



Μοντέλα αριθμητικής πρόγνωσης του καιρού

'Ένα ισχυρό εργαλείο για την μελέτη της ατμόσφαιρας

Θοδωρής Μ. Γιάνναρος

Μεταδιδακτορικός Ερευνητής

Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών

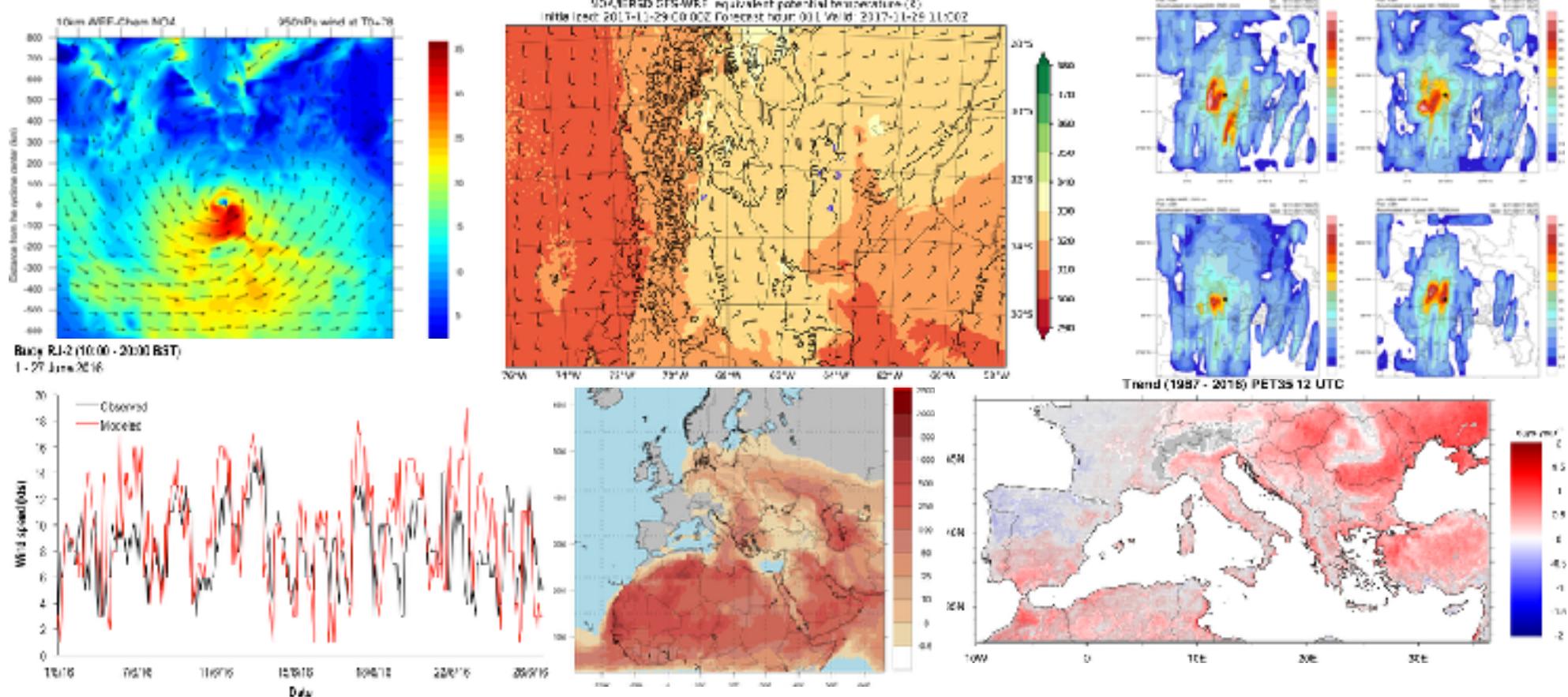
Ινστιτούτο Ερευνών Περιβάλλοντος & Βιώσιμης Ανάπτυξης

Email: thgian@noa.gr

Στόχοι της ομιλίας



- Εισαγωγή στην επιστήμη της **αριθμητικής πρόγνωσης** του καιρού
- Κατανόηση της λειτουργίας των **αριθμητικών μοντέλων**, των **πλεονεκτημάτων** αλλά και των **περιορισμών** τους
- Παρουσίαση των δυνατοτήτων ενός σύγχρονου αριθμητικού μοντέλου, μέσα από τα **αποτελέσματα** της εφαρμογής του για την επίλυση και μελέτη **πραγματικών προβλημάτων**



Μία εικόνα αξίζει όσο χίλιες λέξεις

500hPa geopotential height

Anomaly correlation

12-month running mean

(centered on the middle of the window)

Day 7 NHem

Day 7 SHem

Day 10 NHem

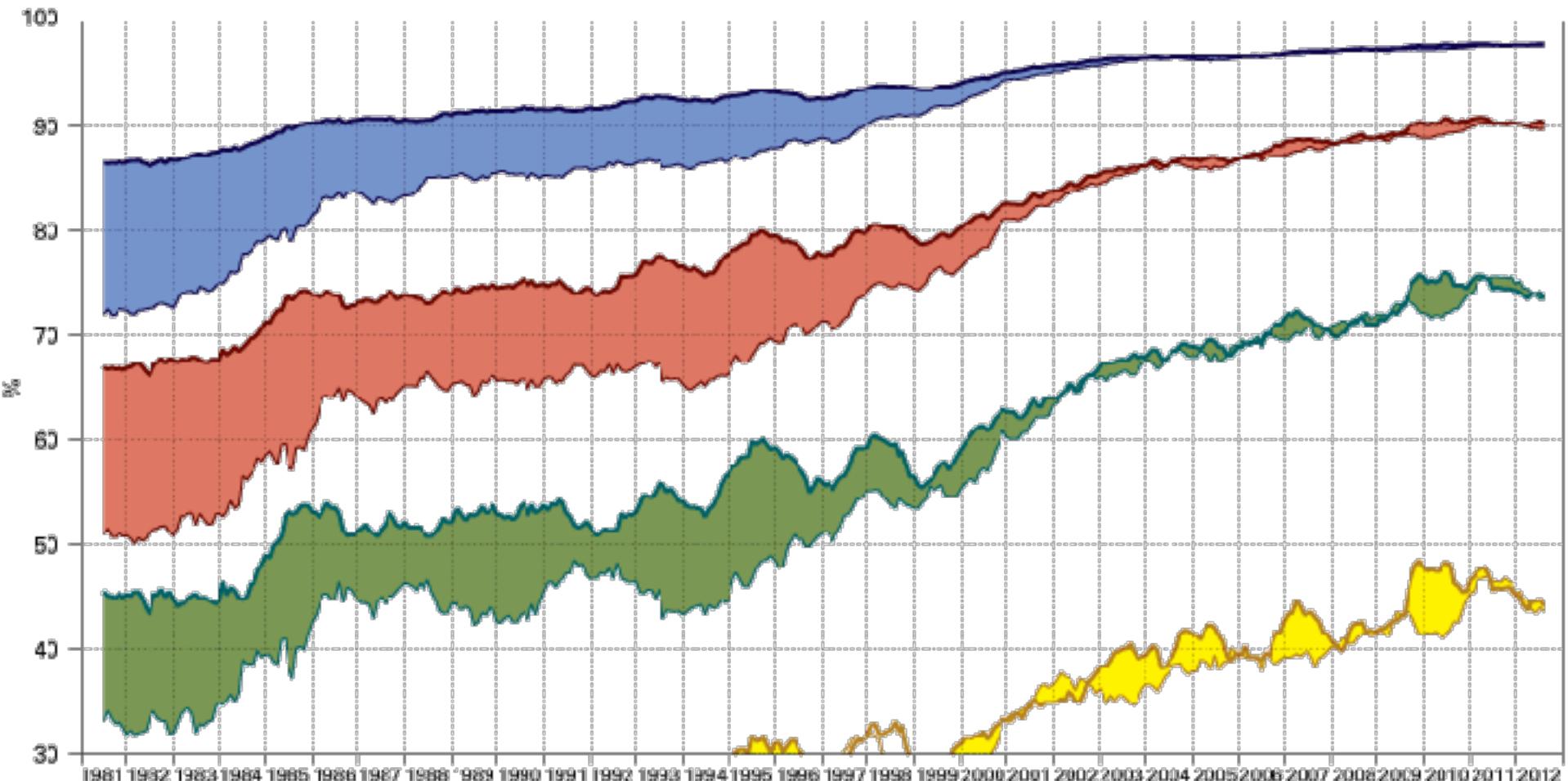
Day 10 SHem

Day 3 NHem

Day 3 SHem

Day 5 NHem

Day 5 SHem



Το γράφημα παρουσιάζει την εξέλιξη της ικανότητας πρόγνωσης του γεωδυναμικού ύψους στα 500 hPa, από το IFS (Integrated Forecasting System) του ECMWF

Η σύγχρονη αριθμητική πρόγνωση...

- Αποτελεί μία από τις επιστημονικές δραστηριότητες με τα μεγαλύτερα επίπεδα **συνεργασίας**

Μετεωρολογικά δεδομένα από σχεδόν όλα τα σημεία του πλανήτη ανταλλάζονται **καθημερινά** μεταξύ των μετεωρολογικών υπηρεσιών και των ερευνητικών φορέων

- Απαιτεί την ικανότητα της προσομοίωσης ατμοσφαιρικών διεργασιών σε ένα **ευρύ φάσμα κλιμάκων**, από την μικροφυσική των νεφών μέχρι τα πλανητικά κύματα
- Αξιοποιεί τους ισχυρότερους υπερυπολογιστές (**super-computers**) στον κόσμο, με το λογισμικό των μοντέλων να αποτελείται από **εκατομμύρια γραμμές κώδικα**
- Έχει επιτρέψει να σωθούν αμέτρητες **ζωές** και να εξοικονομηθούν τεράστια ποσά **χρημάτων**

Η έγκαιρη πρόγνωση **έντονων** και **ακραίων** καιρικών φαινομένων μπορεί να σώσει ζωές

- Έχει οδηγήσει στην παραγωγή ασύλληπτου **όγκου** μετεωρολογικών **δεδομένων Δορυφορικά** δεδομένα, εκατοντάδες χιλιάδες επίγειοι μετεωρολογικοί **σταθμοί**, χιλιάδες **ραδιοβολίσεις**, μετρήσεις από **πλοία** και **σημαδούρες**, και δίκτυα ανίχνευσης **κεραυνικής** δραστηριότητας

Μία σιωπηρή επανάσταση

Από την ανυπαρξία της αριθμητικής πρόγνωσης τη δεκαετία του 1950, έχουμε σήμερα φτάσει στα **υψηλότερα επίπεδα προγνωσιμότητας** του καιρού. Σε αυτό συνετέλεσαν:

- Η σχεδόν εκρηκτική αύξηση της **υπολογιστικής δύναμης** των υπολογιστών και η “γέννηση” των υπερυπολογιστών (**super-computers**), η οποία επέτρεψε την εφαρμογή πιο **σύνθετων** και ακριβών **αριθμητικών μεθόδων**
- Η βελτίωση της κατανόησης διαφόρων **φυσικών διεργασιών** μικρής κλίμακας (π.χ. νέφη, υετός, τυρβώδης μεταφορά ορμής, θερμότητας, υγρασίας και ορμής), και η ενσωμάτωση αντίστοιχων παραμετροποιήσεων στα σύγχρονα μοντέλα
- Η ραγδαία αύξηση της διαθεσιμότητας **παρατηρησιακών** δεδομένων, ιδιαίτερα όμως η πρόσβαση σε **δορυφορικά** δεδομένα, η οποία επέτρεψε την καλύτερη αναπαράσταση του **παρόντος καιρού**
- Η ανάπτυξη περισσότερο ακριβών μεθόδων για την **αφομοίωση** του αυξανόμενου όγκου παρατηρησιακών δεδομένων, η οποία οδήγησε στη **βελτίωση** της **ακρίβειας** των πεδίων που χρησιμοποιούνται για την **αρχικοποίηση** των μοντέλων

Το μανιφέστο του Bjerkness - 1904



Vilhelm Bjerkness (1862 - 1951), Νορβηγός Φυσικός - Μετεωρολόγος
“...the **necessary** and **sufficient** conditions for the rational solution of weather forecasting are the following:

1. A sufficiently **accurate knowledge** of the **state** of the atmosphere **at a given time**
2. A sufficiently **accurate knowledge** of the **laws** according to which one state of the atmosphere develops from another.”

Σύμφωνα με τον Bjerkness, για την **επιστημονικά ορθή** πρόγνωση του καιρού υπάρχουν 2 προϋποθέσεις:

- Η **διάγνωση** του παρόντος καιρού (**αρχικές συνθήκες**)
- Η γνώση των **Φυσικών νόμων** που διέπουν την εξέλιξη της ατμόσφαιρας (**πρόγνωση**)

Αναλύοντας την ιδέα του Bjerkness

- Η ατμόσφαιρα αποτελεί ένα **Φυσικό σύστημα**
- Η συμπεριφορά της διέπεται από **νόμους της φυσικής**
- Οι φυσικοί αυτοί νόμοι μπορούν να περιγραφούν με τη βοήθεια **μαθηματικών εξισώσεων**
- Χρησιμοποιώντας **παρατηρήσεις** (μετρήσεις) μπορούμε να καθορίσουμε την κατάσταση της ατμόσφαιρας μια ορισμένη αρχική στιγμή: “**Παρών καιρός**”
- Επιλύοντας τις **εξισώσεις** μπορούμε να υπολογίσουμε πως η αρχική κατάσταση της ατμόσφαιρας θα μεταβληθεί με το χρόνο: “**Μέλλων καιρός**”

ΑΛΛΑ...

- Το σύστημα των εξισώσεων που περιγράφει την ατμόσφαιρα και την εξέλιξη της με το χρόνο είναι **μη γραμμικό**, οπότε χρειάζεται ένας ισχυρός υπολογιστής για την επίλυση του
- Η ακρίβεια της μεθόδου ελαττώνεται όσο αυξάνεται ο προγνωστικός ορίζοντας, καθώς η **προγνωσιμότητα** της ατμόσφαιρας είναι εγγενώς **περιορισμένη** (χάος)

Η πρώτη εφαρμογή από τον Richardson - 1922



Lewis Fry Richardson (1881 - 1953), Βρετανός Μαθηματικός - Φυσικός

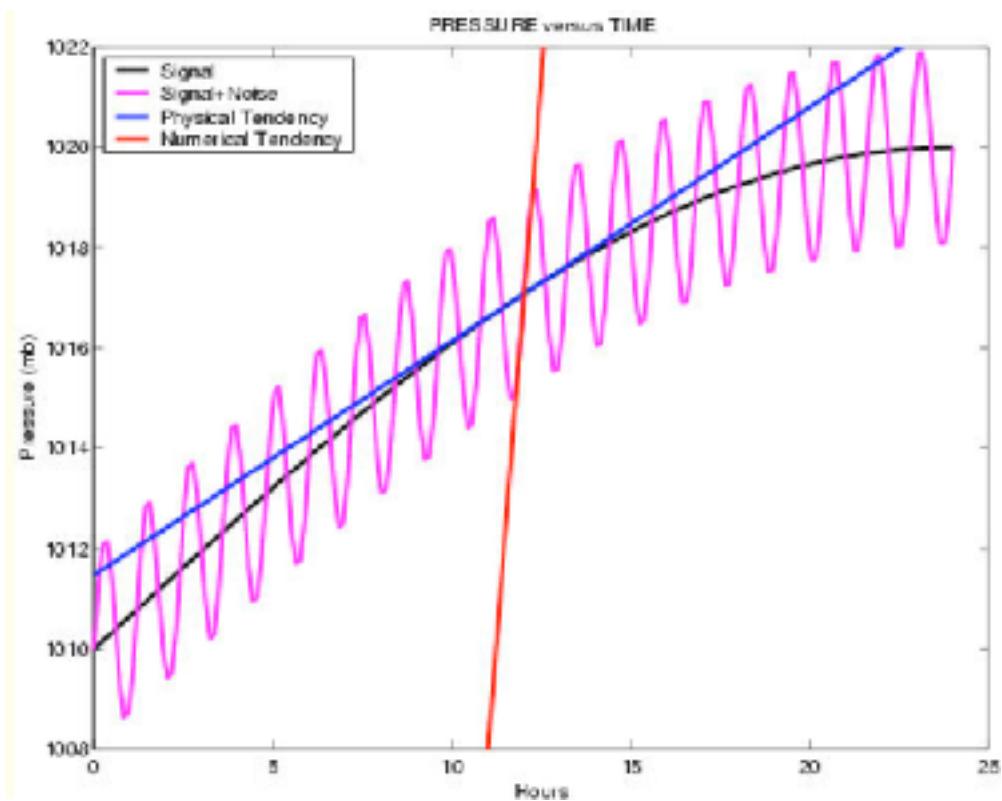
Weather Prediction by Numerical Process

Πραγματοποίησε την **πρώτη** αριθμητική πρόγνωση του καιρού, με στόχο τον υπολογισμό της ατμοσφαιρικής **πίεσης** σε **1 σημείο, 6 ώρες** μετά από την αρχική στιγμή (20 Μαΐου 1910, 07Z).

- **Αρχικές συνθήκες:** μετρήσεις από ένα αραιό δίκτυο παρατηρήσεων
- Επίλυση του **πλήρες** σετ των εξισώσεων μερικών παραγώγων της ατμόσφαιρας (**πρωτογενείς** εξισώσεις).
- **Αριθμητικές** μέθοδοι: εφαρμογή **πεπερασμένων** διαφορών για τον υπολογισμό των **μεταβολών** της ορμής, της θερμοκρασίας και της πίεσης, με **διακριτοποίηση** στην οριζόντια και την κατακόρυφη διάσταση

Καταστροφική αποτυχία: 1000+ ώρες για μία πρόγνωση 6 ωρών, η οποία κατέληξε σε υπολογισμό $\Delta p=145 \text{ hPa}$!

Οι λόγοι της αποτυχίας του Richardson



- Ουσιαστικά, υπολόγισε το Δp στη βάση των **βαρυτικών κυμάτων**, τα οποία έχουν μεγάλα πλάτη ταλάντωσης και μεγάλες συχνότητες, αλλά επηρεάζουν **ελάχιστα** την μετεωρολογία
- Με άλλα λόγια, ο υπολογισμός του Richardson ήταν μια **παρέκταση** των υψηλής συχνότητας ταλαντώσεων των **βαρυτικών κυμάτων** στο μέλλον
- Το χρονικό βήμα (Δt) που υιοθέτησε για την ολοκλήρωση των εξισώσεων μερικών παραγώγων της ατμόσφαιρας ήταν μεγάλο, ώστε οδηγήθηκε στη χρήση στιγμιαίων τιμών πίεσης και όχι της τάσης αυτής
- Αγνόησε, έτσι, τη ροπή της ατμόσφαιρας να **αποκρίνεται γρήγορα** στις μεταβολές: η στιγμιαία αύξηση της πίεσης γεννά **βαροβαθμίδα**, η οποία τείνει να αναιρέσει το αίτιο της δημιουργίας της

Το όραμα του Richardson



*Imagine a large hall like a theatre, except that the circles and galleries go right round through the space usually occupied by the stage. The walls of this chamber are painted to form a **map of the globe**. A myriad **computers** are at work upon the weather of the part of the map each sits, but each computer attends to only **one equation** or **part of an equation**. Numerous little “night signs” display the **instantaneous** values so that **neighbouring** computers can read them.*

Με την παραπάνω γλαφυρή περιγραφή του, το **1922**, ο Richardson οραματίστηκε τη **σύγχρονη αριθμητική πρόγνωση**:

Υπερ-υπολογιστές (**super-computers**) αποτελούμενοι από πλήθος επεξεργαστών (**CPUs**) αναλαμβάνουν την επίλυση των εξισώσεων. Κάθε επεξεργαστής δουλεύει επάνω σε ένα συγκεκριμένο **τμήμα** μίας περιοχής και **επικοινωνεί** τις λύσεις του στους υπόλοιπους.

Τα άλματα της περιόδου 1920 - 1950

Δυναμική μετεωρολογία

- Κύματα Rossby
- Σχεδόν-γεωστροφική προσέγγιση
- Βαροκλινική αστάθεια

Αριθμητική ανάλυση

- Κριτήριο Courant-Friedrichs-Lowy (CFL)

Μετεωρολογικές παρατηρήσεις

- Καθ' ύψος μετρήσεις με χρήση ραδιοβολίδων

Υπολογισμοί

- Κατασκευή του ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Computer)



John von Neumann (1903 - 1957), Ούγρος/Αμερικανός Φυσικός - Μαθηματικός - Μηχανικός Υπολογιστών

*"Weather forecasting was, par excellence, a **scientific problem** suitable for solution using a **large computer**"*

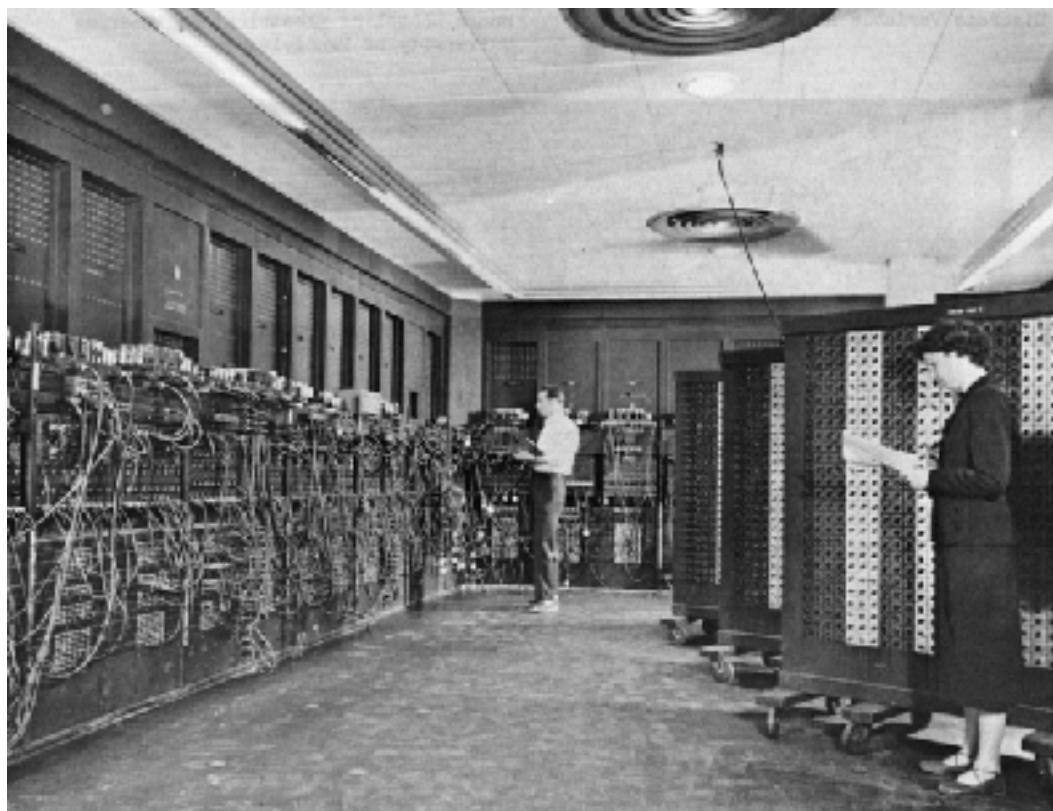
Ο στόχος που έθεσε - 1946

Η πρόγνωση του καιρού, προσομοιώνοντας τη δυναμική της ατμόσφαιρας με χρήση ψηφιακού, ηλεκτρονικού υπολογιστή

Το πρόγραμμα “Μετεωρολογία” - 1950



- **John von Neumann**
- **Ragnar Fjortoft** (1913 - 1998), Νορβηγός Μετεωρολόγος
- **Jule Charney** (1917 - 1981), Αμερικανός Μετεωρολόγος



Πρώτη επιτυχημένη αριθμητική πρόγνωση, επιλύοντας την **εξίσωση** του **βαροτροπικού στροβιλισμού** με τη βοήθεια του ENIAC

Τα επόμενα χρόνια

1954

Ο **Carl Gustaf Rossby** (1898 - 1957), Αμερικανός/Σουηδός Μετεωρολόγος, πραγματοποιεί την πρώτη **επιχειρησιακή** αριθμητική πρόγνωση (**βαροτροπικό** μοντέλο, πρόγνωση για τη στάθμη των **500 hPa**)



1955

Πρώτη πρόγνωση σε 3 επίπεδα (**900, 700, 400 hPa**) χρησιμοποιώντας **βαροκλινικό** μοντέλο

1958

Ίδρυση του **National Meteorological Centre** (ΗΠΑ)

- **1963:** Ανάπτυξη και εφαρμογή **βαροκλινικών** μοντέλων **6 επιπέδων**, βασισμένων στις **πρωτογενείς** εξισώσεις
- **1966:** Παγκόσμια κάλυψη, ανάπτυξη παραμετροποίησεων φυσικών διεργασιών

1970

Ίδρυση του European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)

- **1979:** Πρώτη πρόγνωση

Σήμερα

Παγκόσμια αριθμητική πρόγνωση **10 ημερών** με οριζόντια ανάλυση **~9 km!**

Μοντέλα αριθμητικής πρόγνωσης του καιρού

ΑΡΧΙΚΕΣ ΚΑΙ ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ



Κάθε μοντέλο χαρακτηρίζεται από:

- Παραλείψεις
 - Προσεγγίσεις
 - Συμβιβασμούς

MONTEAO

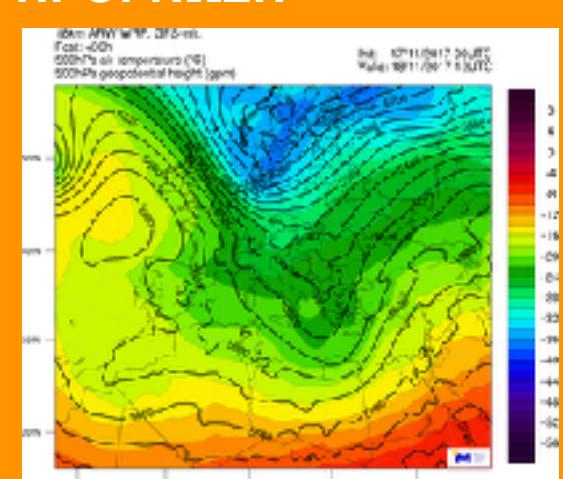
Ένα υπολογιστικό ομοίωμα της ατμόσφαιρας

ΠΡΩΤΟΓΕΝΕΙΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΕΙΣ

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ



Πρωτογενείς εξισώσεις

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -u \frac{\partial u}{\partial x} - v \frac{\partial u}{\partial y} - w \frac{\partial u}{\partial z} + fv - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + F_x$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -u \frac{\partial v}{\partial x} - v \frac{\partial v}{\partial y} - w \frac{\partial v}{\partial z} - fu - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + F_y$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -u \frac{\partial w}{\partial x} - v \frac{\partial w}{\partial y} - w \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \rightarrow \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -u \frac{\partial q}{\partial x} - v \frac{\partial q}{\partial y} - w \frac{\partial q}{\partial z} + E - P$$

2ος Νόμος του Νεύτωνα

3 εξισώσεις για τις 3 συνιστώσεις του ανέμου (**u, v, w**)

Εξίσωση συνέχειας

2 εξισώσεις για την μάζα του αέρα (**p**) και την μάζα των υδρατμών (**q**)

$$Q = C_p \frac{dT}{dt} - \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dt} \quad \text{1ος Νόμος της Θερμοδυναμικής}$$

1 εξίσωση για τις μεταβολές της θερμοκρασίας (**T**)

$p = \rho R T$ **Καταστατική εξίσωση**

1 εξίσωση που συνδέει θερμοκρασία (**T**), πυκνότητα (**p**), πίεση (**p**)

Σύστημα 7 εξισώσεων με 7 μεταβλητές (u, v, w, ρ, p, T, q)

Αριθμητικές μέθοδοι

Το πρόβλημα

Ένας υπολογιστής **μπορεί** να πραγματοποιεί **αριθμητικές** πράξεις: **πρόσθεση** (+), **αφαίρεση** (-), **διαιρεση** (/), **πολλαπλασιασμό** (*)

... **αλλά δεν μπορεί** να πραγματοποιήσει πράξεις **ολοκληρωτικού** ή/και **διαφορικού** λογισμού

Η λύση: Αριθμητικές μέθοδοι

Επίλυση των **μερικών διαφορικών εξισώσεων** με την μέθοδο των **πεπερασμένων διαφορών** σε ένα σύνολο **διακριτών** σημείων (πλέγμα).

