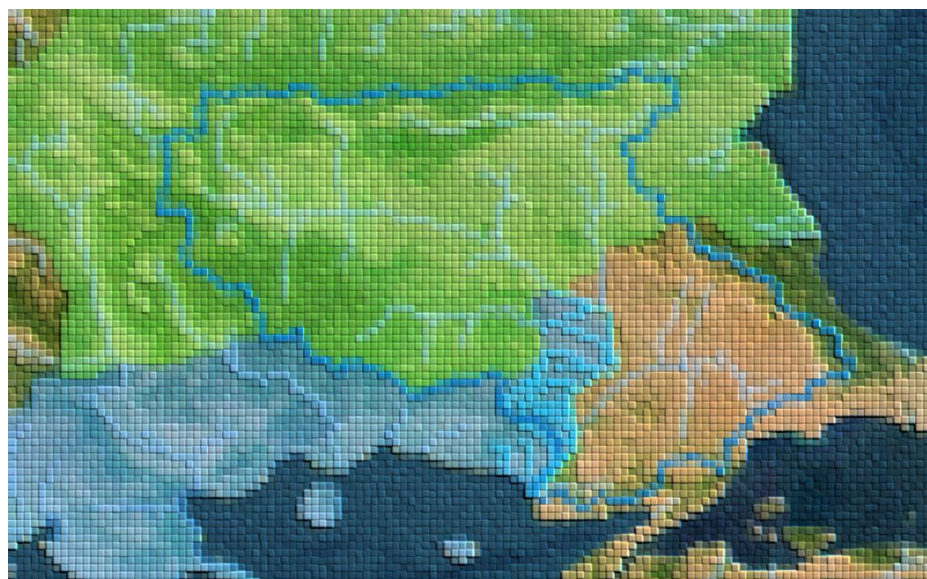




HELLENIC REPUBLIC



MINISTRY OF ENVIRONMENT AND ENERGY
GENERAL SECRETARIAT FOR NATURAL
ENVIRONMENT AND WATER
DIRECTORATE GENERAL FOR WATER



Interreg Greece-Bulgaria FLOODGUARD



European Regional Development Fund

FLOODGUARD

Integrated actions for joint coordination and responsiveness to
flood risks in the Cross Border area

DELIVERABLE 4.6.5.A - METEOROLOGICAL FORECASTING ΕΚΤΕΤΑΜΕΝΗ ΠΕΡΙΛΗΨΗ (ΕΛ)



EMVIS Consultants SA

February 2023

The Project is co-funded by the European Regional Development Fund (ERDF) and by national funds of the countries participating in the Interreg V-A "Greece-Bulgaria 2014-2020" Cooperation Programme



Έκδοση	Ημερομηνία	Σχόλια
1.0	6 Φεβρουαρίου, 2023	1 ^η έκδοση

This report was compiled by EMVIS Consultants SA on behalf of General Secretariat for Natural Environment and Water, Directorate General for Water, under the frame of the INTERREG Project “Integrated actions for joint coordination and responsiveness to flood risks in the Cross Border area – FLOODGUARD”

Disclaimer: The contents of this report are sole responsibility of *General Secretariat for Natural Environment and Water, Directorate General for Water* and can in no way be taken to reflect the views of the European Union, the participating countries the Managing Authority and the Joint Secretariat

ΕΚΤΕΤΑΜΕΝΗ ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διαθεσιμότητα έγκαιρων και αξιόπιστων επιχειρησιακών μετεωρολογικών προβλέψεων είναι απαραίτητη για την ανάπτυξη και την επιτυχή εφαρμογή ενός συστήματος έγκαιρης προειδοποίησης πλημμύρας.

Σήμερα, οι μετεωρολογικές προγνώσεις βασίζονται στα αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης της ατμόσφαιρας (μοντέλα πρόγνωσης καιρού), η ανάπτυξη των οποίων αποτέλεσε καθοριστικό παράγοντα στον τομέα της μετεωρολογίας και ιδιαίτερα στην πρόγνωση του καιρού.

Τα αριθμητικά μοντέλα πρόγνωσης καιρού έχουν τη δυνατότητα να παράγουν ακριβείς προβλέψεις των ατμοσφαιρικών παραμέτρων, όπως της βροχόπτωσης, της θερμοκρασίας του αέρα στα 2m, της υγρασίας και της ταχύτητας και της κατεύθυνσης του ανέμου, σε υψηλή χωρική και χρονική ανάλυση, για προγνωστικό χρόνο μεγαλύτερο των 3 ημερών.

