντιο πλέγμα 1 μοίρας, χρονικό βήμα 6 ωρών). Το (περιοχικό) μοντέλο μέσης κλίμακας WRF (Weather Research and Forecasting) (βλ. περιγραφή στο Παραδοτέο Π 4.2α) εφαρμόστηκε στο πρόγραμμα «ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ» με διαδοχικά πλέγματα οριζόντιας χωρικής αναλύσεως ~18, ~6 και ~2 km (Παραδοτέο 4.2).

Το παραδοτέο 4.2α αφορά στην πρόγνωση με την μορφή σεναρίων-συνόλων (ensembles), ενώ η ντετερμινιστική πρόγνωση περιγράφεται στο Παραδοτέο Π 4.2β. Ακολουθώντας, μέσω του υδρολογικού-υδραυλικού μοντέλου εκτιμάται η χωροχρονική εξέλιξη της παροχής, της στάθμης και του πλημμυρικού κινδύνου (πιθανότητα υπέρβασης διαφόρων ορίων στάθμης), με στοιχείο εισόδου τα εν λόγω σενάρια βροχοπτώσεων (βλ. Παραδοτέο Π 4.4). Επειδή η αριθμητική πρόγνωση καιρού είναι ευαίσθητη στις αρχικές συνθήκες, που προέρχονται από παρατηρήσεις και έχουν σφάλματα μέτρησης και δειγματοληψίας, ενδείκνυται η δημιουργία ενός προγνωστικού συνόλου (ensemble forecasting) μέσω της εκτελέσεως διαδοχικών προσομοιώσεων με ελαφρώς και συστηματικά διαφοροποιημένες αρχικές συνθήκες. Η διαδικασία αυτή βοηθά στην βελτίωση της ακριβείας της προγνώσεως και στην εκτίμηση της εγκυρότητας αυτής. Στο Παραδοτέο Π 4.4 επιδεικνύεται η εφαρμογή του συστήματος σε πιλοτική λεκάνη που ανεπτύχθη στα πλαίσια του έργου, με απώτερο στόχο την προετοιμασία της Πολιτείας, στην κατεύθυνση της πρόγνωσης (σε πρώτη φάση) και διαχείρισης (σε μεταγενέστερο στάδιο) του πλημμυρικού κινδύνου, σε αρμονία με τις απαιτήσεις της Οδηγίας-Πλαίσιο 2007/60/ΕΚ. Στην διαδικτυακή βάση δεδομένων του «ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ» είναι αποθηκευμένα σε αρχείο πλημμυρών τα σημαντικότερα πλημμυρικά επεισόδια που παρατηρήθηκαν στις πιλοτικές λεκάνες.

Ένας στόχος του προγράμματος «ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ» είναι η πρόγνωση πλημμύρας σε πραγματικό χρόνο. Η πρόγνωση αυτή μπορεί να βασισθεί σε μετρήσεις βροχής, εφ' όσον ο χρόνος υδρολογικής αποκρίσεως του υδρολογικού συστήματος είναι επαρκώς μεγαλύτερος από αυτόν που απαιτείται για την λήψη μέτρων προστασίας από τους πλημμυρικούς κινδύνους σε κάποια περιοχή ενδιαφέροντος. Στην περίπτωση που αυτό δεν ισχύει, δηλ. η απόκριση της λεκάνης απορροής είναι πολύ ταχεία, κυρίως λόγω μικρού μεγέθους της επιφανείας και ενδεχομένως λόγω έντονου αναγλύφου της λεκάνης απορροής (χαρακτηριστικά που απαντώνται συχνά στην Ελλάδα και σε όλες τις πιλοτικές λεκάνες του προγράμματος ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ) η μετεωρολογική πρόγνωση του πεδίου βροχής μπορεί να παράσχει το απαιτούμενο χρονικό περιθώριο για την κατάλληλη προετοιμασία των αρχών για την αντιμετώπιση πιθανής πλημμύρας. Το Σχήμα 1 αναφέρεται στην δεύτερη περίπτωση.