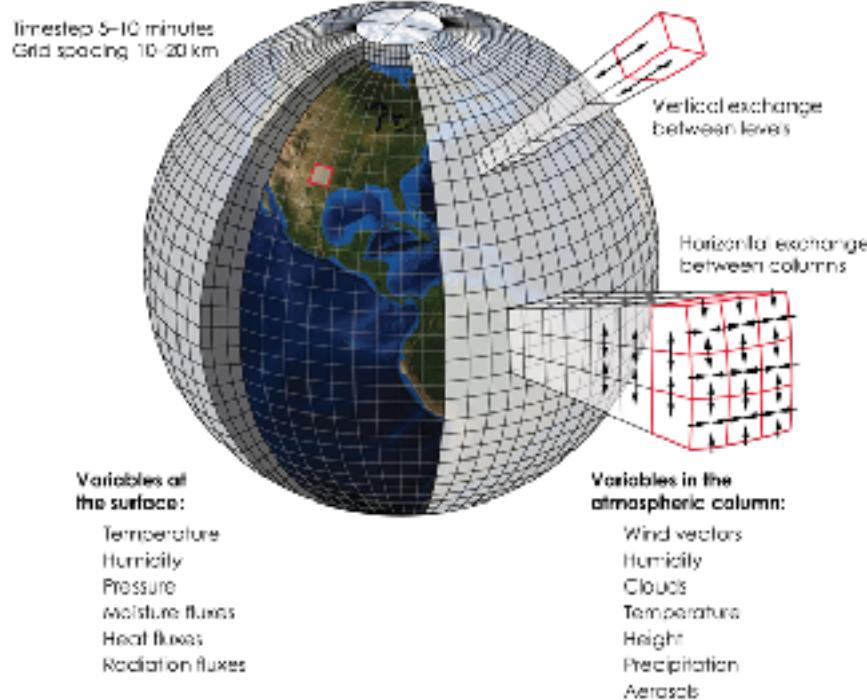
- Ανάπτυξη των μερικών παραγώγων των εξισώσεων σε σειρές **Taylor**

Τα μειονεκτήματα:

- Σφάλματα **στρογγυλοποίησης** (32-bit versus 64-bit)
- Σφάλματα **αποκοπής** λόγω της εφαρμογής των σειρών Taylor
- **Αριθμητική αστάθεια**, όταν η αριθμητική λύση αποκλίνει γρήγορα από την πραγματική εξαιτίας των σφαλμάτων αποκοπής

Διακριτοποίηση και αριθμητικές μέθοδοι

Weather forecast modeling



- Ομοίως μετασχηματίζουμε και τις μερικές παραγώγους ως προς το χρόνο

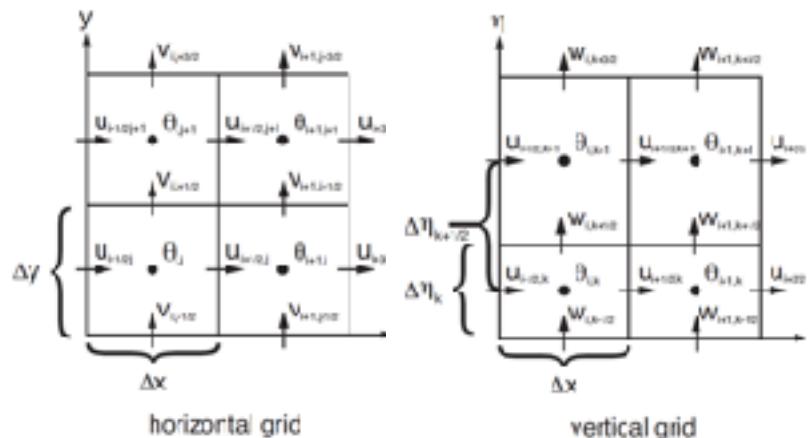
- Διαίρεση της ατμόσφαιρας σε $I \times J \times K$ σημεία (x, y, z)
- Αναλύοντας σε σειρές **Taylor**:

$$N_{x+\Delta x} = N_x + \Delta x \frac{\partial N}{\partial x} + \frac{1}{2} (\Delta x)^2 \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{1}{6} (\Delta x)^3 \frac{\partial^3 N}{\partial x^3} + \frac{1}{24} (\Delta x)^4 \frac{\partial^4 N}{\partial x^4} + \dots \quad (1)$$

$$N_{x-\Delta x} = N_x - \Delta x \frac{\partial N}{\partial x} + \frac{1}{2} (\Delta x)^2 \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} - \frac{1}{6} (\Delta x)^3 \frac{\partial^3 N}{\partial x^3} + \frac{1}{24} (\Delta x)^4 \frac{\partial^4 N}{\partial x^4} + \dots \quad (2)$$

- Αφαιρώντας τις (1), (2):

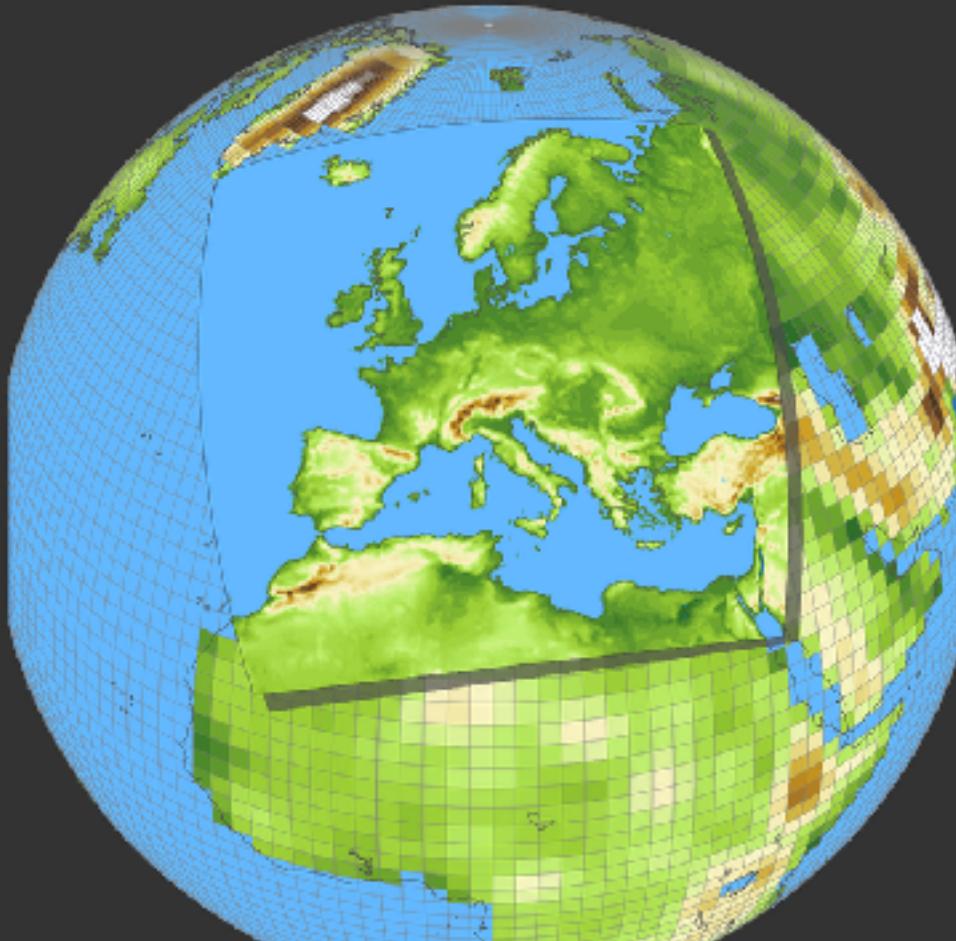
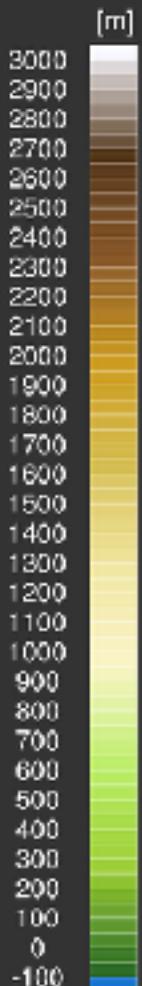
$$\frac{\partial N}{\partial x} = \frac{N_{x+\Delta x} - N_{x-\Delta x}}{2\Delta x} + O(\Delta x)^2 \quad (3)$$



Παράδειγμα πλέγματος: Arakawa-C
Καταστατικές μεταβλητές (T, p, ρ) στο **κέντρο**
Συνιστώσες ανέμου (u, v, w) στις **πλευρές**

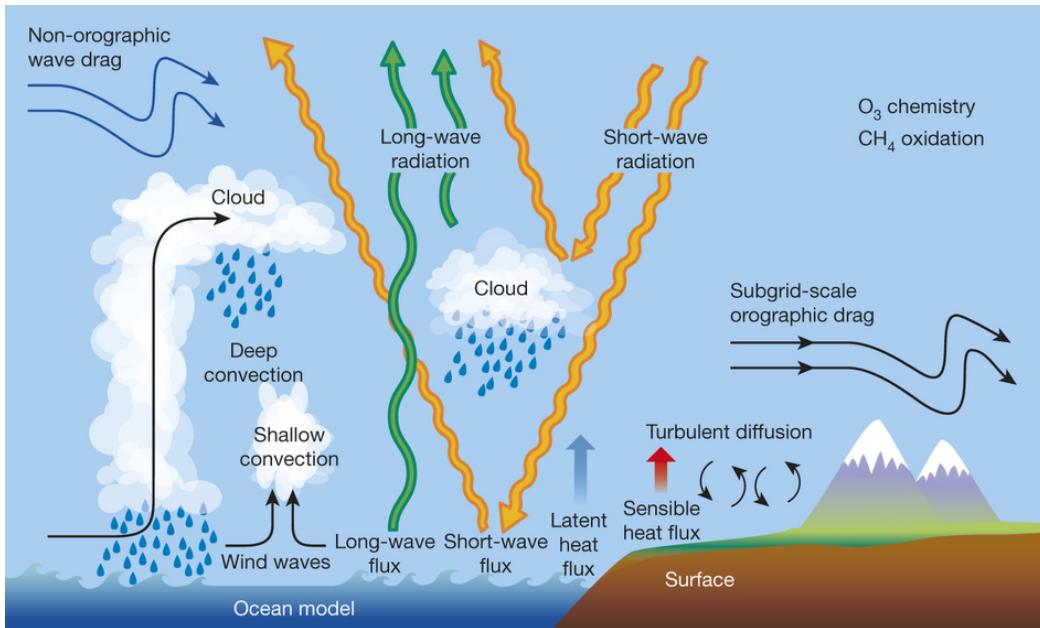
Πλέγμα και οριζόντια ανάλυση

Overlay: regional on global grid (orography)



- Η οριζόντια ανάλυση (**grid spacing**) καθορίζει πόσο **πυκνό** είναι το πλέγμα του μοντέλου
- Υψηλότερο **$\Delta x(\Delta y)$** επιτρέπει την καλύτερη **αναπαράσταση** της **φυσιογραφίας** και ορισμένων **φυσικών διεργασιών**, αλλά αυξάνει σημαντικά το **υπολογιστικό κόστος**

Παραμετροποιήσεις



Το πρόβλημα

Υπάρχουν **φυσικές διεργασίες** των οποίων η **κλίμακα** είναι τόσο μικρή ώστε δεν μπορούν να περιγραφούν αναλυτικά, αλλά και διεργασίες οι οποίες ακόμα δεν έχουν γίνει πλήρως **κατανοητές**:

- **μικροφυσική** (συμπύκνωση/εξάτμιση νεφών)
- διάδοση και αλληλεπίδραση της **ακτινοβολίας** με την ατμόσφαιρα
- **ορογραφικές διεργασίες**
- διεργασίες αλληλεπίδρασης της **ατμόσφαιρας** με την **επιφάνεια**
- διεργασίες ανωμεταφοράς (**convection**)
- **τύρβωδης** διάχυση **ορμής** και θερμότητας

Η λύση

Ανάπτυξη και εφαρμογή παραμετροποιήσεων (**σχήματα φυσικής**)

Ένα σύγχρονο αριθμητικό μοντέλο: WRF



Σύγχρονο μοντέλο αριθμητικής πρόγνωσης του καιρού, σχεδιασμένο να εξυπηρετεί τις ανάγκες τόσο της **επιχειρησιακής πρόγνωσης** όσο και της **έρευνας**

- Κλίμακες εφαρμογής: **~100 m** έως **1,000 km**
- **Πραγματικές** και **ιδεατές** προσομοιώσεις
- Εξελιγμένο σύστημα αφομοίωσης δεδομένων (**data assimilation**)
- Μοντέλου ανοιχτού κώδικα (**open source**)
- **Ευρεία** βάση χρηστών (39,000 εγγεγραμμένοι χρήστες από 160+ χώρες)

Αντιπροσωπεύει την αιχμή (**state-of-the-art**) των μετεωρολογικών μοντέλων:

- **21** σχήματα μικροφυσικής
- **13** σχήματα οριακού στρώματος, **8** σχήματα στρώματος επιφανείας
- **12** σχήματα ανωμεταφοράς (convection)
- **9** σχήματα ακτινοβολίας
- **7** μοντέλα εδάφους

Πολυάριθμες επιλογές μικρο-συντονισμού (**fine-tuning**)

Πρόσθετα του WRF



WRF-Chem

Σύζευξη **μετεωρολογίας-χημείας** σε πραγματικό χρόνο



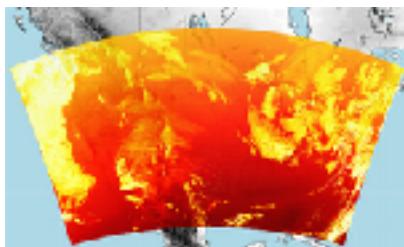
WRF-Hydro

Σύζευξη **μετεωρολογίας-υδρολογίας** σε πραγματικό χρόνο



WRF-Fire (WRF-SFIRE)

Σύζευξη **μετεωρολογίας-πυρκαγιάς** σε πραγματικό χρόνο



WRF-Solar

Εξειδικευμένη παροχή προσομοιώσεων/προγνώσεων **ηλιακού δυναμικού**

Polar-WRF

Εξειδικευμένη έκδοση για την προσομοίωση/πρόγνωση της πολικής ατμόσφαιρας

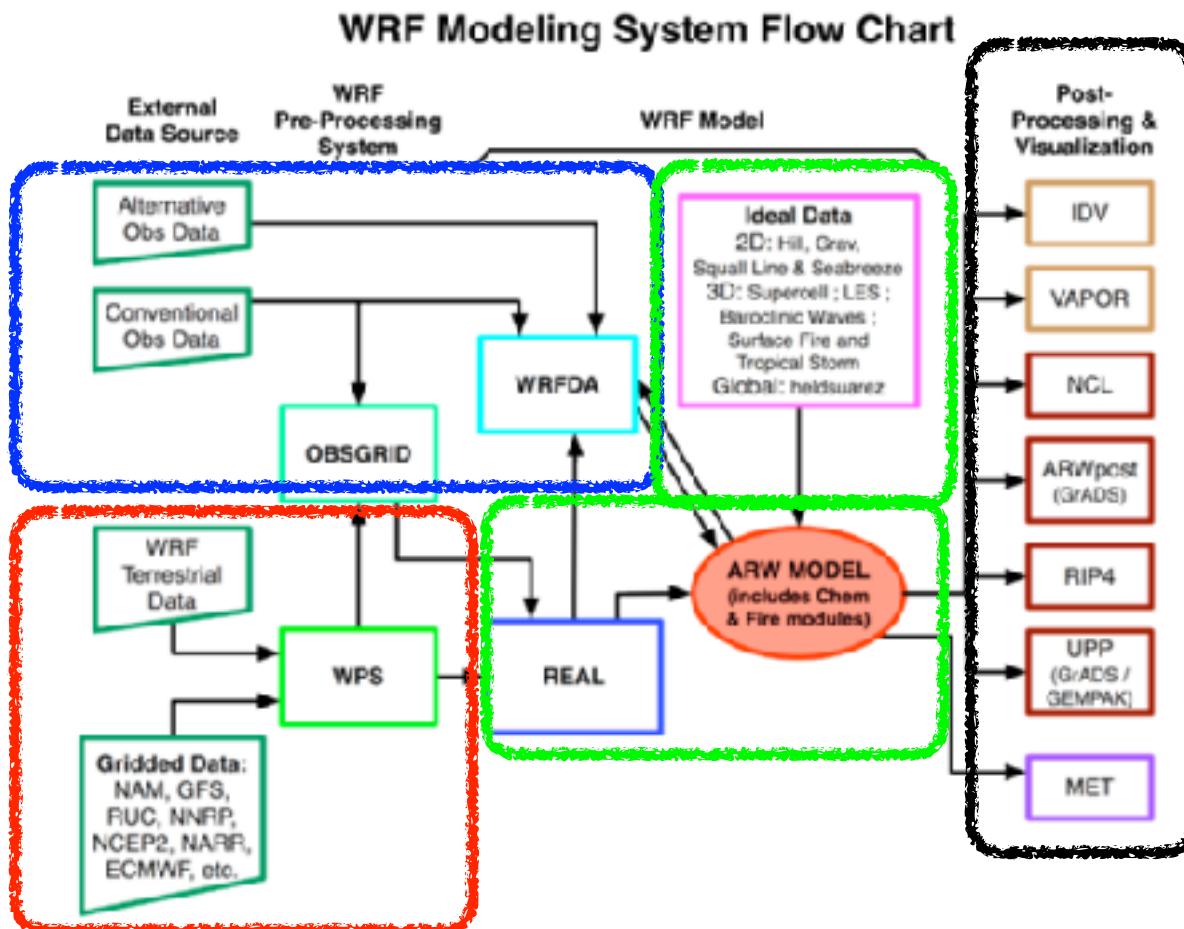


Planet-WRF

Εξειδικευμένη έκδοση για την προσομοίωση/πρόγνωση της ατμόσφαιρας άλλων πλανητών (Άρης, Αφροδίτη, κ.α.)



Διάγραμμα ροής και δομικά στοιχεία του WRF



WRF Pre-processing System (WPS)

- Δημιουργία πλεγμάτων προσομοίωσης, παρεμβολή στατικών πεδίων (π.χ. τοπογραφία), αποκωδικοποίηση και παρεμβολή συναμικών πεδίων (π.χ. προγνώσεις/αναλύσεις μεγάλης κλίμακας)

Dynamics Solver (ARW)

- Παρεμβολή συναμικών και στατικών πεδίων στο 3D πλέγμα, αριθμητική επίλυση, παραμετροποιήσεις

Λογισμικό επεξεργασίας και απεικόνισης

- Επεξεργασία δεδομένων εξόδου του WRF, μετασχηματισμός, απεικόνιση (χάρτες κ.α.)

WRF Data Assimilation System (WRFDA)

- Συίτα προγραμμάτων για την αφομοίωση παρατηρήσεων (συμβατικές, ραντάρ, δορυφόροι, κ.α.)