Τα αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης της ατμόσφαιρας επιλύουν ένα σύνολο διαφορικών εξισώσεων μετεωρολογικών μεταβλητών με μερικές παραγώγους ως προς το χρόνο, πάνω σε ένα τρισδιάστατο χωρικό πλέγμα διακριτών σημείων, βασιζόμενες στις αρχές της διατήρησης της ορμής, της μάζας και της ενέργειας.

Για τις ανάγκες του παρόντος Έργου έγινε χρήση του αριθμητικού μοντέλου WRF (Weather Research and Forecasting model), ένα από τα πλέον σύγχρονα και αξιόπιστα αριθμητικά μοντέλα πρόγνωσης καιρού μέσης κλίμακας, το οποίο σχεδιάστηκε ώστε να εξυπηρετήσει τις ανάγκες τόσο του τομέα έρευνας της ατμόσφαιρας, όσο και της επιχειρησιακής πρόγνωσης καιρού, ενώ αποτελεί την αιχμή της επιστήμης στον τομέα των αριθμητικών μοντέλων πρόγνωσης του καιρού. Το παραπάνω μοντέλο ικανοποιεί ένα μεγάλο εύρος μετεωρολογικών εφαρμογών σε μια χωρική κλίμακα που κυμαίνεται από μερικές εκατοντάδες μέτρα έως εκατοντάδες χιλιόμετρα.

Οι εργασίες υλοποίησης του παραδοτέου Π4.6.5.Aiii χωρίστηκαν σε 2 βασικά στάδια. Στο 1^ο στάδιο έγιναν τα ακόλουθα:

1. Εγκατάσταση και βαθμονόμηση του αριθμητικού μοντέλου πρόγνωσης καιρού με σκοπό την παραγωγή προκαθορισμένων προβλέψεων 5 ημερών με οριζόντια απόσταση 5 χλμ. στην ευρύτερη περιοχή της λεκάνης απορροής της Μαρίτσας/ Έβρου.
2. Δημιουργία των απαραίτητων προγραμμάτων για την επεξεργασία των αιτιολογικών και συνθετικών μετεωρολογικών προβλέψεων που θα παρασχεθούν στο υδρολογικό μοντέλο στην ευρύτερη περιοχή της λεκάνης απορροής της Μαρίτσας/ Έβρου.
3. Ανάπτυξη των απαραίτητων προγραμμάτων (scripts) για την αυτοματοποιημένη και λειτουργική χρήση του αριθμητικού μοντέλου πρόγνωσης καιρού (ανάκτηση δεδομένων εισόδου, προεπεξεργασία, εκτέλεση μοντέλου, μεταποίηση),
4. Ανάπτυξη των απαραίτητων προγραμμάτων (scripts) για την αυτοματοποιημένη και λειτουργική ανάκτηση και επεξεργασία των προβλέψεων του συνόλου του συστήματος NCEP/ Global Ensemble Forecast System (με απόσταση 0,5 x 0,5 βαθμών) για την παροχή προβλέψεων σε σύνολο 5 ημερών και την εκτίμηση της προβλεπόμενης αβεβαιότητας στην ευρύτερη περιοχή της λεκάνης απορροής της Μαρίτσας/ Έβρου
5. Ανάπτυξη των απαραίτητων προγραμμάτων (scripts) για την αυτοματοποιημένη και λειτουργική διάδοσης των προβλέψεων καιρού.
6. Δημιουργία ενός ολοκληρωμένου συστήματος προβλέψεων για τις καιρικές συνθήκες.
7. Παραγωγή προκαθορισμένων συνολικών προβλέψεων σε καθημερινή βάση.
8. Δημιουργία αρχείων σε επεξεργάσιμη μορφή για την απευθείας χρήση τους ως αρχεία εισόδου στο υδρολογικό μοντέλο.

Στο 2^ο στάδιο έγινε ενδελεχή αξιολόγηση των προβλέψεων του μετεωρολογικού μοντέλου.