Σχήμα 1. Πλεονέκτημα από την χρήση μετεωρολογικής προγνώσεως πεδίου βροχής στην πρόγνωση πλημμύρας (προσαρμοσμένο από Koussis et al., 2003)

Όπως περιγράφεται στο Παραδοτέο 4.2, η πρόγνωση του πεδίου βροχής στις εφαρμογές του «ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ» γίνεται μέσω αριθμητικής επιλύσεως των μη γραμμικών μερικών διαφορικών εξισώσεων της δυναμικής μετεωρολογίας πάνω σε τρία πλέγματα με διαδοχικά πιο λεπτομερή διακριτοποίηση. Οι εξισώσεις αυτές επιλύονται με βάση την αρχική κατάσταση της ατμόσφαιρας και τα μοντέλα υπολογίζουν την εξέλιξη των μετεωρολογικών παραμέτρων (θερμοκρασία, άνεμος, υγρασία, κλπ.) σε διακριτά σημεία στον χώρο. Ένα ζήτημα που προκύπτει και χρήζει προσεκτικού χειρισμού είναι η χρήση των υπολογισμένων (όχι μετρημένων) τιμών βροχής ως στοιχείων εισόδου του υδρολογικού μοντέλου. Η δυσκολία έγκειται στο ότι τα σημεία του υπολογιστικού καννάβου δεν πρέπει να θεωρηθούν «υπολογιστικοί βροχογράφοι», έτσι ώστε οι συγκρίσεις μετρημένων και υπολογισμένων βροχοπτώσεων να γίνουν σημειακά, επιλέγοντας π.χ. τα εγγύτερα σημεία του υπολογιστικού καννάβου προς τις θέσεις των πραγματικών βροχογράφων. Αντίθετα, οι υπολογισμένες βροχές θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν μετά από κάποια χωρική στάθμιση.

Σε υδρολογικές εφαρμογές με στοιχεία εισόδου μετρημένες βροχοπτώσεις (στον περιορισμένο αριθμό σημείων, όπου υπάρχουν βροχογράφοι), η βροχή εισόδου κατανέμεται σε υπολεκάνες μέσω μιάς διαδικασίας όπως αυτή της μεθόδου των πολυγώνων Thiessen. Αν ακολουθήτο η ίδια διαδικασία στον υπολογισμό στοιχείων εισόδου του υδρολογικού μοντέλου από τις αριθμητικά υπολογισμένες τιμές βροχής, θα έπρεπε να χρησιμοποιηθούν σημεία του πλέγματος πλησίον των σημείων των φυσικών βροχομέτρων, από τα αποτελέσματα των οποίων θα προέκυπταν τα υπολογισμένα δεδομένα εισόδου μετά από κάποια στάθμιση, π.χ. του τύπου $1/(\text{απόσταση})^n$, $2 \geq n \geq 1$, εφαρμόζοντας στην συνέχεια πάλι μιά διαδικασία τύπου Thiessen. Μιά τέτοια επιλογή εμπεριέχει την σχετικά αυθαίρετη μέθοδο της σταθμίσεως, αλλά είναι συμβατή με την χρήση των στοιχείων εισόδου κατά την βαθμονόμηση του υδρολογικού μοντέλου. Μιά άλλη επιλογή θα ήταν να υπολογισθούν οι τιμές εισόδου βροχής ως μέσος όρος του πεδίου βροχής σε κάθε υπολεκάνη, η οποία όμως δεν θα ήταν απόλυτα συμβατή με την σχετική διαδικασία κατά την βαθμονόμηση του υδρολογικού μοντέλου. Η πρώτη μέθοδος εφαρμόσθηκε στην πρόγνωση πλημμυρών στον Αττικό Κηφισό (~375 km², σύνθετο ανάγλυφο, μικτές χρήσεις γής, πρόγραμμα TELEFLEUR, Koussis 2001) με μέτρια αποτελέσματα. Στο παρόν πρόγραμμα δοκιμάσθηκαν και οι δύο μέθοδοι.

