



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ &  
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

**Διερεύνηση διπλής κυκλοστασιμότητας ανέμου για  
εφαρμογή σε στοχαστικά μοντέλα πρόβλεψης**



Ηλίας Δεληγιάννης

Επιβλέπων: κ. Δημήτριος Κουτσογιάννης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2016



Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας, κ. Δημήτριο Κουτσογιάννη για τις ώρες που μου αφιέρωσε κατά τη διάρκεια εκπόνησής της και για την πολύτιμη καθοδήγησή του. Ήταν πάντα διαθέσιμος σε οποιαδήποτε απορία είχα διατυπώσει. Επιπλέον, οφείλω να τον ευχαριστήσω για την αξέχαστη εμπειρία που αποκόμισα τη φετινή χρονιά στο συνέδριο EGU2016 στη Βιέννη, αφού μου ανέθεσε να παρουσιάσω 2 ενδιαφέρουσες εργασίες και στη συνέχεια προτείναμε για δημοσίευση ένα σχετικό άρθρο.

Θερμές ευχαριστίες απευθύνω και στον υποψήφιο διδάκτορα Παναγιώτη Δημητριάδη, με τον οποίο συνεργάστηκα για ατελείωτες ώρες, τόσο για τις 2 εργασίες του συνεδρίου, όσο και για το άρθρο. Θα θυμάμαι για πάντα τις φορές που φεύγαμε από το Πολυτεχνείο ενώ είχε βραδιάσει. Η συμβολή του στο αποτέλεσμα της διπλωματικής ήταν καθοριστική καθώς είχε πραγματικά εύστοχες ιδέες. Εκτός αυτών, εκτίμησα και τη βοήθειά του για τη χρήση του προγράμματος MATLAB, η οποία ήταν σύμφωνη με το κινέζικο ρητό:

*«Αν δώσεις ένα ψάρι σ' έναν άνθρωπο θα φάει μια φορά.  
Αν του μάθεις να ψαρεύει θα τρώει σ' όλη του τη ζωή.»*

Ευχαριστώ τον επίκουρο καθηγητή κ. Νικόλαο Μαμάση για τις απαντήσεις του σε καίρια σημεία της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένειά μου για τη στήριξη κατά τη διάρκεια της πενταετούς φοίτησής μου στη σχολή Πολιτικών Μηχανικών.



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	Εισαγωγή.....	1
1.1	Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και υδρομετεωρολογικές μεταβλητές.....	1
1.2	Δομή της διπλωματικής εργασίας.....	2
2	Διπλή κυκλοστασιμότητα ταχύτητας ανέμου.....	4
2.1	Γενικά στοιχεία.....	4
2.2	Δεδομένα.....	4
2.3	Σημασία της διπλής περιοδικότητας.....	8
2.4	Φυσική εξήγηση διπλής περιοδικότητας.....	10
2.4.1	Ακτινοβολία στο εξωτερικό όριο της ατμόσφαιρας.....	11
2.4.2	Θερμοκρασία στην ατμόσφαιρα.....	15
2.4.3	Ταχύτητα ανέμου.....	20
3	Μοντέλα διπλής κυκλοστασιμότητας.....	24
3.1	Ταχύτητα ανέμου.....	25
3.1.1	Εκδοχή 1.....	25
3.1.2	Εκδοχή 2.....	27
3.1.3	Εκδοχή 3.....	27
3.1.4	Εκδοχή 4.....	28
3.2	Θερμοκρασία.....	28
3.3	Σύγκριση εκδοχών και επιλογή.....	29
3.4	Αναλυτικά αποτελέσματα.....	31
3.4.1	Ταχύτητα ανέμου.....	31
3.4.2	Θερμοκρασία.....	34
4	Δεδομένα πλήρους επεξεργασίας (reanalysis data).....	37
5	Στοχαστική δομή ταχύτητας ανέμου.....	42
5.1	Γενικά.....	42
5.2	Δεδομένα.....	43
5.3	Ανάλυση.....	45
6	Συμπεράσματα - Conclusions.....	48
7	Βιβλιογραφικές αναφορές.....	49
7.1	Ξενόγλωσσες.....	49

7.2	Ελληνόγλωσσες.....	50
7.3	Ιστοσελίδες.....	50
<b>8</b>	<b>Παράρτημα Α. Εφαρμογή μοντέλου ανέμου .....</b>	<b>51</b>
<b>9</b>	<b>Παράρτημα Β. Εφαρμογή μοντέλου θερμοκρασίας .....</b>	<b>78</b>
<b>10</b>	<b>Παράρτημα Γ. Προκαταρκτική έρευνα.....</b>	<b>102</b>
10.1	Έκδοχή Α.....	102
10.2	Έκδοχή Β.....	102
10.3	Έκδοχή Γ .....	103
10.4	Έκδοχή Δ.....	103
<b>11</b>	<b>Παράρτημα Δ. Παρατηρήσεις excel, matlab.....</b>	<b>104</b>

## ΣΧΗΜΑΤΑ

Σχήμα 2.1. Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας 2 MW.....	9
Σχήμα 2.2. Γεωγραφική κατανομή της μέσης ετήσιας ακτινοβολίας.....	13
Σχήμα 2.3. κατανομή διακύμανσης ακτινοβολίας (α) μηνιαίας, <b>RDm</b> και (β) ωριαίας, <b>RDh</b> . .....	14
Σχήμα 2.4. (α) γεωγραφική κατανομή του μήνα αιχμής ακτινοβολίας, (β) παράδειγμα μηνιαίας χρονοσειράς για έναν σταθμό γεωγραφικού πλάτους 10 μοιρών. ....	14
Σχήμα 2.5. (α) εκτιμώμενη ώρα αιχμής ακτινοβολίας συναρτήσει του γεωγραφικού μήκους, (β) απόκλιση (σε ώρες) από την ευθεία γραμμικής παλινδρόμησης συναρτήσει του γεωγραφικού πλάτους. ....	15
Σχήμα 2.6. Γεωγραφική κατανομή της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας.....	15
Σχήμα 2.7. κατανομή διακύμανσης θερμοκρασίας (α) μηνιαίας, <b>TDm</b> και (β) ωριαίας, <b>TDh</b> . .....	16
Σχήμα 2.8. (α) συχνότητα και (β) γεωγραφική κατανομή εμφάνισης κάθε τιμής της μηνιαίας υστέρησης θερμοκρασίας έναντι της ακτινοβολίας.....	17
Σχήμα 2.9. Γεωγραφική κατανομή μηνιαίου συντελεστή συσχέτισης για υστέρηση θερμοκρασίας έναντι ακτινοβολίας ίση με 1 μήνα. ....	17
Σχήμα 2.10. Γεωγραφική κατανομή του μήνα αιχμής θερμοκρασίας.....	18
Σχήμα 2.11. (α) συχνότητα και (β) γεωγραφική κατανομή εμφάνισης κάθε τιμής της ωριαίας υστέρησης θερμοκρασίας έναντι της ακτινοβολίας.....	18
Σχήμα 2.12. Γεωγραφική κατανομή μέσου ωριαίου συντελεστή συσχέτισης για υστέρηση θερμοκρασίας έναντι ακτινοβολίας ίση με 3 h.....	19
Σχήμα 2.13. (α) εκτιμώμενη ώρα αιχμής θερμοκρασίας συναρτήσει του γεωγραφικού μήκους, (β) απόκλιση (σε ώρες) από την ευθεία γραμμικής παλινδρόμησης συναρτήσει του γεωγραφικού πλάτους. ....	19
Σχήμα 2.14. Γεωγραφική κατανομή της μέσης ετήσιας ταχύτητας ανέμου.....	20
Σχήμα 2.15. Κατανομή διακύμανσης ταχύτητας ανέμου (α) μηνιαίας, <b>URm</b> και (β) ωριαίας, <b>URh</b> . ....	20
Σχήμα 2.16. Συχνότητα (α) και γεωγραφική κατανομή (β) εμφάνισης κάθε τιμής της μηνιαίας υστέρησης ταχύτητας ανέμου έναντι της θερμοκρασίας. ....	21
Σχήμα 2.17. Συχνότητα (α) και γεωγραφική κατανομή (β) εμφάνισης κάθε τιμής της ωριαίας υστέρησης ταχύτητας ανέμου έναντι της θερμοκρασίας.....	21
Σχήμα 2.18. Γεωγραφική κατανομή μέσου ωριαίου συντελεστή συσχέτισης για υστέρηση θερμοκρασίας έναντι ταχύτητας ανέμου ίση με 1 h. ....	22
Σχήμα 2.19. (α) εκτιμώμενη ώρα αιχμής ταχύτητας ανέμου συναρτήσει του γεωγραφικού μήκους, (β) απόκλιση (σε ώρες) από την ευθεία γραμμικής παλινδρόμησης συναρτήσει του γεωγραφικού πλάτους. ....	22
Σχήμα 3.1. Θεωρητικές καμπύλες του μοντέλου 1 για: (α) <b>a1</b> =0,15 και (β) <b>a1</b> =0,6.....	25
Σχήμα 3.2. Θεωρητικές καμπύλες του μοντέλου 1 για: (α) <b>a2</b> =0,4 και <b>a3</b> =0,2. (β) <b>a2</b> =0,15 και <b>a3</b> =0,2. (γ) <b>a2</b> =-0,2 και <b>a3</b> =0,6. (δ) <b>a2</b> =-0,3 και <b>a3</b> =0,4.....	26
Σχήμα 3.3. Θεωρητικές καμπύλες του μοντέλου 2.....	27

Σχήμα 3.4. Θεωρητικές καμπύλες του μοντέλου 3.....	28
Σχήμα 3.5. Θεωρητικές καμπύλες του μοντέλου 4.....	28
Σχήμα 3.6. (α) κατανομή <b>a1</b> με το πλάτος, (β) σχέση <b>a1</b> και <b>URh</b> . ....	31
Σχήμα 3.7. (α) κατανομή <b>a2</b> με το πλάτος, (β) σχέση <b>a2</b> και <b>URm</b> , (γ) κατανομή <b>a3</b> με το πλάτος, (δ) σχέση <b>a3</b> και <b>URm</b> , .....	32
Σχήμα 3.8. σχέση <b>a2</b> και <b>a3</b> . ....	32
Σχήμα 3.9. σχέση <b>a1</b> και <b>a4</b> . ....	32
Σχήμα 3.10. Γεωγραφική κατανομή (α) <b>rh</b> , (β) <b>rm</b> , (γ) <b>eN</b> . ....	33
Σχήμα 3.11. Σχέση μεταξύ (α) <b>rm</b> και <b>URm</b> , (β) <b>rh</b> και <b>URh</b> , (γ) <b>eN</b> και <b>URm</b> , (δ) <b>eN</b> και <b>URh</b> .....	34
Σχήμα 3.12. (α) κατανομή <b>a1</b> με το πλάτος, (β) σχέση <b>a1</b> και <b>TDh</b> .....	34
Σχήμα 3.13. (α) κατανομή <b>a2</b> με το πλάτος, (β) σχέση <b>a2</b> και <b>TDm</b> , (γ) κατανομή <b>a3</b> με το πλάτος, (δ) σχέση <b>a3</b> και <b>TDm</b> . ....	35
Σχήμα 3.14. Γεωγραφική κατανομή (α) <b>rh</b> , (β) <b>rm</b> , (γ) <b>eN</b> . ....	36
Σχήμα 3.15. Σχέση μεταξύ (α) <b>rm</b> και <b>TDm</b> , (β) <b>rh</b> και <b>TDh</b> , (γ) <b>eN</b> και <b>TDh</b> . ....	36
Σχήμα 4.1. Ωριαία και μηνιαία κατανομή ανέμου στη λίμνη Βικτώρια - μοντέλο CFDDA.....	39
Σχήμα 4.2. Ωριαία και μηνιαία κατανομή ανέμου στη λίμνη Βικτώρια – NOAA.....	39
Σχήμα 4.3. Ωριαία κατανομή του ανέμου (α) στο σταθμό Kigali, ανά 6 ώρες, (β) στο σταθμό 2446 ανά 1 ώρα και (γ) στο σταθμό 2446 ανά 6 ώρες. ....	41
Σχήμα 5.1. (α) Πείραμα ρίψης ζαριού και (β) αντίστοιχο κλιμακόγραμμα. ....	43
Σχήμα 5.2. (α) Μουσικό κομμάτι και (β) αντίστοιχο κλιμακόγραμμα. ....	43
Σχήμα 5.3. Κλιμακόγραμμα για κάθε Korpen.....	45
Σχήμα 5.4. Συντελεστής Hurst για κάθε Korpen.....	45
Σχήμα 5.5. Συντελεστής Hurst για κάθε υποκατηγορία του Korpen C.....	46
Σχήμα 5.6. Μέσο παγκόσμιο κλιμακόγραμμα και τεταρτημόρια.....	46
Σχήμα 5.7. Μέσο κλιμακόγραμμα στον ελληνικό χώρο και τεταρτημόρια.....	46
Σχήμα 5.8. Σύγκριση μέσων παγκοσμίων ετησίων τιμών με κανονική κατανομή. ....	47



## ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας 2.1. Οι σταθμοί προκαταρκτικής μελέτης.....	6
Πίνακας 2.2. Οι σταθμοί της Ελλάδας.....	7
Πίνακας 2.3. Τιμές των συντελεστών $n$ , $\delta$ , $B$ και $E$ για κάθε μήνα.....	12
Πίνακας 3.1. Σύγκριση εκδοχών ταχύτητας ανέμου.....	30
Πίνακας 3.2. Σύγκριση εκδοχών θερμοκρασίας.....	30
Πίνακας 5.1. Καλύτεροι σταθμοί για κάθε υποκατηγορία Korpen.....	44

# ΧΑΡΤΕΣ

Χάρτης 2.1. Χωρική κατανομή των σταθμών των ομάδων Α και Β. ....	5
Χάρτης 2.2. Οι 33 σταθμοί που επιλέχθηκαν για την αρχική μελέτη. ....	6
Χάρτης 2.3. Οι σταθμοί της Ελλάδας στους οποίους εφαρμόστηκε η παρούσα μελέτη. ....	7
Χάρτης 4.1. Μέση ταχύτητα ανέμου στα 100 m, σύστημα MERRA (1979-2013).....	37
Χάρτης 4.2. Μέση ταχύτητα ανέμου στα 100 m, σύστημα CFDDA (1985-2005).....	38
Χάρτης 4.3. Μέση ταχύτητα ανέμου στα 100 m, σύστημα CFSR (1979-2010).....	38
Χάρτης 4.4. Μέση ταχύτητα ανέμου στα 100 m, σύστημα ERA-Interim (1979-2012). ....	38
Χάρτης 4.5. Θέση συλλογής αποτελεσμάτων reanalysis από NCAR.....	40
Χάρτης 5.1. Επιλεγμένοι σταθμοί για τη στοχαστική διερεύνηση ανέμου. ....	44

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Εξετάζεται η συμπεριφορά του ανέμου σε ωριαία, μηνιαία και υπερετήσια κλίμακα, σε παγκόσμια βάση. Αρχικά διερευνώνται 1800 σταθμοί παγκοσμίως ώστε να επιβεβαιωθεί ότι υπάρχει διπλή περιοδικότητα (ημερήσιοι και ετήσιοι κύκλοι). Η ύπαρξη της διπλής κυκλοστασιμότητας δικαιολογείται μέσω της συσχέτισης της ταχύτητας ανέμου με δύο άλλες μεταβλητές, την ακτινοβολία στο εξωτερικό όριο της ατμόσφαιρας και τη θερμοκρασία. Έπειτα, αφού δοκιμαστούν μερικά εναλλακτικά προσδιοριστικά μοντέλα, εφαρμόζεται το πιο κατάλληλο από αυτά στα δεδομένα ταχύτητας ανέμου και θερμοκρασίας. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας δεδομένα μιας περιοχής, εξετάζεται εάν τα αποτελέσματα των δεδομένων reanalysis περιγράφουν ικανοποιητικά αυτήν την περιοδικότητα. Τέλος, γίνεται μία παγκόσμια στοχαστική διερεύνηση της ταχύτητας ανέμου, με τη μελέτη της μακροπρόθεσμης εμμονής της μέσης ετήσιας ταχύτητας ανέμου σε 1300 σταθμούς παγκοσμίως.



# ABSTRACT

The wind speed's behavior is examined in an hourly, monthly and over-annual scale. First of all, 1,800 global wind stations are selected to be investigated, in order to ensure that a double periodicity exists (daily and annual cycles). The double cyclostationarity of wind speed is justified through the correlation among wind speed, temperature and radiation. In addition, a deterministic model is selected among several ones and applied to the wind speed and temperature data. What is more, the efficiency of some reanalysis data is checked by observing if they describe this double periodicity. Finally, a stochastic investigation of wind speed is conducted, by studying the long term persistence of annual mean wind speed in 1300 stations globally.



# 1 Εισαγωγή

## 1.1 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και υδρομετεωρολογικές μεταβλητές

Στην εποχή μας η κλιματική αλλαγή αποτελεί μείζον θέμα στην επιστημονική κοινότητα. Δυστυχώς κάποιες φορές οι έρευνες επικεντρώνονται στο «σύμπτωμα» δηλαδή την εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου, και όχι στην «ασθένεια» δηλαδή τη μη-βιωσιμότητα της παραγωγής ενέργειας με συμβατικές μεθόδους. Εάν δεν αναπτυχθούν μέθοδοι εξοικονόμησης ενέργειας και χρήσης Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), ο κίνδυνος σοβαρής κοινωνικοοικονομικής κρίσης θα γίνει ορατός πολύ σύντομα (Koutsoyiannis et al, 2009).

Έτσι, τα τελευταία χρόνια έχει διαπιστωθεί η ανάγκη χρησιμοποίησης ΑΠΕ, όπως η ηλιακή και η αιολική. Οι ΑΠΕ έχουν το πλεονέκτημα ότι είναι φιλικές προς το περιβάλλον και δεν έχουν σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως μέχρι σήμερα (Tsekouras and Koutsoyiannis, 2014).

Τελευταία λοιπόν έχουν διεξαχθεί πολλές μελέτες που αφορούν υδρομετεωρολογικές μεταβλητές, όπως ο άνεμος, η θερμοκρασία και η ακτινοβολία (Tsekouras and Koutsoyiannis, 2014). Ωστόσο, οι μεταβλητές αυτές διέπονται όχι μόνο από προσδιοριστικούς, αλλά και από στοχαστικούς νόμους. Με άλλα λόγια η τυχαιότητα και η αβεβαιότητα αποτελούν χαρακτηριστικά στοιχεία τους (Koutsoyiannis, 2010).

Για να αξιοποιηθούν αποτελεσματικά οι ΑΠΕ, επιβάλλεται να γίνουν αποτελεσματικές μελέτες της δομής των υδρομετεωρολογικών μεταβλητών. Το βασικότερο πρόβλημα που υφίσταται είναι η έλλειψη επαρκών δεδομένων. Η ύπαρξη τυχαιότητας και μεταβλητότητας απαιτεί τη χρησιμοποίηση μεγάλων χρονοσειρών, καθώς ο βαθμός αξιοπιστίας των αναλύσεων αυξάνεται με το μήκος της χρονοσειράς. Οι χρονοσειρές κατά συντριπτική πλειοψηφία είναι μήκους μικρότερου του ενός αιώνα. Κατά συνέπεια κρίνεται απαραίτητη η παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών

μήκους πολλών αιώνων ή χιλιετιών, κάτι που επιτυγχάνεται με τη γνώση της στοχαστικής δομής της κάθε μεταβλητής. Για να ανταποκρίνεται η συνθετική χρονοσειρά στην πραγματικότητα, είναι απαραίτητα τα στατιστικά χαρακτηριστικά της και ο συντελεστής Hurst-Kolmogorov. Αυτά μπορούν να εκτιμηθούν από την ιστορική χρονοσειρά. (Τσεκούρας, 2012). Συνδυάζοντας τη ντετερμινιστική και τη στοχαστική δομή των μεταβλητών, το αποτέλεσμα της μελέτης θα είναι έγκυρο. Έτσι, η προσομοίωση και διαχείριση των ΑΠΕ θα είναι αποτελεσματική.

Ο άνεμος αποτελεί συχνά αντικείμενο έρευνας, ως βασική πηγή ΑΠΕ. Οι περισσότερες μελέτες που έχουν διεξαχθεί επικεντρώνονται μόνο στην εποχιακή περιοδικότητα, παραβλέποντας την ωριαία διακύμανση του ανέμου. Στην πραγματικότητα όμως η διπλή κυκλοστασιμότητα φαίνεται να περιγράφει πολύ καλύτερα τη συμπεριφορά του ανέμου. Δεν υπάρχει δηλαδή μόνο εποχιακή, αλλά και ημερήσια περιοδικότητα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να γίνονται λανθασμένες εκτιμήσεις στην παραγωγή και διαχείριση ενέργειας. Στην παρούσα εργασία διερευνάται κυρίως η διπλή περιοδικότητα του ανέμου (Dimitriadis and Koutsoyiannis, 2015 ; Yousef et al, 1992), με σκοπό να αντιμετωπιστούν τυχόν σφάλματα και ασάφειες στα στοχαστικά μοντέλα πρόβλεψης ταχύτητας ανέμου.

## 1.2 Δομή της διπλωματικής εργασίας

Η εργασία χωρίζεται σε 5 κεφάλαια και 4 παραρτήματα.

- Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μία εισαγωγή στο αντικείμενο των ΑΠΕ και καθίσταται σαφής ο σκοπός της εργασίας.
- Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύεται διεξοδικά η διπλή κυκλοστασιμότητα της ταχύτητας ανέμου. Με παγκόσμια διερεύνηση προκύπτει ότι όντως υπάρχει διπλή περιοδικότητα και μάλιστα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από δύο άλλες μεταβλητές, την ακτινοβολία στο εξωτερικό όριο της ατμόσφαιρας και τη θερμοκρασία.
- Στο τρίτο κεφάλαιο εφαρμόζεται στα δεδομένα ανέμου και θερμοκρασίας ένα ντετερμινιστικό μοντέλο που περιγράφει άριστα τη συμπεριφορά αυτή. Το μοντέλο επιλέχθηκε μεταξύ άλλων εκδοχών με κριτήριο το μικρό αριθμό παραμέτρων και την αποτελεσματικότητά του.



- Στο τέταρτο κεφάλαιο εξετάζεται εάν τα δεδομένα «reanalysis» σε μία τοποθεσία περιγράφουν ικανοποιητικά τη συμπεριφορά του ανέμου.
- Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται παγκόσμια διερεύνηση της μακροπρόθεσμης εμμονής της μέσης ετήσιας ταχύτητας ανέμου, μέσω του υπολογισμού του συντελεστή Hurst.
- ✓ Στο παράρτημα Α απεικονίζονται τα αποτελέσματα του μοντέλου ταχύτητας ανέμου σε πολλούς σταθμούς σε όλον τον κόσμο αλλά και στην Ελλάδα.
- ✓ Στο παράρτημα Β απεικονίζονται παρομοίως τα αποτελέσματα του μοντέλου θερμοκρασίας.
- ✓ Στο παράρτημα Γ παρουσιάζονται ορισμένες εκδοχές οι οποίες απορρίφθηκαν και δεν δοκιμάστηκαν σε όλους τους σταθμούς παγκοσμίως, καθώς και ο λόγος απόρριψής τους.
- ✓ Στο παράρτημα Δ γίνονται λίγα σχόλια για τη χρησιμοποίηση των προγραμμάτων EXCEL, MATLAB στην εργασία αυτή.

## 2 Διπλή κυκλοστασιμότητα ταχύτητας ανέμου

### 2.1 Γενικά στοιχεία

Μία ανέλιξη είναι στάσιμη όταν οι στατιστικές παράμετροί της δε μεταβάλλονται συναρτήσει του χρόνου. Κυκλοστάσιμη ονομάζεται η ανέλιξη της οποίας οι στατιστικές παράμετροι είναι περιοδικές συναρτήσεις του χρόνου (Κουτσογιάννης, 2013).

Η μεταβλητή της ταχύτητας ανέμου, παρουσιάζει διπλή κυκλοστασιμότητα. Αυτό σημαίνει ότι για κάθε μήνα και κάθε ώρα παρατηρούνται διαφορετικά χαρακτηριστικά της ανέλιξης, όπως μέση τιμή και τυπική απόκλιση. Λαμβάνοντας υπ' όψιν τη διπλή κυκλοστασιμότητα, η στοχαστική ανάλυση και προσομοίωση θα είναι πιο έγκυρες.

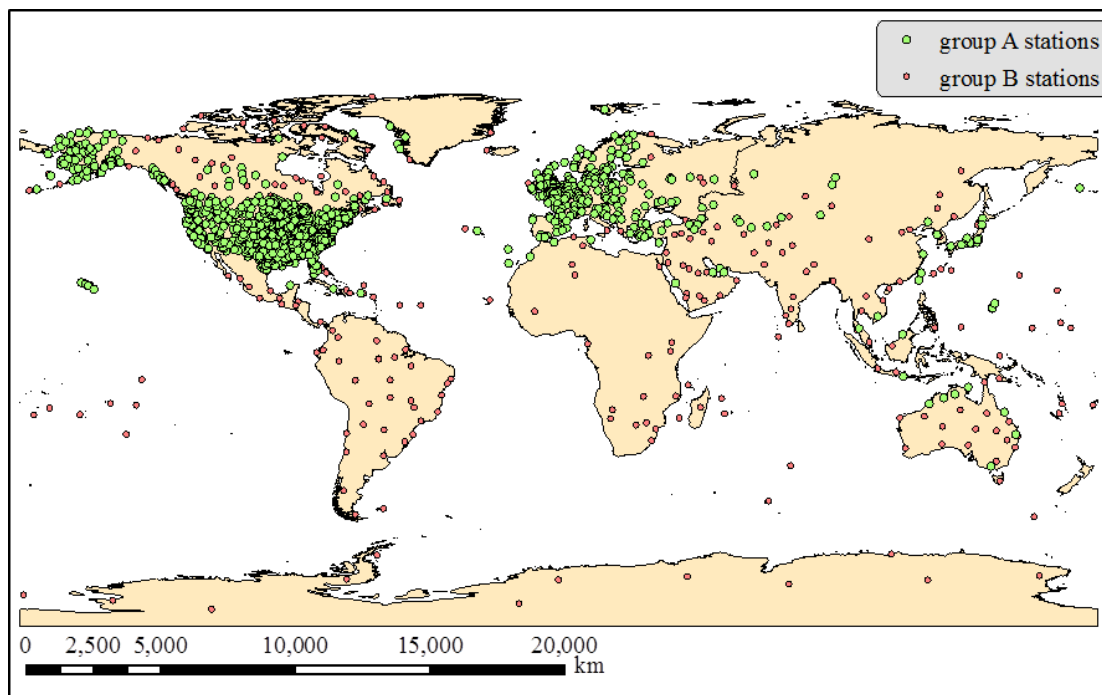
### 2.2 Δεδομένα

Για τη διερεύνηση της διπλής κυκλοστασιμότητας συλλέχθηκαν δεδομένα ταχύτητας ανέμου από μία μεγάλη βάση δεδομένων 15 000 μετεωρολογικών σταθμών παγκοσμίως, εκ των οποίων 7 500 λειτουργούν μέχρι σήμερα (πηγή: National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA, <https://www.ncdc.noaa.gov/cdo-web/>). Στη συνέχεια επιλέχθηκαν να μελετηθούν πάνω από 1 800 σταθμοί, οι οποίοι χωρίστηκαν σε δύο ομάδες (Χάρτης 2.1). Στην ομάδα Α επιλέχθηκαν 1 600 σταθμοί με βάση τα ακόλουθα κριτήρια ποσότητας και πυκνότητας πληροφορίας:

- Τουλάχιστον 100 000 μετρήσεις ταχύτητας ανέμου συνολικά.
- Τουλάχιστον μία μέτρηση ταχύτητας ανέμου κάθε ώρα (κατά μέσον όρο).