Μεθοδολογία Εφαρμογής

1^ο Στάδιο

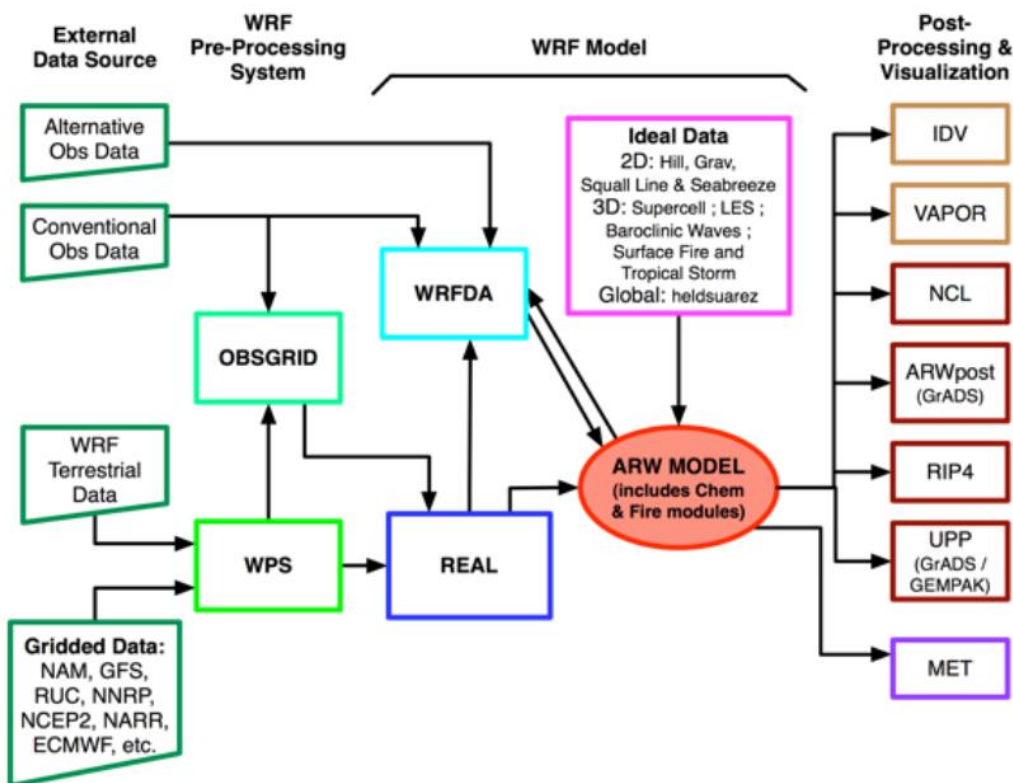
(I) Για τις ανάγκες του παρόντος έργου έγινε χρήση του αριθμητικού μοντέλου WRF (Weather Research and Forecasting model), ένα από τα πλέον σύγχρονα και αξιόπιστα αριθμητικά μοντέλα πρόγνωσης καιρού μέσης κλίμακας, το οποίο σχεδιάστηκε ώστε να εξυπηρετήσει τις ανάγκες τόσο του τομέα έρευνας της ατμόσφαιρας, όσο και της επιχειρησιακής πρόγνωσης καιρού, ενώ αποτελεί την αιχμή της επιστήμης στον τομέα των αριθμητικών μοντέλων πρόγνωσης του καιρού.

Το WRF έχει δύο δυναμικούς πυρήνες: Τον Advanced Research WRF (ARW) και τον Nonhydrostatic Mesoscale Model (NMM) Οι δυναμικοί πυρήνες περιλαμβάνουν κυρίως την οριζόντια μεταφορά, την βαροβαθμίδα, την δύναμη Coriolis, την άνωση, την διάχυση και τα βήματα ολοκλήρωσης των εξισώσεων. Και οι δύο πυρήνες είναι Eulerian με κατακόρυφες συντεταγμένες που ακολουθούν την ορογραφία. Η ανάπτυξη του ARW γίνεται κυρίως στο NCAR/MMM (Mesoscale & Microscale Meteorology) ενώ η ανάπτυξη του NMM πραγματοποιείται από το NCEP/EMC (Environmental Modeling Center) και υποστήριξη παρέχεται από το NCAR/DTC (Developmental Testbed Center).