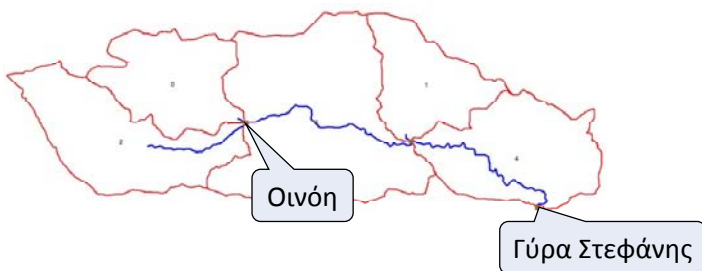
2. Προκαταρκτική εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας

Η μεθοδολογία εφαρμόστηκε πειραματικά στην λεκάνη του Σαρανταπόρου με σκοπό τον εντοπισμό τυχόν σοβαρών αδυναμιών, π.χ. σε σχέση με τον προαναφερθέντα τρόπο σταθμίσεως των τιμών βροχής από τις αριθμητικές προγνώσεις καιρού ή την έλλειψη επαρκώς πυκνών υδρολογικών μετρήσεων (Efstratiadis et al., 2009). Σημειώνεται ότι το πρόβλημα επαρκών υδρολογικών δεδομένων πλημμυρών είναι ιδιαίτερα έντονο σε λεκάνες **διαλείπουσας** (Νέδοντας) και **χειμαρρικής** (Σαρανταπόταμος) ροής. Προφανώς, οι όποιες αδυναμίες θα έπρεπε να αντιμετωπισθούν πριν από την τελική εφαρμογή. Η υδρολογική προσομοίωση έγινε με το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ (HYDROGEIOS), το οποίο έχει αναπτυχθεί από το ΕΜΠ (Efstratiadis et al., 2008). Ακολούθως παρατίθενται σε μορφή σχημάτων τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά της πιλοτικής εφαρμογής στην λεκάνη του Σαρανταπόταμου, τα οποία περιλαμβάνουν: (1) Σχηματοποίηση και παραμετροποίηση μοντέλου, (2) Προσαρμογή μοντέλου στα παρατηρημένα δείγματα ωριαίων παροχών, (3) Προσομοίωση πεδίου βροχής επεισοδίου πλημμύρας 22-23/2/2013 στη λεκάνη του Σαρανταπόταμου, (4) Παράδειγμα εξέλιξης διαδοχικών 6ωρων προγνώσεων βροχής στα Βίλια (20/2/2013 0:00 έως 22/2/2013 12:00) και (5) Σενάρια πρόγνωσης πλημμυρικών παροχών στην έξοδο της λεκάνης (Γύρα Στεφάνης).

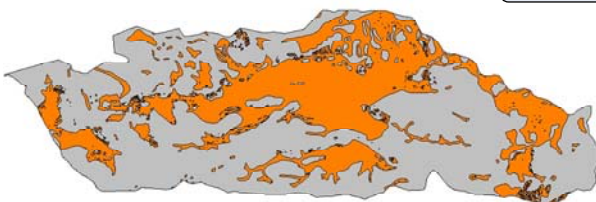
1. Σχηματοποίηση και παραμετροποίηση μοντέλου