Επειδή οι ποιοτικοί σταθμοί της ομάδας Α ανήκουν κατά συντριπτική πλειοψηφία στο Βόρειο ημισφαίριο και μάλιστα σε συγκεκριμένες περιοχές (ΗΠΑ, Αλάσκα, Ευρώπη), μελετήθηκαν επίσης περίπου 200 σταθμοί (ομάδα Β). Οι σταθμοί αυτοί καλύπτουν κατά το δυνατόν όλες τις ζώνες γεωγραφικού μήκους και πλάτους σε όλη την υφήλιο, ώστε η μελέτη να είναι πιο ομοιόμορφη χωρικά. Όσο για το κριτήριο

επιλογής τους, θα πρέπει να έχουν τουλάχιστον 2 400 μετρήσεις ανά έτος, δηλαδή μία μέτρηση ανά τρίωρο για τουλάχιστον 10 μήνες του έτους.

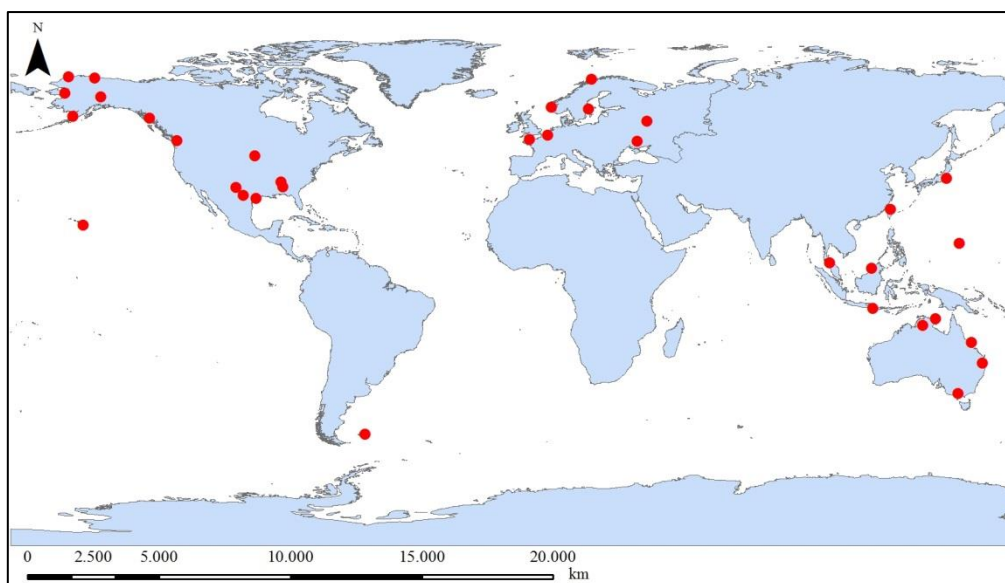


**Χάρτης 2.1. Χωρική κατανομή των σταθμών των ομάδων A και B.**

Πριν την διερεύνηση των 1 800 σταθμών, προηγήθηκε μία αναλυτική διερεύνηση σε 33 από τους ποιοτικότερους σταθμούς της γης (Χάρτης 2.2). Από τη διερεύνηση αυτήν, επιλέχθηκαν τα πιθανά μοντέλα που εφαρμόστηκαν στη συνέχεια παγκοσμίως στους 1 800 σταθμούς, όπως αναλύεται διεξοδικά στο κεφάλαιο 3. Τα χαρακτηριστικά των 33 αυτών σταθμών παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1.

Επιπλέον, τα αποτελέσματα του μοντέλου που θα χρησιμοποιηθεί εφαρμόστηκαν και σε 17 σταθμούς από όλη την Ελλάδα. Τα δεδομένα συλλέχθηκαν επίσης από τη NOAA και οι σταθμοί απεικονίζονται στο Χάρτη 2.3 και στον Πίνακα 2.2.

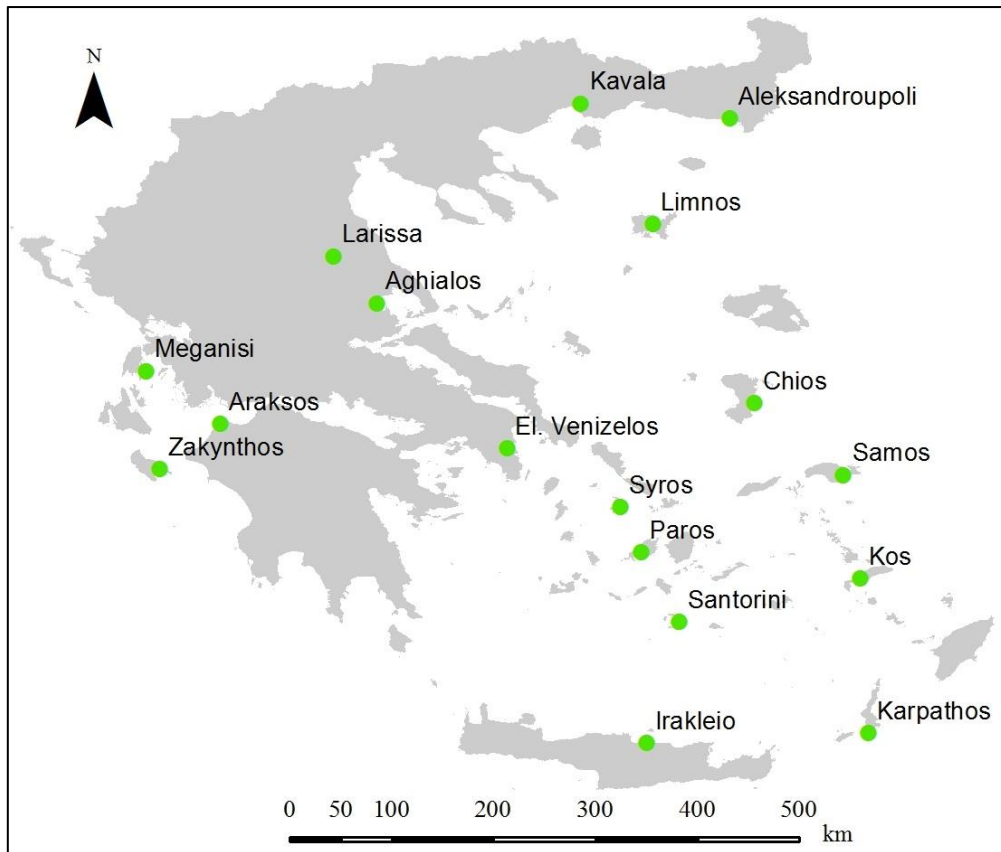
Από τη συνολική χρονοσειρά της ταχύτητας ανέμου, δημιουργήθηκε ένας πίνακας  $\mu_w = a_{ij}^w$  για κάθε σταθμό, όπου  $a_{ij}^w$  είναι η μέση ταχύτητα ανέμου για την ώρα  $i$  και το μήνα  $j$ . Η ανάλυση των επόμενων κεφαλαίων θα βασιστεί πάνω στον πίνακα αυτόν.



Χάρτης 2.2. Οι 33 σταθμοί που επιλέχθηκαν για την αρχική μελέτη.

Πίνακας 2.1. Οι σταθμοί προκαταρκτικής μελέτης.

Station ID	Location	Lon (°)	Lat (°)	Elev (m)	No years	mean wind speed (m/s)	mean temperature (°C)
5539	Falkland Islands, S. America	-58,45	-51,82	74	30	7,7	6,4
5969	Melbourne, Australia	144,47	-38,03	11	11	5,3	14,6
5846	Brisbane, Australia	152,70	-27,63	28	11	3,0	19,5
5847	Hook Island, Australia	148,95	-20,35	5	11	7,8	23,6
5737	Northern Territory, Australia	132,37	-14,52	135	25	2,9	26,4
5849	Bremer Island, Australia	136,82	-12,27	59	11	3,8	26,0
6241	Denpasar, Indonesia	115,17	-8,75	4	10	3,5	27,4
6218	Brunei, Asia	114,93	4,93	15	34	2,3	27,4
2221	Kedah, Malaysia	100,43	6,92	35	42	1,6	27,0
5617	Mariana Islands, Pacific Oc.	144,92	13,58	187	10	5,7	26,3
5622	Hawaii, Pacific Ocean	-155,07	19,72	11	42	2,9	22,8
1963	Taipei, Taiwan	121,22	25,08	33	36	5,5	22,5
3308	Texas, USA	-95,86	28,97	14	9	3,3	21,1
4088	Texas, USA	-100,17	29,95	723	9	4,0	19,0
3932	New Mexico, USA	-102,65	32,68	1010	9	3,8	16,8
7540	Alabama, USA	-86,61	32,85	178	8	2,2	16,8
7536	Tennessee, USA	-87,35	34,66	175	9	2,5	15,7
2095	Narita, Japan	140,38	35,77	44	37	3,5	14,3
3872	Minnesota, USA	-96,22	43,62	436	9	3,8	7,6
1617	Dniprodzerzhynsk, Ukraine	34,67	48,53	147	11	4,0	9,8
4008	Washington, USA	-122,91	48,71	9	9	2,3	10,0
634	St Helier, France	-2,20	49,22	84	42	5,9	11,2
798	Mons, Belgium	3,98	50,50	78	5	2,1	10,6
1661	Moscow, Russia	37,90	55,40	179	16	3,6	5,7
2792	Wrangell Island, Alaska	-132,36	56,48	13	9	3,1	6,6
2772	Port Heiden, Alaska	-158,63	56,96	29	9	5,7	2,3
243	Uppsala, Sweden	17,95	59,65	61	38	4,0	6,4
100	Bergen, Norway	5,22	60,28	50	42	3,7	7,3
2738	McKinley Park, Alaska	-148,91	63,73	524	9	1,7	-2,5
2720	Koyuk, Alaska	-161,16	64,94	43	9	3,4	-2,6
6	Tromso, Norway	18,92	69,68	10	42	4,2	3,3
2784	Nuiqsut, Alaska	-151,00	70,21	17	9	4,7	-10,2
2682	Wainwright, Alaska	-159,99	70,64	9	9	5,4	-9,1



Χάρτης 2.3. Οι σταθμοί της Ελλάδας στους οποίους εφαρμόστηκε η παρούσα μελέτη.

Πίνακας 2.2. Οι σταθμοί της Ελλάδας.

Station Name	Lon (°)	Lat (°)	Elev (m)	No years	mean wind speed (m/s)	mean temperature (°C)
Karpathos	27,13	35,42	20	17	7,6	19,4
Santorini	25,47	36,40	39	24	5,7	18,9
Syros	24,95	37,42	72	17	5,1	18,5
Samos	26,92	37,70	7	37	4,4	18,4
El. Venizelos	23,95	37,93	94	11	4,0	17,5
Chios	26,13	38,33	4	24	3,7	17,6
Limnos	25,23	39,92	4	38	4,4	15,8
Paros	25,13	37,02	36	11	5,5	18,8
Kavala	24,60	40,98	5	24	2,4	15,1
Meganisi	20,77	38,62	4	42	3,6	17,3
Zakynthos	20,88	37,75	5	24	2,5	17,9
Kos	27,07	36,78	129	81	4,8	-
Aghialos	22,80	39,22	15	62	3,3	-
Larissa	22,42	39,63	74	32	1,7	-
Aleksandroupoli	25,92	40,85	3	80	3,6	-
Irakleio	25,18	35,33	39	41	4,6	-
Araksos	21,42	38,15	12	17	2,6	-

### 2.3 Σημασία της διπλής περιοδικότητας

Η μελέτη της διπλής κυκλοστασιμότητας είναι υψίστης σημασίας για τη διαχείριση της αιολικής ενέργειας. Για την αποφυγή προβλημάτων που προκαλεί η αβεβαιότητα και η διακύμανση του ανέμου, έχουν αναπτυχθεί συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, όπως συστήματα αντλησιοταμίευσης (Παπαντώνης, 2009) ή αφαλάτωσης νερού (Χατζηβασιλειάδης, 2009). Παρ' όλα αυτά η ωριαία και μηνιαία χρονική κατανομή του ανέμου εξακολουθεί να αποτελεί σημαντικό ζήτημα, κυρίως για 2 λόγους.

- Επηρεάζει τη διαστασιολόγηση τέτοιων έργων. Εάν η συσχέτιση της ταχύτητας ανέμου και της ζήτησης ενέργειας είναι θετική, τότε ο απαιτούμενος όγκος του ταμιευτήρα αντλησιοταμίευσης θα είναι σχετικά μικρότερος από ότι στην αντίθετη περίπτωση. Το ίδιο ισχύει σε ένα σύστημα ανεμογεννητριών και εγκατάστασης αφαλάτωσης νερού, όσον αφορά στη συσχέτιση μεταξύ ταχύτητας ανέμου και ζήτησης νερού.
- Η παραγωγή ενέργειας από ανεμογεννήτριες δεν είναι ανάλογη της ταχύτητας ανέμου. Έτσι, η θεώρηση σταθερής ταχύτητας ανέμου καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας έχει ως αποτέλεσμα λανθασμένη εκτίμηση του θεωρητικού αιολικού δυναμικού μιας περιοχής.

Για την επιβεβαίωση του τελευταίου σχολίου, θεωρήθηκε η τοποθέτηση μίας ανεμογεννήτριας σε κάθε σταθμό. Στη συνέχεια υπολογίστηκε η αναμενόμενη ετήσια παραγωγή ενέργειας  $E_i$  σε κάθε σταθμό για τις ακόλουθες 3 περιπτώσεις:

- Η ταχύτητα ανέμου εμφανίζει διπλή περιοδικότητα και οι τιμές για κάθε ώρα και μήνα ισούνται με τα στοιχεία του πίνακα  $\mu_w$  του κάθε σταθμού ( $E_1$ ).
- Η ταχύτητα ανέμου εμφανίζει απλή περιοδικότητα, δηλαδή θεωρείται σταθερή για κάθε μήνα ξεχωριστά ( $E_2$ ).
- Η ταχύτητα ανέμου είναι σταθερή κατά τη διάρκεια του έτους ( $E_3$ ).

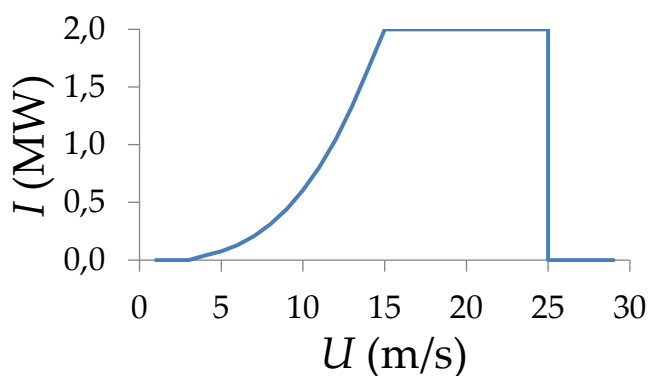
Η θεωρητική ισχύς λειτουργίας της ανεμογεννήτριας είναι ανάλογη του κύβου της ταχύτητας ανέμου, σύμφωνα με τη σχέση (2.1).

$$I = \frac{1}{2} \rho U^3 \frac{\pi d^2}{4} \quad (2.1)$$

όπου:  $I$  είναι η θεωρητική ισχύς της ανεμογεννήτριας σε  $W$ ,  $\rho$  η πυκνότητα του αέρα σε  $\frac{kg}{m^3}$ ,  $U$  η ταχύτητα του ανέμου σε  $\frac{m}{s}$  και  $d$  η διάμετρος του ρότορα σε  $m$ .

Η σχέση όμως αυτή ισχύει θεωρητικά, καθώς η αποδιδόμενη ισχύς πολλαπλασιάζεται με έναν συντελεστή ισχύος  $\mu < 0,59$ , και συνήθως  $\mu \approx 0,3$ . Επίσης ισχύει για συγκεκριμένο εύρος ταχυτήτων. Όταν ο άνεμος είναι μικρότερος από κάποια ταχύτητα  $u_{in}$ , η ροπή στρέψης που προσφέρεται από τον άνεμο είναι ανεπαρκής για την κίνηση των πτερυγίων, συνεπώς η παραγόμενη ενέργεια είναι μηδενική. Συνήθως η τιμή αυτή κυμαίνεται από 3 έως 4  $\frac{m}{s}$ . Για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες από  $u_{in}$ , η ισχύς είναι ανάλογη της τρίτης δύναμης της ταχύτητας, όπως φαίνεται στη σχέση (2.1). Συνήθως για ταχύτητες ανέμου 12-17  $\frac{m}{s}$ , η ισχύς λειτουργίας εξισώνεται με την ονομαστική ισχύ της ανεμογεννήτριας, έτσι περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας ανέμου δεν αυξάνει πλέον την παραγόμενη ισχύ. Τέλος, για ταχύτητες μεγαλύτερες από περίπου 25  $\frac{m}{s}$ , υπάρχει κίνδυνος βλάβης στο ρότορα κατά συνέπεια ρυθμίζεται ώστε να διακόπτεται η περιστροφή του και η παραγωγή ενέργειας ([http://www.wind-power-program.com/turbine\\_characteristics.htm](http://www.wind-power-program.com/turbine_characteristics.htm)).

Στην εφαρμογή αυτή έγιναν οι ακόλουθες παραδοχές: Η αποδιδόμενη ισχύς των ανεμογεννητριών είναι 2 MW. Η διάμετρος του ρότορα είναι 80 m. Η σχέση (2.1) χρησιμοποιείται στο διάστημα ταχυτήτων από 4 έως 15  $\frac{m}{s}$ . Η πυκνότητα του αέρα είναι σταθερή και ίση με 1,2  $\frac{kg}{m^3}$  παγκοσμίως. Η τελευταία παραδοχή έγινε διότι κρίνεται αμελητέα η επίδραση του υψομέτρου και της θερμοκρασίας στην πυκνότητα του αέρα, άρα και στην παραγόμενη ενέργεια. Από τις παραδοχές αυτές διαμορφώνεται η καμπύλη ισχύος του Σχήματος 2.1.



Σχήμα 2.1. Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας 2 MW.

Τα αποτελέσματα της εφαρμογής δείχνουν ότι  $\Sigma E_1 = 600 \text{ GWh}$ ,  $\Sigma E_2 = 510 \text{ GWh}$ ,  $\Sigma E_3 = 460 \text{ GWh}$ . Κατά συνέπεια, η παραγωγή ενέργειας υποεκτιμάται 24% και 15% αντίστοιχα στις 2 λανθασμένες θεωρήσεις. Αξίζει να σημειωθεί ότι είναι ευρέως αποδεκτή η απλή κυκλοστασιμότητα, αλλά όχι τόσο προφανής η διπλή κυκλοστασιμότητα. Η εφαρμογή όμως υποδεικνύει ότι *η ημερήσια περιοδικότητα επηρεάζει την παραγωγή ενέργειας περισσότερο από ότι η εποχιακή περιοδικότητα*.

Θα πρέπει βέβαια να αναφερθεί ότι οι παραπάνω υπολογισμοί απέχουν από την πραγματικότητα και δεν αποτελούν παρά μία ένδειξη για τη σημασία της διπλής περιοδικότητας. Η αβεβαιότητα της ταχύτητας ανέμου, όπως και όλων των υδρολογικών μεταβλητών, είναι μεγάλη. Ακόμη και η μέση ετήσια τιμή εμφανίζει σημαντική διακύμανση, συνεπώς πρέπει να διερευνηθεί και η στοχαστική δομή, όπως θα γίνει στο Κεφάλαιο 5.

## 2.4 Φυσική εξήγηση διπλής περιοδικότητας

Η συμπεριφορά αυτή του ανέμου θα πρέπει να εξηγηθεί με φυσικό τρόπο, με βάση την αλληλεπίδρασή του με άλλες υδρομετεωρολογικές μεταβλητές. Στην παρούσα εργασία, μελετάται η συσχέτιση του ανέμου με δύο άλλες μεταβλητές: την ακτινοβολία στο εξωτερικό όριο της ατμόσφαιρας και τη θερμοκρασία.

Όταν ένα σώμα βρίσκεται σε θερμοκρασία μεγαλύτερη από  $0 \text{ K} = -273 \text{ }^\circ\text{C}$ , εκπέμπει ακτινοβολία. Η ακτινοβολία είναι ανάλογη της τέταρτης δύναμης της απόλυτης θερμοκρασίας (σε K) του σώματος. Διαπιστώνεται λοιπόν σημαντική σχέση μεταξύ θερμοκρασίας και ακτινοβολίας στη μικροκλίμακα. Η ακτινοβολία είναι ο μηχανισμός με τον οποίο η ηλιακή ενέργεια φτάνει στη Γη. Μόλις η Γη απορροφήσει την ηλιακή ενέργεια, η ενέργεια αυτή μετατρέπεται σε θερμότητα και μεταφέρεται με μεταγωγή στα κατώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας. Έτσι, αυξάνεται η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας (πηγή: <http://www.ces.fau.edu/nasa/module-2/correlation-between-temperature-and-radiation.php>). Αυτό σημαίνει ότι η ακτινοβολία και η θερμοκρασία είναι στενά συνδεδεμένες μεταβλητές και στη μακροκλίμακα.

Η κινητική κατάσταση των μορίων του αέρα σχετίζεται με την ταχύτητά τους και τη θερμική τους ενέργεια (Koutsoyiannis, 2014). Κατά συνέπεια, είναι φυσιολογικό η ταχύτητα του ανέμου και η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας να έχουν σημαντική



συσχέτιση και στη μακροκλίμακα. Για παράδειγμα, ο άνεμος προκαλείται από κλίση πίεσης μεταξύ 2 περιοχών, η οποία υπάρχει λόγω διαφοράς θερμοκρασίας. Το φαινόμενο αυτό είναι παρόμοιο με τη θερμική στρωμάτωση σε μία λίμνη: Η διαφορά θερμοκρασίας προκαλεί διαφορά πυκνότητας και έπειτα κίνηση μορίων νερού από μικρά βάθη σε μεγαλύτερα και αντίστροφα.

Υπάρχουν λοιπόν σημαντικές ενδείξεις ότι οι τρεις αυτές υδρομετεωρολογικές μεταβλητές είναι στενά συσχετισμένες, κάτι το οποίο μένει να αποδειχθεί και μαθηματικά, αφού αναλυθούν πρώτα ξεχωριστά.

#### 2.4.1 Ακτινοβολία στο εξωτερικό όριο της ατμόσφαιρας

Η ακτινοβολία στο εξωτερικό όριο της ατμόσφαιρας εξαρτάται από τη γωνία πρόσπτωσης των ακτίνων του ηλίου στον τόπο που μελετάται, καθώς και από την απόσταση του ηλίου από τη γη (Mohamad Kharseh, δεν αναφέρεται ημερομηνία). Κατά συνέπεια διέπεται από έναν πλήρως ντετερμινιστικό νόμο και είναι συνάρτηση του γεωγραφικού πλάτους, της ώρας και της ημέρας του έτους (σχέση 2.2).

$$G_o = G_{on}(\cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin \varphi \cdot \sin \delta) \quad (2.2)$$

όπου:  $G_o$  είναι η ακτινοβολία σε  $Wm^{-2}$  στον τόπο που μελετάται,  $G_{on}$  η ακτινοβολία σε  $Wm^{-2}$  σε έναν τόπο όπου οι ακτίνες του ηλίου πέφτουν κάθετα,  $\varphi$  το γεωγραφικό πλάτος που κυμαίνεται από  $-90^\circ$  (Νότιο ημισφαίριο) έως  $+90^\circ$  (Βόρειο ημισφαίριο),  $\delta$  η απόκλιση του άξονα της γης από τη νοητή γραμμή που συνδέει το κέντρο της γης και τον ήλιο και  $\omega$  η γωνιακή απόκλιση του ηλίου από το νότο.

Ο συντελεστής  $G_{on}$  εξαρτάται μόνο από την απόσταση της γης από τον ήλιο, δηλαδή από την ημέρα του χρόνου και υπολογίζεται από τη σχέση (2.3):

$$G_{on} = G_{sc} \left( 1 + 0,033 \cos \frac{360 \cdot n}{365} \right) \quad (2.3)$$

όπου:  $G_{sc} = 1367 Wm^{-2}$  είναι η ηλιακή σταθερά που υποδηλώνει την ακτινοβολία  $G_{on}$  όταν η γη βρίσκεται στη μέση απόσταση από τον ήλιο και  $n$  η ημέρα του έτους.

Οι συντελεστές  $n$  και  $\delta$  αναφέρονται στην αντιπροσωπευτική ημέρα του κάθε μήνα και οι τιμές που λαμβάνουν παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.3.