Το μοντέλο WRF-ARW v4 είναι ελεύθερο λογισμικό ανοιχτού κώδικα ενώ χρησιμοποιείται επιχειρησιακά ή ερευνητικά από πλήθος μετεωρολογικών υπηρεσιών, ερευνητικών κέντρων και πανεπιστημίων πολλών χωρών, μεταξύ των οποίων και η Ελλάδα και είναι αυτό που χρησιμοποιήσαμε επιχειρησιακά στο παρόν Έργο.

Οι κύριες συνιστώσες του συστήματος WRF – ARW v4 παρουσιάζονται στο διάγραμμα του σχήματος 1. Το αριθμητικό μοντέλο αποτελείται από το σύστημα προ - επεξεργασίας των δεδομένων (WPS), το WRF -ARW Model (το σύστημα παραμετροποίησης των φυσικών διεργασιών), καθώς και το σύστημα μετα - επεξεργασίας και οπτικοποίησης των αποτελεσμάτων του μοντέλου.

WRF Modeling System Flow Chart



Σχήμα 1. Δομή του συστήματος WRF

Το WRF – ARW διαθέτει προπαρασκευαστικό αλγόριθμο (WPS - WRF Preprocessing System) για την αφομοίωση της τοπογραφίας (geogrid) και την αρχικοποίηση των προσομοιώσεων (ungrrib, metgrid), ενώ παρέχει τη δυνατότητα για ρεαλιστικές και εξιδανικευμένες προσομοιώσεις από τοπική μέχρι και συνοπτική κλίμακα. Το geogrid περιέχει πληροφορίες για την προβολή του χάρτη και παρεμβάλλει στατικά γεωγραφικά δεδομένα, το ungrrib εξάγει μετεωρολογικά πεδία από τα διαμορφωμένα αρχεία GRIB και το metgrid παρεμβάλλει οριζόντια τα μετεωρολογικά πεδία που εξάγονται από το ungrrib. Το GRIB είναι ένα τύπος αρχείου που έχει προταθεί από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Καιρού (WMO, World Meteorological Organization) για την αποθήκευση κανονικά κατανεμημένων πεδίων.

Ο μηχανισμός ανάπτυξης του WPS παρέχει επιλογές για την εφαρμογή του WPS σε μια ποικιλία από πλατφόρμες. Όταν είναι διαθέσιμες βιβλιοθήκες που επιτρέπουν παράλληλη προσομοίωση (π.χ., MPI) και κατάλληλοι μεταγλωττιστές, τα προγράμματα metgrid και geogrid μπορούν να πραγματοποιούν προσομοιώσεις με χρήση κατανεμημένης μνήμης, η οποία επιτρέπει σε μεγάλους τομείς του μοντέλου που επεξεργάζονται, να πραγματοποιούνται σε λιγότερο χρόνο.