Ψηφιακό μοντέλο εδάφους

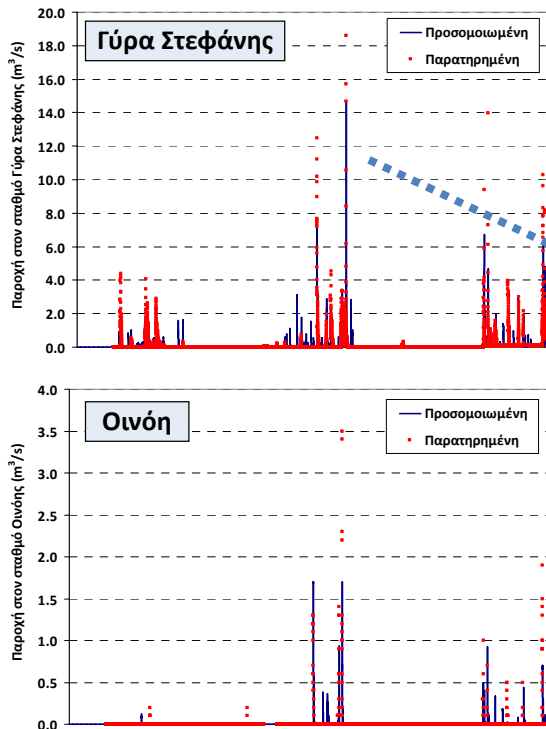


Υδρογραφικό δίκτυο & υπολεκάνες

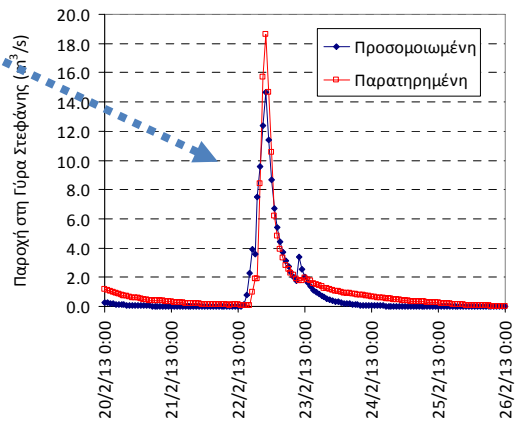


Μονάδες υδρολογικής απόκρισης
(διαχωρισμός σε δύο κατηγορίες, με όριο την τιμή CN = 50)

2. Προσαρμογή μοντέλου στα παρατηρημένα δείγματα ωριαίων παροχών



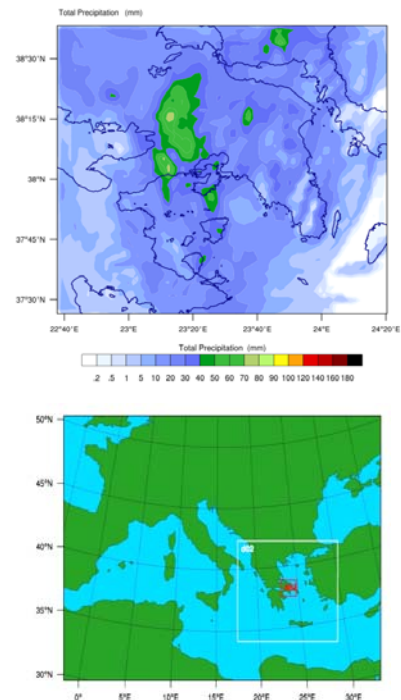
- Περίοδος προσομοίωσης: 1/10/2011-30/4/2014
- Περίοδος βαθμονόμησης: 13/12/2011-30/4/2013