Ο  $\delta$  υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\delta \approx 23,45 \sin\left(360 \cdot \frac{284+n}{365}\right) \quad (2.4)$$

Ο συντελεστής  $\omega$  εξαρτάται από την ώρα της ημέρας και υπολογίζεται ως εξής:

$$\omega = \frac{360^\circ(T_{\text{sol}}-12\text{h})}{24\text{h}} \quad (2.5)$$

όπου  $T_{\text{sol}}$  είναι η ηλιακή ώρα.

Η ηλιακή ώρα είναι η τοπική ώρα ( $T_{\text{loc}}$ ) αλλά με 2 μικρές διορθώσεις. Η πρώτη σχετίζεται με το γεγονός ότι σχεδόν όλες οι τοποθεσίες της γης δε βρίσκονται ακριβώς πάνω στο μεσημβρινό ο οποίος έχει την ίδια ώρα με αυτές. Η δεύτερη σχετίζεται με μικρές διακυμάνσεις στην τροχιά και το ρυθμό περιστροφής της γης. Έτσι, η ηλιακή ώρα προκύπτει από τη (μη διαστατικά ομογενή) σχέση:

$$T_{\text{sol}} = T_{\text{loc}} + \frac{24\text{h}(L_{\text{st}}-L_{\text{loc}})+E}{360^\circ} \quad (2.6\alpha)$$

όπου  $(L_{\text{st}}-L_{\text{loc}})$  είναι η απόκλιση σε μοίρες του τόπου από το μεσημβρινό ο οποίος έχει την ίδια ώρα με τον τόπο αυτόν και:

$$E = 1375,2(0,000075 + 0,0018 \cos B - 0,032 \sin B - 0,014 \cos 2B - 0,04 \sin 2B) \quad (2.7)$$

$$B = \frac{(n-1)360^\circ}{365} \quad (2.8)$$

**Πίνακας 2.3. Τιμές των συντελεστών  $\eta$ ,  $\delta$ ,  $B$  και  $E$  για κάθε μήνα.**

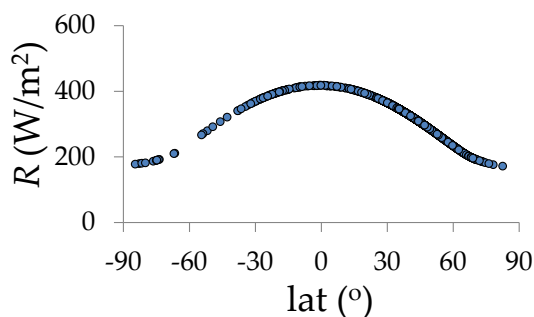
m	n	$\delta$	B	E
1	17	-20,92	15,78	-9,3
2	47	-12,95	45,37	-14,2
3	75	-2,42	72,99	-9,4
4	105	9,41	102,58	-0,2
5	135	18,79	132,16	3,9
6	162	23,09	158,79	0,8
7	198	21,18	194,30	-6,0
8	228	13,45	223,89	-4,7
9	258	2,22	253,48	4,6
10	288	-9,60	283,07	14,4
11	318	-18,91	312,66	15,3
12	344	-23,05	338,30	7,1

Αξίζει να σημειωθεί ότι είναι προτιμότερο να γίνει αναγωγή στην ώρα Greenwich ( $T_{\text{gr}}$ ), διότι όλες οι χρονοσειρές του ανέμου και της θερμοκρασίας αναφέρονται σε αυτήν. Έτσι, θα γίνει ευκολότερη και ακριβέστερη διερεύνηση της συσχέτισης της

ακτινοβολίας με τις άλλες 2 μεταβλητές. Η τροποποιημένη σχέση απαιτεί μόνο το γεωγραφικό μήκος σε μοίρες ( $L$ ) του κάθε τόπου, έχει το πλεονέκτημα ότι δεν εξαρτάται από την τοπική ώρα και γράφεται ως εξής:

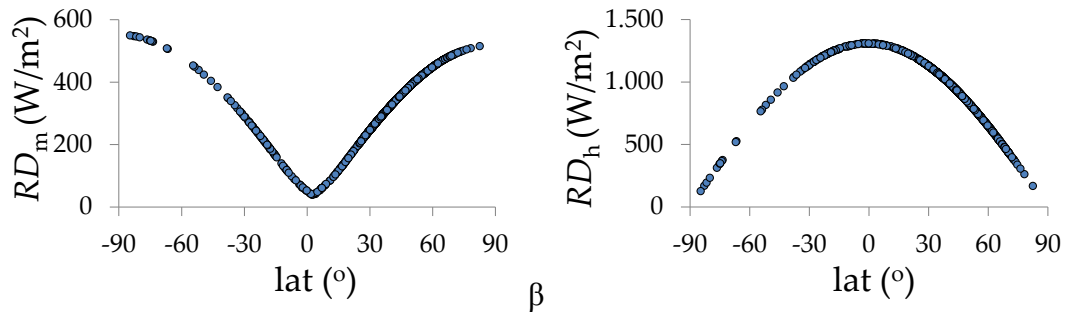
$$T_{\text{sol}} = T_{\text{gr}} + \frac{24L+E}{360} \quad (2.6\beta)$$

Με το σύνολο των παραπάνω υπολογισμών, κατασκευάζεται για κάθε σταθμό ο πίνακας  $\mu_{\text{rad}} = \alpha_{ij}^r$  για κάθε σταθμό, όπου  $\alpha_{ij}^r$  είναι η ακτινοβολία για την ώρα  $i$  και το μήνα  $j$ . Η κατανομή της μέσης ετήσιας ακτινοβολίας  $R$  απεικονίζεται στο Σχήμα 2.2. Είναι φανερό ότι η μέση ετήσια ακτινοβολία στον ισημερινό είναι υπερδιπλάσια από ότι στους πόλους.



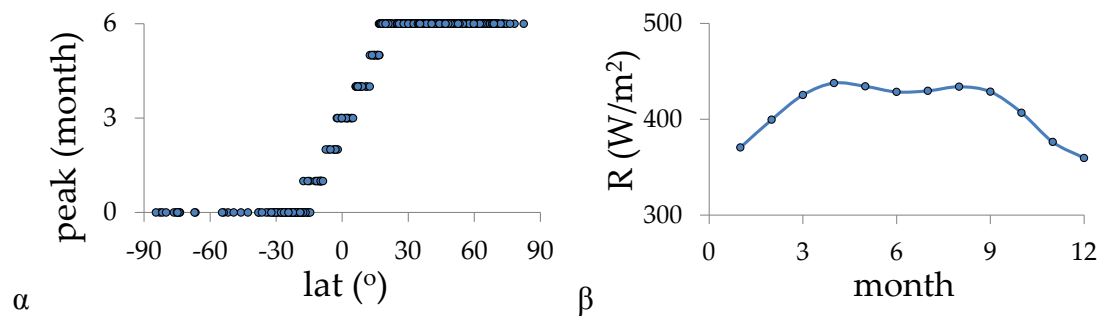
**Σχήμα 2.2. Γεωγραφική κατανομή της μέσης ετήσιας ακτινοβολίας.**

Η αξιολόγηση της μηνιαίας διακύμανσης της ακτινοβολίας γίνεται με τον υπολογισμό της διαφοράς  $RD_m = R_m^{\max} - R_m^{\min}$  για κάθε σταθμό, όπου  $R_m^{\max}$  και  $R_m^{\min}$  είναι η μέγιστη και ελάχιστη μηνιαία ακτινοβολία αντίστοιχα. Επίσης, με αντίστοιχο τρόπο γίνεται υπολογισμός της ωριαίας διακύμανσης της ακτινοβολίας,  $RD_h^i$ , για κάθε μήνα και στη συνέχεια της μέσης τιμής αυτών,  $RD_h$ . Πράγματι, παρατηρείται σημαντική διακύμανση και στις δύο χρονικές κλίμακες (Σχήμα 2.3). Γενικώς οι περιοχές κοντά στον ισημερινό παρουσιάζουν εντονότερη ωριαία διακύμανση, διότι η εναλλαγή ημέρας και νύχτας είναι αισθητή ενώ η εναλλαγή εποχών είναι αμελητέα. Ακριβώς το αντίθετο ισχύει κοντά στους πόλους, όπου υπάρχει εντονότερη μηνιαία διακύμανση.



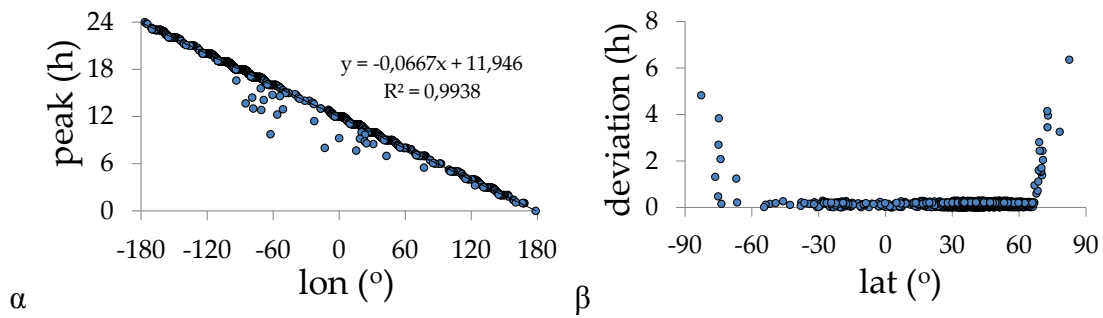
**Σχήμα 2.3.** κατανομή διακύμανσης ακτινοβολίας (α) μηνιαίας,  $RD_m$  και (β) ωριαίας,  $RD_h$ .

Είναι ενδιαφέρον να γίνει μία εκτίμηση του μήνα αιχμής αλλά και της ώρας αιχμής της ακτινοβολίας για κάθε σταθμό. Ορίζεται λοιπόν σαν εκτιμώμενος μήνας αιχμής ο μήνας με τη μέγιστη μέση ακτινοβολία, ενώ σαν ώρα αιχμής η μέση τιμή των ωρών αιχμής για κάθε μήνα. Είναι φανερή η εξάρτηση του μήνα αιχμής από το γεωγραφικό πλάτος (Σχήμα 2.4α), ενώ της ώρας αιχμής από το γεωγραφικό μήκος (Σχήμα 2.5α).



**Σχήμα 2.4.** (α) γεωγραφική κατανομή του μήνα αιχμής ακτινοβολίας, (β) παράδειγμα μηνιαίας χρονοσειράς για έναν σταθμό γεωγραφικού πλάτους 10 μοιρών.

Ο μήνας αιχμής είναι γενικώς ο Ιούλιος στο Βόρειο ημισφαίριο και ο Δεκέμβριος στο Νότιο. Κοντά στον ισημερινό η κατανομή του μήνα αιχμής είναι ιδιαίτερη, καθώς φαίνεται γραμμική με το γεωγραφικό πλάτος. Παρ' όλα αυτά η εικόνα αυτή είναι πλασματική. Ενδεικτικά, παρουσιάζεται ένα διάγραμμα μέσης μηνιαίας ακτινοβολίας για τους 12 μήνες, ενός σταθμού που βρίσκεται σε γεωγραφικό πλάτος  $10^\circ$  (σχήμα 2.4β). Ναι μεν ο μήνας αιχμής μαθηματικά είναι ο Απρίλιος, όμως πρακτικά οι μεγάλες τιμές ακτινοβολίας συσσωρεύονται γύρω από τον Ιούνιο (Απρίλιος μέχρι Αύγουστο). Έτσι, η μαθηματική προσομοίωση της απλής κυκλοστασιμότητας θα έδινε ως μήνα αιχμής τον Ιούνιο. Ίσως υπάρχει ένα μικρό σφάλμα σε αυτήν την προσομοίωση, όμως είναι αμελητέο αφού ούτως ή άλλως η ύπαρξη εποχών κοντά στον ισημερινό δεν είναι έντονη. Γενικεύοντας την παρατήρηση και για τα δύο ημισφαίρια, συμπεραίνουμε ότι σε ολόκληρο το Βόρειο ημισφαίριο παρατηρείται μέγιστη ακτινοβολία το μήνα Ιούνιο, ενώ σε ολόκληρο το Νότιο το μήνα Δεκέμβριο.

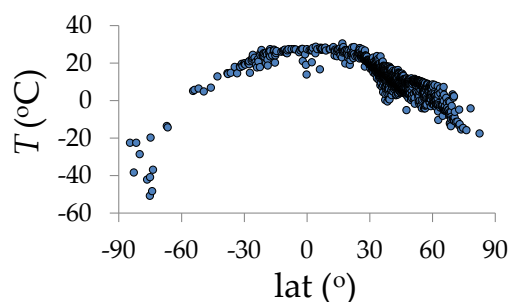


**Σχήμα 2.5. (α) εκτιμώμενη ώρα αιχμής ακτινοβολίας συναρτήσει του γεωγραφικού μήκους, (β) απόκλιση (σε ώρες) από την ευθεία γραμμικής παλινδρόμησης συναρτήσει του γεωγραφικού πλάτους.**

Η κατανομή της εκτιμώμενης ώρας αιχμής είναι ξεκάθαρα γραμμική με το γεωγραφικό μήκος, κάτι που υποδηλώνει ότι σε κάθε τοποθεσία η μέγιστη ακτινοβολία φτάνει από τον ήλιο την ίδια τοπική ώρα, περίπου στις 12 το μεσημέρι (Σχήμα 2.5α). Οι ελάχιστοι σταθμοί που εμφανίζουν κάποια μικρή απόκλιση βρίσκονται κοντά στους πόλους (Σχήμα 2.5β). Η μικρή ημερήσια διακύμανση της ακτινοβολίας μακριά από τον ισημερινό καθιστά ασαφή την έννοια της ώρας αιχμής και συνεπώς αυτές οι αποκλίσεις δεν αναιρούν τη γενικότερη παρατήρηση που έγινε.

#### 2.4.2 Θερμοκρασία στην ατμόσφαιρα

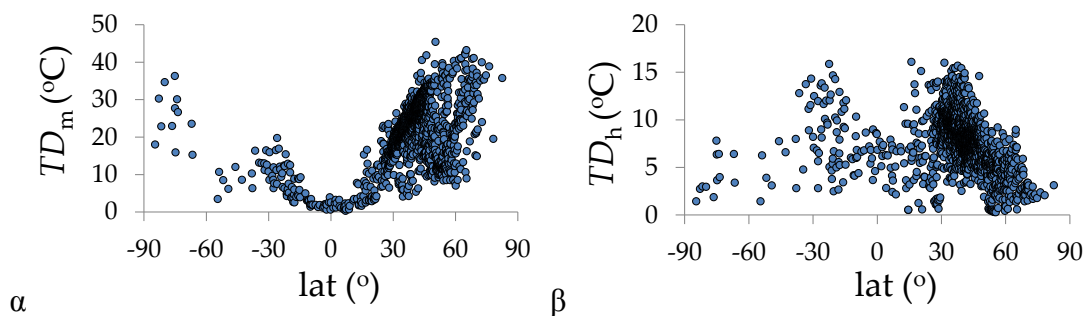
Αφού η θερμοκρασία εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από την ακτινοβολία, αναμένεται παρόμοια συμπεριφορά διπλής κυκλοστασιμότητας. Αναλύοντας τους 1 800 σταθμούς οι οποίοι επιλέχθηκαν για την ανάλυση του ανέμου, και δημιουργώντας τον πίνακα  $\mathbf{\mu}_{temp} = \alpha_{ij}^t$  για κάθε σταθμό, όπου  $\alpha_{ij}^t$  είναι η θερμοκρασία για την ώρα  $i$  και το μήνα  $j$ , επιβεβαιώνεται αυτή η υπόθεση. Η κατανομή της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας υποδεικνύει ότι υπάρχει συσχέτιση με την ακτινοβολία, αφού είναι μεγαλύτερη στον ισημερινό από ότι στους πόλους.



**Σχήμα 2.6. Γεωγραφική κατανομή της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας.**

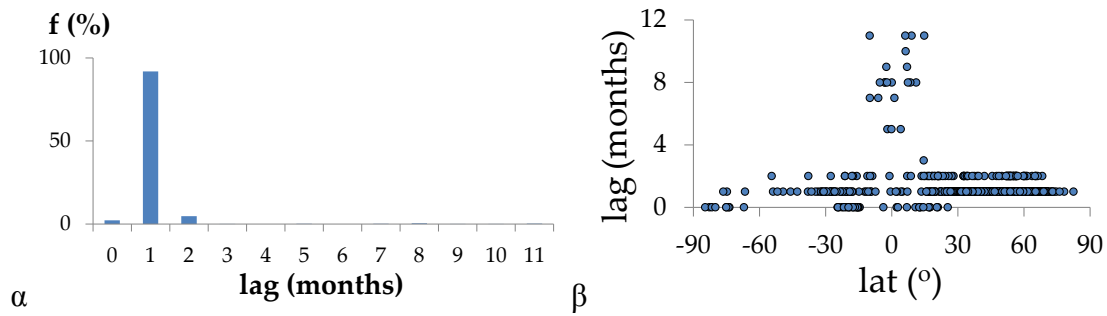
Η αξιολόγηση της μηνιαίας και ωριαίας διακύμανσης της θερμοκρασίας γίνεται όμοια με την ακτινοβολία, με υπολογισμό των διαφορών  $TD_m$  και  $TD_h$  για κάθε σταθμό.

Πράγματι, παρατηρείται και πάλι σημαντική διακύμανση και στις δύο χρονικές κλίμακες (Σχήμα 2.7). Συγκεκριμένα, το 62% των σταθμών παρουσιάζουν  $TD_h > 20^\circ\text{C}$  και το 91% των σταθμών  $TD_h > 10^\circ\text{C}$ . Επίσης, το 83% των σταθμών παρουσιάζουν  $TD_m > 5^\circ\text{C}$ . Γενικώς οι περιοχές κοντά στους πόλους έχουν εντονότερη μηνιαία διακύμανση αλλά μικρότερη ωριαία διακύμανση. Εντονότερη ωριαία διακύμανση φαίνεται να παρουσιάζουν οι περιοχές κοντά στους τροπικούς του καρκίνου και του αιγόκερω (Σχήμα 2.7β). Πιθανόν αυτό να συμβαίνει διότι τους μισούς μήνες του χρόνου η ωριαία διακύμανση της ακτινοβολίας είναι μεγαλύτερη από ότι στον ισημερινό (αφού στους τροπικούς οι ακτίνες πέφτουν κάθετα το μεσημέρι). Έτσι τους μήνες αυτούς η ωριαία διακύμανση θερμοκρασίας είναι μεγαλύτερη από ότι στον ισημερινό. Τους υπόλοιπους μήνες μπορεί να ισχύει το αντίθετο για την ακτινοβολία, αλλά αναμένεται παραπλήσια ωριαία διακύμανση θερμοκρασίας, λόγω του ότι η θερμοκρασία δε φράσσεται από κάτω όριο, αλλά παίρνει και αρνητικές τιμές. Έτσι πιθανόν εξηγείται η εμφάνιση μέγιστης ωριαίας διακύμανσης θερμοκρασίας στους τροπικούς του καρκίνου και του αιγόκερω.



**Σχήμα 2.7.** κατανομή διακύμανσης θερμοκρασίας (α) μηνιαίας,  $TD_m$  και (β) ωριαίας,  $TD_h$ .

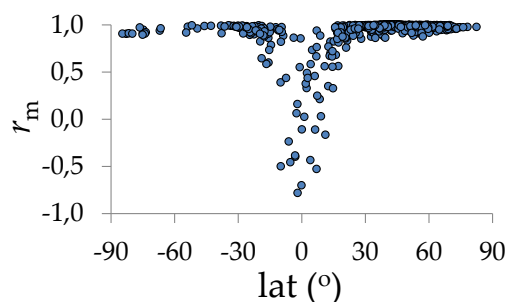
Για τη μαθηματική απόδειξη της συσχέτισης ακτινοβολίας και θερμοκρασίας, συσχετίζονται οι μηνιαίες και ωριαίες τιμές των δύο μεταβλητών. Εξάγεται συνεπώς ένας συντελεστής συσχέτισης για τη μηνιαία χρονοσειρά και ένας μέσος συντελεστής συσχέτισης για τις 12 ωριαίες χρονοσειρές (μία για κάθε μήνα). Επιπλέον, εξετάζεται και η συσχέτιση για όλες τις δυνατές τιμές της υστέρησης της θερμοκρασίας έναντι της ακτινοβολίας: 0 - 11 μήνες και 0 - 23 h.



**Σχήμα 2.8. (α) συχνότητα και (β) γεωγραφική κατανομή εμφάνισης κάθε τιμής της μηνιαίας υστέρησης θερμοκρασίας έναντι της ακτινοβολίας.**

Είναι φανερό ότι σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις η μέγιστη θερμοκρασία εμφανίζεται 1 μήνα μετά από τη μέγιστη ακτινοβολία (Σχήμα 2.8α). Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στη θερμική αδράνεια της γης (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999). Η θερμική αδράνεια της γης προκαλείται από την αποθήκευση θερμότητας από τη θάλασσα, το έδαφος και την ατμόσφαιρα.

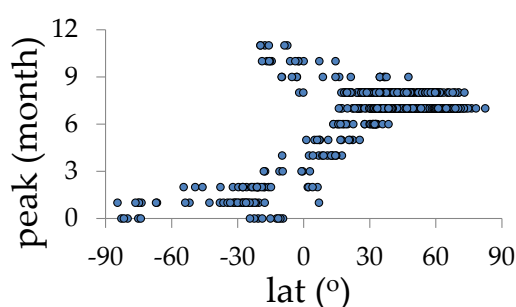
Οι εξαιρέσεις στην υστέρηση υπάρχουν μόνο κοντά στον ισημερινό (Σχήμα 2.8β) και η μικρή μηνιαία διακύμανση μπορεί να τις δικαιολογήσει. Ως εκ τούτου, εάν θεωρηθεί σε όλους τους σταθμούς η υστέρηση ίση με 1 (ακόμη και σε αυτούς για τους οποίους δεν αποτελεί τη βέλτιστη τιμή), ο συντελεστής συσχέτισης είναι πολύ κοντά στη μονάδα παγκοσμίως. Φυσικά, υποεκτιμάται κοντά στον ισημερινό λόγω περίπου σταθερής μηνιαίας χρονοσειράς θερμοκρασιών. Έτσι, η παραδοχή ότι υπάρχει υστέρηση ίση με 1 μήνα παγκοσμίως μπορεί να θεωρηθεί ρεαλιστική. Το 87% των σταθμών παρουσιάζουν συσχέτιση μεγαλύτερη από 0,90 (Σχήμα 2.9).



**Σχήμα 2.9. Γεωγραφική κατανομή μηνιαίου συντελεστή συσχέτισης για υστέρηση θερμοκρασίας έναντι ακτινοβολίας ίση με 1 μήνα.**

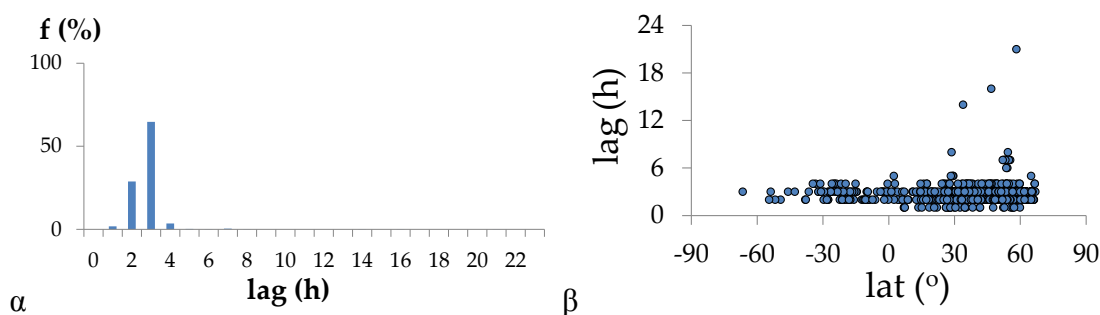
Συνδυάζοντας τα συμπεράσματα από τη μηνιαία αιχμή της ακτινοβολίας και από την υστέρηση ακτινοβολίας-θερμοκρασίας, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η μηνιαία αιχμή της θερμοκρασίας είναι προβλέψιμη παγκοσμίως. Πράγματι, στο Σχήμα 2.10 φαίνεται η γεωγραφική κατανομή του μήνα αιχμής όπως προέκυψε από τα δεδομένα

των σταθμών. Μπορούμε να πούμε ότι ο μήνας αιχμής σε συνεχή χρόνο (δηλαδή όχι ακέραιος αλλά πραγματικός), είναι ο «7,23» και ο «1,20» για το Βόρειο και Νότιο ημισφαίριο αντίστοιχα. Για παράδειγμα, στο Βόρειο ημισφαίριο οι 3 θερμότεροι μήνες είναι κατά φθίνουσα σειρά οι: Ιούλιος, Αύγουστος, Ιούνιος. Οι αριθμοί 7,23 και 1,20 προέκυψαν από μέση τιμή των μηνών αιχμής θερμοκρασίας των σταθμών που βρίσκονται σε γεωγραφικό πλάτος μεγαλύτερο των 20° Βόρειο και Νότιο αντίστοιχα. Το συμπέρασμα αυτό συμφωνεί με τις παρατηρήσεις που έγιναν προηγουμένως. Μάλιστα, δίνει ακριβέστερη εκτίμηση της υστέρησης, καθώς προηγουμένως η υστέρηση ήταν ακέραια μεταβλητή ενώ τώρα πραγματική.



**Σχήμα 2.10. Γεωγραφική κατανομή του μήνα αιχμής θερμοκρασίας.**

Όσον αφορά στην ωριαία υστέρηση, τα συμπεράσματα είναι εξίσου ενδιαφέροντα.