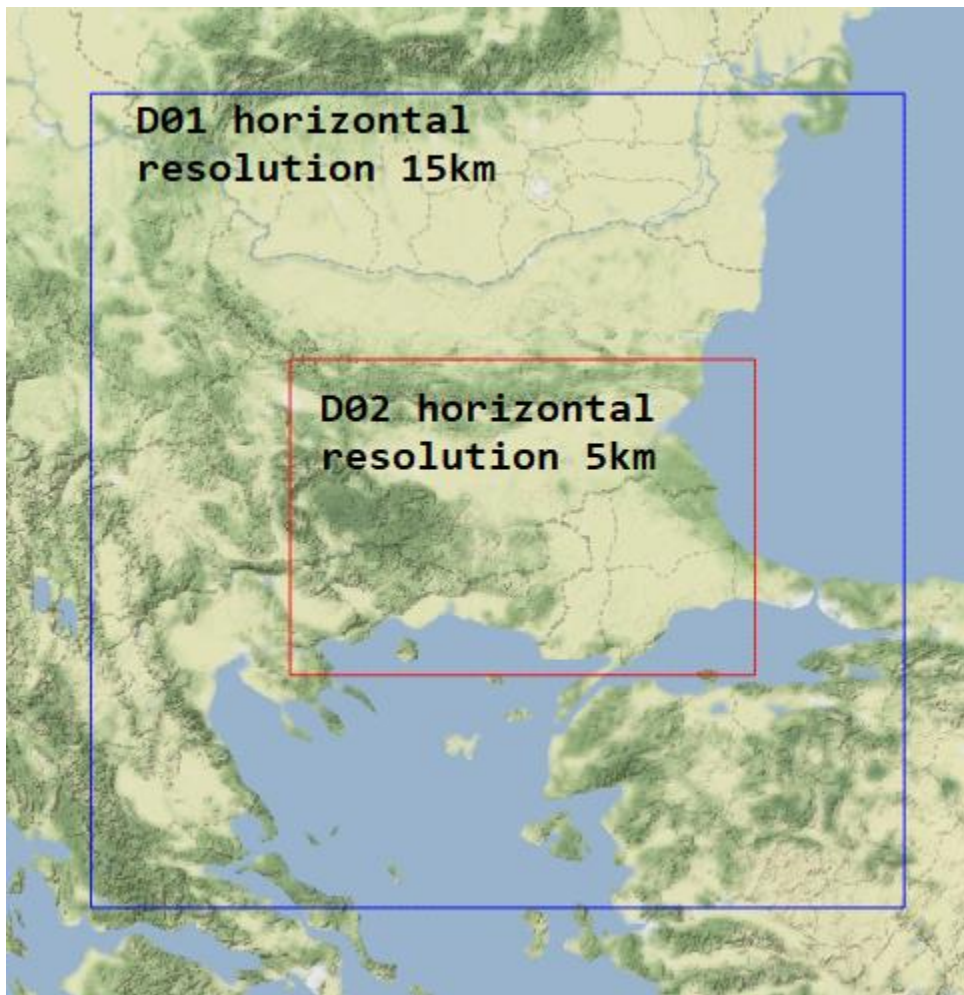
Το WRF – ARW που κάναμε χρήση στο παρόν Έργο διαθέτει σειρά παραμετροποιήσεων (σχήματα) διαφόρων μηχανισμών στην ατμόσφαιρα όπως η μικροφυσική, η τυρβώδης μεταφορά, το οριακό στρώμα, τα νέφη κατακόρυφης μεταφοράς και το ενεργειακό ισοζύγιο. Τα παραπάνω σχήματα προϋπάρχουν στον αλγόριθμο του ARW και επιλέγονται από το χρήστη. Η επιλογή των σχημάτων παραμετροποίησης των μηχανισμών της ατμόσφαιρας αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα του αριθμητικού μοντέλου WRF – ARW, καθώς δίνει τη δυνατότητα καλύτερης προσαρμογής του μοντέλου, και επομένως και καλύτερων

προγνώσεων, στις ιδιαιτερότητες της περιοχής προσομοίωσης (λεκάνη απορροής ποταμού Έβρου/Μαρίτσα).

II) Στο παρόν Έργο με τη χρήση του αριθμητικού μετεωρολογικού μοντέλου WRF- ARW δημιουργήθηκαν 2 πλέγματα μονής εμφωλεύσεως (one-way nesting) για την καλύτερη προσαρμογή των προγνώσεων στη χωρική ανάλυση των 5x5 Km. Το πρώτο πλέγμα [d01] καλύπτει μεγάλο μέρος της Κεντρικής, Νοτιοανατολικής και Ανατολικής Ευρώπης, καθώς και τμήμα της Τουρκίας, με χωρική ανάλυση 15 km. Το δεύτερο [d02] με χωρική ανάλυση 5 km καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος της Βουλγαρίας και της Βορειοανατολικής Ελλάδας, καθώς και τμήμα της Ανατολικής Θράκης (Ευρωπαϊκή Τουρκία).

Στον κατακόρυφο άξονα του τρισδιάστατου μοντέλου έγινε επιλογή 40 επιπέδων, με την κορυφή του υπολογιστικού πλέγματος να λογίζεται στο ύψος των 50 hPa.

Η γεωγραφική κάλυψη των παραπάνω δύο πλεγμάτων φαίνεται στο Σχήμα 2.



Σχήμα 2. Τα δύο πλέγματα που χρησιμοποιήθηκαν από το WRF-ARW στο παρόν Έργο. Το εξωτερικό, d01 (15x15Km) και το εσωτερικό, d02 (5x5Km)

Τα χαρακτηριστικά της τοπογραφίας (land use) κάθε πλέγματος προσομοίωσης ελήφθησαν από τη βάση δεδομένων των φασματόμετρων MODIS, των δορυφόρων Terra και Aqua της NASA, ενώ τα χαρακτηριστικά της ορογραφίας (υψόμετρο) ελήφθησαν από τη βάση δεδομένων της υπηρεσίας Γεωλογικής Έρευνας των ΗΠΑ (U.S. Geological Survey, USGS), στη μέγιστη επιτρεπτή ανάλυση.