Εφαρμογές του WRF

Οι εφαρμογές που θα παρουσιαστούν αποτελούν προϊόν της ερευνητικής μου δραστηριότητας στο **Εργαστήριο Φυσικής της Ατμόσφαιρας του ΑΠΘ**, και στο **Ινστιτούτο Ερευνών Περιβάλλοντος και Βιώσιμης Ανάπτυξης του ΕΑΑ**

Αστική θερμική νησίδα



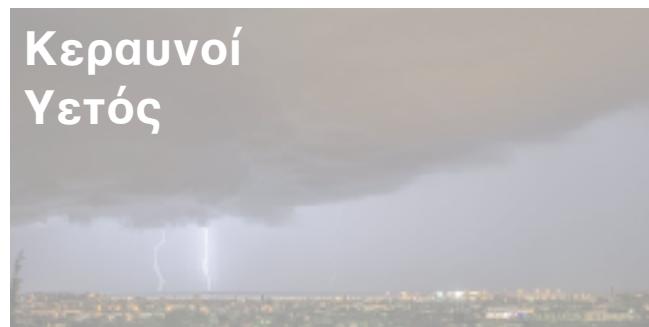
Αιολικό δυναμικό



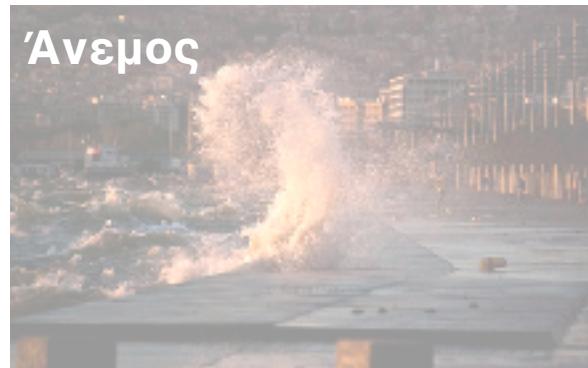
Ηλιακό δυναμικό



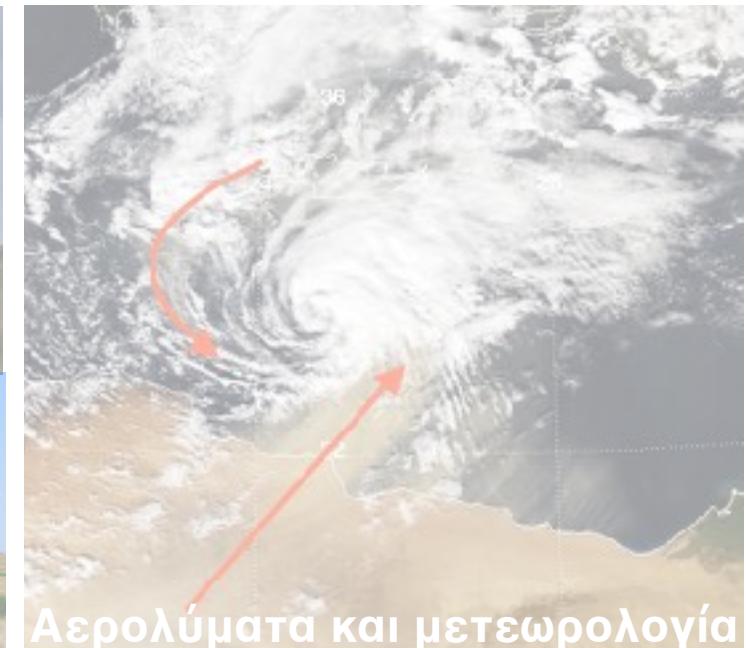
Κεραυνοί
Υετός



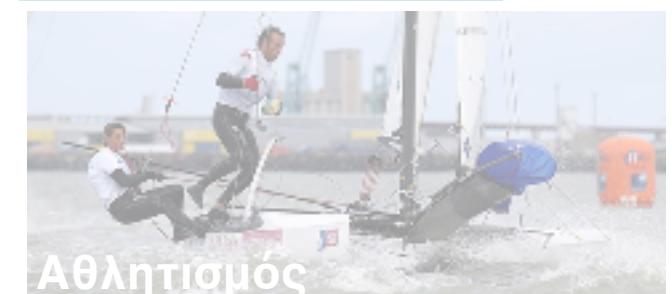
Άνεμος



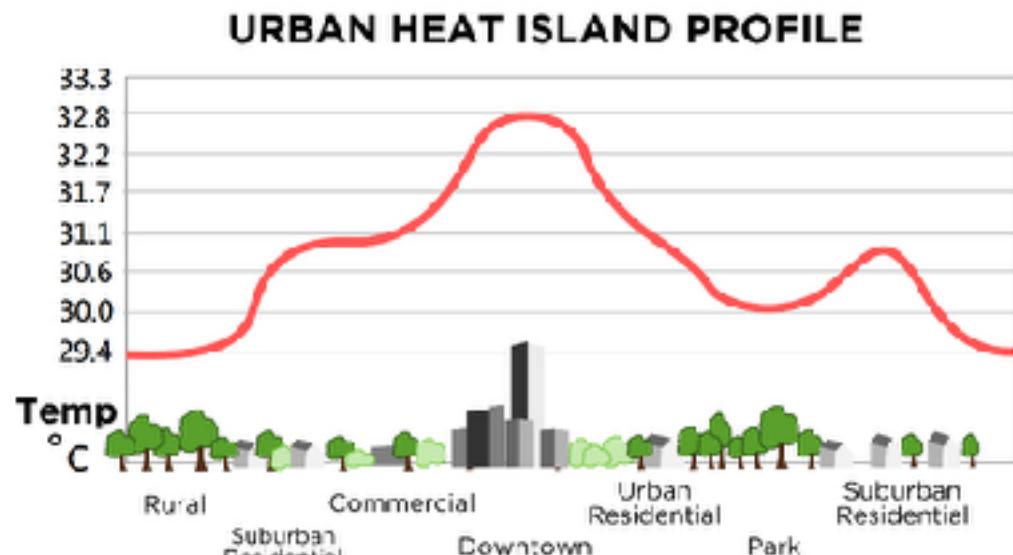
Βιομετεωρολογία



Αερολύματα και μετεωρολογία



Αθλητισμός



Το φαινόμενο κατά το οποίο μία **αστική** περιοχή εμφανίζεται **θερμότερη** σε σύγκριση γειτονικές **μη αστικοποιημένες** περιοχές

- Επιβάρυνση επεισοδίων **καύσωνα** και **ποιότητας** του αέρα
- Αύξηση της **θνησιμότητας**
- **Οικονομικές** επιπτώσεις (π.χ. αύξηση κατανάλωσης ενέργειας για ψύξη)
- Επιδράσεις στην τοπική **μετεωρολογία**

Βασικά χαρακτηριστικά

- Κυρίως **νυχτερινό** φαινόμενο
- Μεγαλύτερη ένταση το **καλοκαίρι**
- Αρνητική συσχέτιση με **άνεμο** και **νεφοκάλυψη**
- Θετική συσχέτιση με την **έκταση** των αστικών περιοχών και την **πυκνότητα** του πληθυσμού



“Urban heat islands and urban thermography”

Χρηματοδότηση: Ευρωπαϊκός Οργανισμός Διαστήματος

Στόχοι

- Μελέτη της ΑΘΝ με εφαρμογή μοντέλου αριθμητικής πρόγνωσης
- Ανάπτυξη συστήματος **επιχειρησιακής πρόγνωσης** του φαινομένου της ΑΘΝ

Μεθοδολογία

- Τροποποίηση του WRF για την καλύτερη **αναπαράσταση** των αστικών περιοχών
- Ανάπτυξη **“φίλτρου”** για τη διόρθωση των προγνώσεων της θερμοκρασίας και την αύξηση της οριζόντιας ανάλυσης πάνω από αστικές περιοχές



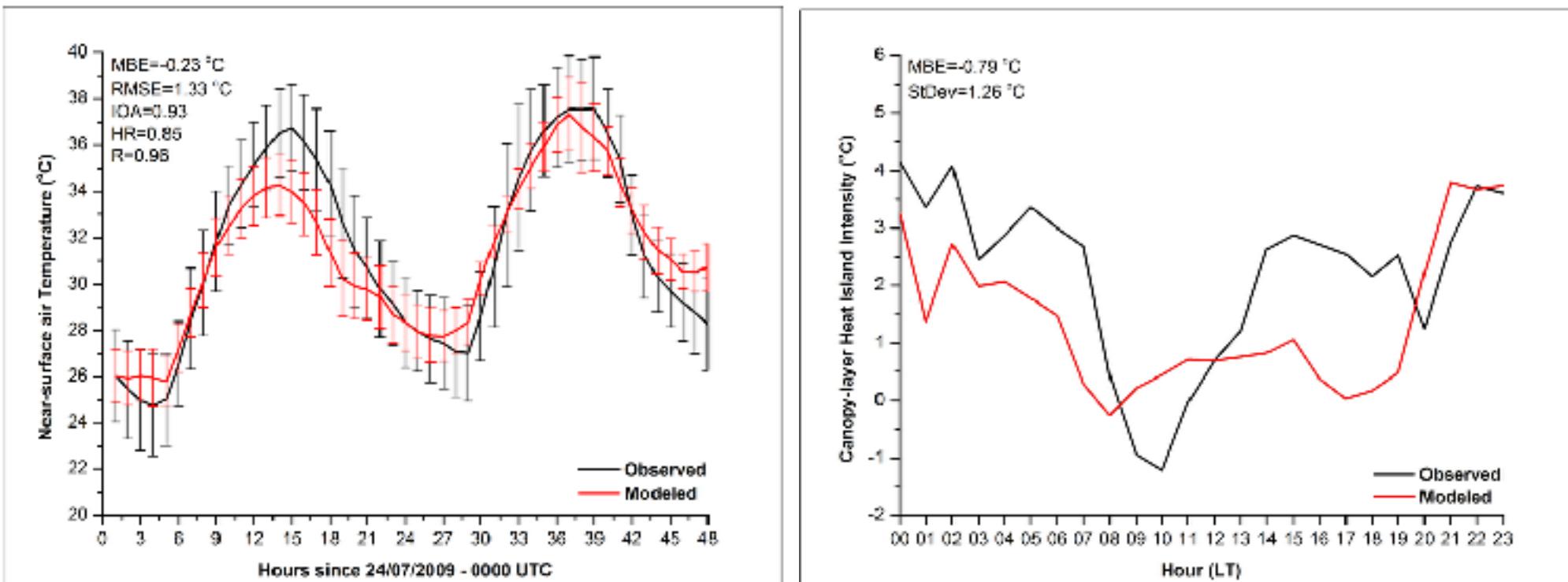
Προσομοιώσεις

- Τηλεσκοπικά (nested) πεδία: **30 - 10 - 2 km**
- 23/7/2009 12Z - 26/7/2009 00Z (**60 h**)
- Αρχικοποίηση με αναλύσεις του **ECMWF**
- Ενσωμάτωση χρήσεων γης του **CORINE (ΕΕΑ)** για καλύτερη αναπαράσταση της αστικής περιοχής (Αθήνα)
- Αύξηση μήκους **τραχύτητας** και **θερμοχωρητικότητας**, ελάττωση **albedo** και **φυτοκάλυψης** για καλύτερη αναπαράσταση του αστικού ενεργειακού ισοζυγίου

Μελέτη της αστικής θερμικής νησίδας

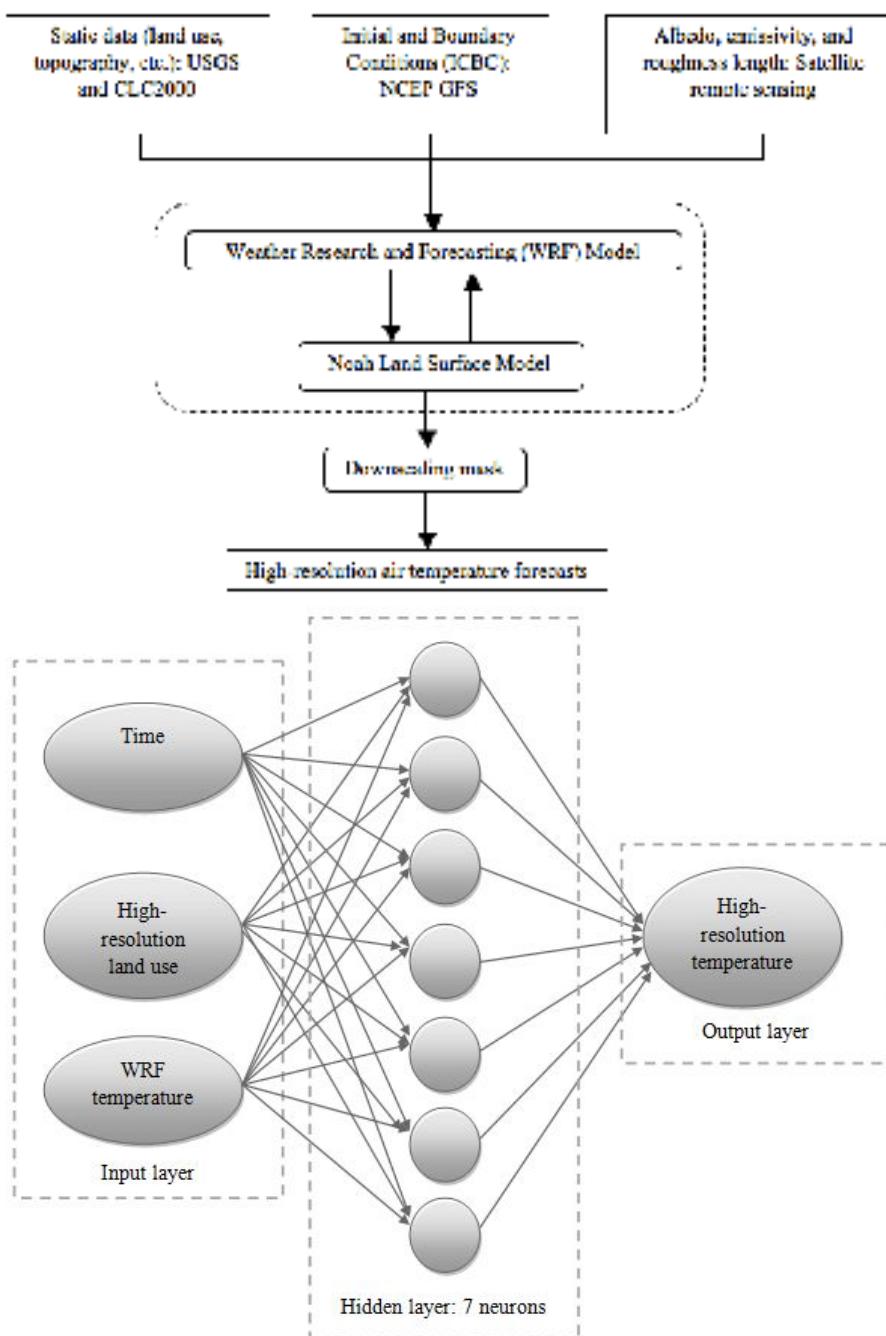
[3]

Giannaros TM, Melas D, Daglis IA, Keramitsoglou I, Kourtidis K (2013) Numerical study of the urban heat island over Athens (Greece) with the WRF model. *Atmospheric Environment* 73: 103-111.



Κύρια ευρήματα και συμπεράσματα

- Το μοντέλο αναπαριστά ικανοποιητικά τον ημερήσιο κύκλο της θερμοκρασίας και της έντασης της θερμικής νησίδας
- Η θερμική νησίδα της Αθήνας φτάνει σε ένταση τους 4 degC κατά τη διάρκεια της νύχτας
- Ασθενής ψυχρή νησίδα κατά τη διάρκεια της ημέρας



Επιχειρησιακό σύστημα πρόγνωσης

- Τηλεσκοπικά (nested) πεδία: **30 - 10 - 2 km**
- Αρχικοποίηση με προγνώσεις του **GFS**
- Καλοκαίρι 2010
- Αθήνα, Θεσσαλονίκη** (Ελλάδα), **Μπάρι** (Ιταλία), **Μαδρίτη, Σεβίλλη** (Ισπανία), **Λισσαβόνα** (Πορτογαλία)

Νευρωνικό δίκτυο

- Δεδομένα **χρήσης γης** υψηλής οριζόντιας ανάλυσης (250 m)
- Προγνωστικά δεδομένα **WRF** (2 km)
- 7 νευρώνες

Εκπαίδευση στη **στατιστική διόρθωση** των πρωτογενών προγνώσεων του μοντέλου και στην **αύξηση** της οριζόντιας τους **ανάλυσης**

Giannaros TM, Melas D, Daglis IA, Keramitsoglou I (2014) Development of an operational modelling system for urban heat islands: an application to Athens, Greece. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 14: 347-358.

City	Performance Metric					
	MBE 2 km	RMSE 250 m	MBE 2 km	RMSE 250 m	R 2 km	R 250 m
Athens	-3.15	-0.47	3.54	1.68	0.84	0.84
Thessaloniki	-2.49	-0.70	3.17	1.98	0.77	0.81
Bari	-1.45	0.00	2.89	2.12	0.68	0.78
Madrid	-2.17	-0.27	3.61	2.67	0.82	0.85
Seville	0.89	-0.09	2.14	1.77	0.94	0.95
Lisbon	1.01	-0.60	2.55	2.39	0.89	0.90

Κύρια ευρήματα και συμπεράσματα

- Ικανοποιητική επίδοση του μοντέλου για όλες τις αστικές περιοχές
- Τάση υποεκτίμησης της θερμοκρασίας, κυρίως ως προς τις μέγιστες τιμές
- Σημαντική βελτίωση των προγνώσεων με την εφαρμογή του στατιστικού φίλτρου

Εφαρμογές του WRF

Οι εφαρμογές που θα παρουσιαστούν αποτελούν προϊόν της ερευνητικής μου δραστηριότητας στο **Εργαστήριο Φυσικής της Ατμόσφαιρας του ΑΠΘ**, και στο **Ινστιτούτο Ερευνών Περιβάλλοντος και Βιώσιμης Ανάπτυξης του ΕΑΑ**

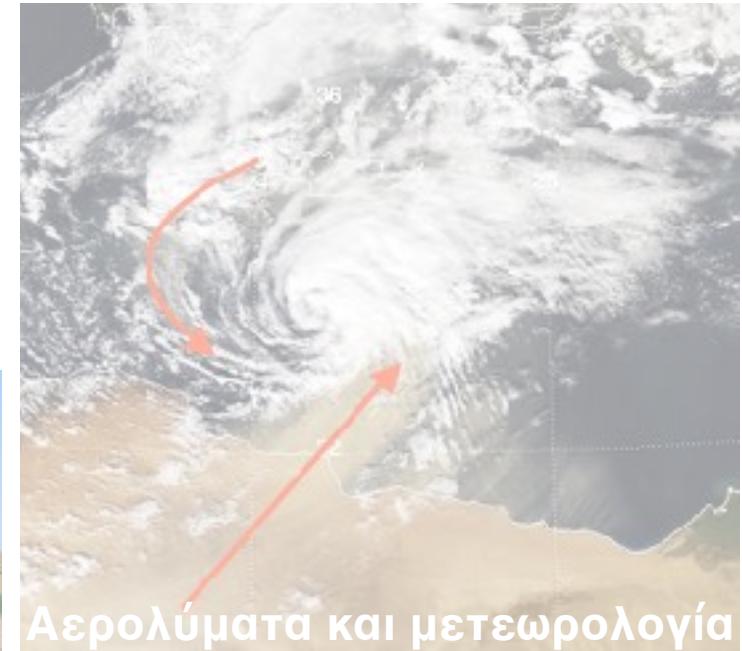
Αστική θερμική νησίδα



Αιολικό δυναμικό



Ηλιακό δυναμικό



Αερολύματα και μετεωρολογία



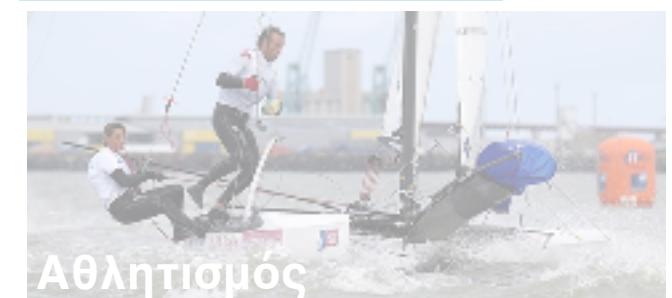
Κεραυνοί
Υετός



Άνεμος



Βιομετεωρολογία



Αθλητισμός



the TALOS project

[English
version](#)

Η κεραυνική δραστηριότητα στην Ελλάδα. Ιστορικά δεδομένα, παρατηρήσεις, προγνώσεις, συμβουλές

“Thunder and lightning observing system”

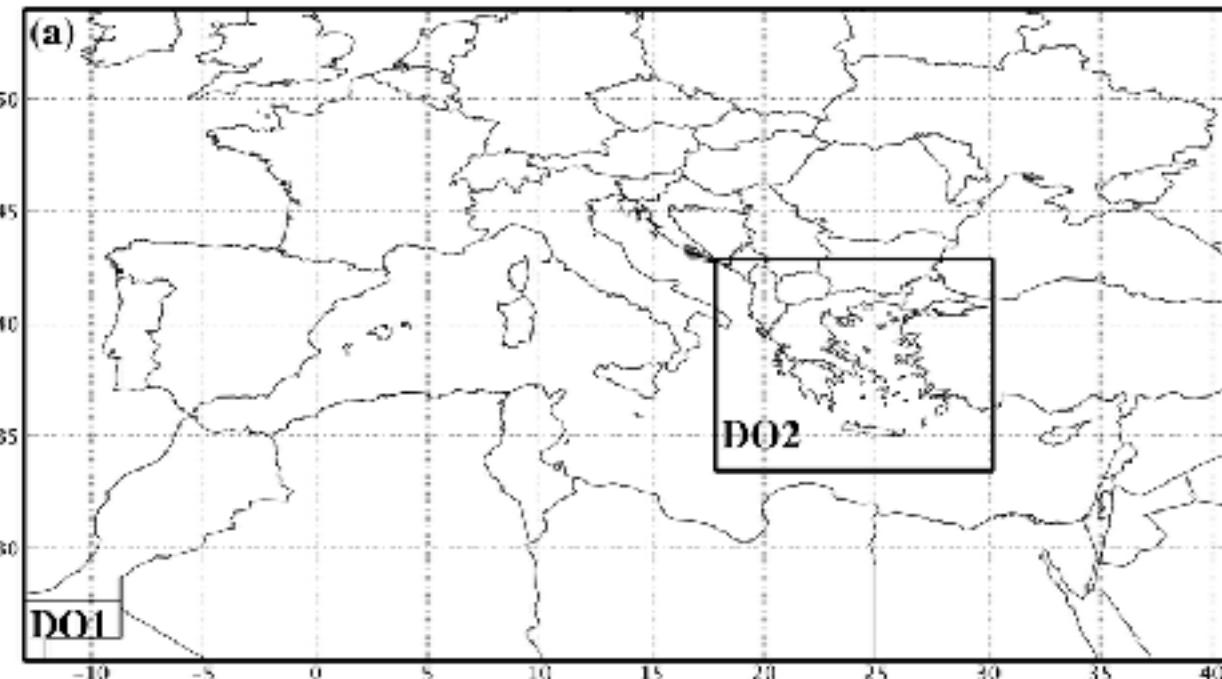
Χρηματοδότηση: Ευρωπαϊκή Ένωση - Ελλάδα

Στόχοι

- Ανάπτυξη συστήματος για την **επιχειρησιακή πρόγνωση** της κεραυνικής δραστηριότητας
- Αξιοποίηση **δεδομένων παρατήρησης** κεραυνών για τη βελτίωση των προγνώσεων υετού

Μεθοδολογία

- **Εφαρμογή** και μικρο-συντονισμός (**fine-tuning**) του WRF για την προσομοίωση της κεραυνικής δραστηριότητας (**WRF-LTNG**)
- Ανάπτυξη **αλγορίθμου** για την **αφομοίωση** δεδομένων παρατήρησης κεραυνών στο WRF με στόχο τη βελτίωση της πρόγνωσης του **υετού** ανωμεταφοράς (convective rain) (**WRF-LTNGDA**)



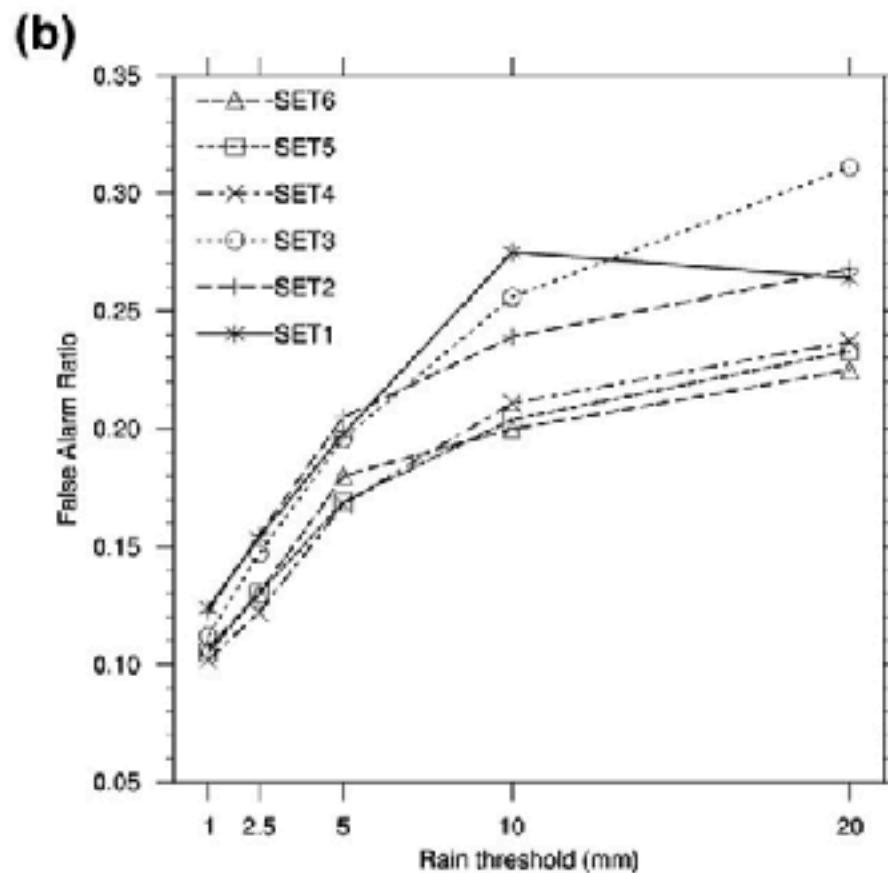
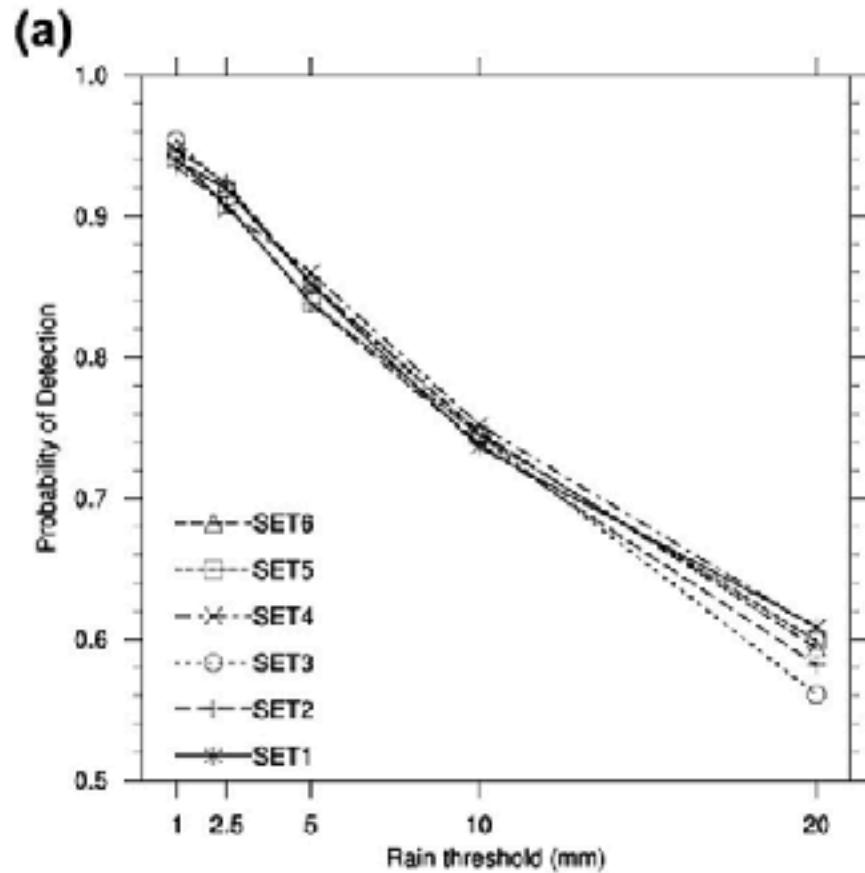
Προσομοιώσεις #1

- Τηλεσκοπικά (nested) πεδία: **24 - 6 km**
- 10 επεισόδια με έντονη κεραυνική δραστηριότητα
- Αρχικοποίηση με αναλύσεις του **NCEP**
- **Ανάλυση ευαισθησίας** του μοντέλου στα σχήματα **οριακού στρώματος** και **μικροφυσικής**
- Παραμετροποίηση κεραυνών μέσα από τα **σχήματα** ανωμεταφοράς (**convection**) και με τη χρήση του **ύψους** της **κορυφής** των νεφών
- Ανάπτυξη **φίλτρου** για τη **διόρθωση** των προγνώσεων

Ακραία και έντονα καιρικά φαινόμενα: Κεραυνοί

[3]

Giannaros TM, Kotroni V, Lagouvardos K (2015) Predicting lightning activity in Greece with the Weather Research and Forecasting (WRF) model. *Atmospheric Research* 156: 1-13.