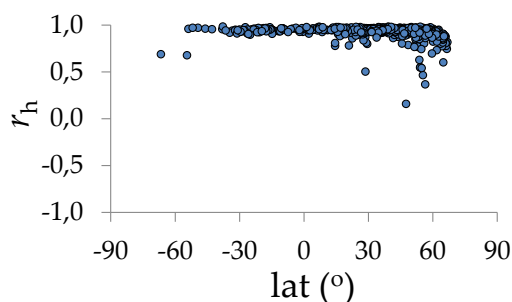


**Σχήμα 2.11. (α) συχνότητα και (β) γεωγραφική κατανομή εμφάνισης κάθε τιμής της ωριαίας υστέρησης θερμοκρασίας έναντι της ακτινοβολίας.**

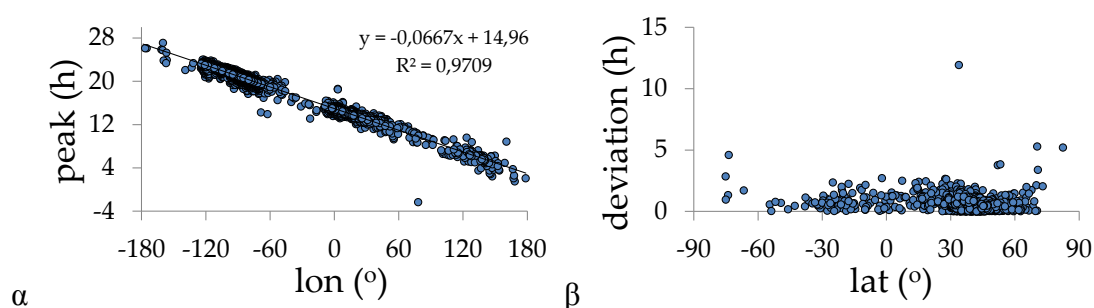
Η θερμοκρασία υστερεί γενικώς κατά 2-3 ώρες από την ακτινοβολία (Σχήμα 2.11). Αυτή η υστέρηση μπορούμε να υποθέσουμε ότι οφείλεται στο χρόνο που απαιτείται για να ολοκληρωθούν οι διεργασίες μετατροπής ηλιακής ενέργειας σε θερμότητα και μεταφοράς θερμότητας από το εξωτερικό προς το κατώτερο όριο της ατμόσφαιρας με μεταγωγή. Οι σταθμοί για τους οποίους η ωριαία υστέρηση λαμβάνει διαφορετικές τιμές είναι ελάχιστοι. Έτσι μπορεί να θεωρηθεί η υστέρηση ίση με 3 h χωρίς ιδιαίτερη επίπτωση στο μέσο συντελεστή συσχέτισης ο οποίος κυμαίνεται σε πολύ υψηλά



επίπεδα παγκοσμίως. Το 93% των σταθμών παρουσιάζουν συσχέτιση μεγαλύτερη από 0,93 (Σχήμα 2.12).



**Σχήμα 2.12. Γεωγραφική κατανομή μέσου ωριαίου συντελεστή συσχέτισης για υστέρηση θερμοκρασίας έναντι ακτινοβολίας ίση με 3 h.**



**Σχήμα 2.13. (α) εκτιμώμενη ώρα αιχμής θερμοκρασίας συναρτήσει του γεωγραφικού μήκους, (β) απόκλιση (σε ώρες) από την ευθεία γραμμικής παλινδρόμησης συναρτήσει του γεωγραφικού πλάτους.**

Η ώρα αιχμής (Greenwich) της θερμοκρασίας είναι γραμμική συναρτήσει του γεωγραφικού μήκους (με συντελεστή συσχέτισης  $R^2 = 0,97$ ) και είναι περίπου 3 το απόγευμα τοπική ώρα σε όλους τους σταθμούς, με κάποιες αποκλίσεις της τάξεως των 1-2 h (Σχήμα 2.13). Όντως λοιπόν υπάρχει υστέρηση περίπου 3 h της ωριαίας θερμοκρασίας έναντι της ωριαίας ακτινοβολίας. Συγκεκριμένα, η ώρα αιχμής  $a_h$  μπορεί να θεωρηθεί ως σταθερά και υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση (εάν  $a_h > 24$ , τότε  $a_h = a_h - 24$ ):

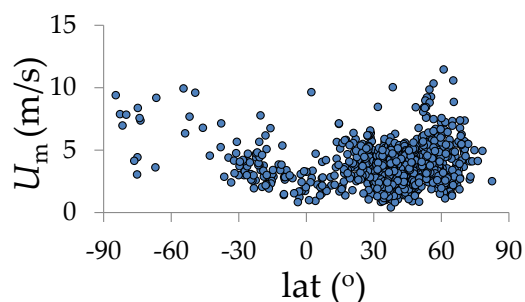
$$a_h = \alpha \cdot lon + \beta \quad (2.9)$$

όπου:  $\alpha = \frac{24}{2 \cdot 180}$  h/deg,  $lon$  = γεωγραφικό μήκος που κυμαίνεται από -180 έως +180

deg,  $\beta = 14.96$  h.

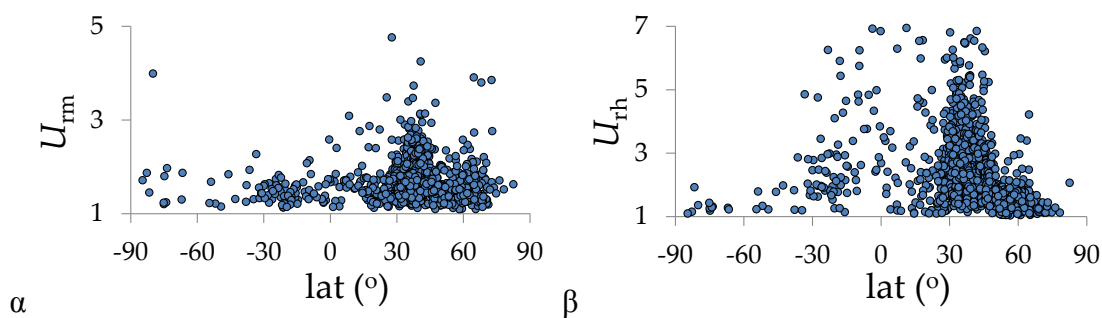
### 2.4.3 Ταχύτητα ανέμου

Η κατανομή της μέσης ετήσια ταχύτητας ανέμου φαίνεται στο Σχήμα 2.14.



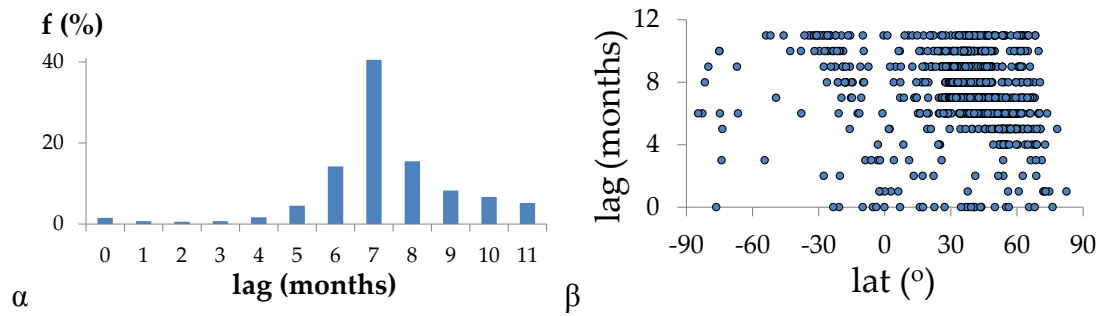
Σχήμα 2.14. Γεωγραφική κατανομή της μέσης ετήσιας ταχύτητας ανέμου.

Όμοια με τη συσχέτιση ακτινοβολίας και θερμοκρασίας, εξετάζεται η συσχέτιση θερμοκρασίας και ανέμου. Η αξιολόγηση της μηνιαίας διακύμανσης της ταχύτητας ανέμου γίνεται με τον υπολογισμό του λόγου  $UR_m = \frac{U_m^{\max}}{U_m^{\min}}$  για κάθε σταθμό, όπου  $U_m^{\max}$  και  $U_m^{\min}$  είναι η μέγιστη και ελάχιστη μηνιαία ταχύτητα ανέμου αντίστοιχα. Επίσης, με αντίστοιχο τρόπο γίνεται υπολογισμός της ωριαίας διακύμανσης της ταχύτητας ανέμου,  $UR_h^i$ , για κάθε μήνα και στη συνέχεια της μέσης τιμής αυτών,  $UR_h$ . Το 82% των σταθμών παρουσιάζουν  $UR_h > 1,5$  και το 26% των σταθμών  $UR_h > 2,5$ . Επίσης, το 64% των σταθμών παρουσιάζουν  $UR_m > 1,5$  (Σχήμα 2.15).



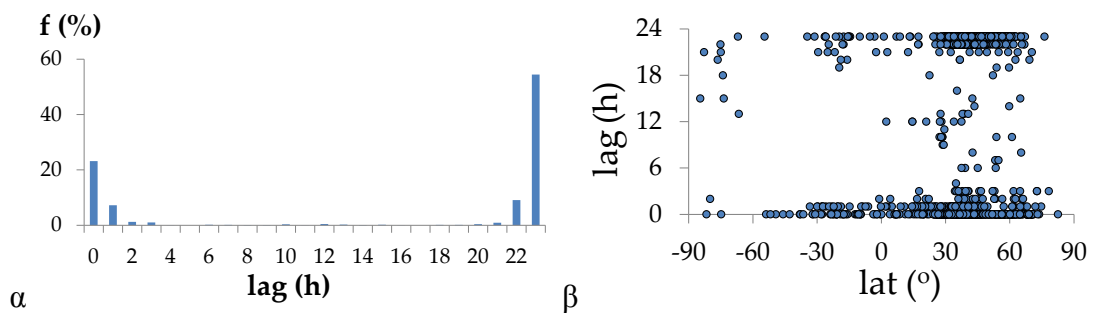
Σχήμα 2.15. Κατανομή διακύμανσης ταχύτητας ανέμου (α) μηνιαίας,  $UR_m$  και (β) ωριαίας,  $UR_h$ .

Η μηνιαία υστέρηση της ταχύτητας ανέμου έναντι της θερμοκρασίας δε δείχνει κάποιο ιδιαίτερο συμπέρασμα (Σχήμα 2.16).



**Σχήμα 2.16. Συχνότητα (α) και γεωγραφική κατανομή (β) εμφάνισης κάθε τιμής της μηνιαίας υστέρησης ταχύτητας ανέμου έναντι της θερμοκρασίας.**

Κατά συνέπεια, ο μήνας αιχμής της ταχύτητας ανέμου δε μπορεί να θεωρηθεί σταθερά παγκοσμίως. Ακόμη και μέσα στον Ελλαδικό χώρο υπάρχουν περιοχές με τελείως διαφορετική μηνιαία συμπεριφορά του ανέμου. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι περιοχές της ανατολικής ηπειρωτικής Ελλάδας και του Αιγαίου, όπου κατά το μήνα Αύγουστο εμφανίζονται τα μελέμια. Τα μελέμια είναι εποχικοί βορειοανατολικοί άνεμοι που φτάνουν ακόμη και την ταχύτητα των 75 m/s. (<http://www.meteo-news.gr/>). Σε πολλές άλλες περιοχές της χώρας ο μέγιστος άνεμος εμφανίζεται το χειμώνα.

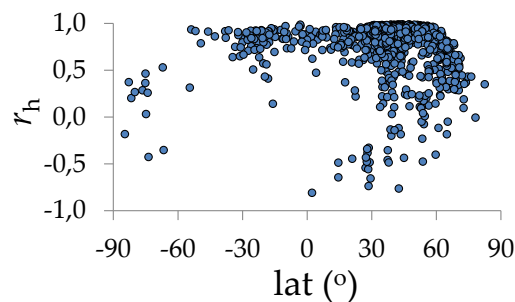


**Σχήμα 2.17. Συχνότητα (α) και γεωγραφική κατανομή (β) εμφάνισης κάθε τιμής της ωριαίας υστέρησης ταχύτητας ανέμου έναντι της θερμοκρασίας.**

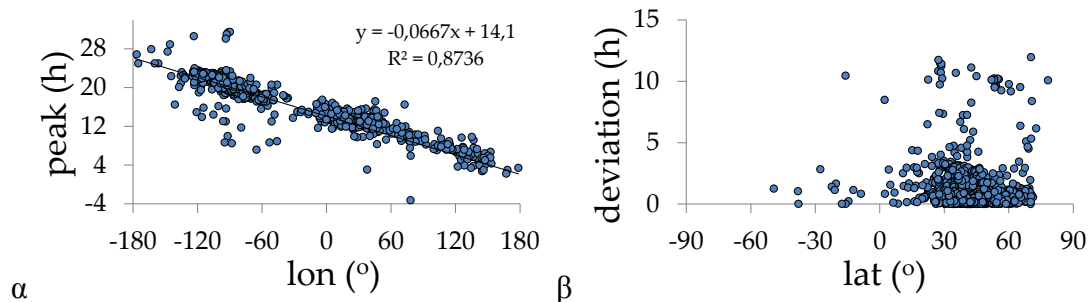
Η ταχύτητα ανέμου υστερεί γενικώς κατά 23 ώρες από τη θερμοκρασία (Σχήμα 2.17). Αυτό σημαίνει ότι τελικά η θερμοκρασία είναι το μέγεθος που υστερεί έναντι της ταχύτητας ανέμου κατά μία ώρα. Πιθανότατα λοιπόν ο άνεμος είναι αυτός που προκαλεί τη διαφορά θερμοκρασίας σε ωριαία κλίμακα.

Η θάλασσα διατηρεί τη θερμοκρασία της λόγω τεράστιας ειδικής θερμότητας του νερού έναντι της ατμόσφαιρας (σχολικό Βιβλίο Χημείας, Α' τάξης λυκείου). Η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας πάνω από τη θάλασσα είναι λοιπόν καθορισμένη. Στη συνέχεια ο άνεμος μεταφέρει την αέρια μάζα της θάλασσας πάνω από τη στεριά. Η θερμοκρασία και η ταχύτητα ανέμου μετρώνται ως επί το πλείστον σε

μετεωρολογικούς σταθμούς στη στεριά. Αυτές οι μετρήσεις πιθανόν να εμφανίζουν υστέρηση 1 h λόγω της διεργασίας μεταφοράς των αερίων μαζών. Οι σταθμοί για τους οποίους η υστέρηση δεν λαμβάνει την τιμή 1 h είναι ελάχιστοι. Έτσι μπορεί να τεθεί υστέρηση ίση με 1 h χωρίς ιδιαίτερη επίπτωση στο μέσο συντελεστή συσχέτισης ο οποίος κυμαίνεται σε πολύ υψηλά επίπεδα παγκοσμίως. Είναι αξιοσημείωτο ότι το 90% των σταθμών παρουσιάζουν συσχέτιση μεγαλύτερη από 0,63 και το 65% των σταθμών παρουσιάζουν συσχέτιση μεγαλύτερη από 0,90 (Σχήμα 2.18).



**Σχήμα 2.18. Γεωγραφική κατανομή μέσου ωριαίου συντελεστή συσχέτισης για υστέρηση θερμοκρασίας έναντι ταχύτητας ανέμου ίση με 1 h.**



**Σχήμα 2.19. (α) εκτιμώμενη ώρα αιχμής ταχύτητας ανέμου συναρτήσει του γεωγραφικού μήκους, (β) απόκλιση (σε ώρες) από την ευθεία γραμμικής παλινδρόμησης συναρτήσει του γεωγραφικού πλάτους.**

Η ώρα αιχμής (Greenwich) της ταχύτητας ανέμου είναι γραμμική συναρτήσει του γεωγραφικού μήκους (με συντελεστή συσχέτισης  $R^2 = 0,87$ ) και είναι περίπου 2 το απόγευμα τοπική ώρα σε όλους τους σταθμούς (σχήμα 2.19). Όντως λοιπόν υπάρχει υστέρηση περίπου 1 h της ωριαίας θερμοκρασίας έναντι της ταχύτητας ανέμου. Συγκεκριμένα, η ώρα αιχμής  $a_h$  μπορεί να θεωρηθεί ως σταθερά και υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση (εάν  $a_h > 24$ , τότε  $a_h = a_h - 24$ ):

$$a_h = \alpha \cdot lon + \beta \quad (2.10)$$

όπου:  $\alpha = \frac{24}{2 \cdot 180}$  h/deg,  $lon =$  γεωγραφικό μήκος που κυμαίνεται από -180 έως +180 deg,  $\beta = 14.97$  h.

Το σφάλμα λόγω της απόκλισης από την ευθεία γραμμικής παλινδρόμησης δεν κρίνεται σημαντικό, αν και είναι μεγαλύτερο από ότι στις μεταβλητές της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας. Η εξήγηση για αυτό δίνεται στο παράρτημα Δ.

### 3 Μοντέλα διπλής κυκλοστασιμότητας

Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν μερικές εκδοχές ντετερμινιστικών μοντέλων και θα γίνει προσπάθεια να εφαρμοστεί το καταλληλότερο από αυτά στην ωριαία κατανομή της θερμοκρασίας και του ανέμου. Για την περιγραφή της διπλής κυκλοστασιμότητας της θερμοκρασίας έχουν αναπτυχθεί μοντέλα που συνδυάζουν τριγωνομετρικές και εκθετικές συναρτήσεις. Αυτό, διότι έχει παρατηρηθεί πως υπάρχει απότομη αύξηση της θερμοκρασίας το μεσημέρι και αργή μείωση το βράδυ (Martinez, 1991).

Ίσως φαίνεται παράξενο το ότι η θερμοκρασία απαιτεί και εκθετικές συναρτήσεις ενώ η ακτινοβολία (με την οποία συσχετίζεται σημαντικά) μόνο τριγωνομετρικές. Αυτό δεν πρέπει να προκαλεί εντύπωση. Η ακτινοβολία μηδενίζεται κατά τη διάρκεια της νύχτας, κάτι που δημιουργεί μία καμπύλη που πλησιάζει την εκθετική. Δηλαδή έχουμε σταθερή ακτινοβολία το βράδυ ίση μη μηδέν και απότομη αύξηση την ημέρα. Κάτι παρόμοιο περιγράφηκε για τη θερμοκρασία, ως φυσικό επακόλουθο της μεγάλης συσχέτισής τους.

Αφού επίσης υπάρχει σημαντική συσχέτιση μεταξύ ταχύτητας ανέμου και θερμοκρασίας, είναι απόλυτα φυσιολογικό να διερευνήσουμε παρόμοια μοντέλα για τις δύο αυτές υδρομετεωρολογικές μεταβλητές. Ακολουθούν τέσσερις εκδοχές μοντέλων που εφαρμόστηκαν σε όλους τους σταθμούς των ομάδων Α και Β. Στη μελέτη αυτή εξετάστηκαν και άλλα μοντέλα, τα οποία εφαρμόστηκαν σε μερικούς μόνο σταθμούς. Λεπτομέρειες για την εφαρμογή τους και οι λόγοι απόρριψης αναφέρονται στο Παράρτημα Γ.

Κάθε μοντέλο περιλαμβάνει έναν αριθμό παραμέτρων. Η τιμή τους υπολογίζεται από την ελαχιστοποίηση του αθροίσματος τετραγωνικών σφαλμάτων μεταξύ παρατηρημένων τιμών των ανελιξίων και θεωρητικών τιμών του μοντέλου. Με άλλα λόγια, από το μοντέλο κατασκευάζεται ένας νέος πίνακας  $\mu_{mod}$  ο οποίος έχει τιμές παραπλήσιες του αρχικού. Σε κάθε σταθμό αντιστοιχίζεται ένα σύνολο παραμέτρων το οποίο σε συνδυασμό με τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση της ανέλιξης του σταθμού, είναι ικανό να περιγράψει επιτυχώς τη συμπεριφορά του ανέμου και της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της ημέρας και του έτους.

### 3.1 Ταχύτητα ανέμου

#### 3.1.1 Εκδοχή 1

Μία αρχική προσέγγιση είναι το ακόλουθο μοντέλο, το οποίο περιγράφει τη διπλή κυκλοστασιμότητα χρησιμοποιώντας συνδυασμό τριγωνομετρικών και εκθετικών συναρτήσεων. Βασίστηκε σε ένα μοντέλο των Dimitriadis and Koutsoyiannis (2015), το οποίο βελτιώθηκε από τους Deligiannis et al (submitted, 2016).

$$\mu_c = \left( (a_1 + a_2 C_m(t)) \exp(C_h(t)) + a_3 C_m(t) + a_4 \right) \mu \quad (3.1)$$

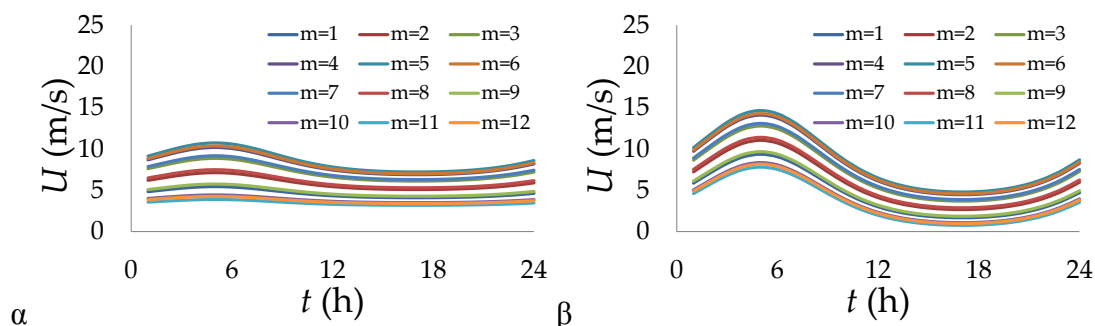
όπου οι δύο συναρτήσεις που περιγράφουν τη διπλή περιοδικότητα είναι οι εξής:

$$C_m(t) = \cos\left(2\pi \frac{(t_m - a_m)}{T_m}\right) \quad (3.2)$$

$$C_h(t) = \cos\left(2\pi \frac{(t_h - a_h)}{T_h}\right) \quad (3.3)$$

Επιπροσθέτως:  $\mu_c$  είναι η μέση τιμή της ανέλιξης για κάθε μήνα και ώρα,  $\mu$  η μέση τιμή της ανέλιξης,  $t_h$  ο συνεχής χρόνος μεταξύ 0 h και 24 h,  $t_m$  ο συνεχής χρόνος μεταξύ 0 και 12 μηνών,  $T_h = 24$  h;  $T_m = 12$  μήνες,  $a_1, a_2, a_3, a_4$  αδιάστατες παράμετροι,  $a_h$  παράμετρος που δείχνει την ώρα αιχμής (μεταξύ 0 h και 24 h),  $a_m$  παράμετρος που δείχνει το μήνα αιχμής (μεταξύ 0 και 12 μηνών).

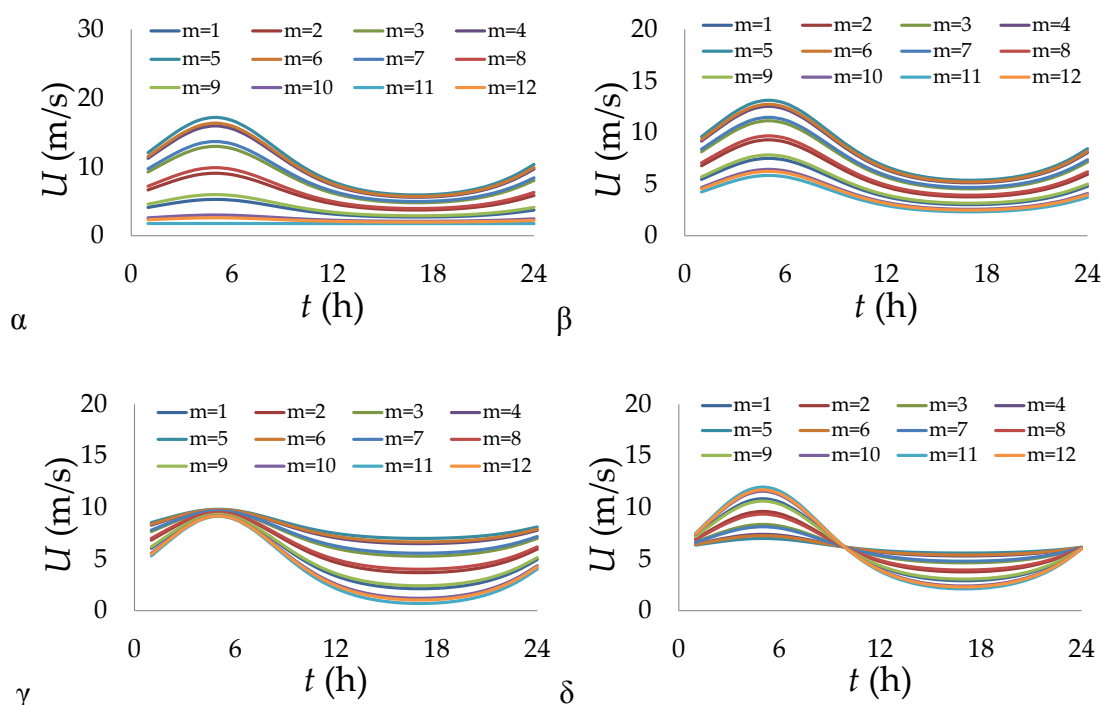
Ο συντελεστής  $a_1$  σχετίζεται με την ημερήσια περιοδικότητα. Όσο μεγαλύτερη είναι η ωριαία διακύμανση του ανέμου, τόσο μεγαλύτερη η τιμή του συντελεστή (Σχήμα 3.1).



Σχήμα 3.1<sup>1</sup>. Θεωρητικές καμπύλες του μοντέλου 1 για: (α)  $a_1=0,15$  και (β)  $a_1=0,6$ .

<sup>1</sup> Οι υπόλοιπες παράμετροι λήφθηκαν ίσες με:  $a_2 = 0,1$ ,  $a_3 = 0,3$ ,  $a_h = 5$  h,  $a_m = 5,1$  μήνες,  $\mu = 6$  m/s.

Οι συντελεστές  $a_2$  και  $a_3$  σχετίζονται με την εποχιακή περιοδικότητα. Όσο μεγαλύτερη είναι η μηνιαία διακύμανση του ανέμου, τόσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του συντελεστή  $a_3$ . Όσον αφορά το συντελεστή  $a_2$ , είναι απαραίτητος διότι συνδυαζόμενος με τον  $a_3$  επιτρέπει στο μοντέλο να περιγράψει όλες τις συνηθέστερες συμπεριφορές του ανέμου παγκοσμίως (Σχήμα 3.2). Μερικές από τις συμπεριφορές αυτές είναι: (α) απότομη ωριαία αιχμή σε ορισμένους μήνες και σταθερός άνεμος στους υπόλοιπους, (β) περίπου παράλληλες μεταξύ τους μηνιαίες καμπύλες, (γ) παρόμοια τιμή της μέγιστης ταχύτητας σε όλους τους μήνες και σημαντικά διαφορετική τιμή ελάχιστης ταχύτητας, (δ) εναλλαγή του μήνα αιχμής για διαφορετικές ώρες της ημέρας.