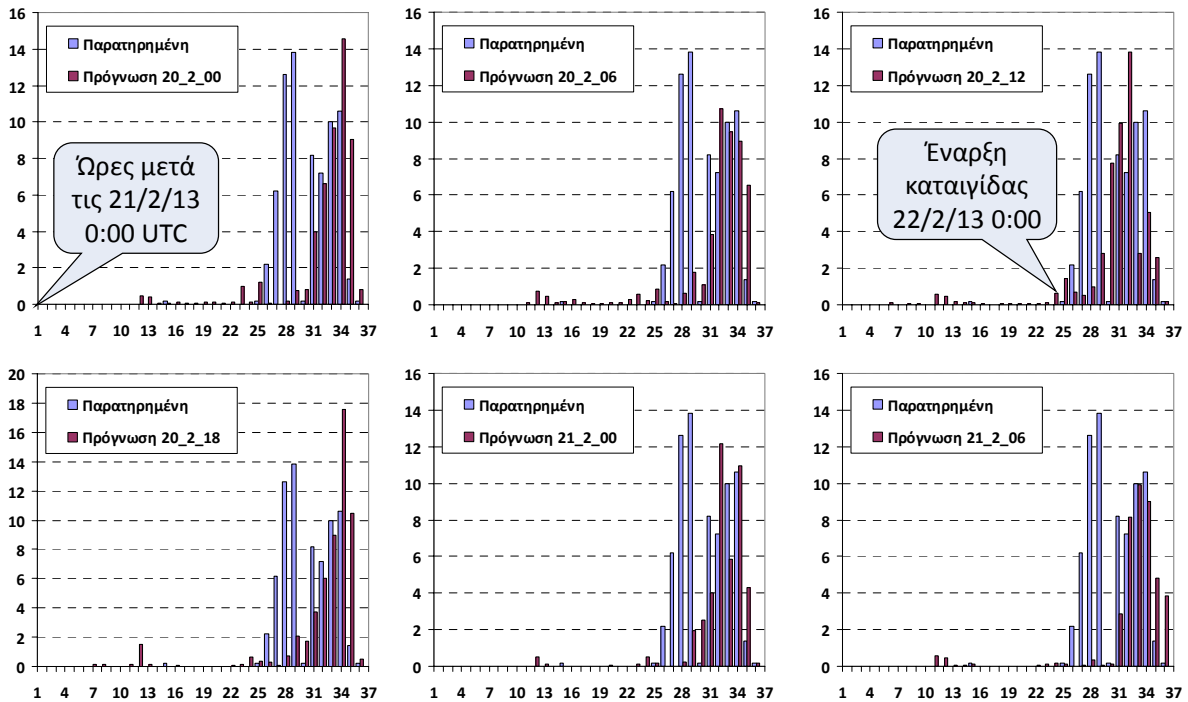
Προσομοίωση παροχών 20-25/2/2013

3. Προσομοίωση πεδίου βροχής επεισοδίου πλημμύρας 22-23/2/2013 στη λεκάνη του Σαρνταπόταμου

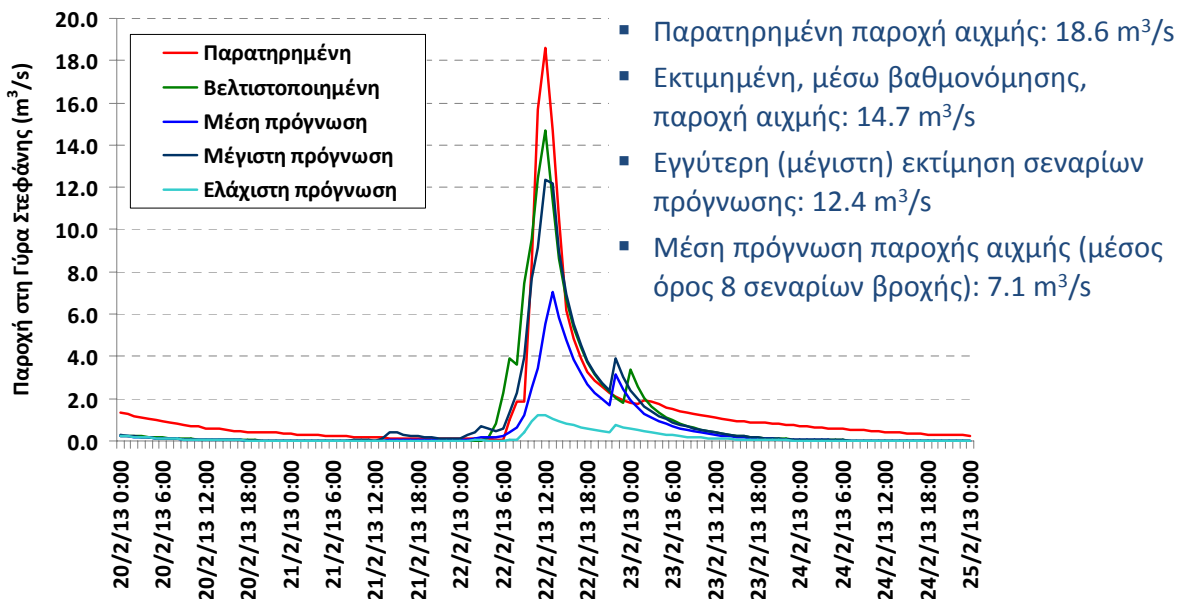
- Εφαρμογή αριθμητικού μοντέλου καιρού WRF σε τρία επάλληλα πλέγματα, χωρικής διακριτότητας 18×18, 6×6 και 2×2 km, αντίστοιχα.
- Προσομοίωση βροχόπτωσης με διαφορετικό χρόνο έναρξης (και άρα διαφορετικές αρχικές συνθήκες) και ίδιο χρόνο λήξης (άρα διαφορετική διάρκεια), που καλύπτει το σύνολο του επεισοδίου.
- Παραγωγή οκτώ διαδοχικών (ανά 6 h) σεναρίων πρόγνωσης, από 20/2/13 00:00 έως 21/2/13 18:00.
- Εκτίμηση σημειακής βροχόπτωσης στους σταθμούς Βίλια, Πράσινο και Μάνδρα, ως σταθμισμένου μέσου όρου των εγγύτερων κόμβων του πλέγματος.
- Αντικατάσταση «παρατηρημένων» τιμών επιφανειακής βροχόπτωσης υπολεκανών από τις αντίστοιχες προγνώσεις, για την παραγωγή σεναρίων πρόγνωσης της παροχής με το μοντέλο Υδρόγειος.