Η επιλογή των σχημάτων καθορίζει την **ποιότητα** και **ακρίβεια** των προγνώσεων

Ακραία και έντονα καιρικά φαινόμενα: Κεραυνοί

[4]

Giannaros TM, Kotroni V, Lagouvardos K (2015) Predicting lightning activity in Greece with the Weather Research and Forecasting (WRF) model. *Atmospheric Research* 156: 1-13.

Case (date)	POD	FAR
<i>Warm period</i>		
5 June 2010	0.90	0.51
2 July 2010	0.88	0.44
11 September 2010	0.90	0.62
21 September 2011	0.95	0.72
10 August 2012	0.79	0.51
<i>Cold period</i>		
18 October 2010	0.92	0.74
12 January 2011	0.92	0.80
6 February 2012	0.94	0.77
29 October 2012	0.83	0.51
6 November 2013	0.92	0.72

Το πρόβλημα

Υπερεκτίμηση (υψηλά FAR) της κεραυνικής δραστηριότητας

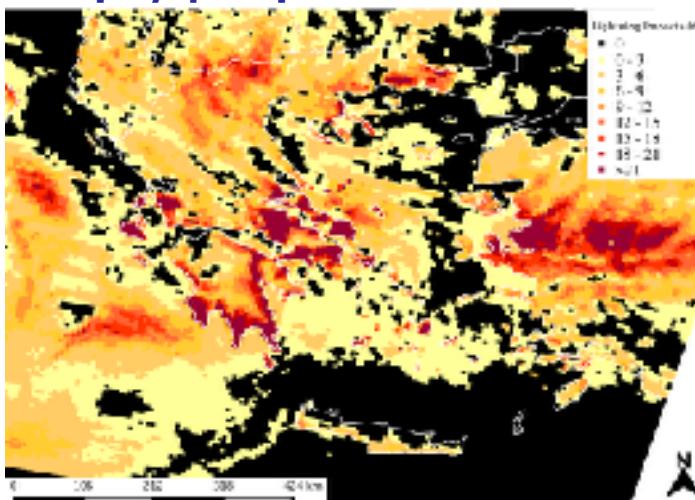
Η λύση

Ανάπτυξη **φίλτρου** ελέγχου και διόρθωσης της παραγωγής κεραυνών μέσα στο αντίστοιχο σχήμα παραμετροποίησης

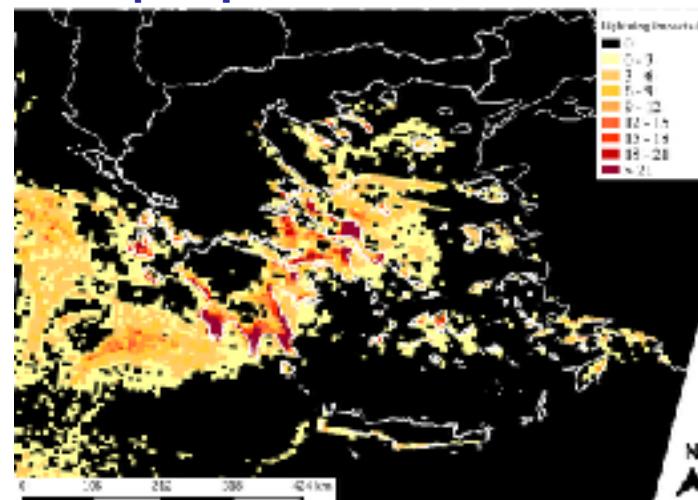
- Ολική ποσότητα **πάγου**
- Μέγιστη **κατακόρυφη ταχύτητα**
- **CAPE**

Παράδειγμα: 6 Φεβρουαρίου 2012

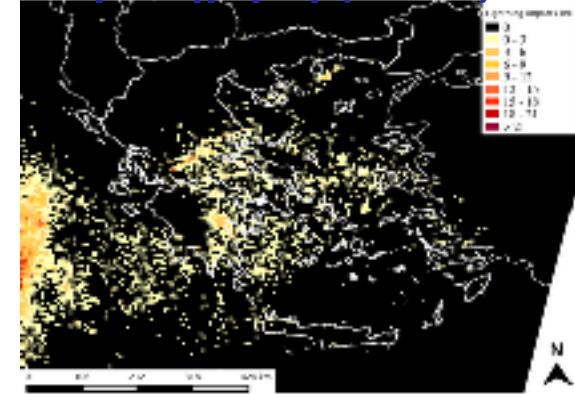
Χωρίς φίλτρο

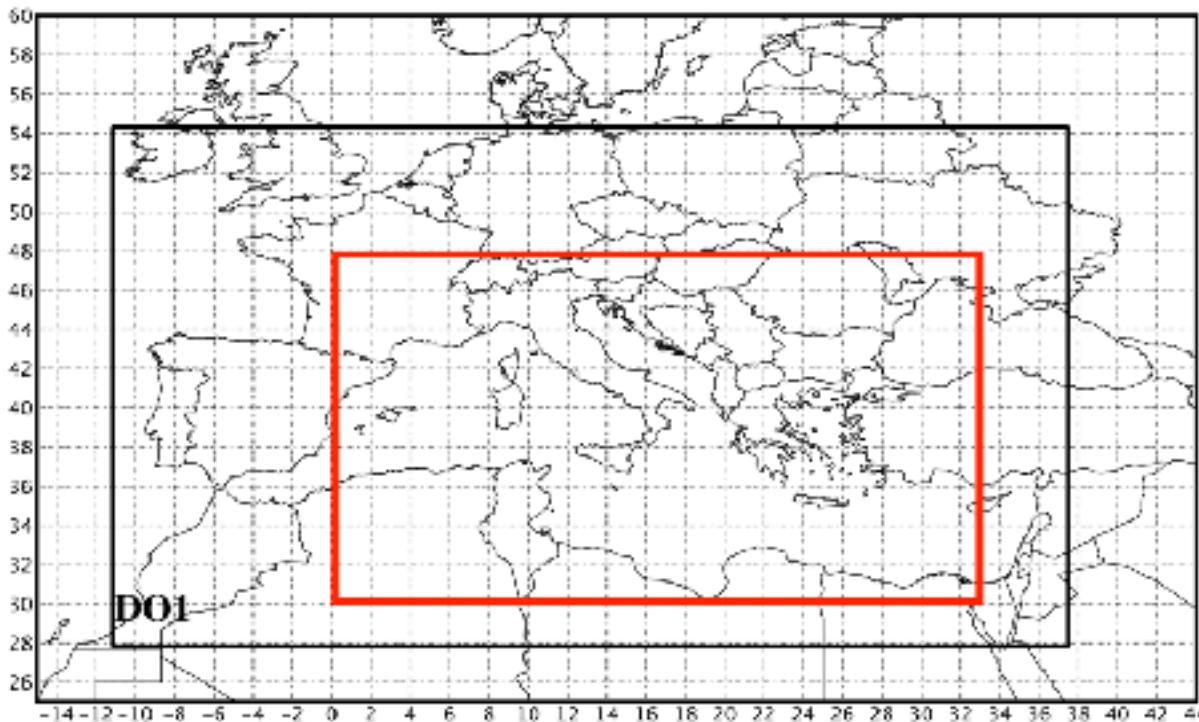


Με φίλτρο



Παρατήρηση (ZEUS)





Προσομοιώσεις #2

- 1 πεδίο: **24 km**
- 1 έτος (2009/2010) επιχειρησιακών προγνώσεων 72 h
- Αρχικοποίηση με προγνώσεις του **GFS**
- **Ανάλυση ευαισθησίας** του μοντέλου στα σχήματα παραμετροποίησης των διεργασιών ανωμεταφοράς (**convection**)
- **Επανέλεγχος** του φίλτρου για τη διόρθωση/έλεγχο των προγνώσεων
- **Τροποποίηση** των **εξισώσεων** του **σχήματος** παραμετροποίησης της κεραυνικής δραστηριότητας

Άκραία και έντονα καιρικά φαινόμενα: Κεραυνοί

[6]

Giannaros TM, Lagouvardos K, Kotroni V (2017) Performance evaluation of an operational lightning forecasting system in Europe. *Natural Hazards* 85: 1-18.

Table 3 Verification scores computed over the warm and cold seasonal periods, and the entire study period, for each CPS, after the modification of the PR92 LPS

CPS	POD			FAR			ETS		
	W ^a	C ^b	Y ^c	W	C	Y	W	C	Y
GD	0.52*	0.55*	0.53*	0.37*	0.28*	0.32*	0.37*	0.43	0.40*
GF	0.62*	0.60*	0.61*	0.47*	0.42*	0.44*	0.37*	0.39	0.38
KF	0.71	0.58*	0.63*	0.40*	0.35*	0.37*	0.45*	0.42	0.44*

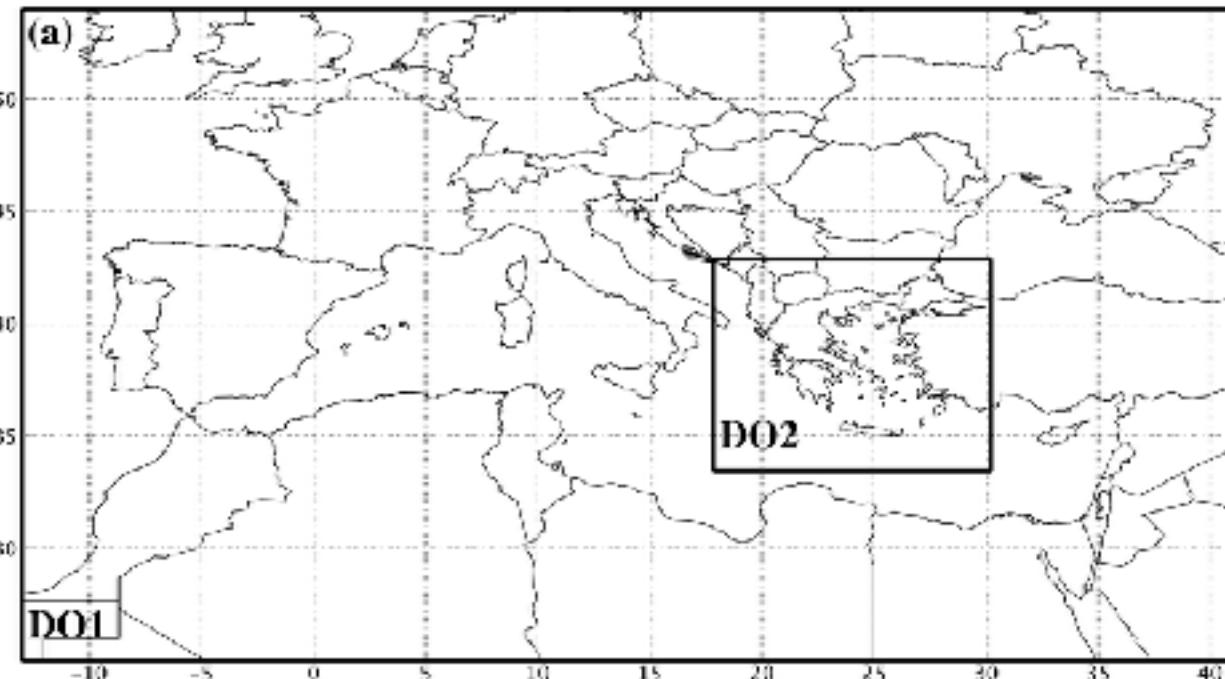
The calculation of the performance metrics was carried out using gridded observed and modeled (with the implementation of the masking filter) data, aggregated to 72-h intervals, beginning at T0 + 12 on each day of the verification period. Scores appearing in bold font indicate a statistically significant difference (at $\alpha = 0.05$) between GF/KF simulations and the GD simulation (control). Scores with an asterisk indicate a statistically significant difference between the FLT_LAND and FLT simulations, for each given CPS.

^a Warm period

^b Cold period

^c Year

FLT		
POD	FAR	ETS
0.59*	0.45*	0.37*
0.66*	0.51*	0.36*
0.68*	0.47*	0.40*



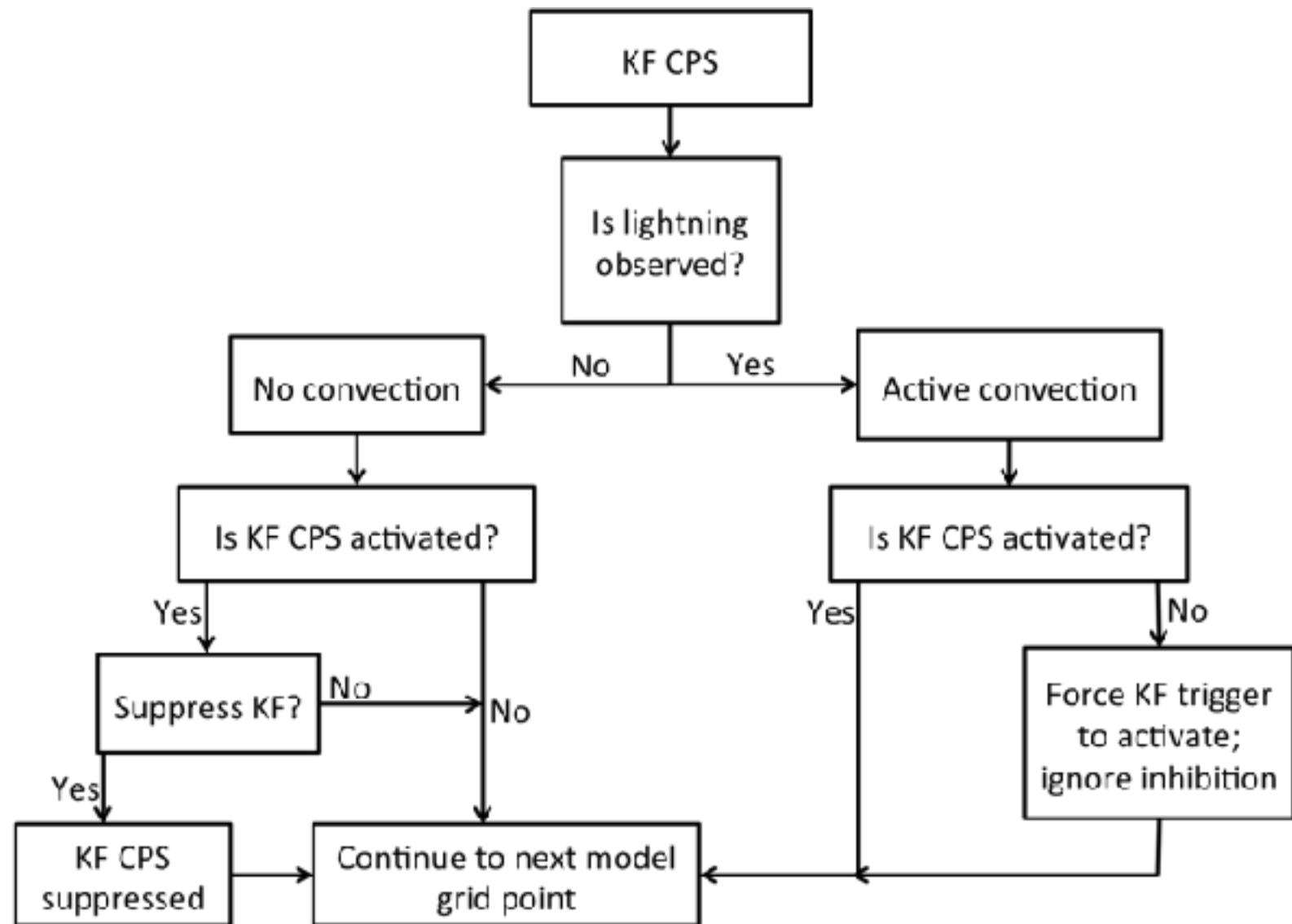
Προσομοιώσεις #3

- Τηλεσκοπικά (nested) πεδία: **24 - 6 km**
- 8 επεισόδια με μεγάλα ύψη υετού και κεραυνική δραστηριότητα
- Αρχικοποίηση με αναλύσεις του **NCEP**
- Ανάπτυξη και εφαρμογή **αλγορίθμου** για την **αφομοίωση δεδομένων** παρατήρησης κεραυνών από το δίκτυο ZEUS του ΕΑΑ

Ακραία και έντονα καιρικά φαινόμενα: Κεραυνοί

[8]

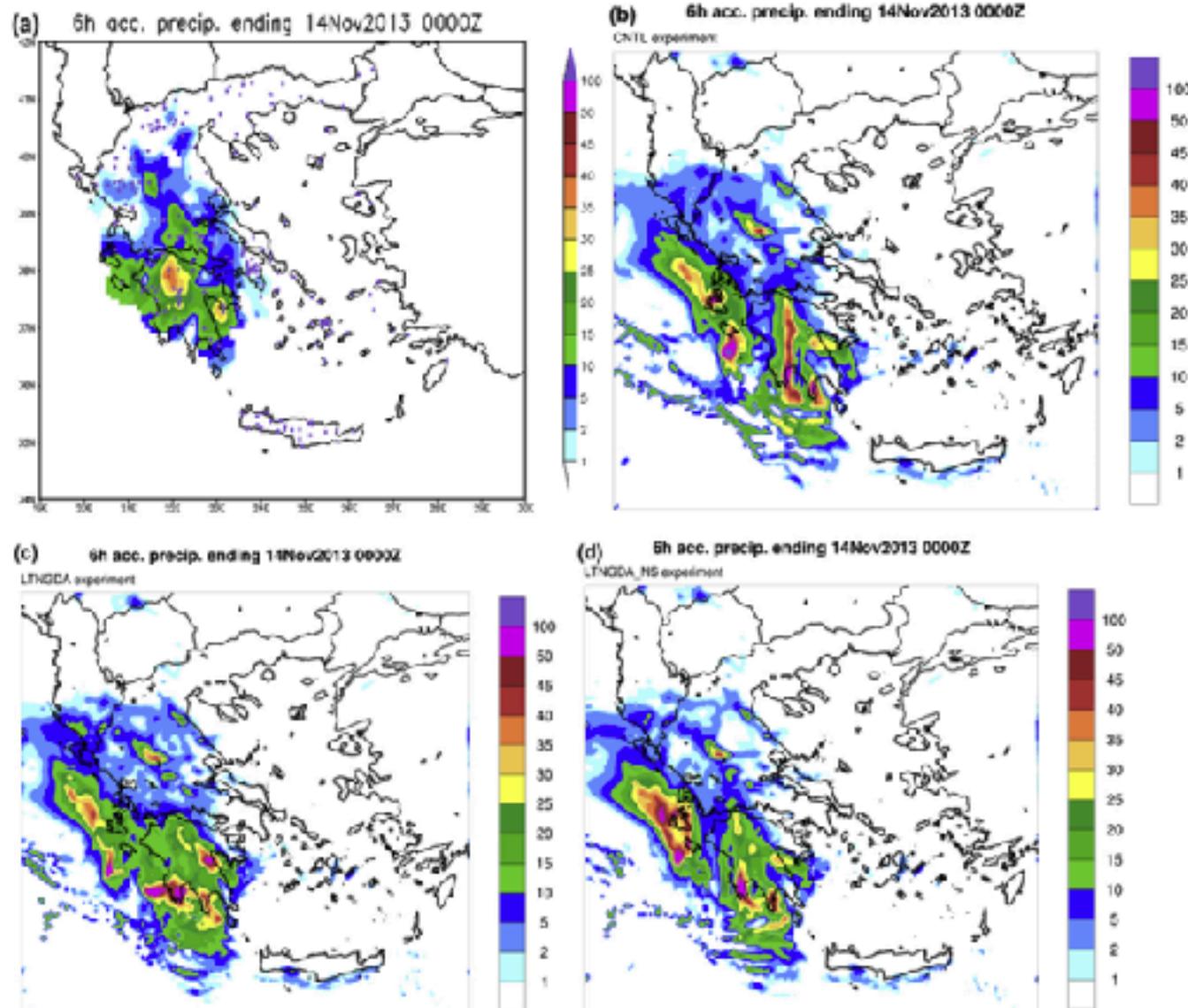
Giannaros TM, Kotroni V, Lagouvardos K (2016) WRF-LTNGDA: A lightning data assimilation technique implemented in the WRF model for improving precipitation forecasts. *Environmental Modelling and Software* 76: 54-68.



Άκραία και έντονα καιρικά φαινόμενα: Κεραυνοί

[9]

Giannaros TM, Kotroni V, Lagouvardos K (2016) WRF-LTNGDA: A lightning data assimilation technique implemented in the WRF model for improving precipitation forecasts. *Environmental Modelling and Software* 76: 54-68.



Άκραία και έντονα καιρικά φαινόμενα: Κεραυνοί [10]

<http://www.thunderstorm24.com>



Thunderstorm24

Lightning observations and forecasting

Home Historical data Lightning now Lightning forecasts Weather forecasts Gallery Information Contact

News

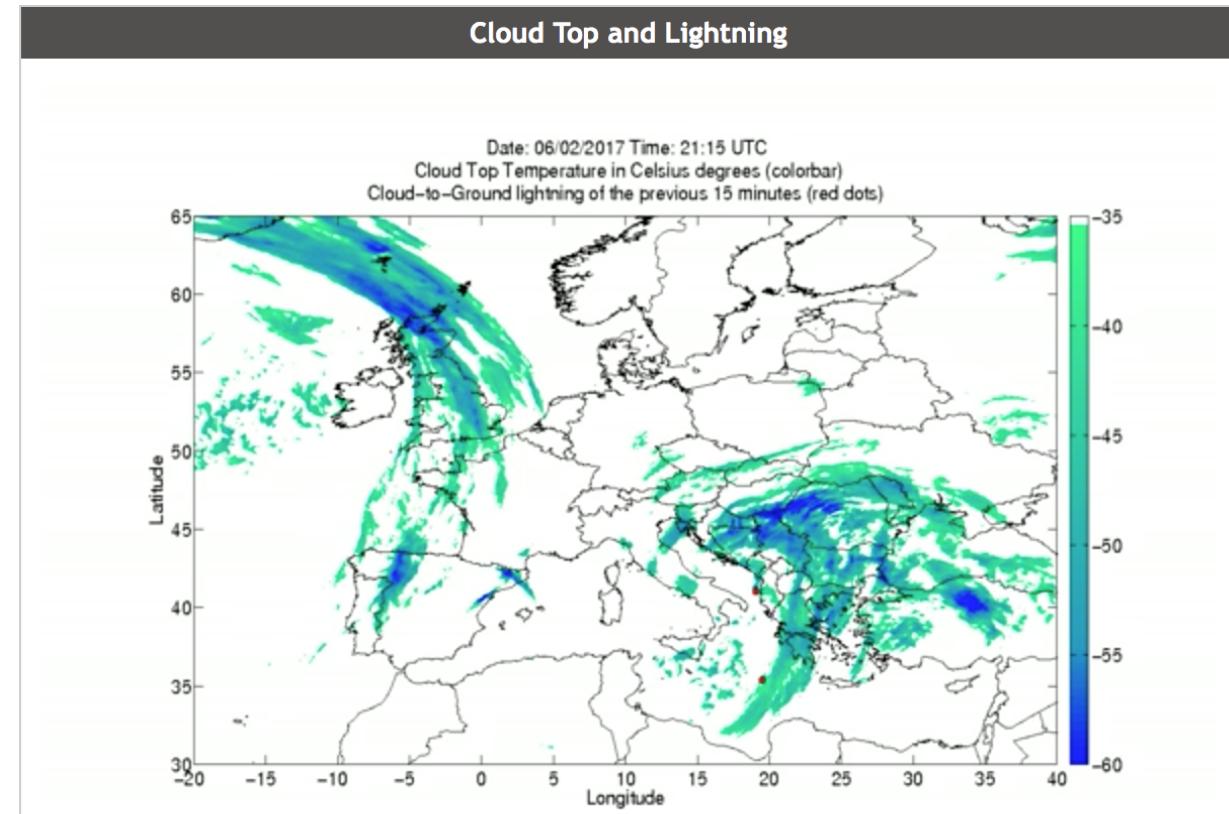
- Lightning kills 5 secondary students, 34 ...
 - Lightning kills 5 secondary students, 34 badly injured in Zimbabwe (31/1/2017)**

Five students at a secondary school in Zimbabwe, Chinatsa Secondary School died while 34 were hospitalised after lightning struck the school during
 - Heat, flood, cold & lightning killed ...