**Σχήμα 3.2<sup>2</sup>. Θεωρητικές καμπύλες του μοντέλου 1 για: (α)  $a_2=0,4$  και  $a_3=0,2$ . (β)  $a_2=0,15$  και  $a_3=0,2$ . (γ)  $a_2=-0,2$  και  $a_3=0,6$ . (δ)  $a_2=-0,3$  και  $a_3=0,4$ .**

Ο συντελεστής  $a_4$  είναι απαραίτητος ώστε το μοντέλο να πιάσει τη μέση τιμή της ανέλιξης. Για το μοντέλο του ανέμου διαπιστώνουμε ότι δεν αποτελεί ξεχωριστή παράμετρο, αλλά εξαρτάται πλήρως από το συντελεστή  $a_1$ . Πράγματι, ολοκληρώνοντας για 1 έτος τη σχέση 3.1, διαπιστώνουμε ότι:

$$a_4 = 1 - a_1 \int_0^{2\pi} \exp(\cos x) dx = 1 - 1,2661a_1 \quad (3.4)$$

<sup>2</sup> Οι υπόλοιπες παράμετροι λήφθηκαν ίσες με:  $a_1 = 0,4$ ,  $a_h = 5$  h,  $a_m = 5,1$  μήνες,  $\mu = 6$  m/s.



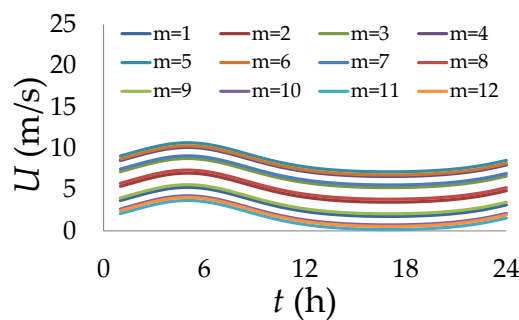
Ο συντελεστής  $a_h$  λογίζεται ως σταθερά όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 2.4.3, έτσι δεν αποτελεί παράμετρο του μοντέλου. Αντιθέτως, ο συντελεστής  $a_m$  δε λογίζεται ως σταθερά. Κατά συνέπεια το συγκεκριμένο μοντέλο έχει συνολικά τέσσερις παραμέτρους.

### 3.1.2 Εκδοχή 2

Μία ειδική περίπτωση της εκδοχής 1 αποτελεί η εκδοχή 2, σύμφωνα με την οποία μηδενίζεται ο συντελεστής  $a_2$ , συνεπώς έχει τρεις παραμέτρους. Η μορφή της εκδοχής απεικονίζεται ακολούθως.

$$\mu_c = (a_1 \exp(C_h(t)) + a_3 C_m(t) + a_4) \mu \quad (3.5)$$

Η εκδοχή αυτή περιγράφει πολύ αποτελεσματικά τη συμπεριφορά των παραλλήλων μηνιαίων καμπύλων (Σχήμα 3.3).



Σχήμα 3.3<sup>3</sup>. Θεωρητικές καμπύλες του μοντέλου 2.

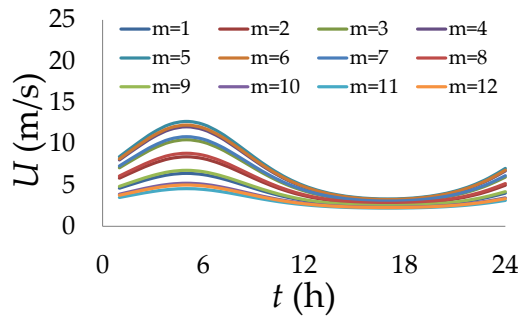
### 3.1.3 Εκδοχή 3

Μία άλλη ειδική περίπτωση της εκδοχής 1 αποτελεί η εκδοχή 3, σύμφωνα με την οποία μηδενίζεται ο συντελεστής  $a_3$ , δηλαδή και πάλι οι παράμετροι είναι τρεις. Η μορφή της εκδοχής απεικονίζεται ακολούθως.

$$\mu_c = ((a_1 + a_2 C_m(t)) \exp(C_h(t)) + a_4) \mu \quad (3.6)$$

Η εκδοχή αυτή περιγράφει πολύ αποτελεσματικά τη συμπεριφορά των καμπύλων που εμφανίζουν παραπλήσια ελάχιστη τιμή και διαφέρουν σημαντικά στη μέγιστη τιμή. (Σχήμα 3.4). Είναι η πιο κοντινή εκδοχή στο μοντέλο το οποίο εξετάστηκε από τους Dimitriadis and Koutsoyiannis (2015).

<sup>3</sup> Οι παράμετροι λήφθηκαν ίσες με:  $a_1 = 0,3$ ,  $a_3 = 0,7$ ,  $a_h = 5$  h,  $a_m = 5,1$  μήνες,  $\mu = 5$  m/s.



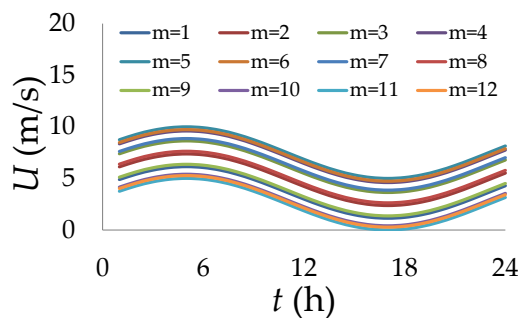
Σχήμα 3.4<sup>4</sup>. Θεωρητικές καμπύλες του μοντέλου 3.

### 3.1.4 Εκδοχή 4

Εκτός από τις εκδοχές που συμπεριλαμβάνουν εκθετική συνάρτηση για την ωριαία διακύμανση, θα είναι ενδιαφέρον να εξεταστεί και μία εκδοχή με τριγωνομετρικές μόνο συναρτήσεις. Ενδεικτικά λοιπόν δημιουργείται μία παραλλαγή της εκδοχής 2, χωρίς την εκθετική συνάρτηση.

$$\mu_c = (a_1 C_h(t) + a_3 C_m(t) + 1)\mu \quad (3.7)$$

Είναι αξιοσημείωτο ότι στην εκδοχή αυτή ο συντελεστής  $a_4$  ισούται πάντοτε με τη μονάδα. Αυτό ισχύει διότι οι τριγωνομετρικές συναρτήσεις είναι συμμετρικές ως προς το μηδέν και έτσι η μέση τιμή της ανέλιξης πιάνεται με  $a_4 = 1$ . Κατά συνέπεια οι παράμετροι είναι και πάλι τρεις.



Σχήμα 3.5<sup>5</sup>. Θεωρητικές καμπύλες του μοντέλου 4.

## 3.2 Θερμοκρασία

Για την περιγραφή της διπλής κυκλοστασιμότητας της θερμοκρασίας θα χρησιμοποιηθούν οι ίδιες εκδοχές, με μία μικρή όμως αλλαγή. Ο άνεμος παίρνει μη

<sup>4</sup> Οι παράμετροι λήφθηκαν ίσες με:  $a_1 = 0,5$ ,  $a_2 = 0,3$ ,  $a_h = 5$  h,  $a_m = 5,1$  μήνες,  $\mu = 5$  m/s.

<sup>5</sup> Οι παράμετροι λήφθηκαν ίσες με:  $a_1 = 0,4$ ,  $a_3 = 0,5$ ,  $a_h = 5$  h,  $a_m = 5,1$  μήνες,  $\mu = 5$  m/s.

αρνητικές τιμές και έτσι είναι δυνατή η τυποποίηση των τεσσάρων συντελεστών έτσι ώστε να είναι αδιάστατοι, με πολλαπλασιασμό με τη μέση τιμή της ανέλιξης  $\mu$ . Στις εκδοχές της θερμοκρασίας είναι άστοχο να γίνει η ίδια τυποποίηση, διότι η θερμοκρασία παίρνει και αρνητικές τιμές και η θερμοκρασία 0°C δεν έχει κάποια φυσική σημασία (όπως έχει η άπνοια για τον άνεμο). Επιλέγεται λοιπόν να τυποποιηθούν οι παράμετροι  $a_1, a_2, a_3$  με την τυπική απόκλιση  $\sigma$  του πίνακα  $\mu_{\text{temp}}$ . Βέβαια λόγω αυτής της επιλογής, η  $a_4$  θα πρέπει πλέον να θεωρηθεί ως παράμετρος. Οι τέσσερις εκδοχές του μοντέλου για τη θερμοκρασία απεικονίζονται σύντομα παρακάτω.

$$\mu_c = \left( (a_1 + a_2 C_m(t)) \exp(C_h(t)) + a_3 C_m(t) \right) \sigma + a_4 \mu \quad (3.8)$$

$$\mu_c = \left( a_1 \exp(C_h(t)) + a_3 C_m(t) \right) \sigma + a_4 \mu \quad (3.9)$$

$$\mu_c = \left( a_1 + a_2 C_m(t) \right) \exp(C_h(t)) \sigma + a_4 \mu \quad (3.10)$$

$$\mu_c = \left( a_1 C_h(t) + a_3 C_m(t) \right) \sigma + \mu \quad (3.11)$$

Όπως αναφέρθηκε στο εδάφιο 2.4.2, οι συντελεστές φάσης της θερμοκρασίας  $a_h$  και  $a_m$  μπορούν να θεωρηθούν και οι δύο ως σταθερές. Έτσι, ο αριθμός παραμέτρων των τεσσάρων εκδοχών της θερμοκρασίας είναι αντίστοιχα 4, 3, 3, 2.

### 3.3 Σύγκριση εκδοχών και επιλογή

Τα κριτήρια με τα οποία θα επιλεγεί το πιο κατάλληλο μοντέλο είναι η ύπαρξη όσο το δυνατόν λιγότερων παραμέτρων, και η αποτελεσματικότητά του. Ο αριθμός των παραμέτρων περιγράφεται στην ανάλυση κάθε εκδοχής. Για την αποτελεσματικότητα του κάθε μοντέλου, χρησιμοποιούνται τρία κριτήρια: η μηνιαία συσχέτιση, η ωριαία συσχέτιση και το αδιάστατο σφάλμα, μεταξύ παρατηρημένων τιμών και τιμών του μοντέλου.

Η μηνιαία συσχέτιση κάθε σταθμού ορίζεται ως  $r_m$  και είναι ο συντελεστής συσχέτισης Pearson των μέσων μηνιαίων τιμών των παρατηρήσεων και του μοντέλου. Η ωριαία συσχέτιση κάθε σταθμού  $r_h$  είναι η μέση τιμή των ωριαίων

συσχετίσεων για κάθε μήνα,  $r_h^i$ . Το αδιάστατο σφάλμα  $e_N$  είναι η μέση τιμή των αδιάστατων σφαλμάτων  $e_N^i$  για κάθε μήνα. Το σφάλμα της ταχύτητας ανέμου του κάθε μήνα ορίζεται ως η ρίζα της μέσης τιμής του τετραγώνου των αποκλίσεων,

δηλημένη διά τη μέση τιμή του μήνα,  $m_i$ . Δηλαδή  $e_N^i = \frac{\sqrt{\frac{1}{24} \sum_{j=1}^{24} (a_{ji}^w - a_{ji}^{th})^2}}{m_i}$ . Ανάλογα ορίζουμε και το σφάλμα θερμοκρασίας του κάθε μήνα, διαιρώντας με την τυπική απόκλιση  $\sigma_i$  της ωριαίας σειράς των 24 τιμών για κάθε μήνα. Δηλαδή  $e_N^i = \frac{\sqrt{\frac{1}{24} \sum_{j=1}^{24} (a_{ji}^t - a_{ji}^{th})^2}}{\sigma_i}$ .

Στους Πίνακες 3.1 και 3.2 παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα κάθε εκδοχής, τα οποία θα καθορίσουν την επιλογή της καταλληλότερης.

**Πίνακας 3.1. Σύγκριση εκδοχών ταχύτητας ανέμου.**

ΕΚΔΟΧΗ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ	$\Gamma_m$	$\Gamma_h$	$e_N$
1	4	0,873	0,851	0,124
2	3	0,873	0,839	0,132
3	3	0,873	0,819	0,160
4	3	0,873	0,815	0,142

**Πίνακας 3.2. Σύγκριση εκδοχών θερμοκρασίας.**

ΕΚΔΟΧΗ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ	$\Gamma_m$	$\Gamma_h$	$e_N$
1	4	0,973	0,936	0,182
2	3	0,962	0,934	0,196
3	3	0,962	0,394	0,489
4	2	0,963	0,922	0,201

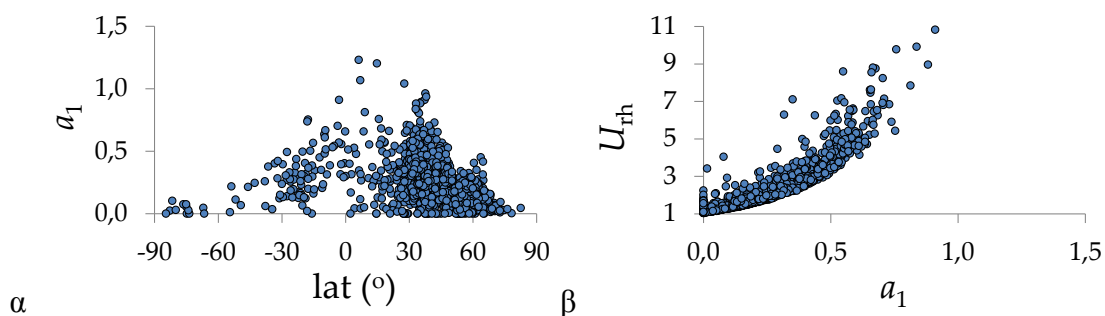
Η εκδοχή 3 οπωσδήποτε θα πρέπει να απορριφθεί διότι είναι εμφανώς χειρότερη από τις υπόλοιπες. Οι εκδοχές 1, 2 και 4 είναι σχετικά ισορροπημένες και δεν είναι έτσι ξεκάθαρο ποια από αυτές είναι πιο κατάλληλη. Στην παρούσα εργασία θα επιλεγθεί και για τις 2 μεταβλητές η εκδοχή 1 η οποία έχει μεν περισσότερους συντελεστές, αλλά η ωριαία συσχέτιση και το αδιάστατο σφάλμα είναι λίγο καλύτερα από ότι στις άλλες εκδοχές. Η επιλογή αυτή έγινε διότι η εκδοχή 1 περιγράφει μεγαλύτερη ποικιλία τύπων διαγραμμμάτων. Φυσικά, εάν κάποια μελλοντική μελέτη αναφέρεται σε συγκεκριμένη περιοχή τότε μπορεί να επιλεγθεί άλλη εκδοχή με λιγότερες παραμέτρους, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της περιοχής. Δεδομένης της

παγκόσμιας διερεύνησης κρίνεται απόλυτα φυσιολογική η ύπαρξη τεσσάρων συντελεστών για την περιγραφή διπλής κυκλοστασιμότητας.

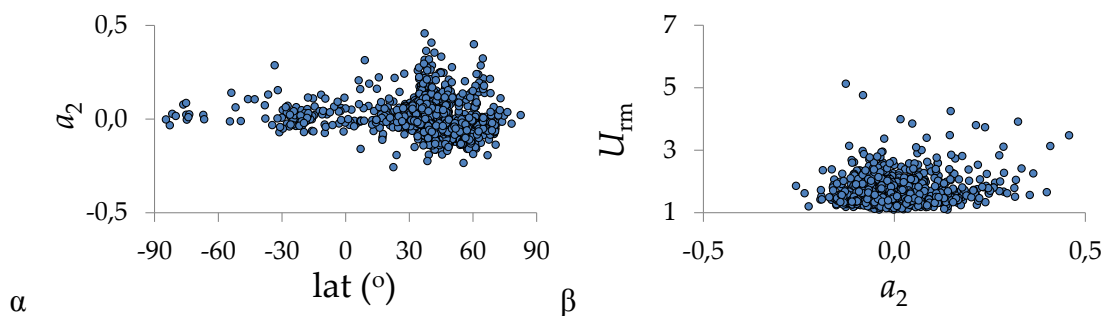
### 3.4 Αναλυτικά αποτελέσματα

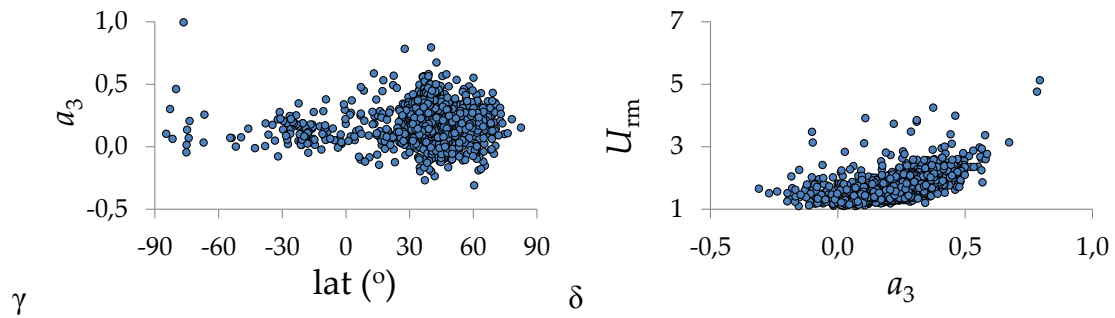
#### 3.4.1 Ταχύτητα ανέμου

Η εκδοχή 1 για την ταχύτητα ανέμου έδωσε τα ακόλουθα αποτελέσματα. Η κατανομή του συντελεστή  $a_1$ , καθώς και η σχέση του με την ωριαία διακύμανση ταχύτητας ανέμου, απεικονίζονται στο Σχήμα 3.6. Πράγματι, σε σταθμούς με μεγάλη ωριαία διακύμανση αντιστοιχεί μεγάλη τιμή του  $a_1$ . Επίσης, υπάρχει αντίστοιχη σχέση (αν και όχι τόσο εμφανής) του συντελεστή  $a_3$  με τη μηνιαία διακύμανση (Σχήμα 3.7γ,δ). Ο συντελεστής  $a_2$  δεν εμφανίζει το ίδιο αποτέλεσμα (Σχήμα 3.7β), διότι ο ρόλος του είναι κυρίως να καθορίζει τη σχέση μεταξύ των μηνιαίων καμπύλων. Η κατανομή του φαίνεται στο Σχήμα 3.7α.



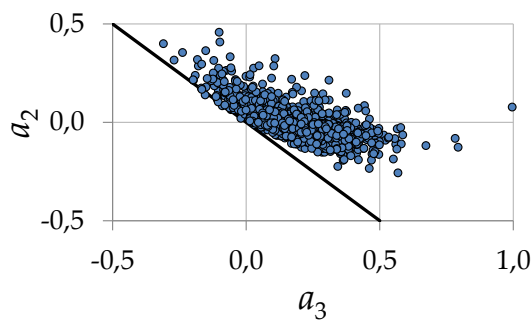
Σχήμα 3.6. (α) κατανομή  $a_1$  με το πλάτος, (β) σχέση  $a_1$  και  $UR_h$ .





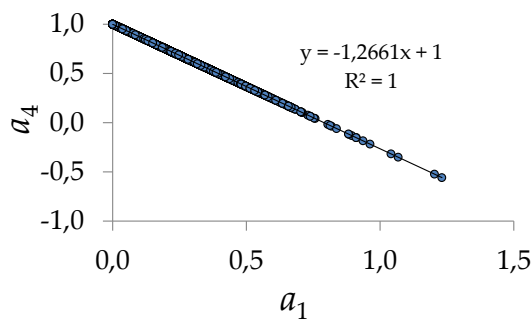
**Σχήμα 3.7. (α) κατανομή  $a_2$  με το πλάτος, (β) σχέση  $a_2$  και  $UR_m$ , (γ) κατανομή  $a_3$  με το πλάτος, (δ) σχέση  $a_3$  και  $UR_m$ ,**

Γενικά θα πρέπει όλοι οι συντελεστές να είναι θετικοί ώστε να εξασφαλίζεται πως οι  $a_m$ ,  $a_h$  θα αναφέρονται στην αιχμή της ταχύτητας ανέμου και όχι στην ελάχιστη τιμή. Βέβαια, οι  $a_2$  και  $a_3$  είναι αναγκαίο να παίρνουν και αρνητικές τιμές ώστε να περιγράφουν και τις πιο σπάνιες μορφές καμπύλων (Σχήμα 3.2). Πάντως ποτέ δεν είναι και οι δύο αρνητικοί, μάλιστα το αλγεβρικό τους άθροισμα είναι θετικό (Σχήμα 3.8).



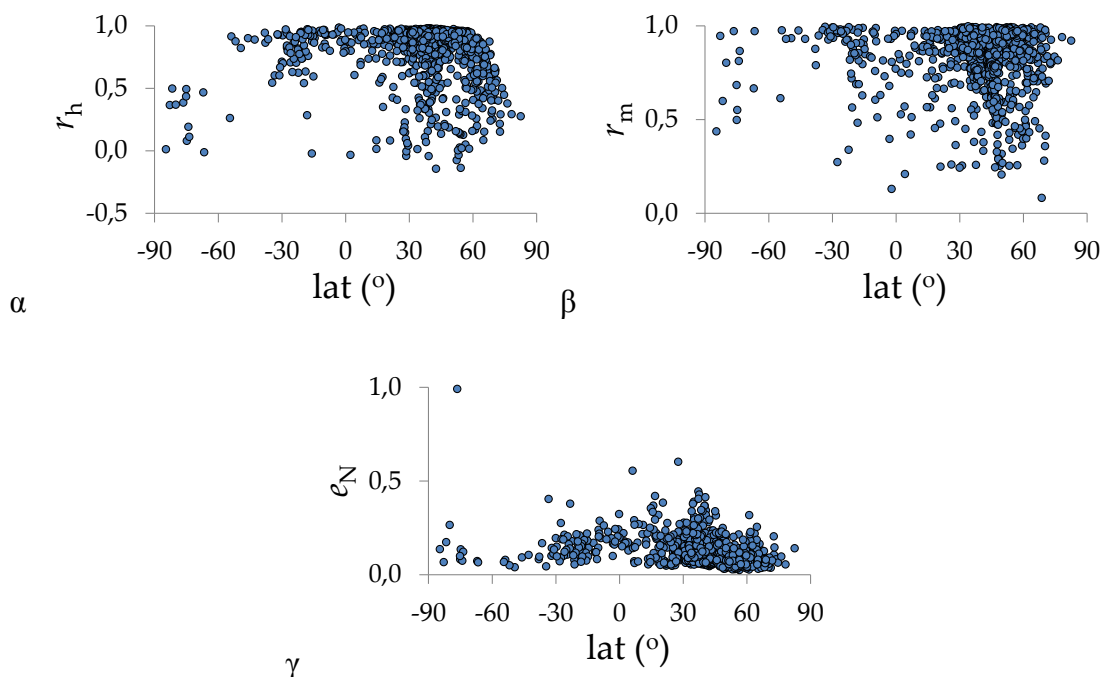
**Σχήμα 3.8. σχέση  $a_2$  και  $a_3$ .**

Ο συντελεστής  $a_4$  μπορεί πράγματι να θεωρηθεί με απόλυτη ακρίβεια συνάρτηση του  $a_1$ . Η επιβεβαίωση της θεωρίας έγινε με τη θεώρησή του ως παράμετρο κατά την εφαρμογή του μοντέλου και την παρατήρηση της συσχέτισης με τον  $a_1$  (Σχήμα 3.9).



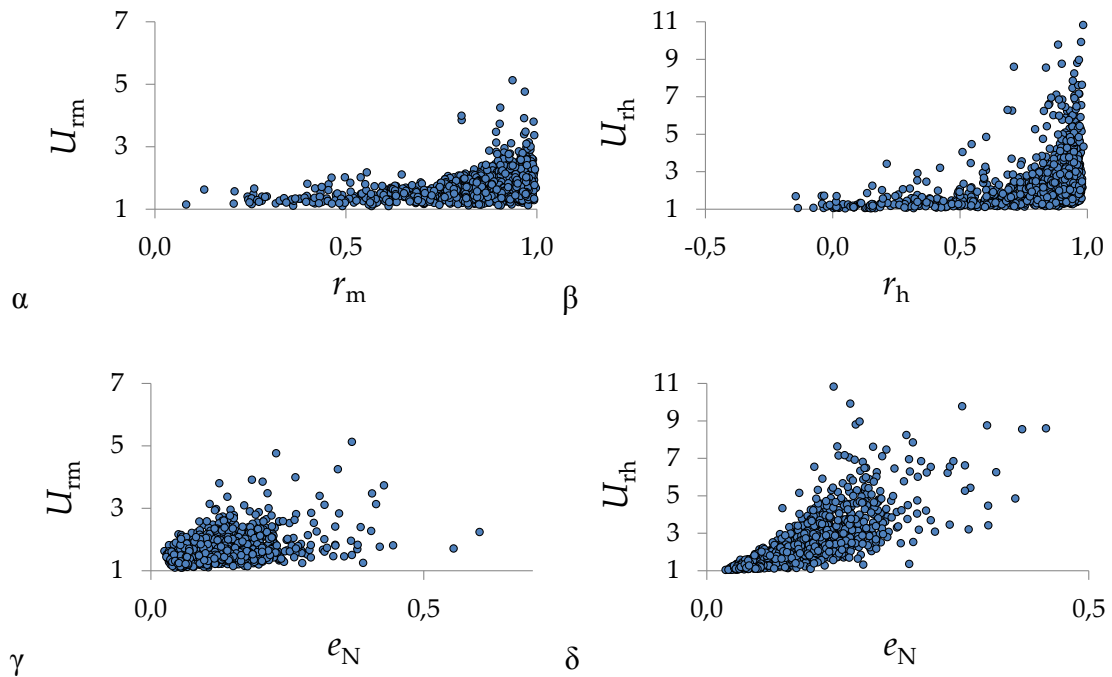
**Σχήμα 3.9. σχέση  $a_1$  και  $a_4$ .**

Ο ωριαίος και ο μηνιαίος συντελεστής συσχέτισης κυμαίνονται σε πολύ υψηλά επίπεδα. Το 90% των σταθμών παρουσιάζουν  $r_h > 0.63$  και το 64% των σταθμών  $r_h > 0.90$ . Επίσης, το 90% των σταθμών παρουσιάζουν  $r_m > 0.70$  και το 59% των σταθμών  $r_m > 0.90$ . Τέλος, το 37% των σταθμών παρουσιάζουν  $e_N < 0.10$  και το 91% των σταθμών  $e_N < 0.20$  (Σχήμα 3.10).