Για τις αρχικές και οριακές συνθήκες του WRF – ARW χρησιμοποιούνται δεδομένα από το GFS (Global Forecasting System) του Εθνικού Κέντρου Περιβαλλοντικών Προγνώσεων (NCEP) του NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) των Η.Π.Α., τα οποία παρέχονται σε χωρική ανάλυση 0.25 της μούρας (~28Km) και χρονικό βήμα 3 ωρών.

Τα δεδομένα GFS για την αρχικοποίηση του WRF – ARW, παρέχονται ελεύθερα από το NCEP/NOAA στην κωδικοποιημένη μορφή GRIB2.

Οι παραπάνω διεργασίες πραγματοποιούνται αυτόματα μέσω κατάλληλων εφαρμογών γραμμής εντολών που αναπτύχθηκαν. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε η γλώσσα προγραμματισμού Python, σε περιβάλλον Linux. Για την αυτοματοποίηση ορίστηκαν χρονοπρογραμματισμένες διεργασίες με τη χρήση του προγραμματιστή εργασιών cron.

(IIIa) Για τις ανάγκες του παρόντος Έργου αναπτύχθηκε ολοκληρωμένη σειρά εφαρμογών γραμμής εντολών, με σκοπό την ανάκτηση και επεξεργασία μετεωρολογικών προγνώσεων από το Global Ensemble Forecast System (GEFS) των Εθνικών Κέντρων Περιβαλλοντικής Πρόβλεψης (NCEP, National Centers for Environmental Prediction) των Η.Π.Α, για προγνωστικό χρόνο 5 ημερών σε χωρική ανάλυση 0.5 x 0.5 μίρες (~50x50Km) για την ευρύτερη περιοχή της λεκάνης απορροής του ποταμού Έβρου/Μαρίτσας. Οι εφαρμογές αναπτύχθηκαν με την γλώσσα προγραμματισμού Python, σε περιβάλλον Linux και διακρίνονται στις εξής:

- Πρόγραμμα μεταφόρτωσης αρχείων GRIB του μοντέλου GEFS
- Πρόγραμμα εξαγωγής δεδομένων
- Πρόγραμμα επεξεργασίας και παρουσίασης των προγνώσεων

Το σύστημα Global Ensemble Forecast System (GEFS) παράγει 21 προγνώσεις, με την μία από αυτές, αυτή που την παρήγαγε με τις πιο ακριβείς αρχικές συνθήκες να είναι η πρόγνωση ελέγχου. Οι υπόλοιπες 20 γίνονται με “διαταραχές στις αρχικές συνθήκες”. Από όλες αυτές εξάγεται το “Ensemble”, με το φάσμα των πιθανών αποτελεσμάτων και την πιθανότητα εμφάνισής τους.

Οι παραπάνω προγνώσεις, καθώς παρέχουν την παράμετρο της πιθανότητας εμφάνισης για κάθε μετεωρολογική παράμετρο, συμβάλουν στην εκτίμηση της προβλεπόμενης αβεβαιότητας στα δεδομένα εισαγωγής στο υδρολογικό μοντέλο.

(IIIb) Το μετεωρολογικό μοντέλο πρόγνωσης καιρού έχει ρυθμιστεί με τέτοιο τρόπο ώστε οι προσομοιώσεις – προγνώσεις να διενεργούνται 2 φορές / ημέρα με χρόνο έναρξης στις 00:00 UTC και στις 12:00 UTC. Ο παραπάνω προγραμματισμός πραγματοποιήθηκε με την ανάπτυξη εφαρμογών γραμμής εντολών για την εκτέλεση των προπαρασκευαστικών προγραμμάτων και του ίδιου του μοντέλου, χρησιμοποιώντας τα εξής εργαλεία:

- Γλώσσα προγραμματισμού Python
- Γλώσσα προγραμματισμού κελύφους bash

Η χωρική ανάλυση της πρόγνωσης είναι τα 5x5 Km, το βήμα πρόγνωσης είναι η 1 ώρα, ενώ ο προγνωστικός χρόνος είναι οι 5,5 ημέρες. Όλα τα αριθμητικά αρχεία των δεδομένων της πρόγνωσης έχουν κατάλληλη μορφή ώστε να μπορούν αν εισαχθούν στη συνέχεια στο υδρολογικό μοντέλο για την πρόβλεψη των πλημμυρών.