Did you know?

- Lightning Makes For A Terrible Renewable ...
 - Lightning Makes For A Terrible Renewable Energy Source**

Lightning is an impressive, energetic force of nature – so why aren't we using all that raw power to run our homes? Two reasons: For one thing, lightning is unpredictable



Εφαρμογές του WRF

Οι εφαρμογές που θα παρουσιαστούν αποτελούν προϊόν της ερευνητικής μου δραστηριότητας στο **Εργαστήριο Φυσικής της Ατμόσφαιρας του ΑΠΘ**, και στο **Ινστιτούτο Ερευνών Περιβάλλοντος και Βιώσιμης Ανάπτυξης του ΕΑΑ**

Αστική θερμική νησίδα



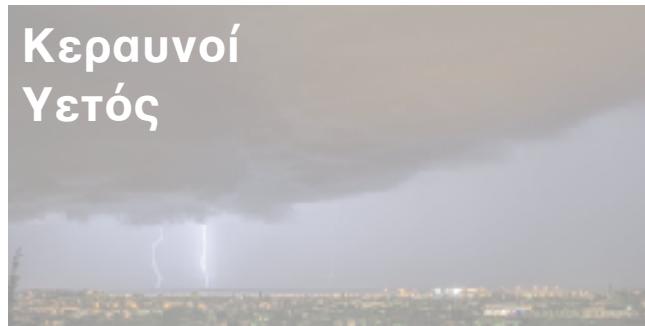
Αιολικό δυναμικό



Ηλιακό δυναμικό



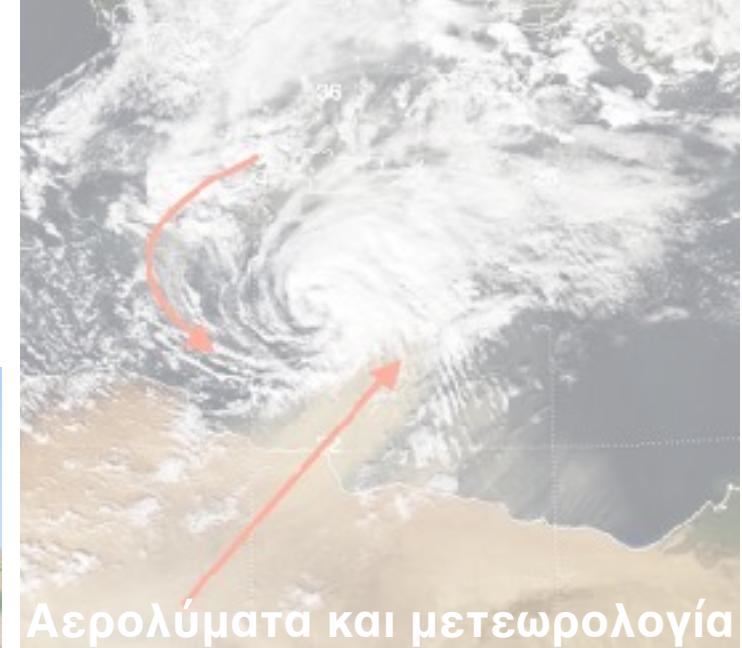
Κεραυνοί
Υετός



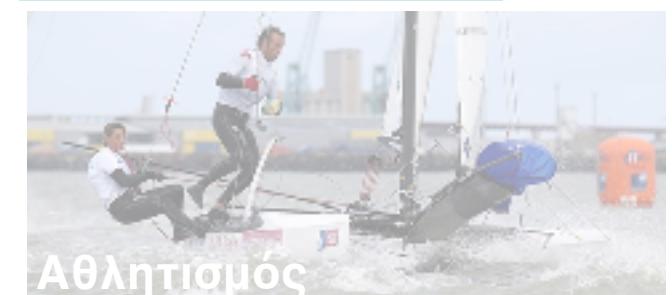
Άνεμος



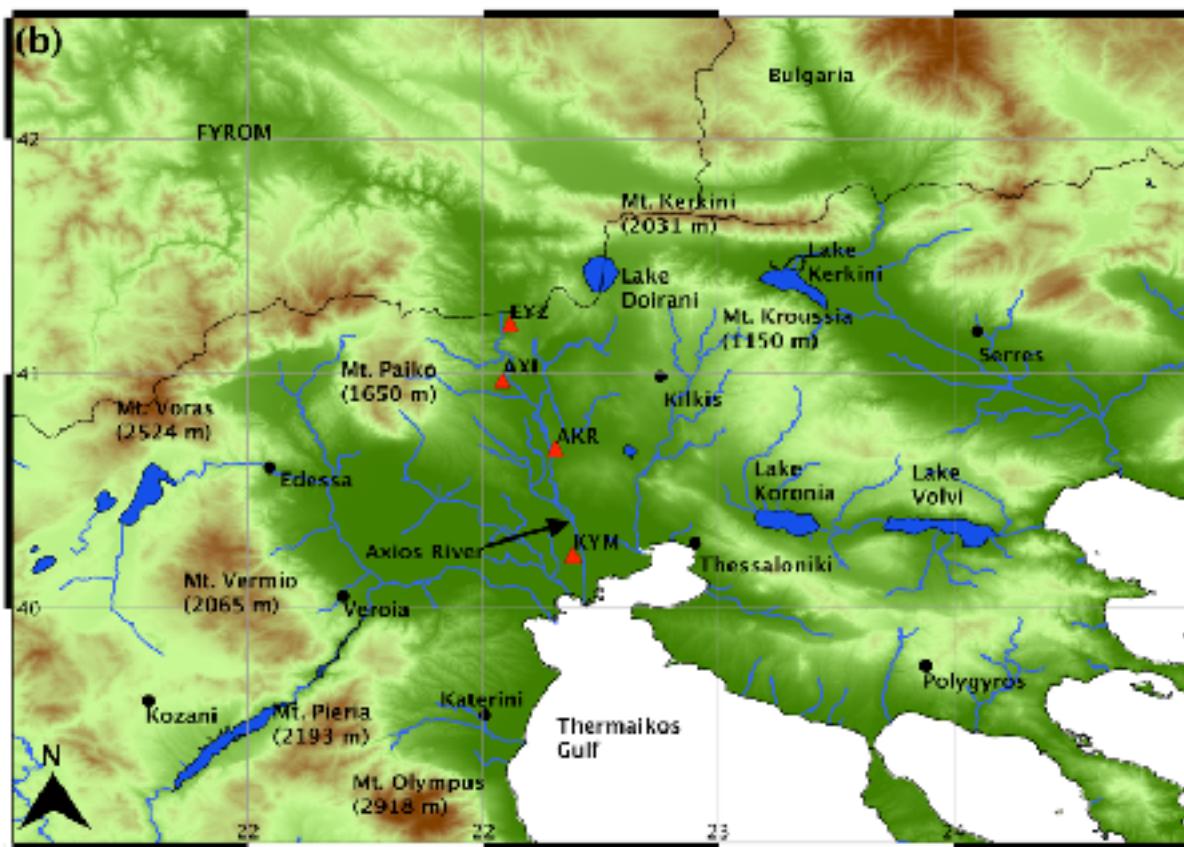
Βιομετεωρολογία



Αερολύματα και μετεωρολογία



Αθλητισμός



Προσομοιώσεις

- Τηλεσκοπικά (nested) πεδία: **20 - 5 - 1 km**
- 1 επεισόδιο ισχυρού **Βαρδάρη** (10/11/2007)
- Αρχικοποίηση με προγνώσεις του **ECMWF**
- Εξέταση της **ικανότητας** του μοντέλου να προσομοιώσει το επεισόδιο
- Ανάλυση του **μηχανισμού δημιουργίας** του Βαρδάρη

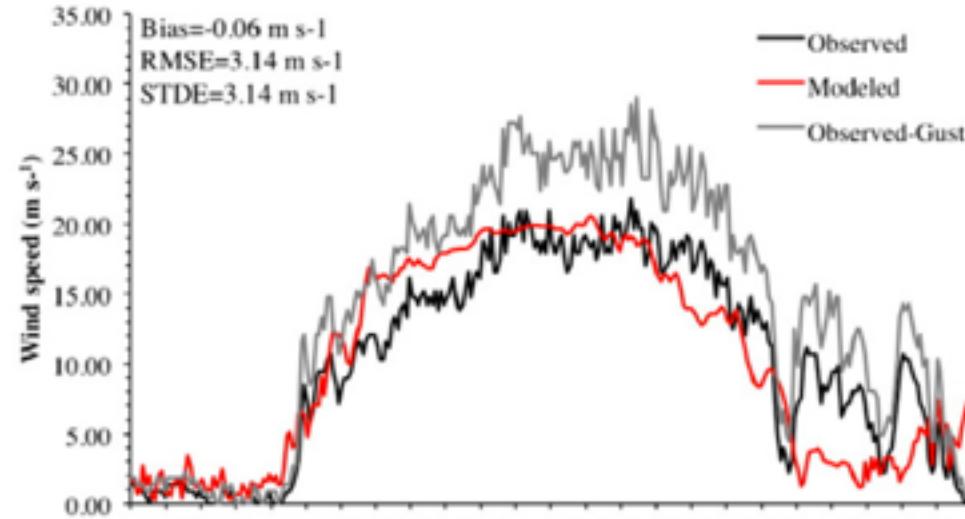
Ακραία και έντονα καιρικά φαινόμενα: Άνεμος

[2]

Koletsis I, Giannaros TM, Lagouvardos K, Kotroni V (2016) Observational and numerical study of the Vardaris wind regime in northern Greece. *Atmospheric Research* 171: 107-120.

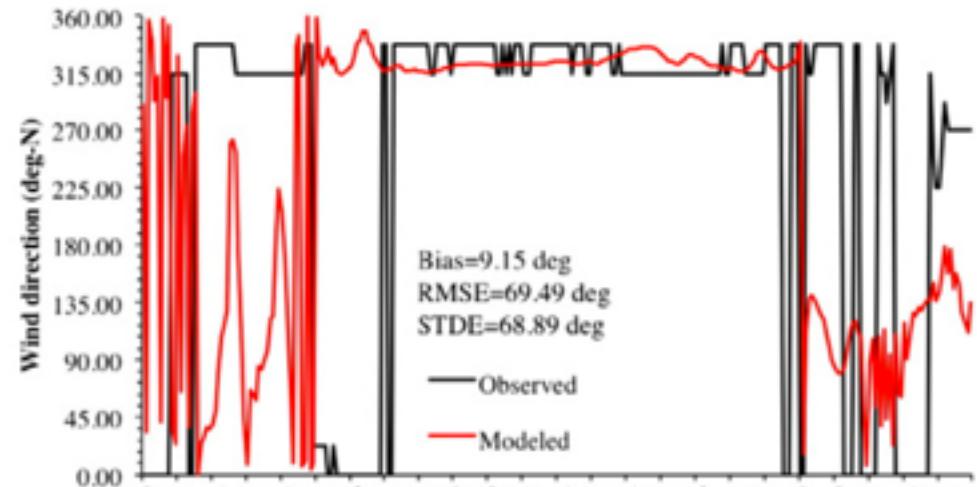
(a)

Eyzonoi



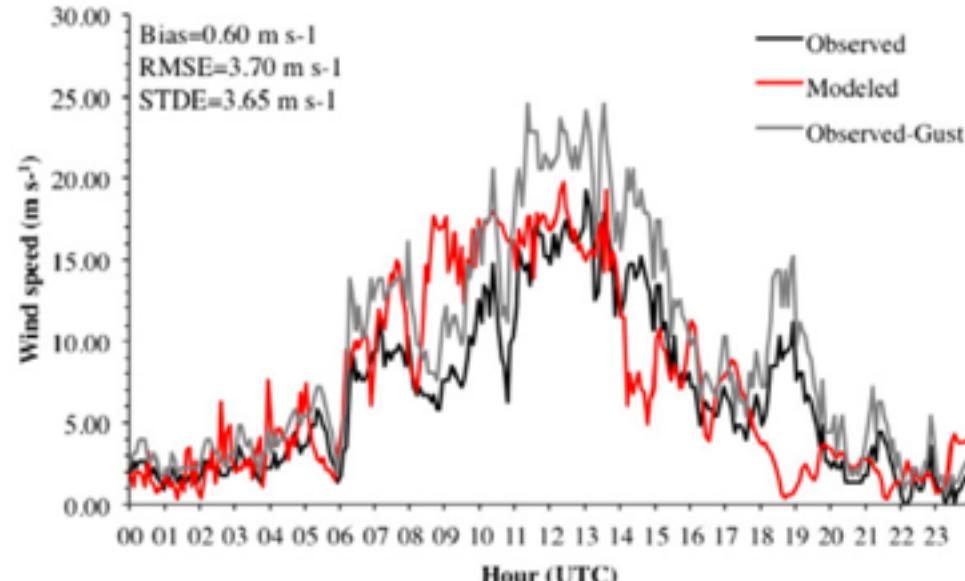
(b)

Eyzonoi



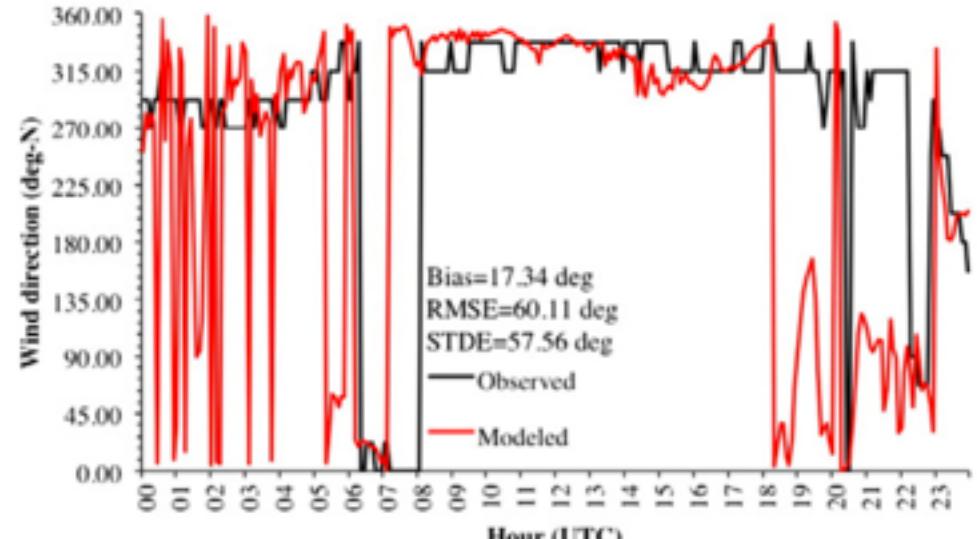
(g)

Kymina



(h)

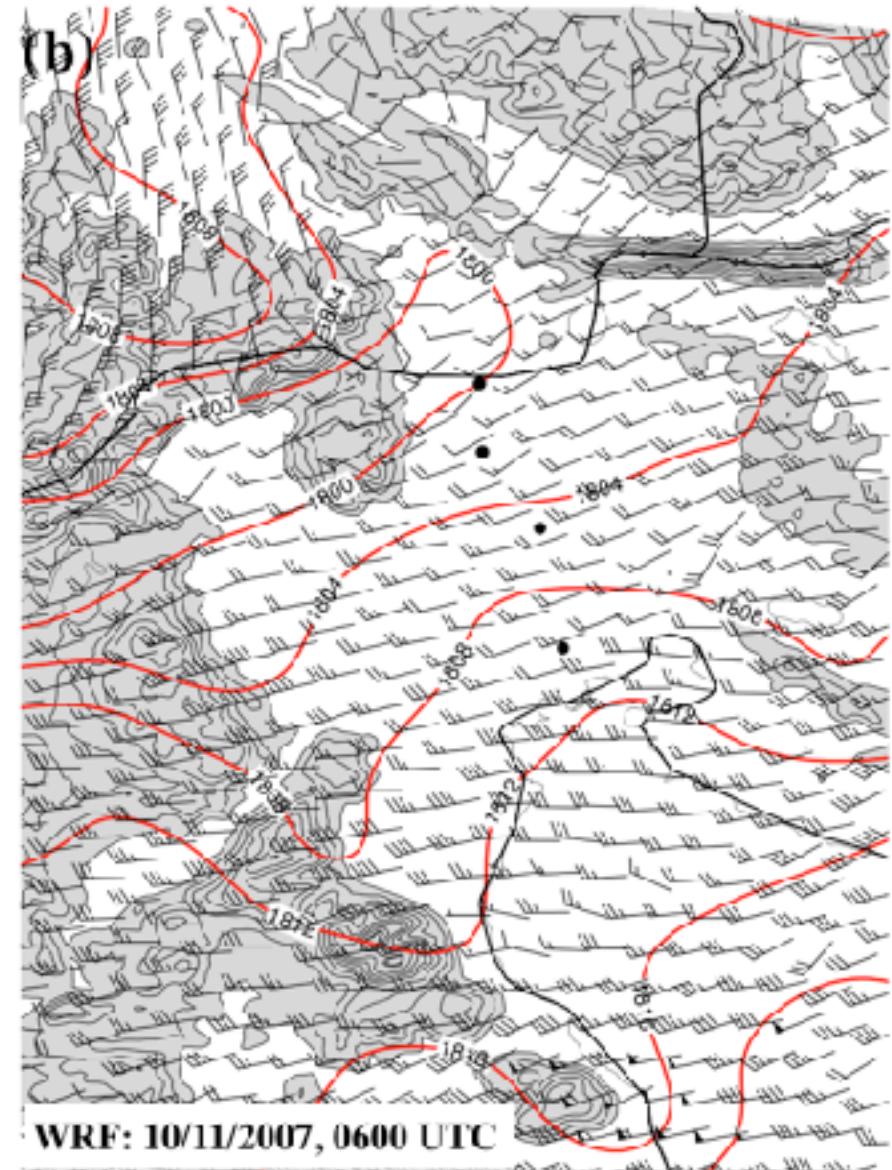
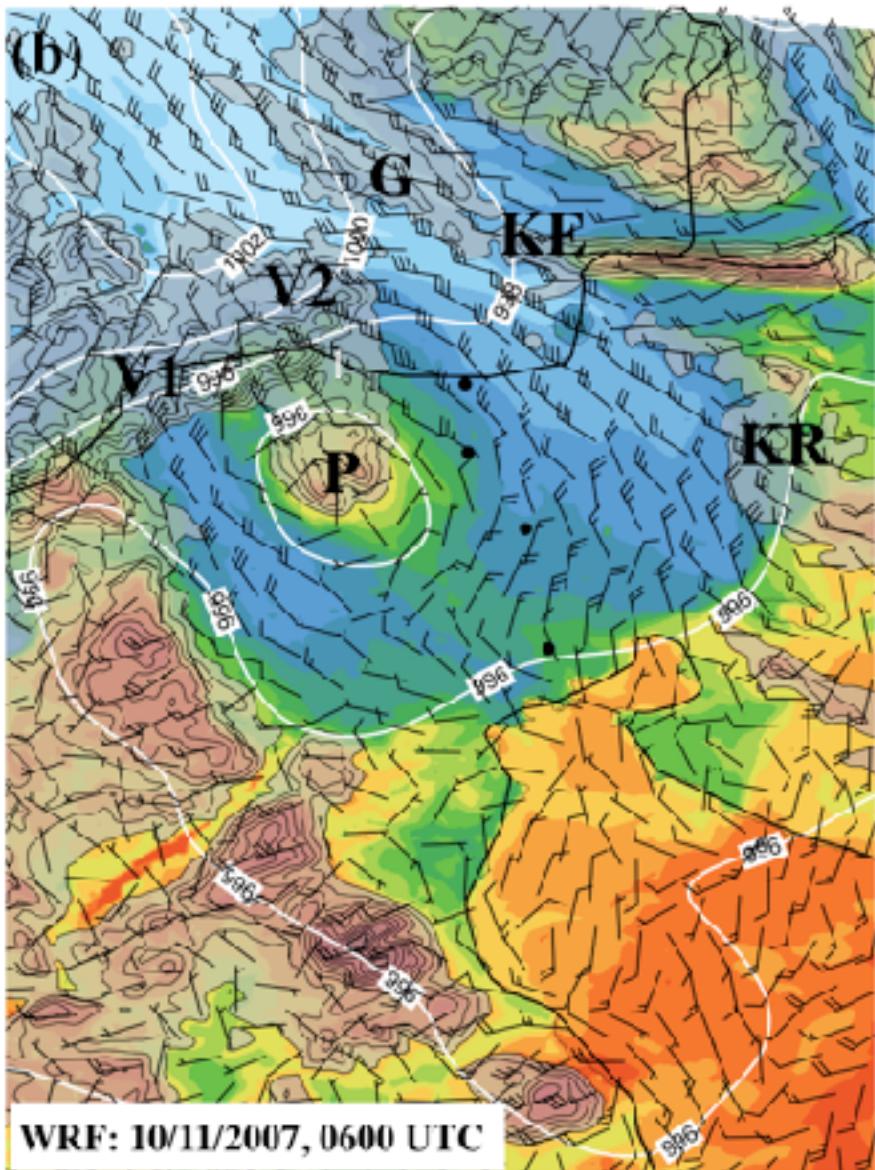
Kymina



Ακραία και έντονα καιρικά φαινόμενα: 'Άνεμος'

[3]