**Σχήμα 3.10. Γεωγραφική κατανομή (α)  $r_h$ , (β)  $r_m$ , (γ)  $e_N$ .**

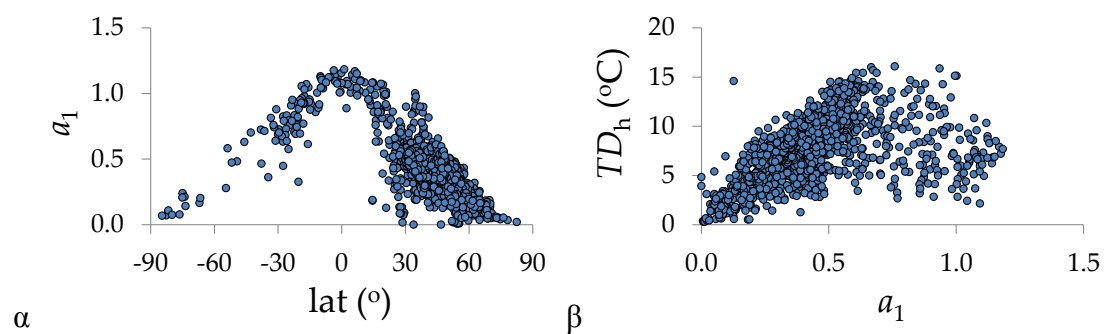
Γενικώς η συσχέτιση υποεκτιμάται όταν η διακύμανση δεν είναι έντονη. Στην περίπτωση λοιπόν που έχουμε χαμηλές τιμές των  $r_m$  και  $r_h$  δε σημαίνει ότι το μοντέλο δε λειτουργεί σωστά. Αντιθέτως, στην περίπτωση αυτή το σφάλμα είναι μικρότερο, καθώς είναι πιο εύκολο να προσαρμοστεί μία θεωρητική καμπύλη πάνω σε μία σταθερή καμπύλη. Η παρατήρηση αυτή γίνεται φανερή στο Σχήμα 3.11, κυρίως στο μέρος (β) όπου βλέπουμε ότι η ωριαία συσχέτιση είναι πάντα κοντά στο 1 όταν υπάρχει μεγάλη ωριαία διακύμανση, αλλά και στο (δ) όπου γίνεται φανερό ότι το σφάλμα είναι μικρό όταν υπάρχει μικρή ωριαία διακύμανση. Οι αντίστοιχες παρατηρήσεις σχετικά με τη μηνιαία διακύμανση ισχύουν, αν και δεν είναι τόσο αξιοσημείωτες (Σχήμα 3.11α,γ).



**Σχήμα 3.11.** Σχέση μεταξύ (α)  $r_m$  και  $UR_m$ , (β)  $r_h$  και  $UR_h$ , (γ)  $e_N$  και  $UR_m$ , (δ)  $e_N$  και  $UR_h$ .

### 3.4.2 Θερμοκρασία

Η εκδοχή 1 για τη θερμοκρασία έδωσε τα ακόλουθα αποτελέσματα. Η κατανομή του συντελεστή  $a_1$ , καθώς και η σχέση του με την ωριαία διακύμανση θερμοκρασίας, απεικονίζονται στο Σχήμα 3.12. Πράγματι, σε σταθμούς με μεγάλη ωριαία διακύμανση αντιστοιχεί μεγάλη τιμή του  $a_1$  (Σχήμα 3.12).

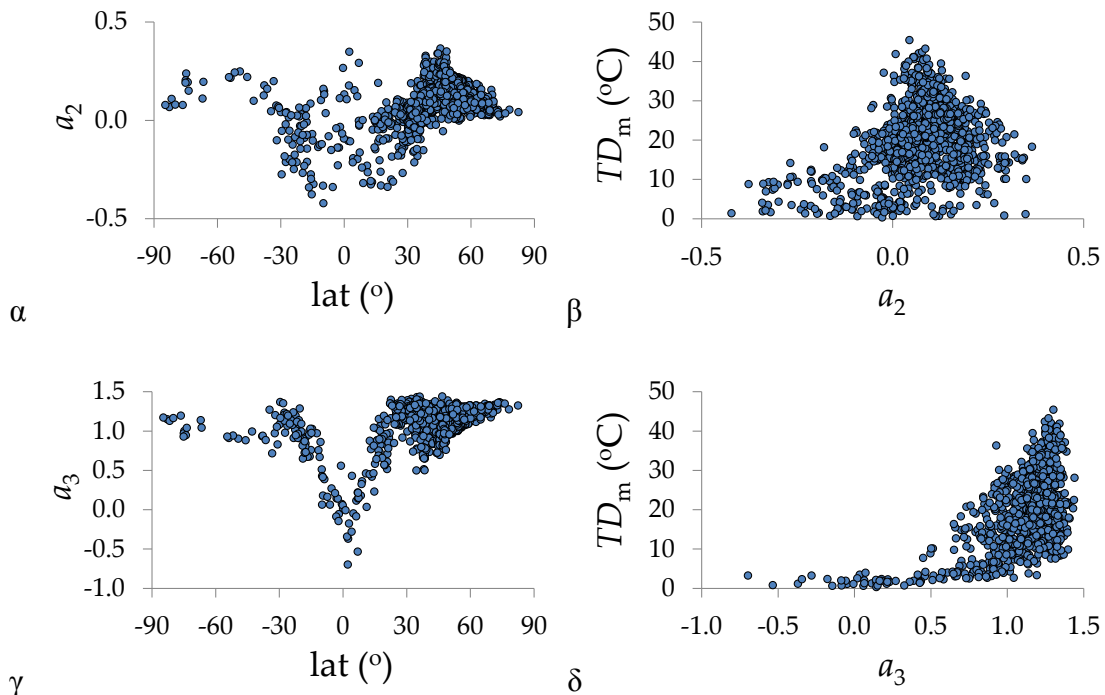


**Σχήμα 3.12.** (α) κατανομή  $a_1$  με το πλάτος, (β) σχέση  $a_1$  και  $TD_h$ .

Επίσης, υπάρχει αντίστοιχη σχέση του συντελεστή  $a_3$  με τη μηνιαία διακύμανση (Σχήμα 3.13γ,δ). Η κατανομή των συντελεστών  $a_2$  και  $a_3$  απεικονίζεται στο Σχήμα 3.13α,γ. Είναι φανερό ότι ο συντελεστής  $a_3$  είναι αρκετά υψηλός όταν η μηνιαία διακύμανση θερμοκρασίας είναι σημαντική (Σχήμα 3.13δ). Επίσης, λαμβάνει αρνητικές τιμές μόνο κοντά στον ισημερινό, όπου παρατηρείται η μικρή ασάφεια του

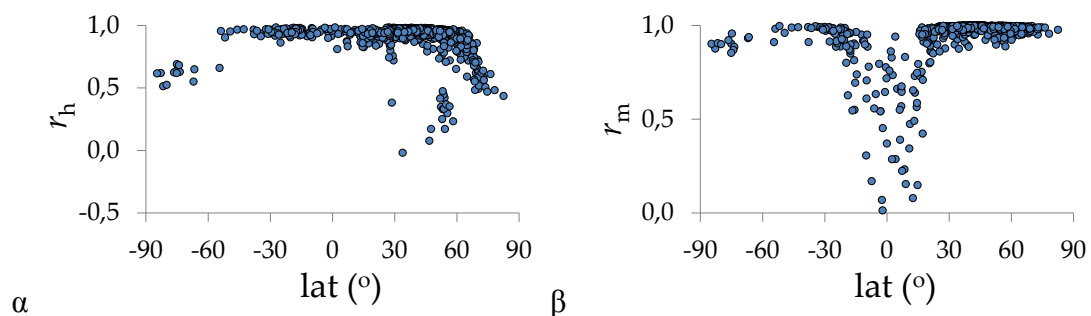


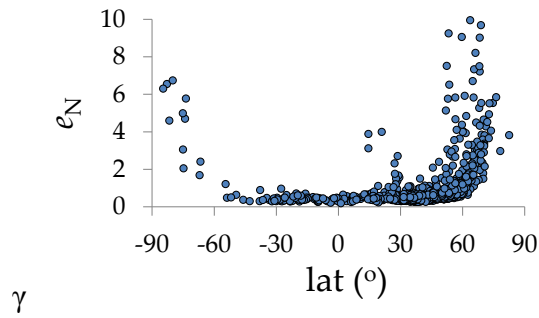
μήνα αιχμής που αναλύθηκε στο εδάφιο 2.4.2. Ο συντελεστής  $a_2$  δεν εμφανίζει κάτι αξιοσημείωτο, καθώς ο ρόλος του είναι διαφορετικός από τον  $a_3$ . Γενικώς είναι σχετικά κοντά στο μηδέν (Σχήμα 3.13α). Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι η εκδοχή 2 στην οποία τίθεται  $a_2 = 0$  είναι αρκετά καλή, άσχετα αν δεν επιλέχτηκε ως επικρατέστερη. Δηλαδή οι παράλληλες μηνιαίες καμπύλες αποτελεί μία ικανοποιητική θεώρηση για τη μεταβλητή της θερμοκρασίας.



**Σχήμα 3.13. (α) κατανομή  $a_2$  με το πλάτος, (β) σχέση  $a_2$  και  $TD_m$ , (γ) κατανομή  $a_3$  με το πλάτος, (δ) σχέση  $a_3$  και  $TD_m$ .**

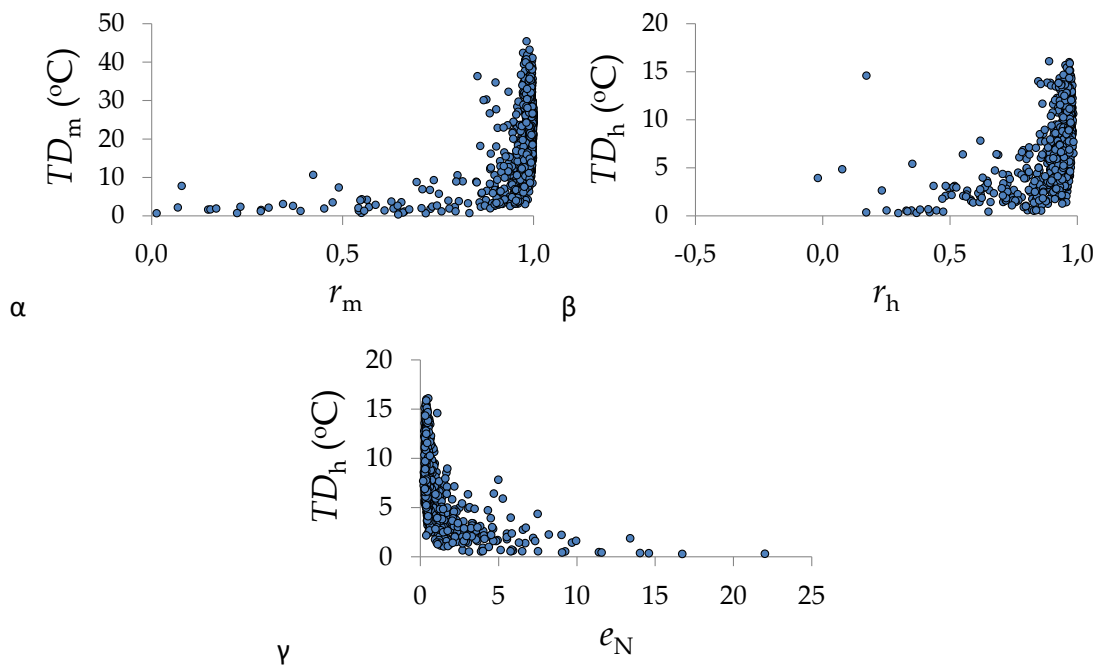
Ο ωριαίος και ο μηνιαίος συντελεστής συσχέτισης κυμαίνονται σε πολύ υψηλά επίπεδα (Σχήμα 3.14α,β). Το 95% των σταθμών παρουσιάζουν  $r_h > 0.80$  και το 69% των σταθμών  $r_h > 0.95$ . Επίσης, το 97% των σταθμών παρουσιάζουν  $r_m > 0.80$  και το 84% των σταθμών  $r_m > 0.98$ . Τέλος, το 59% των σταθμών παρουσιάζουν  $e_N < 0.5$  και το 89% των σταθμών  $e_N < 1$  (Σχήμα 3.14γ).





Σχήμα 3.14. Γεωγραφική κατανομή (α)  $r_h$ , (β)  $r_m$ , (γ)  $e_N$ .

Οι συντελεστές συσχέτισης υποεκτιμώνται όταν η διακύμανση θερμοκρασίας είναι μικρή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.15α,β. Το σφάλμα κοντά στον ισημερινό φαίνεται να είναι πολύ μεγάλο. Λόγω της μικρής ημερήσιας διακύμανσης θερμοκρασίας, η τυπική απόκλιση (με την οποία διαιρείται το σφάλμα για να αδιαστατοποιηθεί) είναι πολύ μικρή. Έτσι, αν και το μοντέλο είναι αρκετά αποτελεσματικό, δημιουργείται λανθασμένη εντύπωση (Σχήμα 3.15γ).

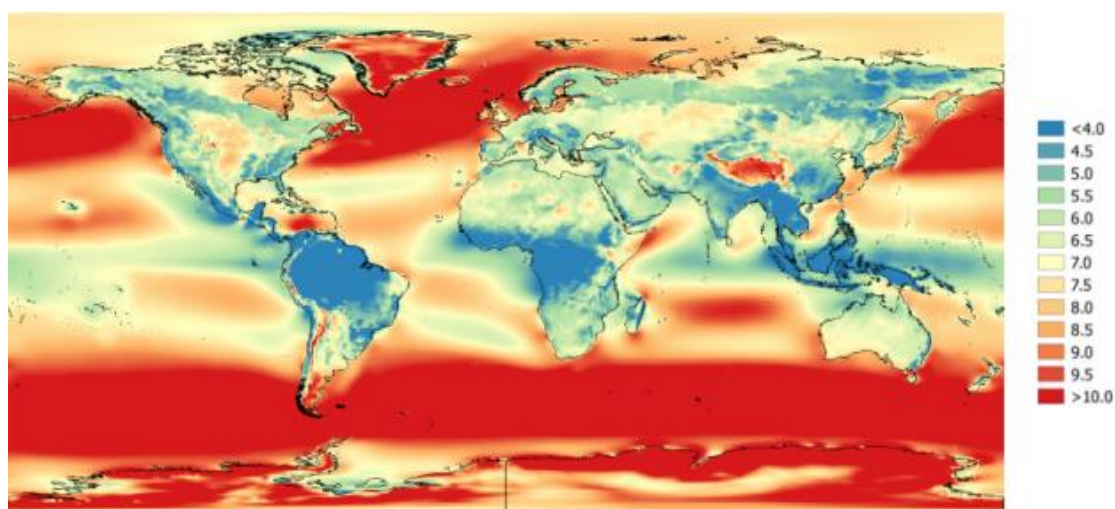


Σχήμα 3.15. Σχέση μεταξύ (α)  $r_m$  και  $TD_m$ , (β)  $r_h$  και  $TD_h$ , (γ)  $e_N$  και  $TD_h$ .

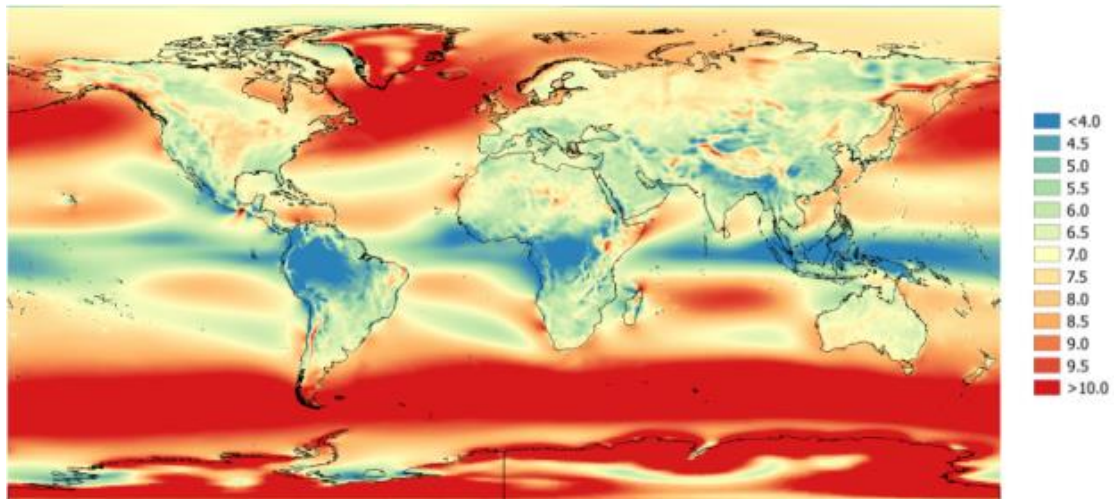
## 4 Δεδομένα πλήρους επεξεργασίας (reanalysis data)

Τα Reanalysis data (Δεδομένα Πλήρους Επεξεργασίας) χρησιμοποιούνται στις επιστήμες περιβάλλοντος και χρησιμοποιούν ένα αριθμητικό μοντέλο το οποίο δίνει αποτελέσματα για το παρελθόν αντί για το μέλλον. Χρησιμοποιούνται συνήθως για τον έλεγχο εγκυρότητας των μοντέλων (Τσεκούρας, 2012). Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζεται η εγκυρότητα των μοντέλων που χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή δεδομένων reanalysis.

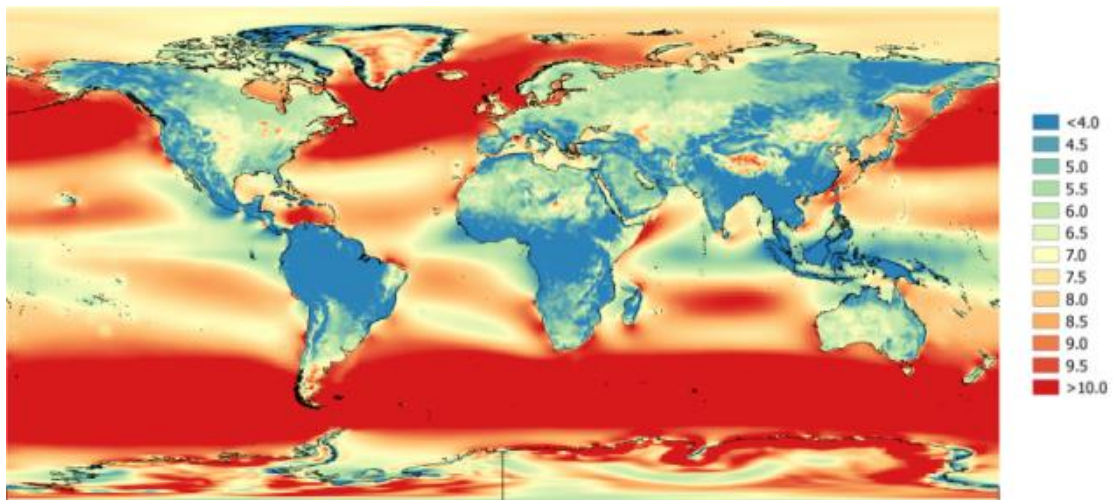
Αρχικά χρησιμοποιούνται δεδομένα από τον Global Wind Atlas (πηγή: <http://globalwindatlas.com/datasets.html#toc-Section-2.1>). Τα δεδομένα αυτά έχουν ληφθεί από 4 διαφορετικά μοντέλα και αναφέρονται σε άνεμο στα 100 m υψόμετρο από την επιφάνεια της γης. Τα 4 μοντέλα ονομάζονται MERRA, CFDDA, CFSR και ERA-Interim. Οι Χάρτες 4.1 έως 4.4 απεικονίζουν τη μέση ταχύτητα ανέμου όπως αυτή προέκυψε από τα μοντέλα. Φαίνεται ότι τα διαφορετικά μοντέλα εμφανίζουν παρόμοια κατανομή ανέμου κοντά στους πόλους και στους ωκεανούς, αλλά έχουν σημαντικές διαφορές πάνω από τις ηπείρους. Η διαφορά οφείλεται στις οριακές συνθήκες του κάθε μοντέλου.



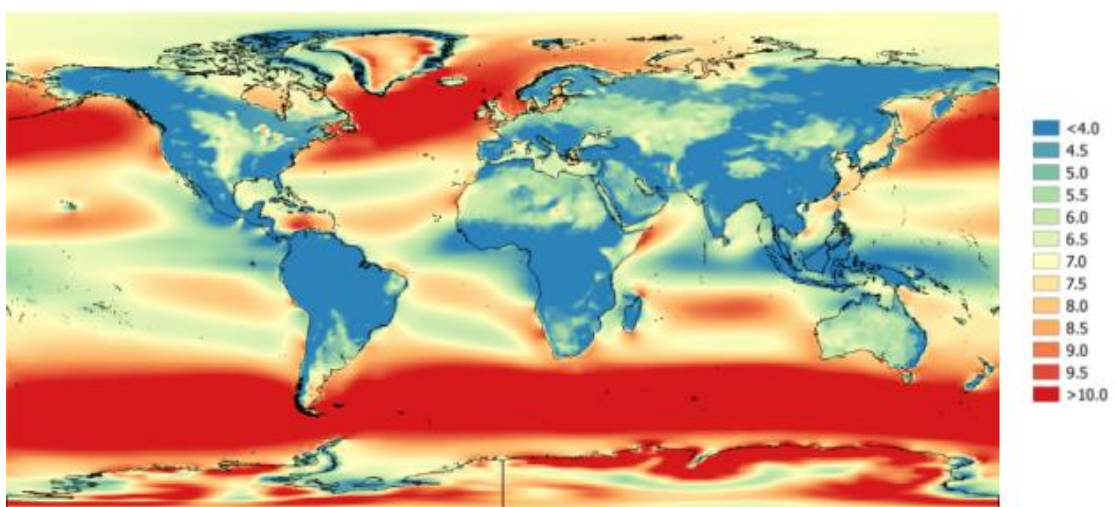
Χάρτης 4.1. Μέση ταχύτητα ανέμου στα 100 m, σύστημα MERRA (1979-2013).



Χάρτης 4.2. Μέση ταχύτητα ανέμου στα 100 m, σύστημα CFDDA (1985-2005).

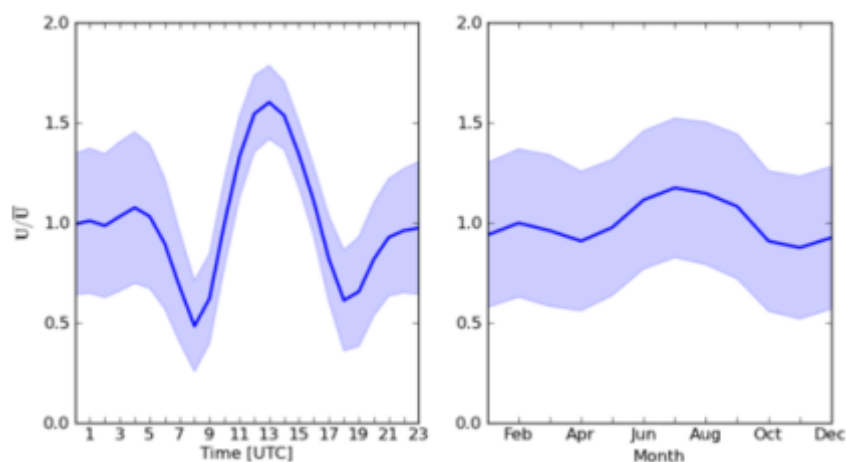


Χάρτης 4.3. Μέση ταχύτητα ανέμου στα 100 m, σύστημα CFSR (1979-2010).



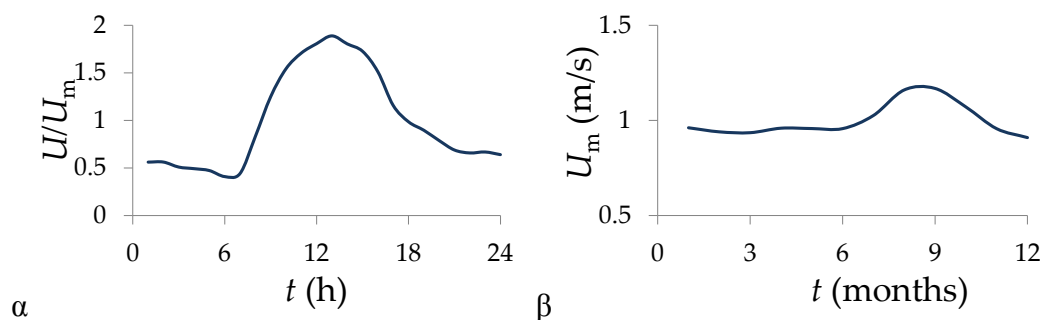
Χάρτης 4.4. Μέση ταχύτητα ανέμου στα 100 m, σύστημα ERA-Interim (1979-2012).

Επιπλέον, από την ίδια πηγή συλλέχθηκε το Σχήμα 4.1, το οποίο περιγράφει την ημερήσια και την εποχιακή περιοδικότητα της ταχύτητας ανέμου στην περιοχή της λίμνης Βικτώριας στην Αφρική (0.4°S, 34.0°E) για την περίοδο 1985-2005, όπως προέκυψε από εφαρμογή του μοντέλου CFDDA.



**Σχήμα 4.1. Ωριαία και μηνιαία κατανομή ανέμου στη λίμνη Βικτώρια - μοντέλο CFDDA.**

Θα έχει ενδιαφέρον να εξεταστεί εάν η κατανομή αυτή περιγράφεται και από τα ιστορικά δεδομένα της NOAA. Επιλέγουμε λοιπόν το σταθμό με κωδικό 2446 (1.97°S, 30.13°E) ο οποίος αποτελεί τον πλησιέστερο σταθμό στη λίμνη Βικτώρια. Η περίοδος λειτουργίας του είναι το διάστημα 1973-2014, άρα η σύγκριση με το μοντέλο έχει νόημα, καθώς οι περίοδοι βρίσκονται κοντά. Τα αντίστοιχα διαγράμματα απεικονίζονται στο Σχήμα 4.2.