4. Παράδειγμα εξέλιξης διαδοχικών 6ωρων προγνώσεων βροχής στα Βίλια (20/2/2013 0:00 έως 22/2/2013 12:00)



5. Σενάρια πρόγνωσης πλημμυρικών παροχών στην έξοδο της λεκάνης (Γύρα Στεφάνης)



Η εγγύτερη (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.

Από την πρώτη αυτή εφαρμογή, συμπεραίνεται κατ' αρχήν, ότι η πρόγνωση πλημμύρας μέσω ενός υδρολογικού μοντέλου με δεδομένα εισόδου τα αποτελέσματα της αριθμητικής προγνώσεως βροχής (μετεωρολογική πρόγνωση, μοντέλο καιρού) μπορεί να έχει πρακτική χρησιμότητα. Εν τούτοις, η διαδικασία έχει και εμφανείς αδυναμίες. Πρώτον, τα σενάρια βροχής μπορεί να αποκλίνουν ισχυρά από τις σχετικές μετρήσεις, π.χ. προγνώσεις μπορούν να αγνοούν πλήρως μεγάλα τμήματα του υετογραφήματος, ενώ η μέση πλημμυρική αιχμή (που προέρχεται από τον μέσο όρο των σεναρίων βροχής και είναι περίπου αντίστοιχη της ντετερμινιστικής προγνώσεως) δύναται να υποεκτιμά σημαντικά την πραγματική αιχμή. Εικάζεται ότι η σχετική πρόγνωση της απορροής μπορεί να βελτιωθεί εάν τα δεδομένα εισόδου βροχής, που υπολογίζονται από την σταθμισμένη πρόγνωση βροχής στις περιοχές των σταθμών βροχής για χρήση στα πολύγωνα Thiessen, αντικατασταθούν από την μέση βροχή σε κάθε υπολεκάνη. Το βάσιμο της εικασίας αυτής επιβεβαιώθηκε στην έρευνα που ακολούθησε, η οποία περιγράφεται στο Παραδοτέο Π 4.4. Παρ' όλα τα δυνητικά οφέλη της αριθμητικής προγνώσεως καιρού για την πλημμυρική υδρολογία, στην υδρο-μετεωρολογική προγνωστική αλυσίδα η μετεωρολογική πρόγνωση εξακολουθεί να αποτελεί τον αδύναμο κρίκο.