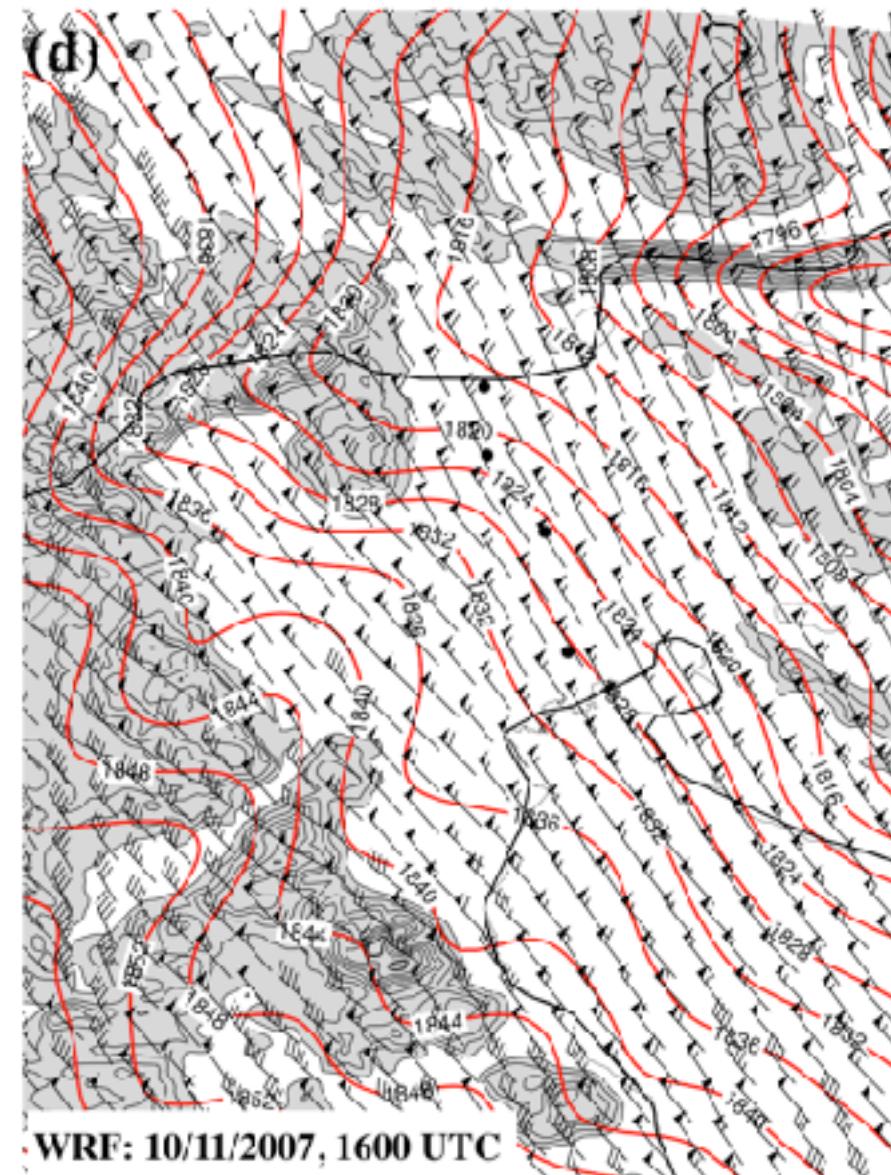
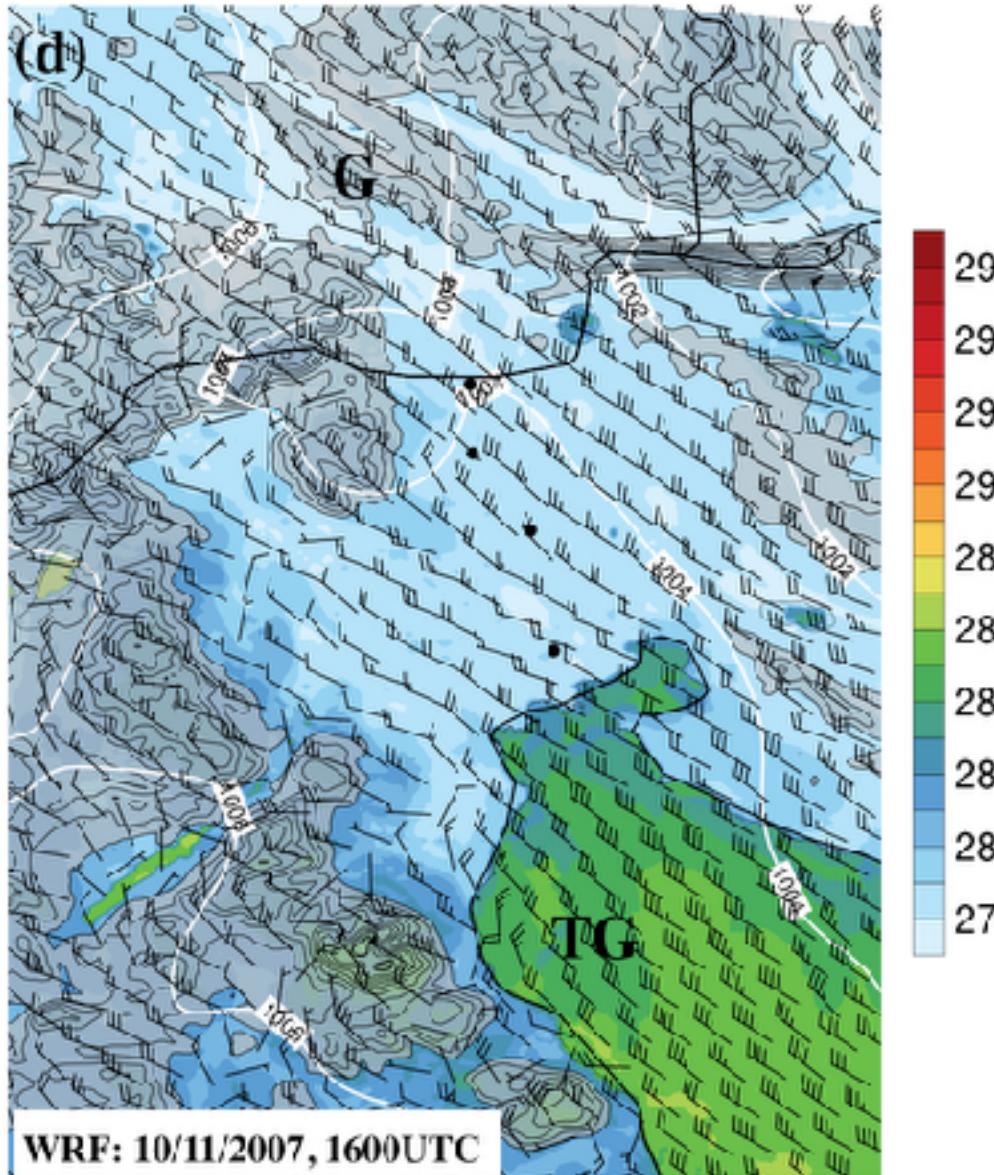
Koletsis I, Giannaros TM, Lagouvardos K, Kotroni V (2016) Observational and numerical study of the Vardaris wind regime in northern Greece. *Atmospheric Research* **171**: 107-120.



Ακραία και έντονα καιρικά φαινόμενα: Άνεμος

[4]

Koletsis I, Giannaros TM, Lagouvardos K, Kotroni V (2016) Observational and numerical study of the Vardaris wind regime in northern Greece. *Atmospheric Research* 171: 107-120.



Εφαρμογές του WRF

Οι εφαρμογές που θα παρουσιαστούν αποτελούν προϊόν της ερευνητικής μου δραστηριότητας στο **Εργαστήριο Φυσικής της Ατμόσφαιρας του ΑΠΘ**, και στο **Ινστιτούτο Ερευνών Περιβάλλοντος και Βιώσιμης Ανάπτυξης του ΕΑΑ**

Αστική θερμική νησίδα



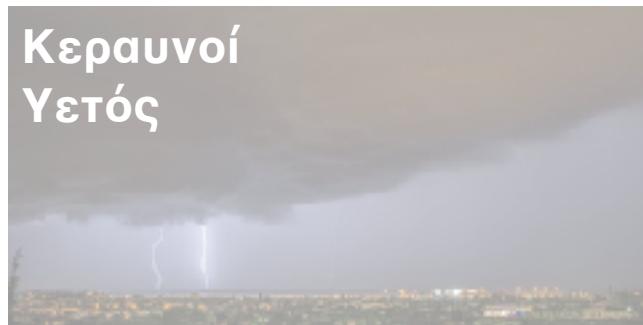
Αιολικό δυναμικό



Ηλιακό δυναμικό



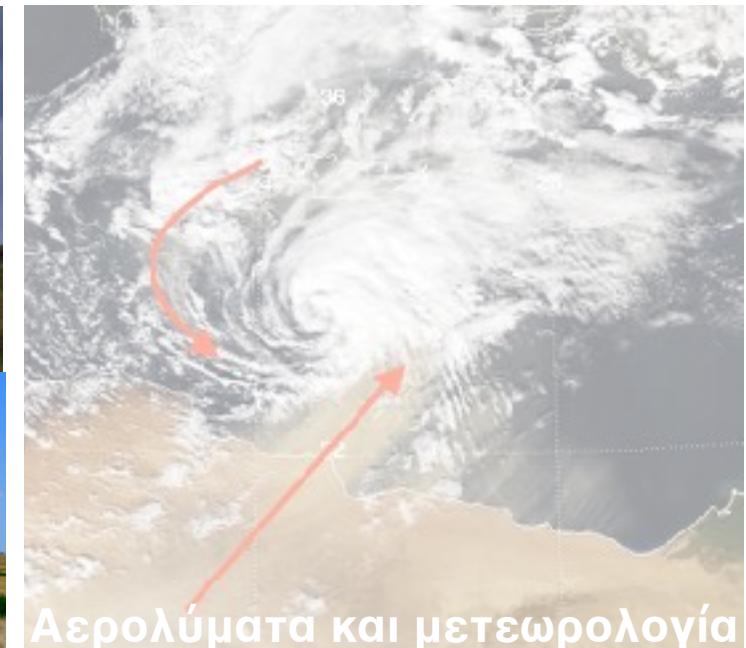
Κεραυνοί
Υετός



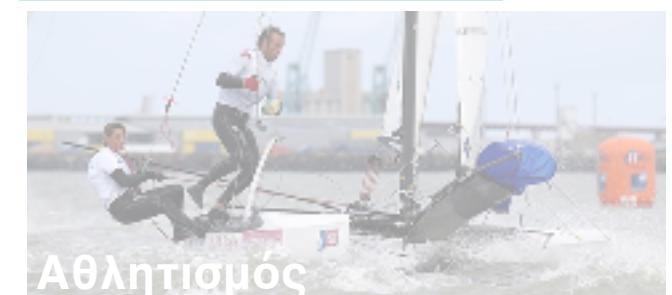
Άνεμος



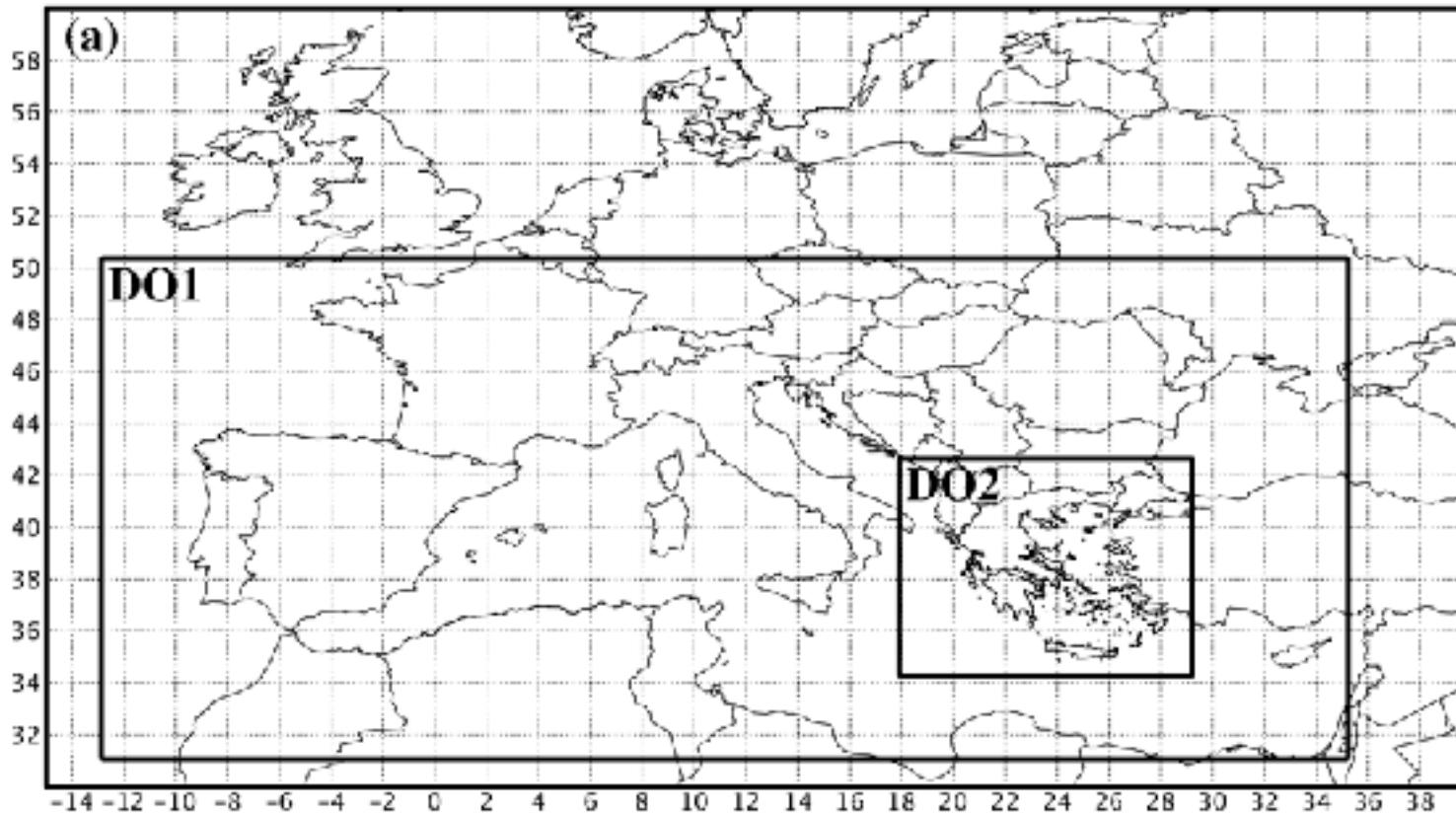
Βιομετεωρολογία



Αερολύματα και μετεωρολογία



Αθλητισμός



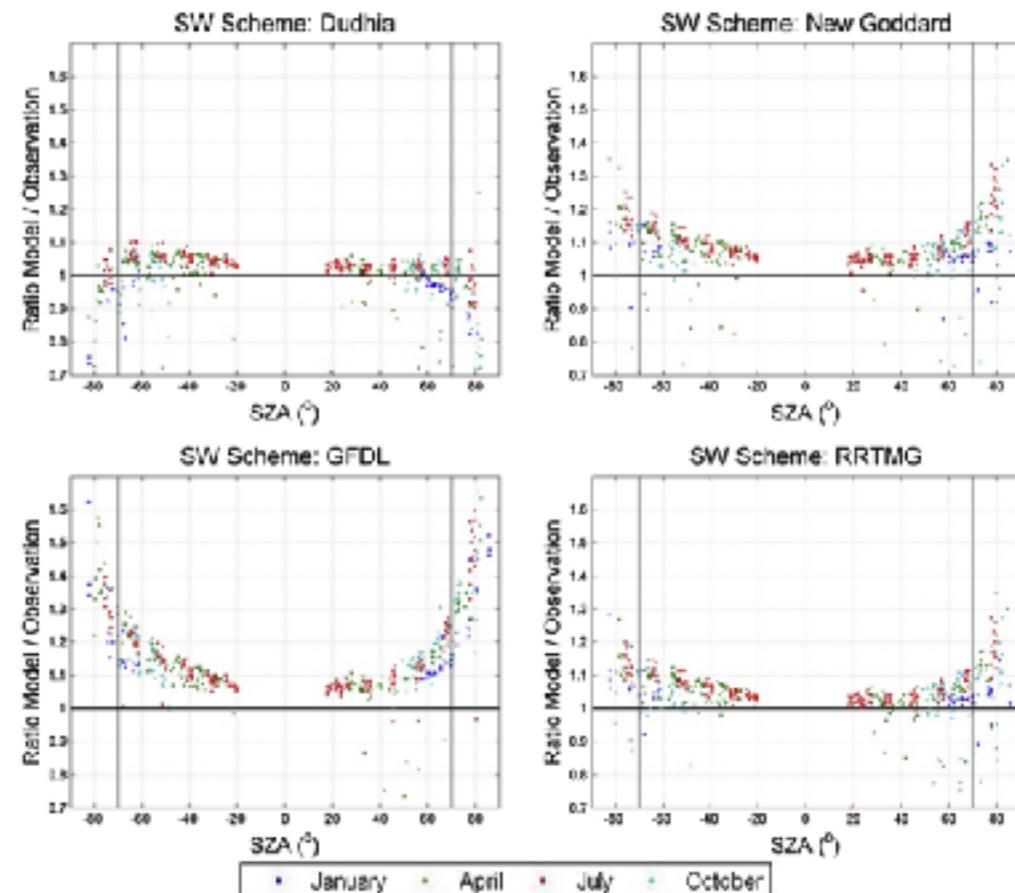
Προσομοιώσεις

- Τηλεσκοπικά (nested) πεδία: **30 - 10 km**
- **4 μήνες** (Ιαν - Απρ - Ιολ - Οκτ) του 2013
- Αρχικοποίηση με αναλύσεις του **NCEP**
- Ανάλυση της ευαισθησίας του μοντέλου στα σχήματα παραμετροποίησης της ηλιακής (μικρού μ.κ.) ακτινοβολίας.

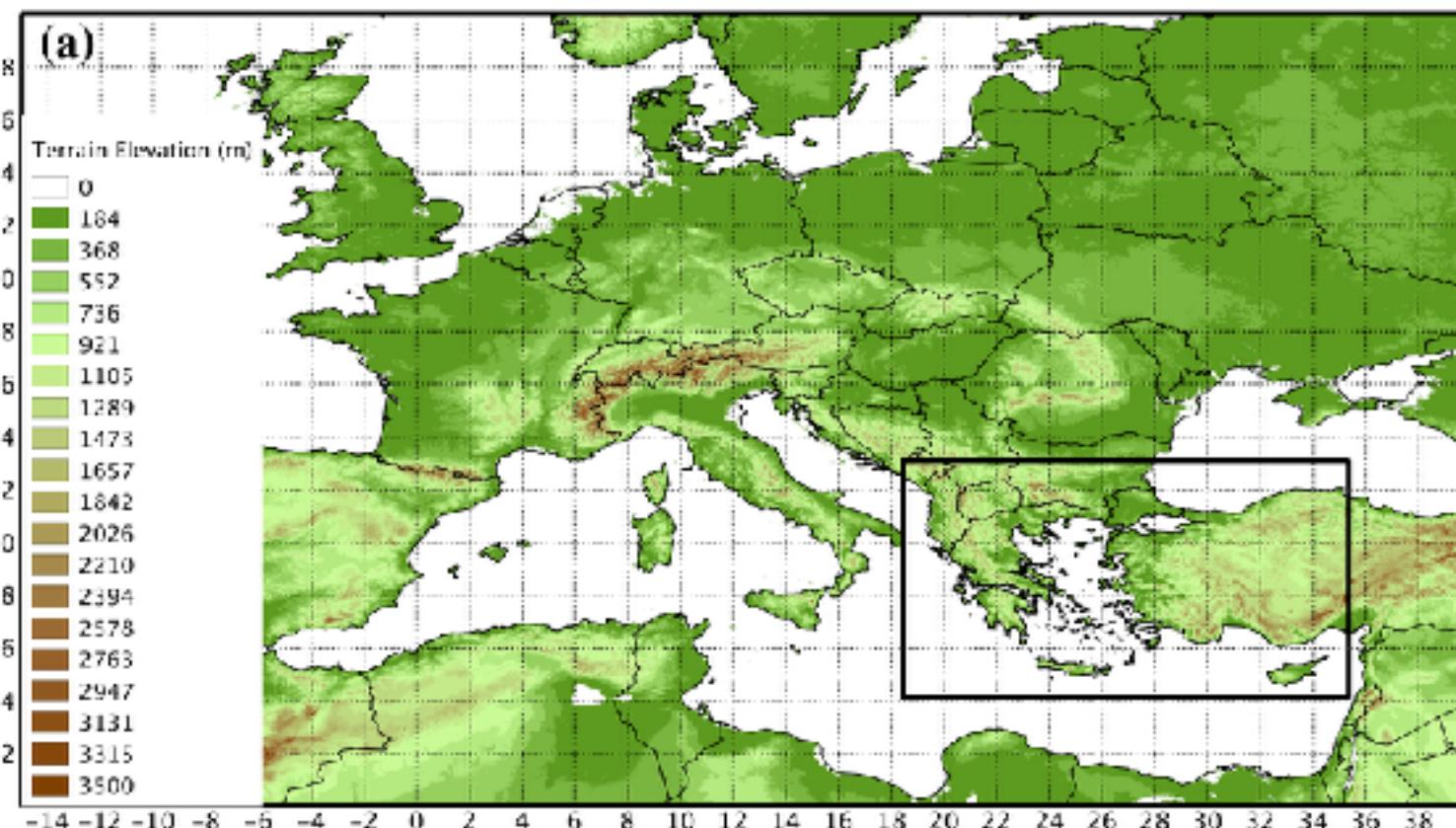
Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας: Ηλιακό δυναμικό

[2]

Zempila M-M, Giannaros TM, Bais A, Melas D, Kazantzidis A (2016). Evaluation of WRF shortwave parameterisations in predicting global solar irradiance in Greece. *Renewable Energy* 86: 831-840.



	Clear skies		All skies	
	RD (%)	RMSE (W m^{-2})	RD (%)	RMSE (W m^{-2})
Dudhia	2.25 (15.58)	102.03	42.63 (228)	185.45
New Goddard	7.73 (14.16)	103.74	56.49 (276)	195.02
GFDL	12.24 (13.63)	112.89	73.12 (337)	212.38
RRTMG	5.28 (13.13)	92.75	56.40 (269)	187.28



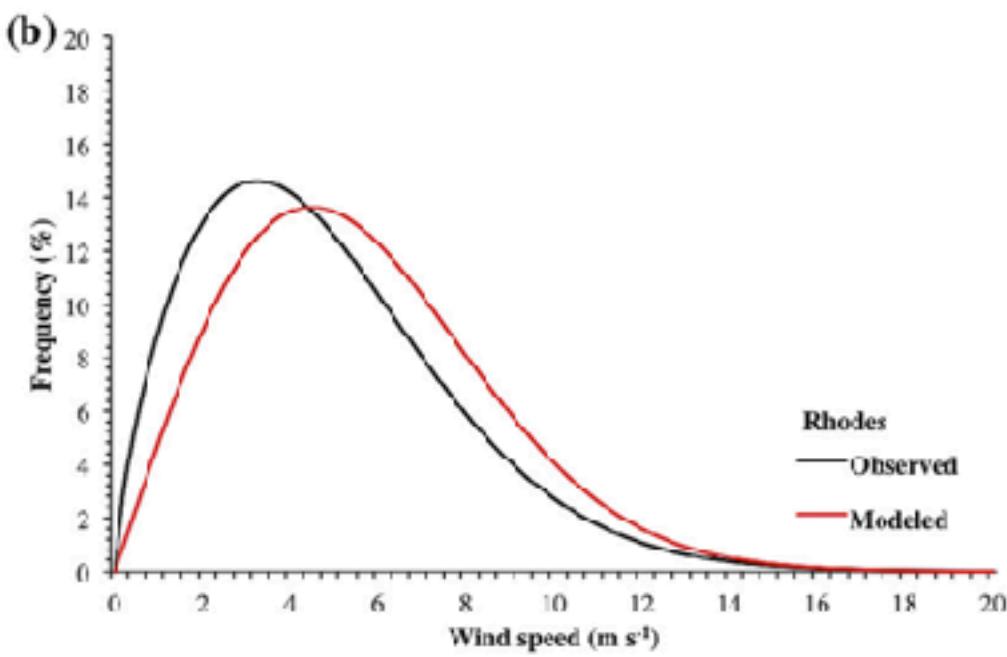
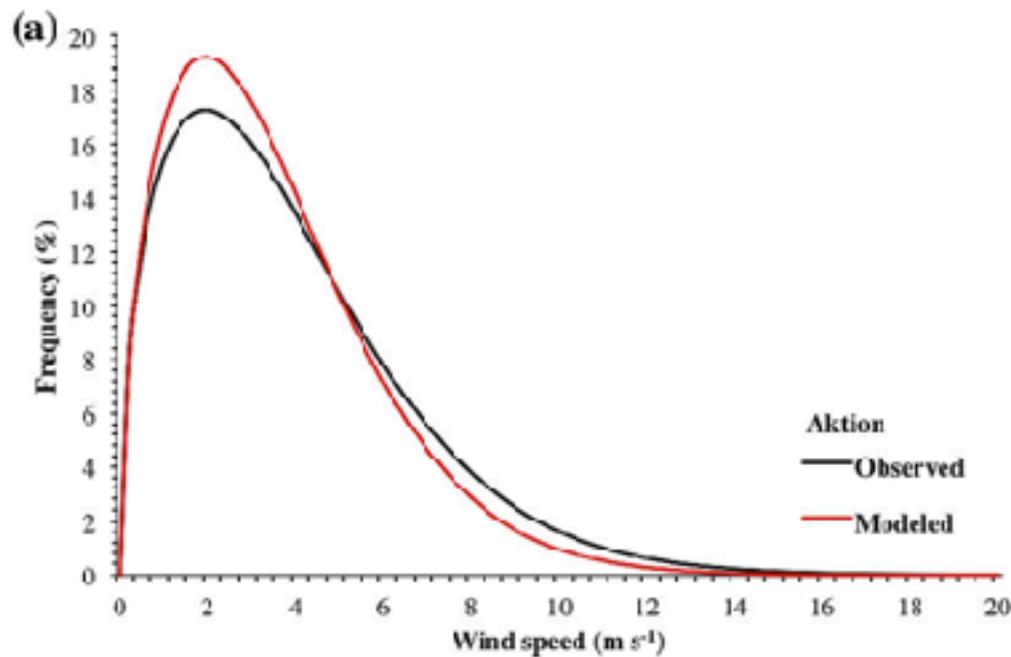
Προσομοιώσεις

- 1 πεδίο: **6 km**
- **1 έτος** (2003)
- Αρχικοποίηση με αναλύσεις του **ECMWF**
- Εξέταση της **ικανότητας** του μοντέλου να αναπαράξει το **αιολικό δυναμικό** της Ελλάδας

Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας: Αιολικό δυναμικό

[2]

Giannaros TM, Melas D, Ziomas I (2017). Performance evaluation of the Weather Research and Forecasting (WRF) model for assessing wind resource in Greece. *Renewable Energy* 102: 190-198.