**Σχήμα 4.2. Ωριαία και μηνιαία κατανομή ανέμου στη λίμνη Βικτώρια – NOAA**

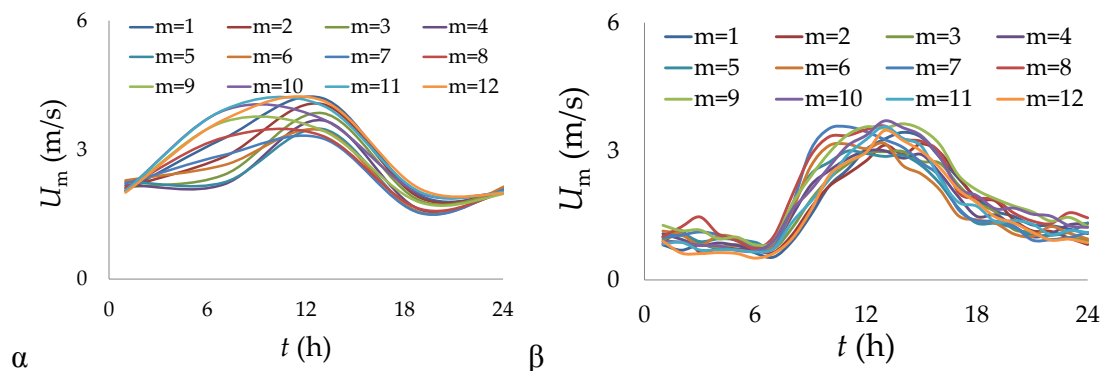
Συμπεραίνουμε ότι το σύστημα αυτό πιάνει τη γενική συμπεριφορά του ανέμου σε ωριαία και μηνιαία κλίμακα.

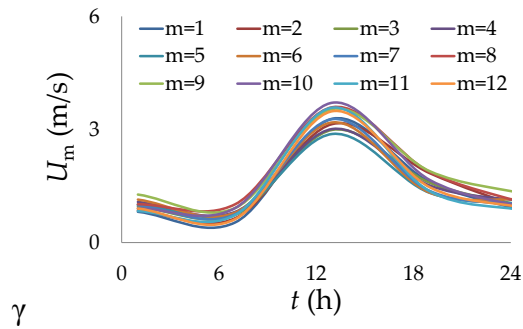
Εκτός από τον Global Wind Atlas, συλλέγονται και αποτελέσματα reanalysis από το National Centre for Atmospheric Research, NCAR (<https://ncar.ucar.edu/>) και ελέγχεται ενδεικτικά η κατανομή του ανέμου στην ίδια περιοχή. Η πηγή αυτή χωρίζει τη γη σε grids ανά  $0,312^\circ \times 0,312^\circ$ , έτσι επιλέγουμε δεδομένα από το πλησιέστερο grid το οποίο βρίσκεται στη θέση  $2.03^\circ\text{S}$ ,  $30.0^\circ\text{E}$ . Ο Χάρτης 4.5 δείχνει την ακριβή θέση των δεδομένων.



**Χάρτης 4.5. Θέση συλλογής αποτελεσμάτων reanalysis από NCAR.**

Η ωριαία κατανομή του ανέμου για κάθε μήνα φαίνεται στο Σχήμα 4.3α. Για λόγους σύγκρισης παρατίθενται ακόμη 2 διαγράμματα. Το Σχήμα 4.3β απεικονίζει την αντίστοιχη κατανομή στον πλησιέστερο σταθμό της NOAA (2446), ενώ σχεδιάζεται και με ανάλυση 6 ωρών ώστε να μπορεί να συγκριθεί πιο αποτελεσματικά (Σχήμα 4.3γ).





**Σχήμα 4.3. Ωριαία κατανομή του ανέμου (α) στο σταθμό Kigali, ανά 6 ώρες, (β) στο σταθμό 2446 ανά 1 ώρα και (γ) στο σταθμό 2446 ανά 6 ώρες.**

Παρατηρούμε ότι τους μισούς μήνες του χρόνου τα δεδομένα reanalysis απέχουν πολύ από την πραγματικότητα. Τους υπόλοιπους μήνες αν και το σχήμα της κατανομής φαίνεται να πιάνεται, υπάρχει σφάλμα στις ελάχιστες και μέγιστες τιμές. Γενικά τα δεδομένα αυτά κρίνονται αναξιόπιστα, αφού δεν περιγράφουν επαρκώς την πραγματικότητα.

## 5 Στοχαστική δομή ταχύτητας ανέμου

### 5.1 Γενικά

Η κλιματική αλλαγή συνήθως αποδίδεται στην ανθρωπογενή παρέμβαση. Ωστόσο, ενδέχεται κατά ένα μεγάλο μέρος να οφείλεται στην ίδια τη φύση, η οποία έχει την τάση συνεχώς να παρουσιάζει μεταβλητότητα (Deligiannis et al, 2016).

Η κλιματική μεταβλητότητα συνδέεται στενά με το φαινόμενο Hurst, το οποίο παρατηρείται σε πολλές μεγάλες χρονοσειρές υδροκλιματικών μεταβλητών. Τυπικές στατιστικές παράμετροι όπως μέση τιμή και διακύμανση, συνεχώς αλλάζουν (Koutsoyiannis, 2003). Το φαινόμενο ονομάζεται και μακροπρόθεσμη εμμονή και χαρακτηριστικό του είναι η μεγάλη διακύμανση και αβεβαιότητα στις μεγάλες κλίμακες. Έχει εφαρμογή όχι μόνο στο κλίμα και την υδρολογία, αλλά και στη μουσική και τα οικονομικά.

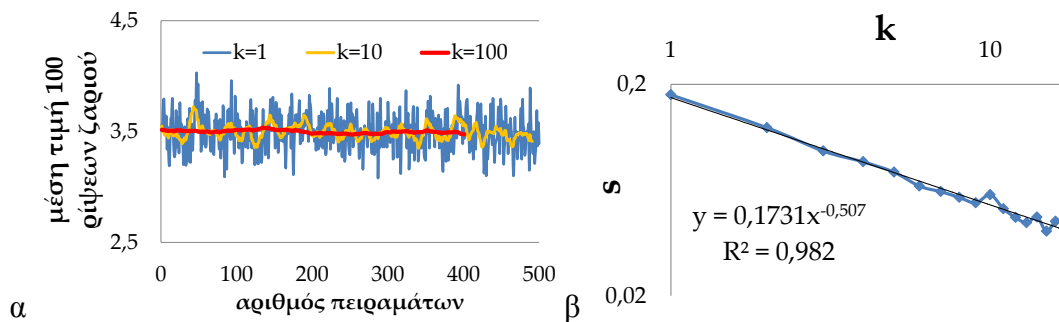
Αντιθέτως, ένα πείραμα τύχης δεν εμφανίζει εμμονή και αυξανόμενη της κλίμακας συνάθροισης η διασπορά τείνει στο μηδέν. Έτσι, υπάρχει πολύ μικρή αβεβαιότητα στις μεγάλες κλίμακες. Ο συντελεστής Hurst σε ένα πείραμα τύχης ισούται περίπου με  $H = 0,5$ , ενώ σε μία μεταβλητή με εμμονή είναι  $H > 0,5$ .

Ενδεικτικά, παρουσιάζονται 2 σχήματα. Το πρώτο απεικονίζει τα αποτελέσματα του πειράματος ρίψης ενός τριμίου ζαριού 100 φορές και εξαγωγής της μέσης τιμής ( $H = 0,493 \approx 0,5$ )<sup>6</sup>. Το πείραμα επαναλαμβάνεται 500 φορές (Σχήμα 5.1). Παρατηρούμε ότι στην κλίμακα συνάθροισης  $k=100$  η χρονοσειρά είναι σχεδόν σταθερή και ίση με 3,5. Το Σχήμα 5.2 απεικονίζει ένα κομμάτι Βυζαντινής μουσικής σε όρους συχνοτήτων (πηγή: Γεώργιος Ν. Κωνσταντίνου, 2014). Συγκεκριμένα είναι το Αναστάσιμο απολυτίκιο α' ήχου «*Τοῦ λίθου σφραγισθέντος*». Παρατηρούμε ότι εμφανίζει εμμονή ( $H = 0,71$ ), δηλαδή οι μεγάλες και οι μικρές τιμές συχνοτήτων εμφανίζονται κατά ομάδες.

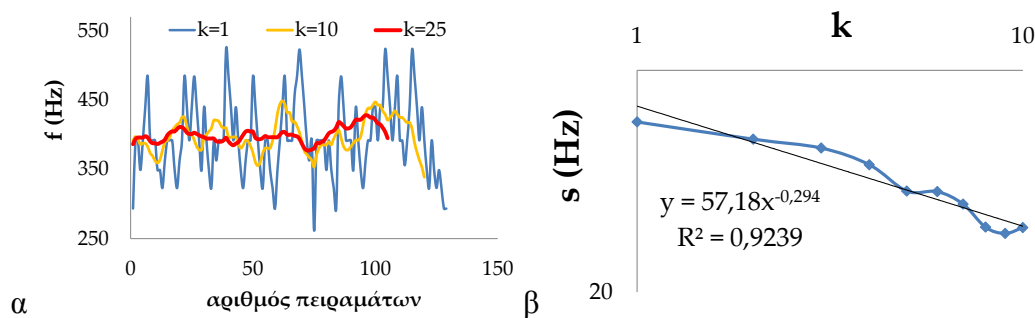
---

<sup>6</sup> Ο συντελεστής Hurst προκύπτει από τη σχέση  $H = 1 + d$ , όπου  $d$  είναι η κλίση του κλιμακογράμματος  $s - k$  σε διπλά λογαριθμικούς άξονες.





Σχήμα 5.1. (α) Πείραμα ρίψης ζαριού και (β) αντίστοιχο κλιμακόγραμμα.



Σχήμα 5.2. (α) Μουσικό κομμάτι και (β) αντίστοιχο κλιμακόγραμμα.

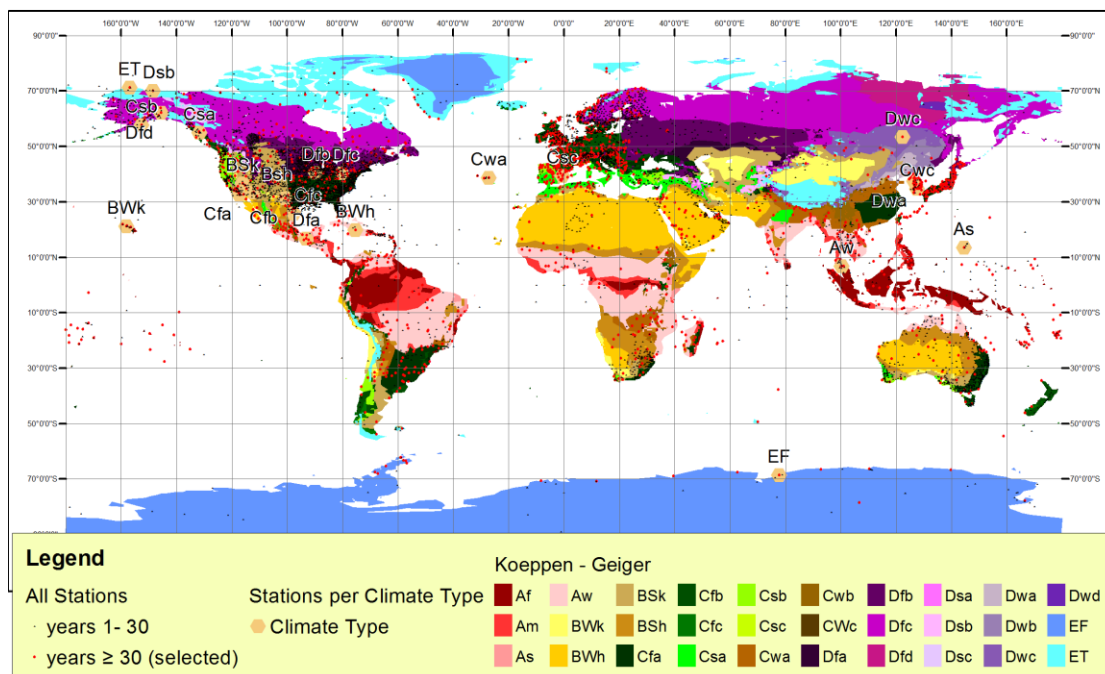
Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει παγκόσμια ανάλυση της επίδρασης του φαινομένου Hurst στη μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου.

## 5.2 Δεδομένα

Από την ίδια βάση δεδομένων (<https://www.ncdc.noaa.gov/cdo-web/>) επιλέχθηκαν αρκετοί σταθμοί με διαφορετικά κριτήρια από ότι στην προηγούμενη ενότητα. Πλέον μεγαλύτερη βαρύτητα δεν έχει η πυκνότητα πληροφορίας, αλλά το μήκος της χρονοσειράς. Έτσι, μελετώνται οι σταθμοί που έχουν μετρήσεις για τουλάχιστον 30 έτη. Ένα έτος μετρήσεων οφείλει να έχει τουλάχιστον 1 800 μετρήσεις, δηλαδή μία μέτρηση ανά τετράωρο και για 10 μήνες του χρόνου. Ακόμη και αν λείπουν μετρήσεις από δύο μήνες του χρόνου, κατά τη δυσμενέστερη περίπτωση όπου οι μήνες αυτοί εμφανίζουν ακραίες παρατηρήσεις, κρίνεται ότι η μέση ετήσια τιμή δεν επηρεάζεται σημαντικά. Τελικά επιλέγονται 1 344 σταθμοί εκ των 7 500 που λειτουργούν μέχρι σήμερα.

Επιλέγεται η διερεύνηση του φαινομένου Hurst να γίνει ξεχωριστά για κάθε κλιματική ομάδα Korpen (A, B, C, D και E). Η κλιματική κατάταξη κατά Korpen

καθώς και οι επιλεγμένοι σταθμοί για αυτήν τη μελέτη απεικονίζονται στο Χάρτη 5.1. επίσης, στον Πίνακα 5.1 παρουσιάζονται ενδεικτικά οι καλύτεροι σταθμοί, ένας για κάθε μία από τις υποκατηγορίες Koppen.



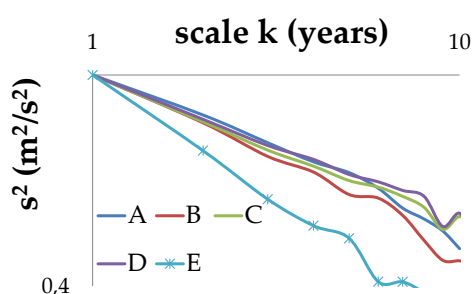
Χάρτης 5.1. Επιλεγμένοι σταθμοί για τη στοχαστική διερεύνηση ανέμου.

Πίνακας 5.1. Καλύτεροι σταθμοί για κάθε υποκατηγορία Koppen.

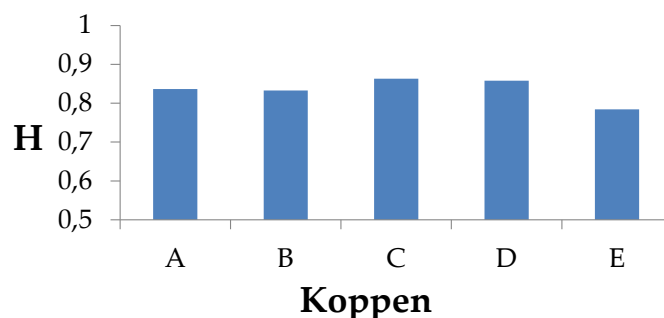
Station ID	Location	Koppen	Lon (°)	Lat (°)	Elev (m)	No years	mean wind speed (m/s)
2681	Winter Trail, Alaska	ET	-156,78	71,30	9	70	5,5
5577	Antarctica	EF	77,95	-68,58	13	42	5,8
2255	Daxinganling Heilongjiang, China	Dwc	122,52	53,47	433	42	1,8
1988	Incheon, South Korea	Dwa	126,80	37,55	20	70	2,7
2687	Anchorage, Alaska	Dsc	-148,47	70,20	18	42	5,7
2745	Chitina, Alaska	Dfc	-145,45	62,15	481	70	2,5
4618	Pittsburgh, Pennsylvania, USA	Dfb	-80,22	40,50	373	70	3,9
4649	Springfield, Illinois, USA	Dfa	-89,68	40,67	199	42	3,9
5240	Chiapas, Mexico	Cwb	-93,12	16,75	528	42	3,7
2014	Jeonnam, South Korea	Cwa	127,73	34,73	68	42	4,1
1075	Azores, Portugal, Atlantic Ocean	Csb	-27,10	38,77	55	68	4,6
1051	Valencia, Spain	Csa	-0,47	39,50	62	42	3,2
2779	Kodiak Island ,Alaska	Cfc	-152,50	57,75	34	70	4,8
2802	British Columbia, Canada	Cfb	-131,57	55,03	34	74	4,1
4118	Brownsville, Texas, USA	Cfa	-97,43	25,90	6	68	5,0
4160	San Angelo, Texas, USA	BSh	-100,50	31,37	582	67	4,6
4218	San Diego, California, USA	BSk	-117,20	32,70	15	70	2,7
4189	Phoenix, Arizona, USA	BWh	-112,02	33,43	337	42	2,9
4377	Las Vegas, Nevada, USA	BWk	-116,02	36,62	1006	37	4,0
5257	Guantanamo, Gulf of Mexico	Aw	-75,15	19,90	16	70	3,6
5609	Pearl Harbor, Hawaii, Pac. Ocean	As	-157,93	21,33	3	76	4,9
2221	Kedah, Malaysia	Am	100,43	6,92	35	42	1,6
5616	Guam, Mariana Islands, Pac. Ocean	Af	144,80	13,48	76	42	4,4

### 5.3 Ανάλυση

Για κάθε Korpen εκτιμάται ένα κλιμακόγραμμα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.3. Χρησιμοποιώντας τη σχέση:  $H = 1 + \frac{d}{2}$ , όπου  $H$  είναι ο συντελεστής Hurst και  $d$  η κλίση του κλιμακογράμματος  $s^2 - k$  σε διπλά λογαριθμικούς άξονες, εκτιμάται ο συντελεστής Hurst για κάθε κλιματικό τύπο. Βλέπουμε πως οι πέντε κλιματικοί τύποι μπορούν να ομαδοποιηθούν: οι τύποι A και B παρουσιάζουν  $H = 0,83$ , οι τύποι C και D έχουν  $H = 0,86$ , ενώ τέλος οι σταθμοί που έχουν πολικό κλίμα (E) εμφανίζουν λίγο μικρότερο συντελεστή  $H = 0,78$  (Σχήμα 5.4).

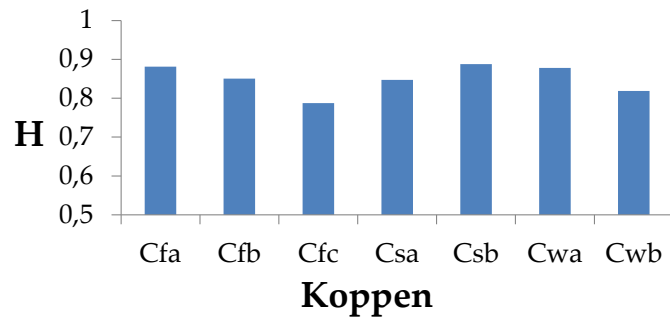


Σχήμα 5.3. Κλιμακόγραμμα για κάθε Korpen.



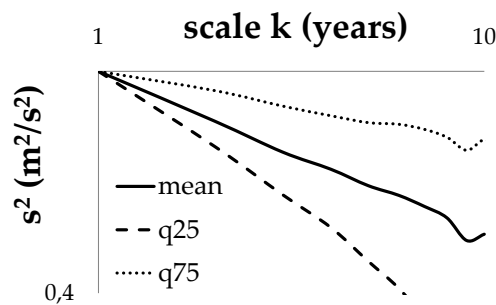
Σχήμα 5.4. Συντελεστής Hurst για κάθε Korpen.

Επιπρόσθετα, αναλύονται περαιτέρω οι υποκατηγορίες του τύπου C, καθώς ο τύπος αυτός χαρακτηρίζει 661 σταθμούς, τους μισούς δηλαδή περίπου από όσους μελετήθηκαν. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ο συντελεστής Hurst είναι γενικώς σταθερός και ίσος με  $H = 0,85$ , εκτός από τις υποκατηγορίες Cfc, Cwb, οι οποίες πάντως αντιπροσωπεύουν μόνο 22 σταθμούς συνολικά και έχουν  $H = 0,8$  (Σχήμα 5.5).

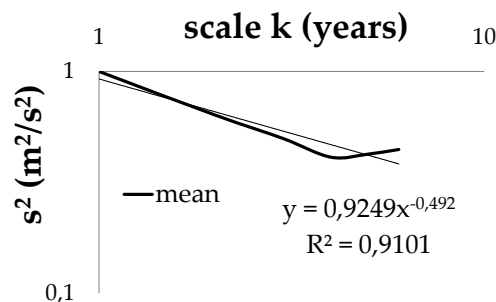


**Σχήμα 5.5.** Συντελεστής Hurst για κάθε υποκατηγορία του Koppen C.

Αναλύοντας το σύνολο των επιλεγμένων σταθμών παγκοσμίως χωρίς διαφοροποίηση κατά κλιματικό τύπο, προκύπτει το κλιμακόγραμμα που φαίνεται στο Σχήμα 5.6. Η μακροπρόθεσμη εμμονή είναι φανερή και σε αυτό το σχήμα, καθώς ο μέσος συντελεστής Hurst είναι ίσος με  $H = 0,85$ , ενώ τα τεταρτημόρια Q25 και Q75 αντιστοιχούν σε συντελεστές  $H = 0,76$  και  $H = 0,94$  αντίστοιχα. Όσον αφορά στην περιοχή της Ελλάδας, ο συντελεστής Hurst κυμαίνεται σε χαμηλότερα επίπεδα, περίπου  $H = 0,75$  (Σχήμα 5.7).



**Σχήμα 5.6.** Μέσο παγκόσμιο κλιμακόγραμμα και τεταρτημόρια.

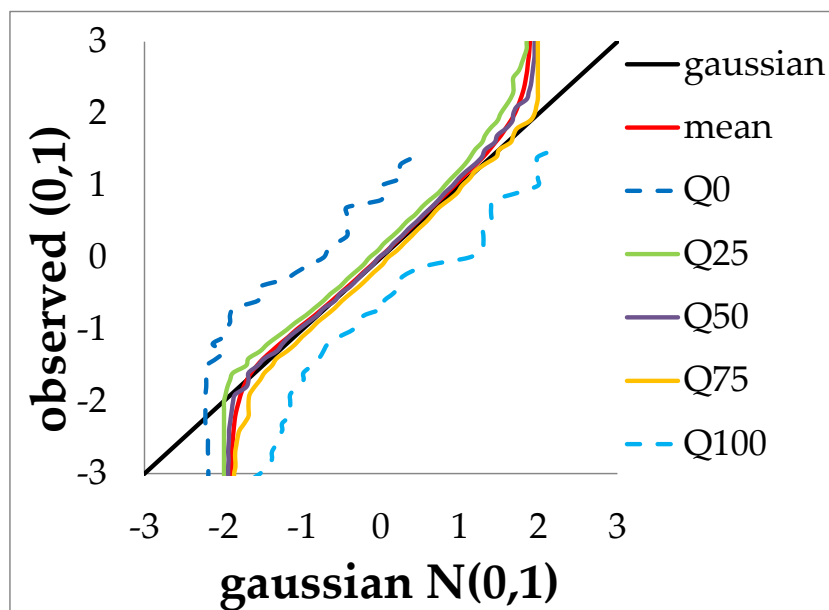


**Σχήμα 5.7.** Μέσο κλιμακόγραμμα στον ελλαδικό χώρο και τεταρτημόρια.

Η παρατηρημένη συνάρτηση κατανομής συγκρίνεται με την κανονική κατανομή. Για κάθε παρατηρημένη τυποποιημένη τιμή από  $-6$  έως  $+6$ , εκτιμούμε την τιμή της κανονικής κατανομής η οποία αντιστοιχεί στην ίδια πιθανότητα. Τα αποτελέσματα περιγράφονται στο Σχήμα 5.6. Παρατηρούμε ότι η μέση τιμή όλων των σταθμών, η

διάμεσος Q50 και τα τεταρτημόρια Q25, Q75 σχεδόν συμπίπτουν μεταξύ τους και με την ευθεία της κανονικής κατανομής. Αυτό συμβαίνει στο εύρος τιμών από  $-2$  έως  $+2$ . Δηλαδή για τιμές του ανέμου από  $\mu - 2\sigma$  έως  $\mu + 2\sigma$  (όπου  $\mu$  είναι η μέση τιμή και  $\sigma$  η τυπική απόκλιση των μέσων ετησίων τιμών για κάθε σταθμό), η κατανομή των μέσων ετησίων τιμών πλησιάζει πολύ την κανονική. Για τιμές  $X < \mu - 2\sigma$  υπάρχει σημαντική απόκλιση για τεχνικούς λόγους: τα ανεμόμετρα δε μπορούν να μετρήσουν αποτελεσματικά τις πολύ μικρές τιμές της ταχύτητας ανέμου. Για τιμές  $X > \mu + 2\sigma$  υπάρχει σημαντική απόκλιση για στατιστικούς λόγους: η κανονική κατανομή απέχει πολύ από την ουρά της πραγματικής κατανομής διότι δε μπορεί να περιγράψει καλά τις ακραίες τιμές του ανέμου.

Για την παραγωγή ενέργειας δεν έχουν σημασία ούτε οι μικρές τιμές, ούτε η ουρά της κατανομής, αλλά το κύριο σώμα είναι αυτό που αποδίδει την ενέργεια. Αυτό το πιάνει εξαιρετικά η κανονική κατανομή, έτσι κρίνεται κατάλληλη για την παρούσα μελέτη.