3. Επίλογος

Η συνδυασμένη υδρο-μετεωρολογική πρόγνωση είναι μιά σχετικά νέα μεθοδολογία η οποία συνεχώς αναπτύσσεται (βλέπε μεταξύ άλλων, Koussis et al., 2003, Collischonn et al., 2005, Werner et al. 2005, Tucci and Collischonn 2006, Davolio, 2008, Yoshitani et al. 2009). Βελτιώσεις υπόσχεται η χρήση νέων προηγμένων τεχνολογιών, όπως ραντάρ καιρού και δορυφορικών παρατηρήσεων, οι οποίες δεν χρησιμοποιούνται στην παρούσα έρευνα. Τέλος, σημαντικό είναι να μελετηθεί εντατικά και σε βάθος η διάδοση της αβεβαιότητας στην προγνωστική αλυσίδα, όπως π.χ. έκαναν οι Hostache et al. (2011), όμως μιά τέτοια έρευνα ήταν πέραν των ορίων του προγράμματος «ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ».

4. Βιβλιογραφία

Collischonn, W., R. Haas, I. Andreolli and C.E. Morelli Tucci (2005) Forecasting River Uruguay flow using rainfall forecasts from a regional weather-prediction model, *J. Hydrol.*, **305** (1-4): 87-98.

Davolio, S, M. M. Miglietta, T. Diomede, C. Marsigli, A. Morgillo and A. Moscatello (2008) A meteo-hydrological prediction system based on a multi-model approach for precipitation forecasting, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **8**, 143–159.

Efstratiadis, A., I. Nalbantis, A. Koukouvinos, E. Rozos, and D. Koutsoyiannis (2008) HYDROGEIOS: A semi-distributed GIS-based hydrological model for modified river basins, *Hydrology and Earth System Sciences*, **12**, 989–1006.

Efstratiadis, A., K. Mazi, A. D. Koussis & D. Koutsoyiannis (2009) Flood modelling in complex hydrologic systems with sparsely resolved data, *EGU General Assembly 2009, Geophysical Research Abstracts, Vol. 11*, Vienna, 4157, European Geosciences Union.

Hostache, R., P. Matgen, A. Montanari, M. Montanari, L. Hoffmann and L. Pfister (2011). Propagation of uncertainties in coupled hydro-meteorological forecasting systems: A stochastic approach for the assessment of the total predictive uncertainty, *Atmospheric Research*, Volume **100**, Issues 2–3, Pages 263–274.

Koussis, A.D. (2001) Final Report for the EC project TELEFLEUR (DG 13), National Observatory of Athens.

Koussis, A. D., K. Lagouvardos, K. Mazi, V. Kotroni, D. Sitzmann, J. Lang, H. Zaiss, A. Buzzi and P. Malguzzi (2003) Flood forecasts for an urban basin with integrated hydro-meteorological model, *J. Hydrologic Engineering*, **8**(1), pp. 1-11.

Tucci, C.E.M. and W. Collischonn (2006) Flood forecasting, *WMO Bulletin* **55**(3): 179-184.

Werner, M., P. Reggiani, A.D. De Roo, P. Bates and E. Sprokereef (2005), Flood forecasting and warning at the river basin and at the European scale, *Natural Hazards*, **36**: 25-42.

Werner, M. G. F., J. Schellekens and J. C. J. Kwadijk (2006) Flood Early Warning Systems for Hydrological (Sub) Catchments (Part 2. Hydroinformatics), *Encyclopedia of Hydrological Sciences*.

Yoshitani, J., Z. Q. Chen, M. L. Kavas and K. Fukami (2009) Atmospheric Model-Based Streamflow Forecasting at Small, Mountainous Watersheds by a Distributed Hydrologic Model: Application to a Watershed in Japan, *J. Hydrol. Eng.*, **14**(10), 1107–1118.