Εφαρμογές του WRF

Οι εφαρμογές που θα παρουσιαστούν αποτελούν προϊόν της ερευνητικής μου δραστηριότητας στο **Εργαστήριο Φυσικής της Ατμόσφαιρας του ΑΠΘ**, και στο **Ινστιτούτο Ερευνών Περιβάλλοντος και Βιώσιμης Ανάπτυξης του ΕΑΑ**

Αστική θερμική νησίδα



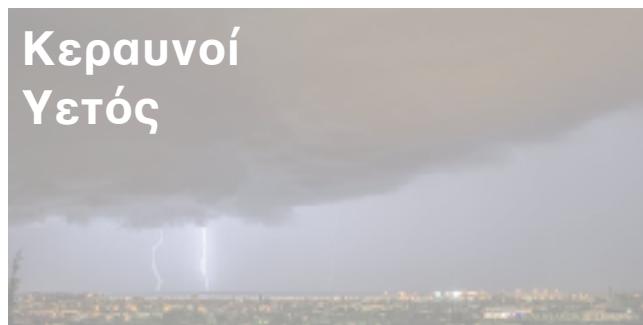
Αιολικό δυναμικό



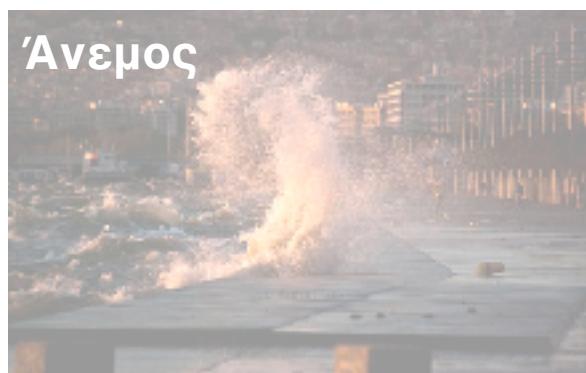
Ηλιακό δυναμικό



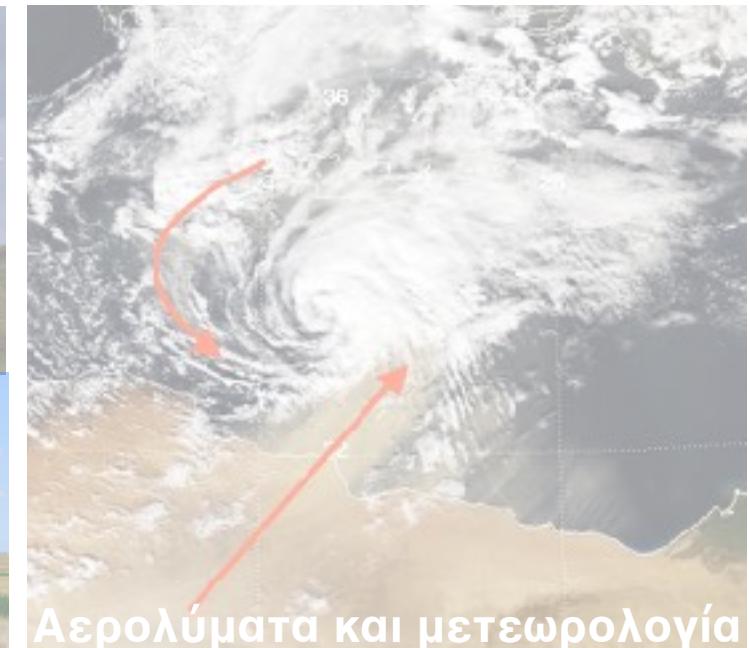
Κεραυνοί
Υετός



Άνεμος



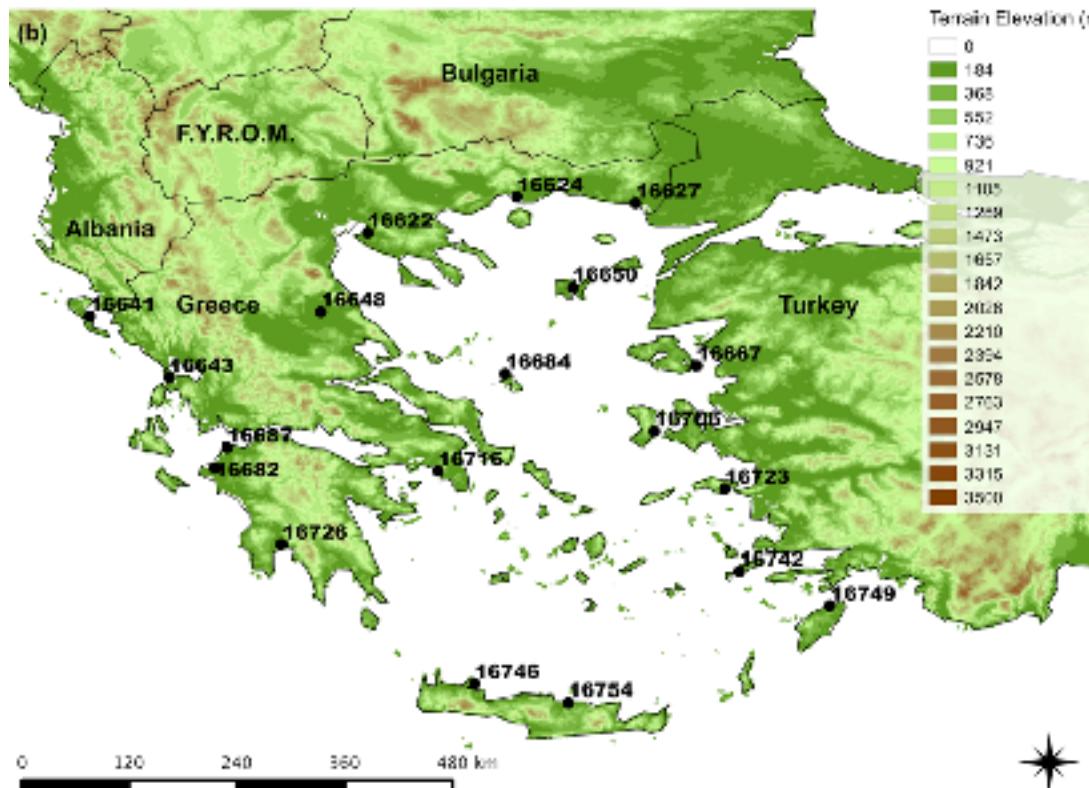
Βιομετεωρολογία



Αερολύματα και μετεωρολογία



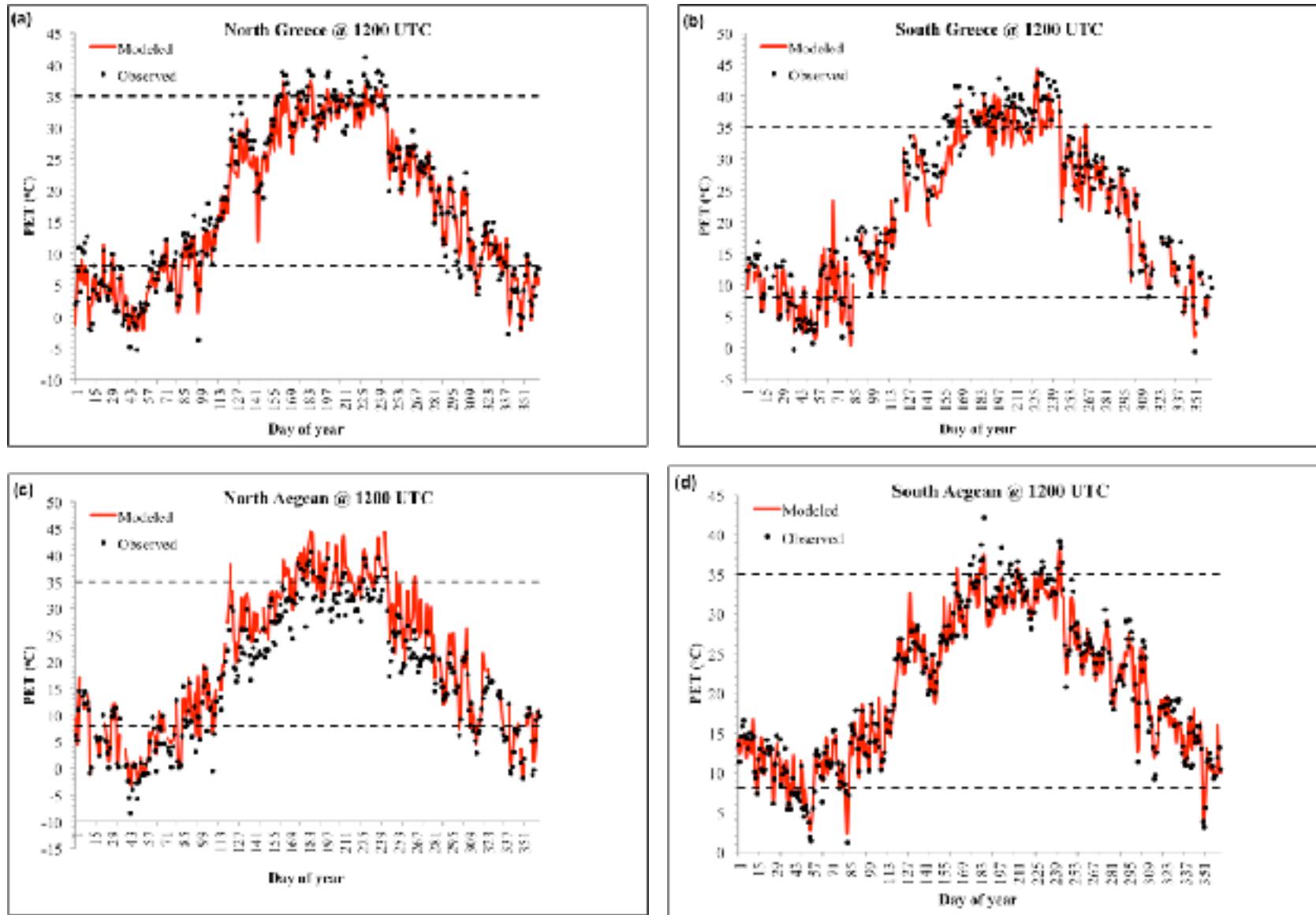
Αθλητισμός



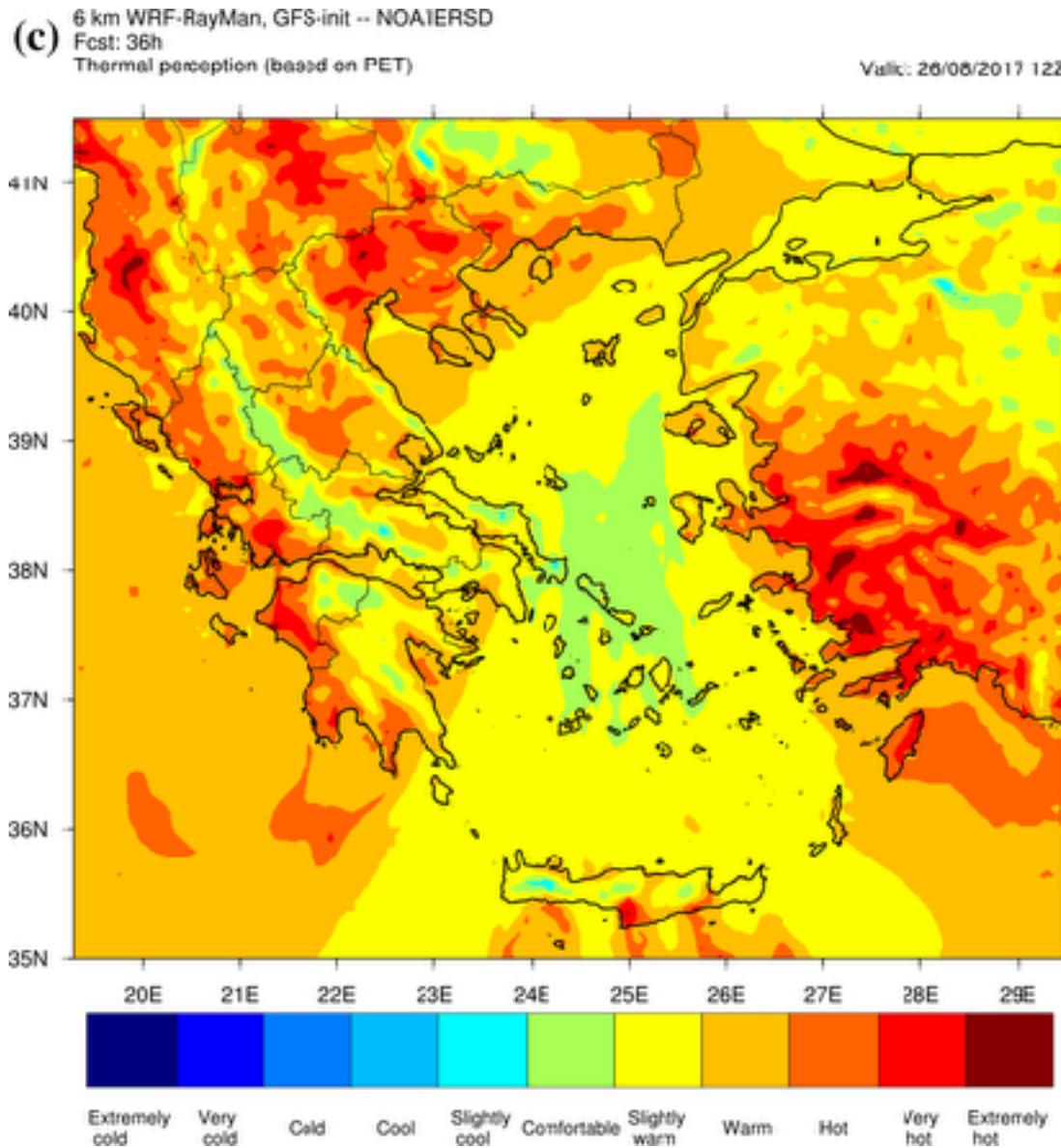
Προσομοιώσεις

- 1 πεδίο: **6 km**
- **1 έτος** (2003)
- Αρχικοποίηση με αναλύσεις του **ECMWF**
- Offline **σύζευξη** με το **άνθρωπο-βιομετεωρολογικό** μοντέλο **RayMan** για τον υπολογισμό της φυσιολογικά ισοδύναμης θερμοκρασίας (**Θερμική άνεση**)
- Μελέτη της χωροχρονικής διακύμανσης του **αισθήματος θερμικής άνεσης** στην Ελλάδα

Giannaros TM, Melas D, Matzarakis A (2015). Evaluation of thermal bioclimate based on observational data and numerical simulations. *International Journal of Biometeorology* 59: 151-164.



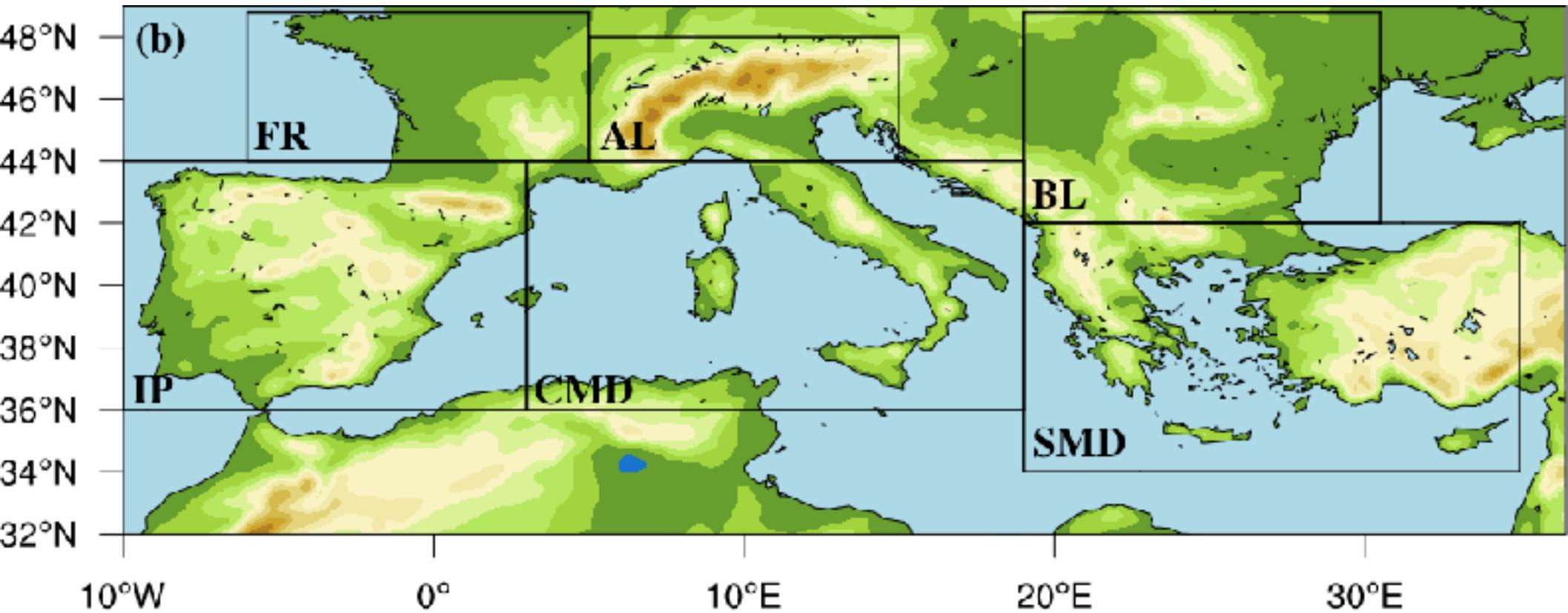
Giannaros TM, Lagouvardos K, Kotroni V, Matzarakis A (). Operational forecasting of human biometeorological conditions. Under review in *International Journal of Biometeorology*



Παροχή προγνώσεων **θερμικής αίσθησης** και **θερμικού στρες** σε επιχειρησιακή βάση για την περιοχή της Ελλάδας

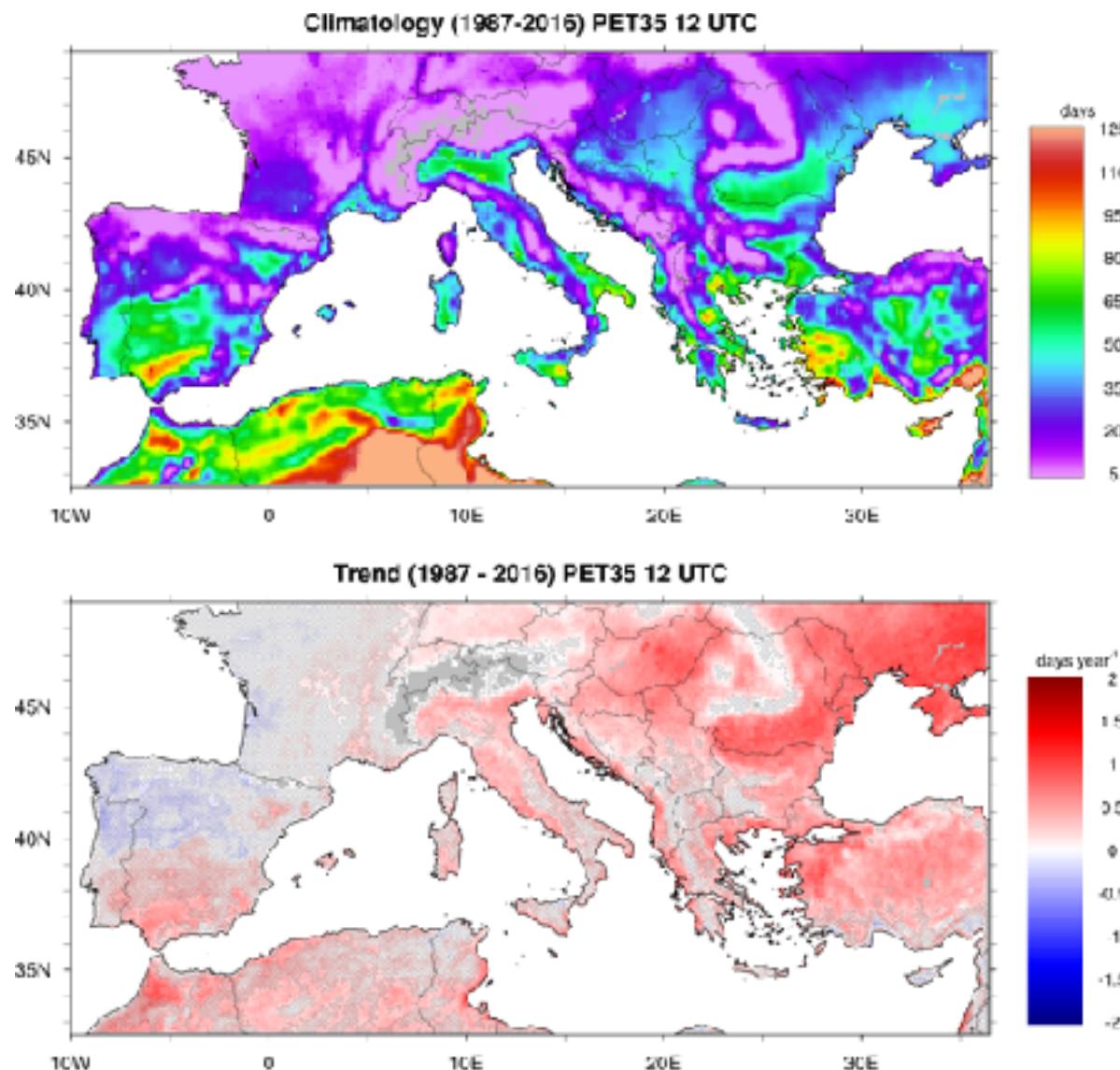
*Powered by **WRF**, provided through **meteo.gr***

Giannaros TM, Kotroni V, Lagouvardos K, Matzarakis A (). Climatology and trends of the Mediterranean thermal bioclimate. Under review in *International Journal of Climatology*



Ανάλυση του **θερμικού βιοκλίματος** της Μεσογείου και των **τάσεων** του, με βάση αριθμητικές προσομοιώσεις υψηλής ορίζοντας ($\sim 12 \text{ km}$) για 30 έτη (1987 - 2016)

Giannaros TM, Kotroni V, Lagouvardos K, Matzarakis A (). Climatology and trends of the Mediterranean thermal bioclimate. Under review in *International Journal of Climatology*



Εφαρμογές του WRF

Οι εφαρμογές που θα παρουσιαστούν αποτελούν προϊόν της ερευνητικής μου δραστηριότητας στο **Εργαστήριο Φυσικής της Ατμόσφαιρας του ΑΠΘ**, και στο **Ινστιτούτο Ερευνών Περιβάλλοντος και Βιώσιμης Ανάπτυξης του ΕΑΑ**