2^ο Στάδιο

Η πρόγνωση του καιρού, παρά τις σημαντικές βελτιώσεις των τελευταίων ετών στα μετεωρολογικά μοντέλα, παρουσιάζει ακόμα σφάλματα εξαιτίας κυρίως των λόγων που αναφέρονται παρακάτω:

1. Προβλήματα στις αρχικές συνθήκες των μετεωρολογικών μοντέλων

2. Αβεβαιότητα λόγω της χρήσης προσεγγιστικών μεθόδων προσομοίωσης των ατμοσφαιρικών διεργασιών
3. Χωρική ανάλυση αριθμητικών μοντέλων
4. Υπολογιστική ισχύς Ηλεκτρονικών Υπολογιστών.
5. Σφάλματα στις πλευρικές οριακές συνθήκες (περιοχικά μοντέλα)
6. Ελλιπής κατανόηση διεργασιών του συστήματος γης- ατμόσφαιρας

Εξαιτίας των παραπάνω, είναι επιτακτική η ανάγκη αξιολόγησης των προγνώσεων που παράγονται από το αριθμητικό μοντέλο, ώστε να γνωρίζουμε κάθε φορά την ακρίβειά τους, καθώς αυτές αποτελούν τα δεδομένα εισόδου στο υδρολογικό μοντέλο, συμβάλλοντας στον προσδιορισμό των υδρολογικών παραμέτρων που απαιτούνται για την υδραυλική προσομοίωση της πλημμύρας.

Η αξιολόγηση γίνεται με βάση τις καταγραφές των κοντινότερων αυτόματων μετεωρολογικών σταθμών, των οποίων πρωτίστως τα δεδομένα θα ελέγχονται για τη διαθεσιμότητα – ποιότητά τους.

Το σύστημα μέσω μιας σειράς κατάλληλων αλγορίθμων αυτόματα αξιολογεί τις παραγόμενες προγνώσεις σε μηνιαία βάση και εξάγει το ποσοστιαίο σφάλμα για κάθε μία από τις απαιτούμενες μετεωρολογικές παραμέτρους. Για το σκοπό αυτό έχει αναπτυχθεί εφαρμογή χρησιμοποιώντας τη γλώσσα προγραμματισμού Python και τις βιβλιοθήκες:

- NumPy - για την αριθμητική ανάλυση των προγνώσεων
- Pandas – για την παραγωγή αποτελεσμάτων σε αρχεία Excel

Στο 2ο στάδιο του Έργου έγινε επίσης και μια ενδελεχή μελέτη αξιοπιστίας των παραγόμενων προγνώσεων του μετεωρολογικού μοντέλου.

Οι προγνώσεις βροχόπτωσης και θερμοκρασίας αξιολογήθηκαν με βάση ποιοτικές μετρήσεις από έξι αυτόματους μετεωρολογικούς σταθμούς επιφανείας του δικτύου του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών, που βρίσκονται στην περιοχή μελέτης και καλύπτουν μεγάλο τμήμα της λεκάνης απορροής του ποταμού Έβρου. Για την παρούσα αξιολόγηση χρησιμοποιήσαμε τιμές ημερήσιας ολικής βροχόπτωσης, μέσης ημερήσια θερμοκρασίας στα 2 μέτρα, ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία στα 2 μέτρα, για την περίοδο από 1 Ιανουαρίου έως 30 Ιουνίου 2022.

Τα κύρια συμπεράσματα της αξιολόγησης είναι:

- (i) Το μετεωρολογικό μοντέλο προβλέπει την ποσότητα βροχόπτωσης, καθώς και τις ημέρες βροχόπτωσης με αρκετά καλή ακρίβεια και μέσα στα πλαίσια που παρατηρούνται διεθνώς. Τα καλύτερα αποτελέσματα παρατηρήθηκαν στις 3 πρώτες ημέρες πρόγνωσης.
- (ii) Το μετεωρολογικό μοντέλο προβλέπει με μεγάλη επιτυχία τη μέση ημερήσια θεοκρασία στα 2 μέτρα, καθώς και τις ελάχιστες και τις μέγιστες τιμές του 24ώρου.