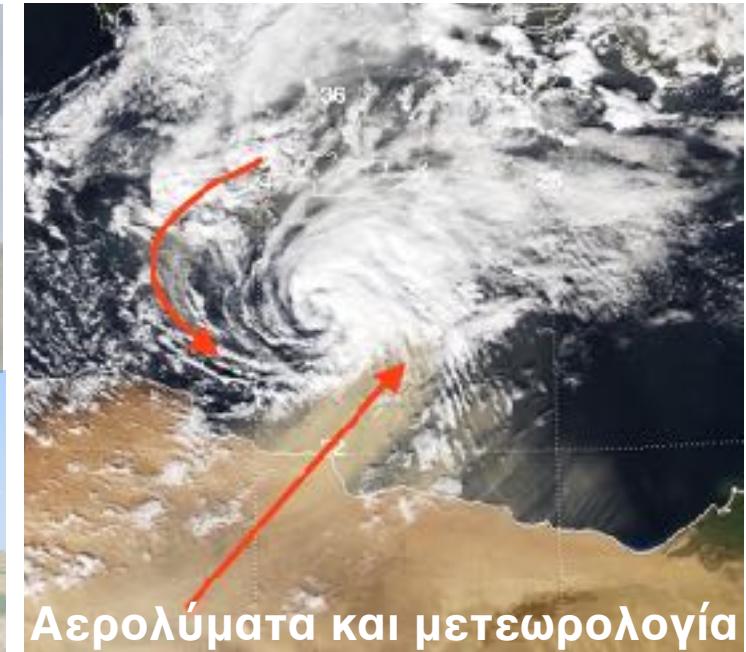
Αστική θερμική νησίδα



Αιολικό δυναμικό

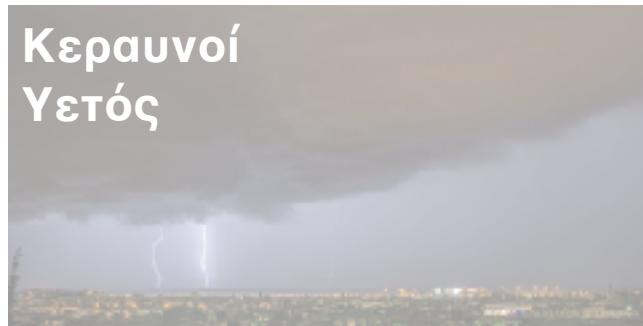


Ηλιακό δυναμικό



Αερολύματα και μετεωρολογία

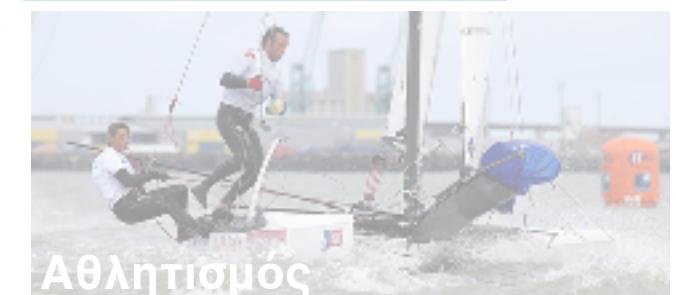
Κεραυνοί
Υετός



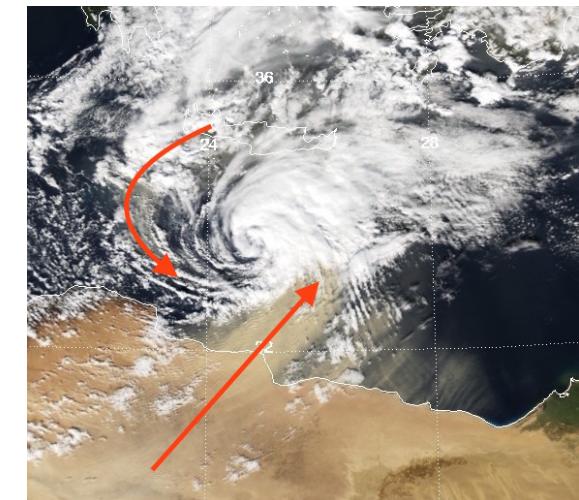
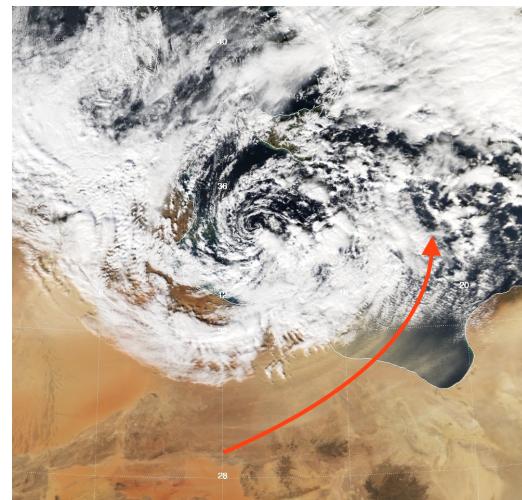
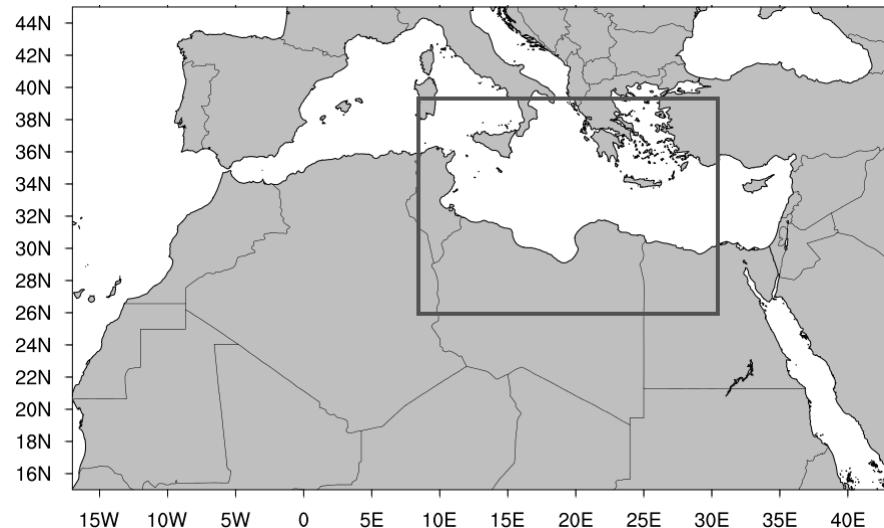
Άνεμος



Βιομετεωρολογία



Αθλητισμός



Ανάλυση ενός Μεσογειακού κυκλώνα με τροπικά χαρακτηριστικά (**Medicane**) και εξέταση των πιθανών **επιδράσεων** της **σκόνης** στη δομή και τα χαρακτηριστικά του

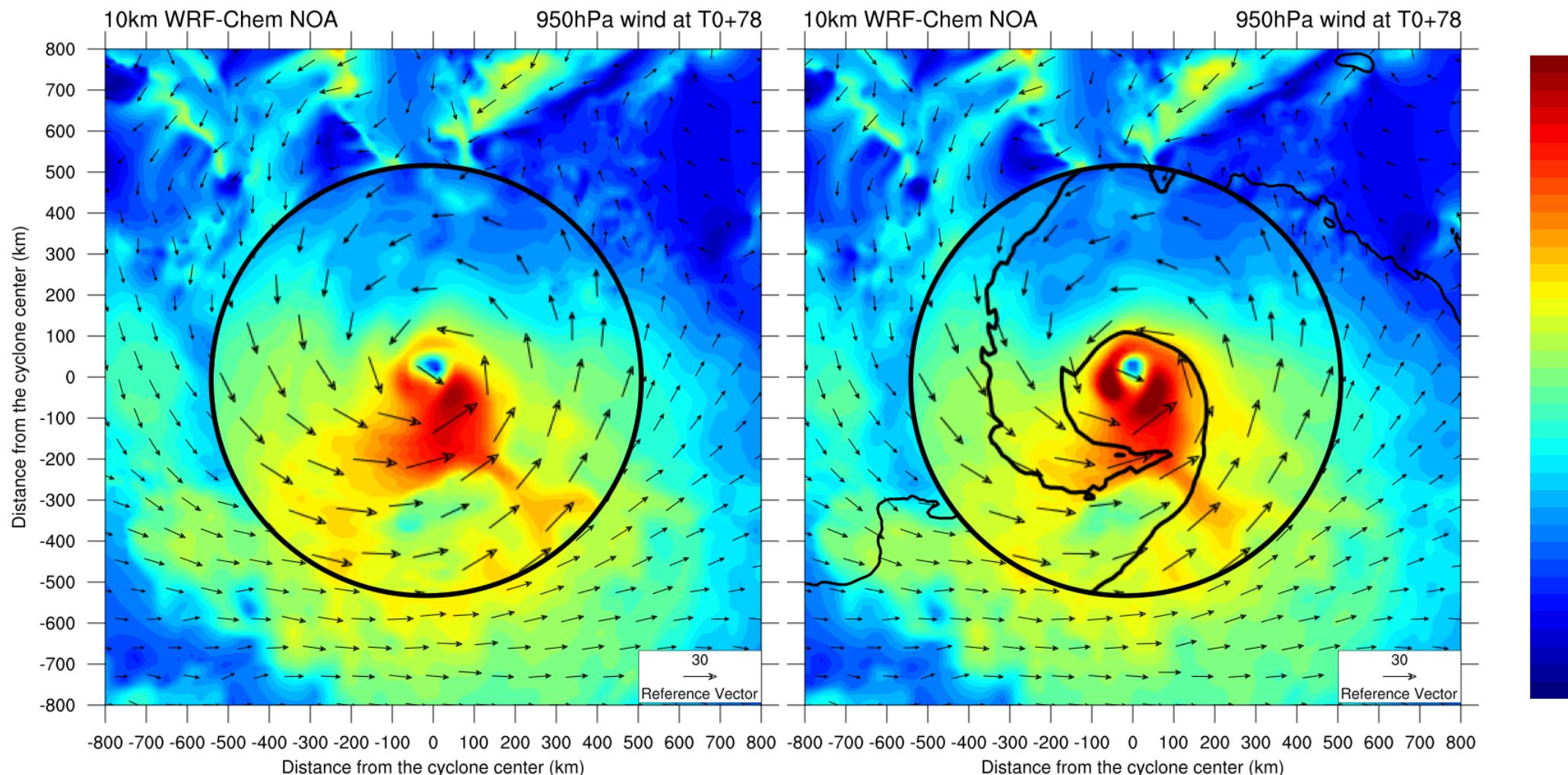


CNRM_{UMR3589}



Ερευνητική πρωτοβουλία στα πλαίσια του **HyMeX** με τη συμμετοχή **4 μοντέλων** από **7 ερευνητικές ομάδες**

Εργασία σε εξελίξη...



Εφαρμογές του WRF

Οι εφαρμογές που θα παρουσιαστούν αποτελούν προϊόν της ερευνητικής μου δραστηριότητας στο **Εργαστήριο Φυσικής της Ατμόσφαιρας του ΑΠΘ**, και στο **Ινστιτούτο Ερευνών Περιβάλλοντος και Βιώσιμης Ανάπτυξης του ΕΑΑ**

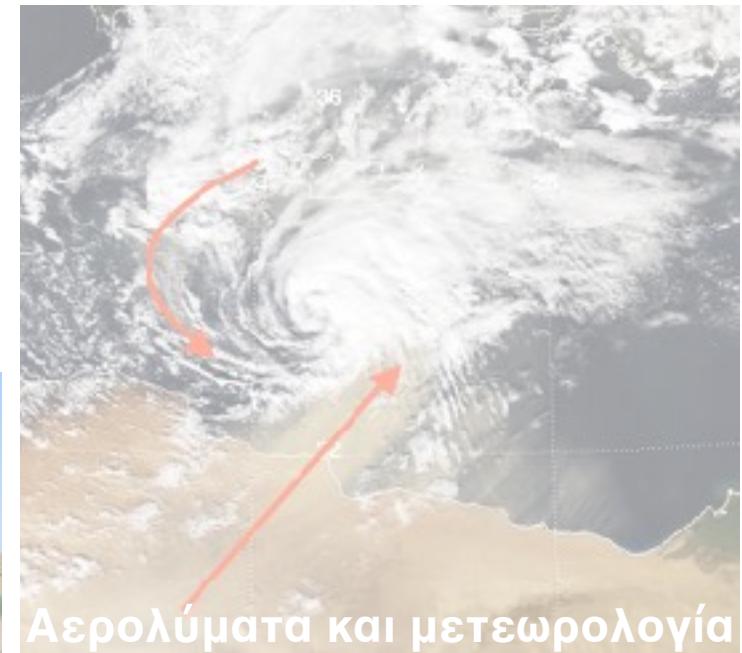
Αστική θερμική νησίδα



Αιολικό δυναμικό



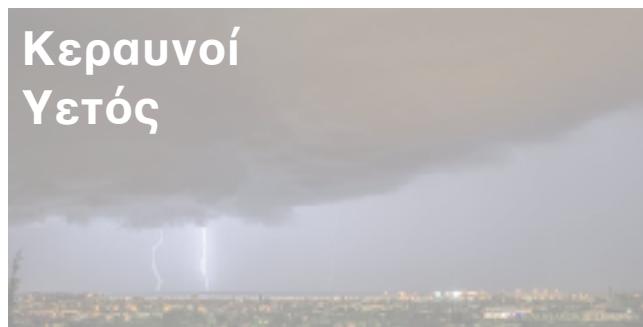
Ηλιακό δυναμικό



Αερολύματα και μετεωρολογία



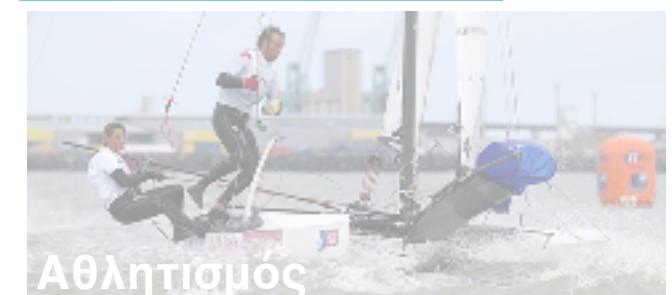
Κεραυνοί
Υετός



Άνεμος



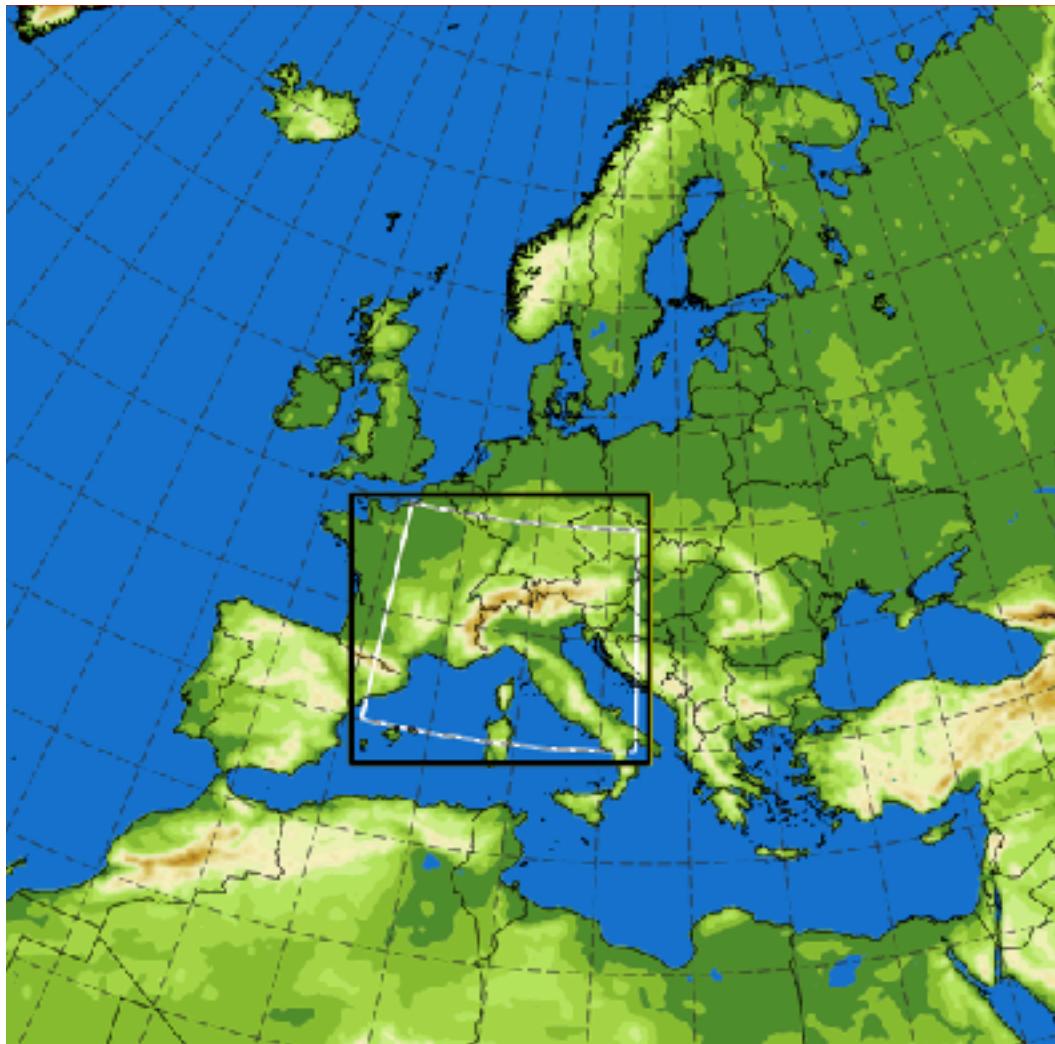
Βιομετεωρολογία



Αθλητισμός

Κλιματικές προσομοιώσεις

Εργασία σε εξελίξη...



Συμμετοχή στο **CORDEX FPS-Convection**

- Εκτέλεση κλιματικών προσομοιώσεων εστιάζοντας στις Άλπεις για την μελέτη των διεργασιών ανωμεταφοράς (convection)

Εφαρμογές του WRF

Οι εφαρμογές που θα παρουσιαστούν αποτελούν προϊόν της ερευνητικής μου δραστηριότητας στο **Εργαστήριο Φυσικής της Ατμόσφαιρας του ΑΠΘ**, και στο **Ινστιτούτο Ερευνών Περιβάλλοντος και Βιώσιμης Ανάπτυξης του ΕΑΑ**

Αστική θερμική νησίδα



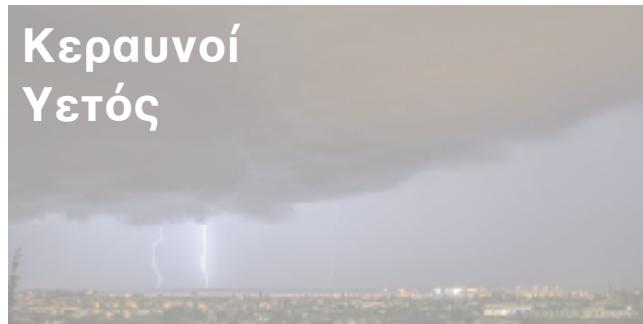
Αιολικό δυναμικό



Ηλιακό δυναμικό



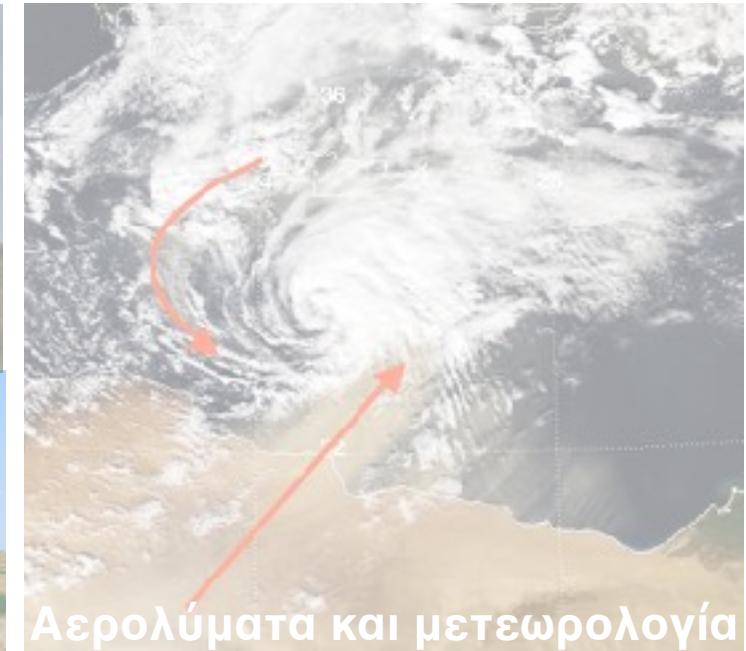
Κεραυνοί
Υετός



Άνεμος



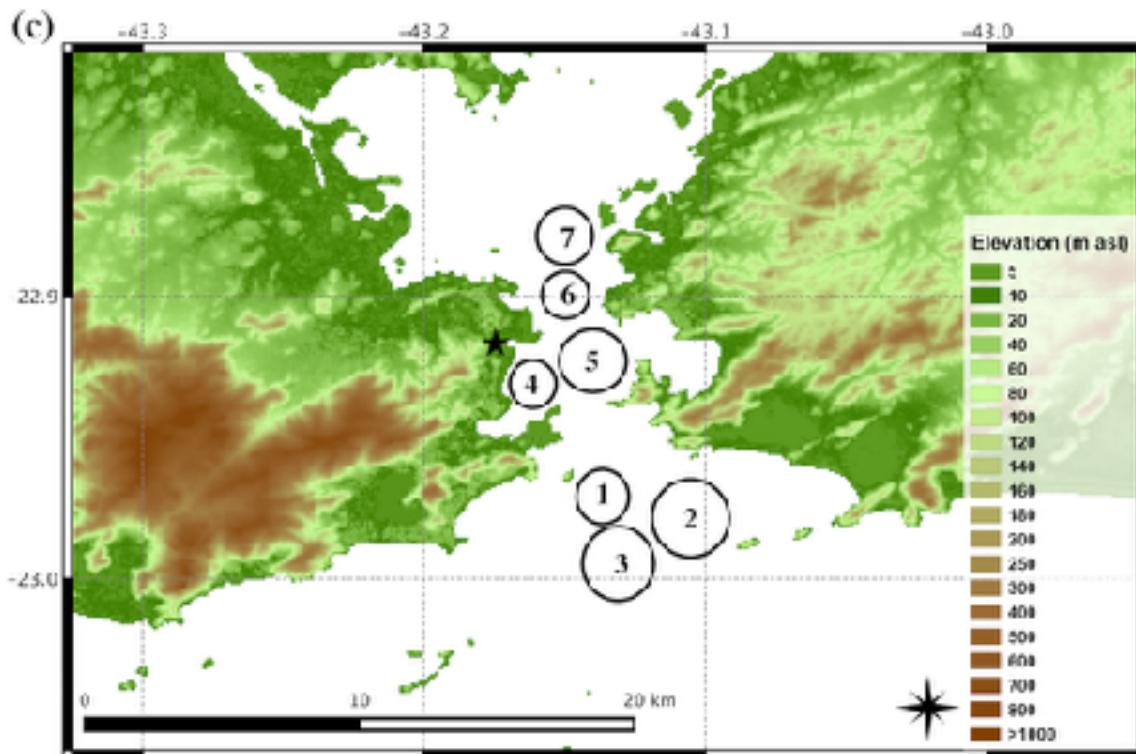
Βιομετεωρολογία



Αερολύματα και μετεωρολογία



Αθλητισμός



Επιχειρησιακή υποστήριξη της Ελληνικής Ολυμπιακής και Παραολυμπιακής Ομάδας
Ιστιοπλοΐας κατά τη διάρκεια των **Ολυμπιακών Αγώνων** Ρίο 2016

ΑΙΟΛΟΣ-ΡΙΟ2016 (WRF)

- **Καθημερινές** προγνώσεις για τον κόλπο του Ρίο και τους αγωνιστικούς στίβους, με οριζόντια ανάλυση **200 m**.

Date: 12 Aug 2016
 Event: Olympic Games, Rio 2016
 Team: Hellenic Wind (Nacra GRE)



DETAILED WIND FORECAST: COPACABANA

Hour (BST)	Mean WD	WD Range	Mean WS	WS Range	WS Gust
09:30-10:00	W	253-264	13	11-13	13-18
10:00-10:30	WSW	246-256	13	12-13	13-14
10:30-11:00	WSW	244-254	12	12-13	13-14
11:00-11:30	SW	231-236	13	13-14	14-16
11:30-12:00	SW	228-233	15	14-15	14-16
12:00-12:30	SW	229-235	15	14-16	15-17
12:30-13:00	SW	229-239	16	15-17	16-18
13:00-13:30	SW	224-232	15	15-16	16-18
13:30-14:00	SW	226-231	15	14-16	15-17
14:00-14:30	SW	225-230	15	14-16	15-17
14:30-15:00	SW	222-227	15	14-16	17-18
15:00-15:30	SW	223-229	14	14-15	15-16
15:30-16:00	SW	221-228	13	13-14	14-15
16:00-16:30	SW	222-227	12	12-13	13-17
16:30-17:00	SW	218-225	12	12-13	13-16
17:00-17:30	SW	218-224	12	11-13	12-14
17:30-18:00	SW	218-223	12	11-13	12-14
18:00-18:30	SW	217-223	11	10-13	11-13
18:30-19:00	SW	216-223	11	10-13	11-14
19:00-19:30	SW	215-220	12	10-13	11-14
19:30-20:00	SW	217-220	11	10-12	12-13

Date: 12 Aug 2016
 Event: Olympic Games, Rio 2016
 Team: Hellenic Wind (Nacra GRE)



METEO INFO: COPACABANA

Hour (BST)	Rain	Air Temperature	Mean SLP
10:00-12:00	No rain	20-20	1022-1021
12:00-14:00	No rain	20-20	1021-1021
14:00-16:00	No rain	20-20	1021-1021
16:00-18:00	No rain	20-21	1021-1022
18:00-20:00	No rain	21-21	1022-1022

METEO INFO: PAO DE ACUCAR

Hour (BST)	Rain	Air Temperature	Mean SLP
10:00-12:00	No rain	21-21	1023-1021
12:00-14:00	No rain	21-21	1021-1021
14:00-16:00	No rain	21-21	1021-1021
16:00-18:00	No rain	21-20	1021-1022
18:00-20:00	No rain	20-20	1022-1022

(c) meteo.gr	SBRJ		RJ1		RJ2		RJ3	
	MVE ($m s^{-1}$)	WBE (°)	MVE ($m s^{-1}$)	WBE (°)	MVE ($m s^{-1}$)	WBE (°)	MVE ($m s^{-1}$)	WBE (°)
8	1.6	25.5	0.8	19.3	1.3	30.3	1.2	29.0
9	1.7	14.3	1.4	105.7	1.3	63.5	1.7	89.4
10	1.2	43.9	2.3	23.7	4.5	39.0	1.4	30.3
11	1.0	26.6	1.8	18.7	2.1	24.0	3.1	30.9
12	2.8	68.8	2.3	52.4	3.2	66.2	1.5	37.4
13	2.5	29.1	1.5	41.1	2.1	50.3	1.9	32.7
14	0.8	22.1	1.3	40.7	0.6	36.0	1.3	39.2
15	1.1	139.1	3.3	66.7	2.4	123.4	3.6	67.5
16	0.7	7.5	1.1	46.0	0.8	36.4	0.9	53.1
17	2.2	77.6	0.8	44.0	1.5	52.8	1.7	100.7
18	0.8	16.6	1.8	27.5	1.0	25.8	2.8	18.9

ge 9 of 11



Ευχαριστώ πολύ για την προσοχή σας

Ερωτήσεις;

Θοδωρής Μ. Γιάνναρος

Μεταδιδακτορικός Ερευνητής

Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών

Ινστιτούτο Ερευνών Περιβάλλοντος & Βιώσιμης Ανάπτυξης

Email: thgian@noa.gr