**Σχήμα 5.8.** Σύγκριση μέσων παγκοσμίων ετησίων τιμών με κανονική κατανομή.

Οι Deligiannis et al (2016) κατέληξαν ότι η κλιματική μεταβλητότητα του ανέμου μπορεί να περιγραφεί πολύ καλά χρησιμοποιώντας μόνο τρεις παραμέτρους, τη μέση τιμή, την τυπική απόκλιση και το συντελεστή Hurst. Μάλιστα, η ανάλυσή τους έγινε υπέρ της ασφαλείας. Έγινε χρήση της κανονικής κατανομής η οποία είναι χειρότερη από άλλες κατανομές διότι δεν περιγράφει καλά τις ακραίες τιμές.

## 6 Συμπεράσματα - Conclusions

Η μεταβλητή της ταχύτητας ανέμου παρουσιάζει ξεκάθαρα μία συμπεριφορά διπλής κυκλοστασιμότητας. Αυτό οφείλεται στην εξάρτησή της από δύο άλλες μεταβλητές, την ακτινοβολία και τη θερμοκρασία, οι οποίες επίσης παρουσιάζουν αντίστοιχη συμπεριφορά. Η ταχύτητα ανέμου είναι δυνατόν να προσομοιωθεί σε ωριαία και μηνιαία κλίμακα από ένα ντετερμινιστικό μοντέλο, το οποίο περιγράφει σε παγκόσμια βάση αυτή τη συμπεριφορά με αποτελεσματικό τρόπο. Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα του μοντέλου μπορούν να αποτελέσουν το θεμέλιο λίθο για την κατασκευή ενός στοχαστικού μοντέλου πρόγνωσης ανέμου. Αυτό θα πρέπει να γίνει σε συνδυασμό με τη μελέτη της στοχαστικής δομής του ανέμου, ο οποίος εμφανίζει ισχυρή μακροπρόθεσμη εμμονή σε υπερετήσια κλίμακα σε όλον τον κόσμο. Τα δεδομένα reanalysis περιγράφουν τη διπλή κυκλοστασιμότητα με σημαντικό όμως σφάλμα.

The variable of wind speed shows a clear double-cyclostationarity behavior, due to its correlation with two other double cyclostationary variables, radiation and temperature. Wind speed can be simulated in an hourly and monthly scale by a deterministic model which describes effectively this behavior globally. Then, a stochastic wind speed forecasting model can be based on the results of this model. It should be combined with the wind speed stochastic properties study, as it appears to have a strong long term persistence in an over-annual scale globally. The reanalysis data describe double cyclostationarity; however, their error is important.

## 7 Βιβλιογραφικές αναφορές

### 7.1 Ξενόγλωσσες

Deligiannis I., P. Dimitriadis, O. Daskalou, Y. Dimakos and D. Koutsoyiannis, Global investigation of double periodicity of hourly wind speed for stochastic simulation; application in Greece , *Energy Procedia* (submitted).

Deligiannis I., Tyrogiannis V., Daskalou O., Dimitriadis P., Markonis Y., Iliopoulou T., Koutsoyiannis D. *Stochastic investigation of wind process for climatic variability identification*. European Geosciences Union General Assembly 2016, Geophysical Research Abstracts, Vienna, 18, EGU2016- 14946-6, 2016.

Dimitriadis P., Koutsoyiannis D. Application of stochastic methods to double cyclostationary processes for hourly wind speed simulation. *Energy Procedia*, 76, 406–411, 2015.

Dimitriadis P., Lappas L., Daskalou O., Filippidou A., Giannakou M., Gkova E., Ioannidis R., Polydera A., Polymerou E., Psarrou E., Vyrini A., Papalexiou S., and Koutsoyiannis D., *Application of stochastic methods for wind speed forecasting and wind turbines design at the area of Thessaly, Greece*, EGU General Assembly 2015, Geophysical Research Abstracts, Vol. 17, EGU2015-13810, 2015.

Kharseh Mohamad, *Solar Radiation Calculation*, (δεν αναφέρεται ημερομηνία).

Koutsoyiannis D., A random walk on water, *Hydrology and Earth System Sciences*, 14, 585–601, 2010.

Koutsoyiannis D., and Th. Xanthopoulos, *Engineering Hydrology*, Edition 3, 418 pages, National Technical University of Athens, Athens, 1999. (<http://www.itia.ntua.gr/en/docinfo/115/>)

Koutsoyiannis D., C. Makropoulos, A. Langousis, S. Baki, A. Efstratiadis, A. Christofides, G. Karavokiros, and N. Mamassis, Climate, hydrology, energy, water: recognizing uncertainty and seeking sustainability, *Hydrology and Earth System Sciences*, 13, 247–257, 2009.

Koutsoyiannis D., Climate change, the Hurst phenomenon, and hydrological statistics, *Hydrological Sciences Journal*, 48 (1), 3–24, 2003.

Koutsoyiannis D., Entropy: from thermodynamics to hydrology (invited talk), *Orlob First International Symposium on Theoretical Hydrology*, Davis, California, USA, University California Davis, 2013.

Martinez AT. An exponential model of the curve of mean monthly hourly air temperature. *Atmosfera*, 4, 139-144, 1991.

Tsekouras, G., and D. Koutsoyiannis, Stochastic analysis and simulation of hydrometeorological processes associated with wind and solar energy, *Renewable Energy*, 63, 624–633, 2014.

Yousef AG, Abdalla I., Attili BS. Daily and hourly wind speed distribution in Bahrain. *Energy Convers. Mgmt*; 1992. 33(1), 1-5.

## 7.2 Ελληνόγλωσσες

Κουτσογιάννης Δ., *Σημειώσεις Στοχαστικών Μεθόδων στους Υδατικούς Πόρους*, Έκδοση 4, 100 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2013.

Κωνσταντίνου Γ., *Θεωρία και πράξη της εκκλησιαστικής μουσικής*, έκδοση Ζ, 341 σελίδες, 2014.

Λιοδάκης Σ., Δ. Γάκης, Δ. Θεοδωρόπουλος, Π. Θεοδωρόπουλος, Α. Κάλλης, *Σχολικό βιβλίο Χημείας Α' Λυκείου*, Έκδοση 2015.

(<http://ebooks.edu.gr/modules/ebook/show.php/DSGL111/482/3167,12762/>)

Παπαντώνης Δ., *Νέες προοπτικές για την Ανάπτυξη της αντλησιοταμίευσης στην Ελλάδα: Τεχνολογία και Τεχνολογικοί Περιορισμοί*, ΤΕΕ Ιωάννινα, 2009.

([http://library.tee.gr/digital/m2380/m2380\\_papantonis.pdf](http://library.tee.gr/digital/m2380/m2380_papantonis.pdf))

Τσεκούρας Γ., Στοχαστική ανάλυση και προσομοίωση υδρομετεωρολογικών διεργασιών σχετικών με την αιολική και ηλιακή ενέργεια, Διπλωματική εργασία, 234 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Οκτώβριος 2012.

Χατζηβασιλειάδης Γ., *Τεχνολογίες Αποθήκευσης Ηλεκτρικής Ενέργειας για τα Νησιωτικά Συστήματα*, ΤΕΕ–Τμ Δωδ/νήσου, 2009.

## 7.3 Ιστοσελίδες

- <https://www.ncdc.noaa.gov/cdo-web/> (National Centres for Environmental Information, National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA).
- [http://www.wind-power-program.com/turbine\\_characteristics.htm](http://www.wind-power-program.com/turbine_characteristics.htm)
- <http://www.ces.fau.edu/nasa/module-2/correlation-between-temperature-and-radiation.php>
- <http://www.meteo-news.gr/2013/04/meltemia-to-klimatistiko-toy-aigaiou.html>
- <http://globalwindatlas.com/datasets.html#toc-Section-2.1> (Global Wind Atlas)
- <https://ncar.ucar.edu/> (National Centre for Atmospheric Research, NCAR)



## 8 Παράρτημα Α. Εφαρμογή μοντέλου ανέμου

Στο παράρτημα αυτό παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της εφαρμογής του μοντέλου ταχύτητας ανέμου στους 33 σταθμούς παγκοσμίως και στους 17 σταθμούς της Ελλάδας. Πρώτα απ' όλα στους δύο πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα του μοντέλου.

Στη συνέχεια, για κάθε σταθμό παρουσιάζονται τέσσερα διαγράμματα:

- το πρώτο περιλαμβάνει τις παρατηρημένες μέσες τιμές της ανέλιξης.
- το δεύτερο τις αντίστοιχες του μοντέλου.

Για λόγους ευκολότερης σύγκρισης, παρατίθενται δύο ακόμη διαγράμματα που δείχνουν την παρατηρημένη κατανομή του ανέμου και την αντίστοιχη του μοντέλου, για:

- τον καλύτερο μήνα.
- το χειρότερο μήνα.

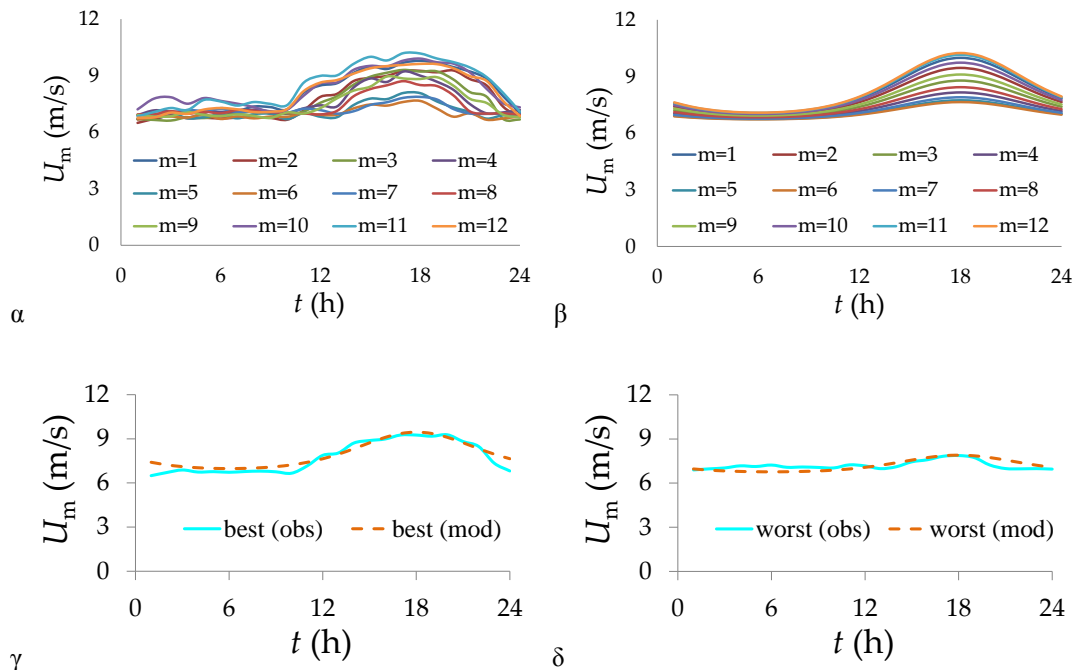
Ως καλύτερος και χειρότερος μήνας κάθε σταθμού ορίζεται ο μήνας με τον υψηλότερο και χαμηλότερο αντίστοιχα συντελεστή συσχέτισης  $r_h^i$ .

**Πίνακας Α1: εφαρμογή μοντέλου ταχύτητας ανέμου σε 17 σταθμούς στην Ελλάδα.**

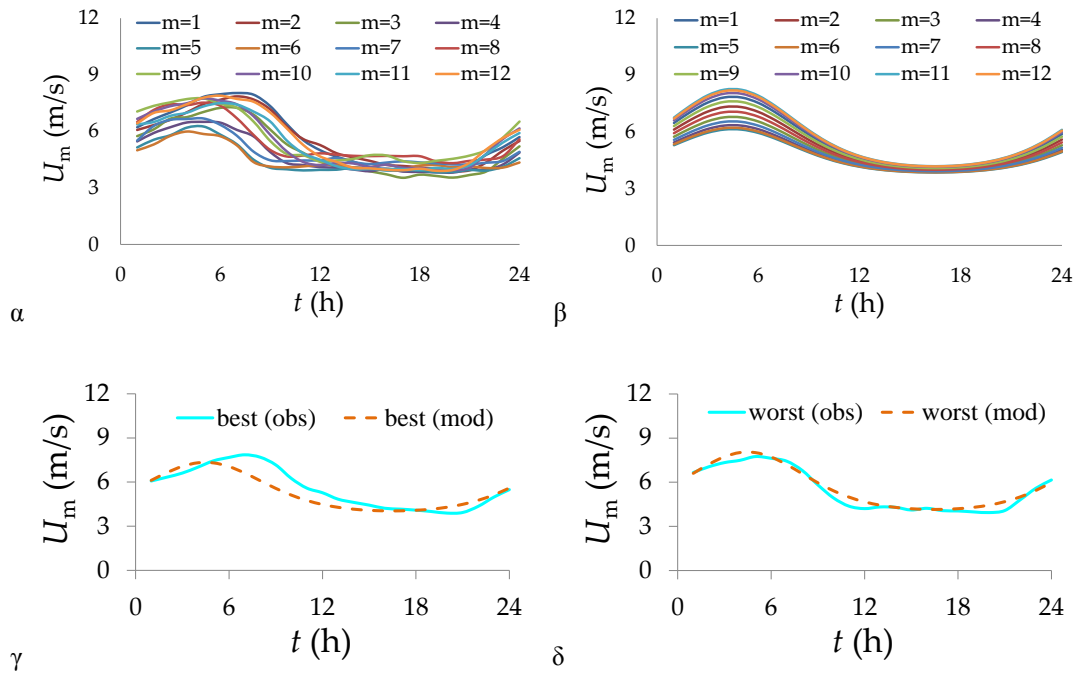
Station Name	Constant	Coefficients				model performance		
	$a_h$	$a_m$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$r_h$	$r_m$	$e_N$
Karpathos	11,88	7,12	0,130	0,042	0,213	0,94	0,83	0,127
Santorini	11,89	2,00	0,144	0,000	0,051	0,96	0,43	0,078
Syros	12,07	0,34	0,185	0,000	0,102	0,96	0,72	0,081
Samos	12,09	11,00	0,165	0,000	0,036	0,81	0,26	0,147
El. Venizelos	12,51	6,94	0,416	0,188	-0,163	0,95	0,55	0,131
Chios	11,67	5,51	0,291	0,064	-0,140	0,96	0,29	0,127
Limnos	11,28	0,35	0,264	0,000	0,139	0,95	0,81	0,097
Paros	12,02	11,00	0,250	0,000	0,005	0,95	0,32	0,118
Kavala	12,44	6,67	0,401	0,189	-0,306	0,96	0,86	0,141
Meganisi	13,73	1,80	0,305	0,000	0,060	0,66	0,73	0,167
Zakynthos	12,75	6,71	0,477	0,220	-0,400	0,91	0,80	0,169
Kos	13,23	3,47	0,251	0,016	0,007	0,96	0,51	0,067
Aghialos	13,23	6,45	0,314	0,290	-0,318	0,80	0,58	0,118
Larissa	15,35	6,36	0,674	0,489	-0,295	0,97	0,93	0,149
Aleksandroupoli	12,27	6,50	0,427	0,164	-0,323	0,97	0,79	0,106
Irakleio	11,95	6,50	0,171	0,119	-0,225	0,89	0,51	0,096
Araksos	13,74	6,95	0,527	0,265	-0,496	0,97	0,91	0,106

**Πίνακας Α2: εφαρμογή μοντέλου ταχύτητας ανέμου σε 33 σταθμούς παγκοσμίως.**

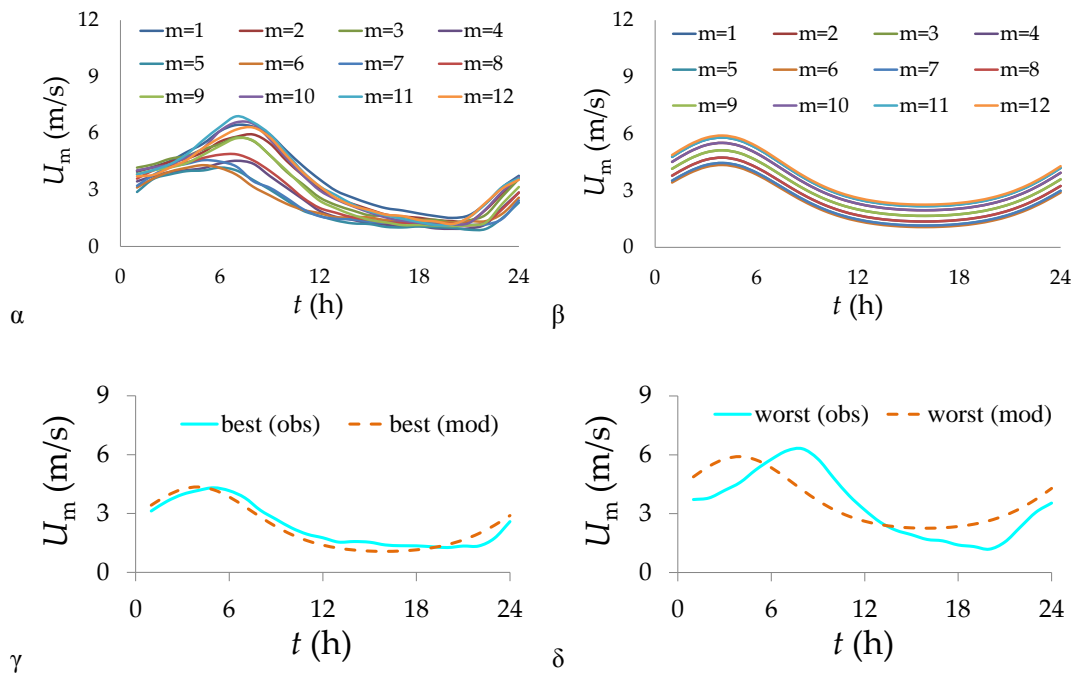
Location	Constant	Coefficients				model performance		
	$a_h$	$a_m$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$r_h$	$r_m$	$e_N$
Falkland Islands, S. America	18,01	11,77	0,113	0,063	0,000	0,88	0,93	0,050
Melbourne, Australia	4,48	11,25	0,259	0,073	0,005	0,95	0,88	0,082
Brisbane, Australia	3,93	12,00	0,494	0,026	0,189	0,83	0,97	0,276
Hook Island, Australia	4,18	3,19	0,065	-0,034	0,188	0,74	0,88	0,068
Northern Territory, Australia	5,29	7,03	0,346	0,067	0,014	0,90	0,85	0,143
Bremer Island, Australia	4,99	6,63	0,450	0,042	0,162	0,96	0,84	0,170
Denpasar, Indonesia	6,43	7,24	0,314	0,025	0,115	0,93	0,51	0,195
Brunei, Asia	6,45	0,96	0,478	-0,027	0,124	0,93	0,80	0,158
Kedah, Malaysia	7,41	1,78	1,068	0,160	-0,103	0,97	0,42	0,291
Mariana Islands, Pacific Oc.	4,45	1,59	0,070	-0,013	0,243	0,85	0,97	0,054
Hawaii, Pacific Ocean	0,45	3,03	0,271	0,035	0,012	0,92	0,98	0,098
Taipei, Taiwan	6,03	11,78	0,192	-0,047	0,301	0,96	0,97	0,068
Texas, USA	20,50	2,58	0,409	-0,015	0,295	0,95	0,97	0,134
Texas, USA	20,79	4,21	0,103	-0,011	0,191	0,62	0,89	0,128
New Mexico, USA	20,95	3,33	0,266	0,020	0,174	0,88	0,94	0,128
Alabama, USA	19,88	2,06	0,398	-0,006	0,191	0,93	0,97	0,139
Tennessee, USA	19,93	2,25	0,361	-0,008	0,272	0,95	0,99	0,107
Narita, Japan	4,75	4,44	0,255	0,045	0,033	0,94	0,67	0,104
Minnesota, USA	20,52	2,69	0,298	-0,063	0,293	0,96	0,78	0,150
Dniprodzerzhynsk, Ukraine	11,80	1,36	0,159	-0,058	0,191	0,93	0,88	0,067
Washington, USA	22,30	1,80	0,132	-0,008	0,111	0,77	0,60	0,136
St Helier, France	14,26	0,65	0,051	-0,027	0,188	0,89	0,97	0,031
Mons, Belgium	13,84	1,37	0,262	-0,084	0,284	0,94	0,83	0,118
Moscow, Russia	11,58	0,90	0,209	-0,128	0,284	0,94	0,88	0,077
Wrangell Island, Alaska	22,93	0,99	0,060	-0,078	0,445	0,31	0,96	0,086
Port Heiden, Alaska	0,69	0,97	0,105	-0,076	0,220	0,88	0,95	0,046
Uppsala, Sweden	12,91	1,72	0,178	-0,089	0,193	0,91	0,91	0,081
Bergen, Norway	13,76	0,78	0,130	-0,122	0,292	0,77	0,95	0,064
McKinley Park, Alaska	0,04	4,77	0,451	0,286	-0,179	0,85	0,74	0,220
Koyuk, Alaska	0,85	1,87	0,064	-0,040	0,205	0,61	0,94	0,068
Tromso, Norway	12,85	1,40	0,082	-0,077	0,336	0,65	0,96	0,078
Nuiqsut, Alaska	0,18	1,26	0,055	-0,069	0,130	0,66	0,36	0,080
Wainwright, Alaska	0,78	0,70	0,037	-0,051	0,144	0,65	0,69	0,061



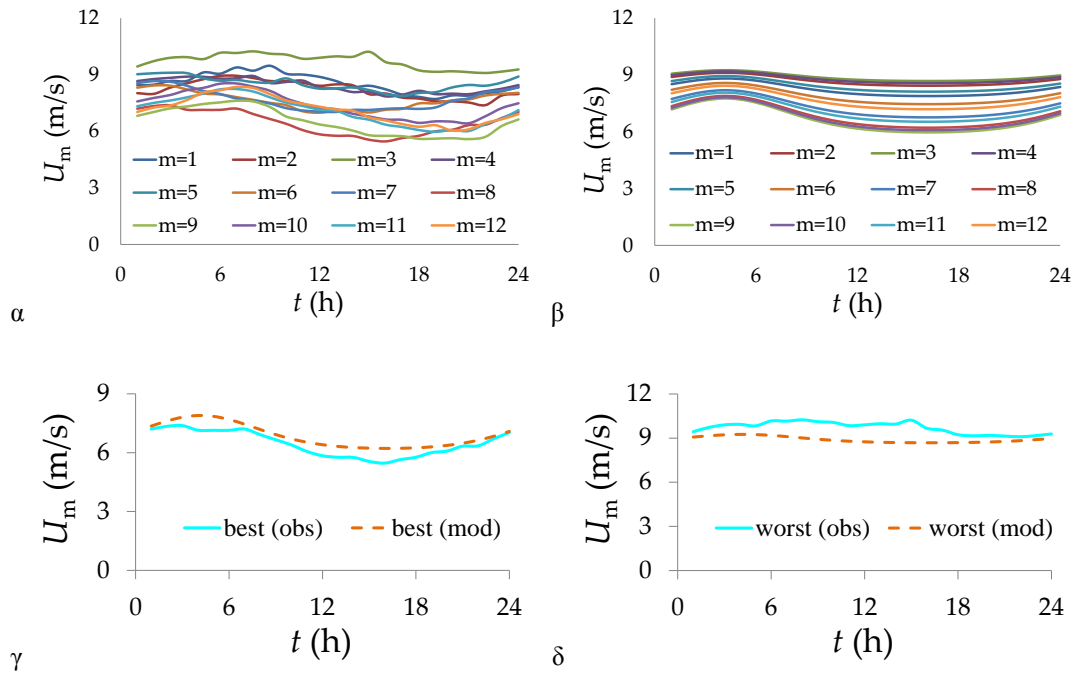
Διάγραμμα A1: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 5539 (Falkland Islands, South America).



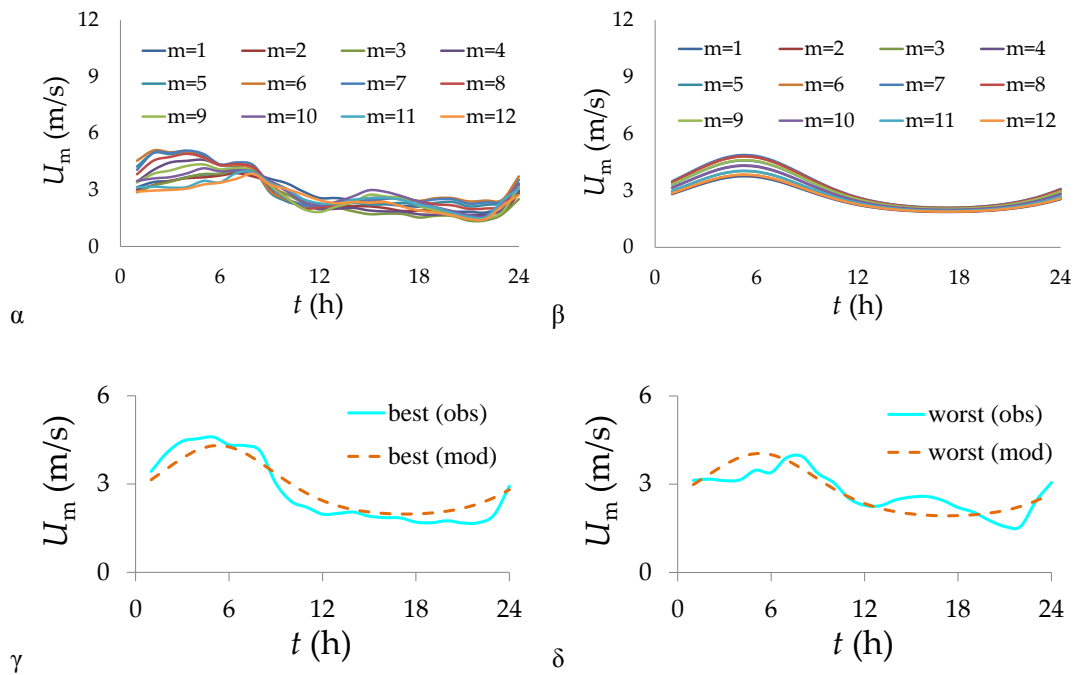
Διάγραμμα A2: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 5969 (Melbourne, Australia, Oceania).



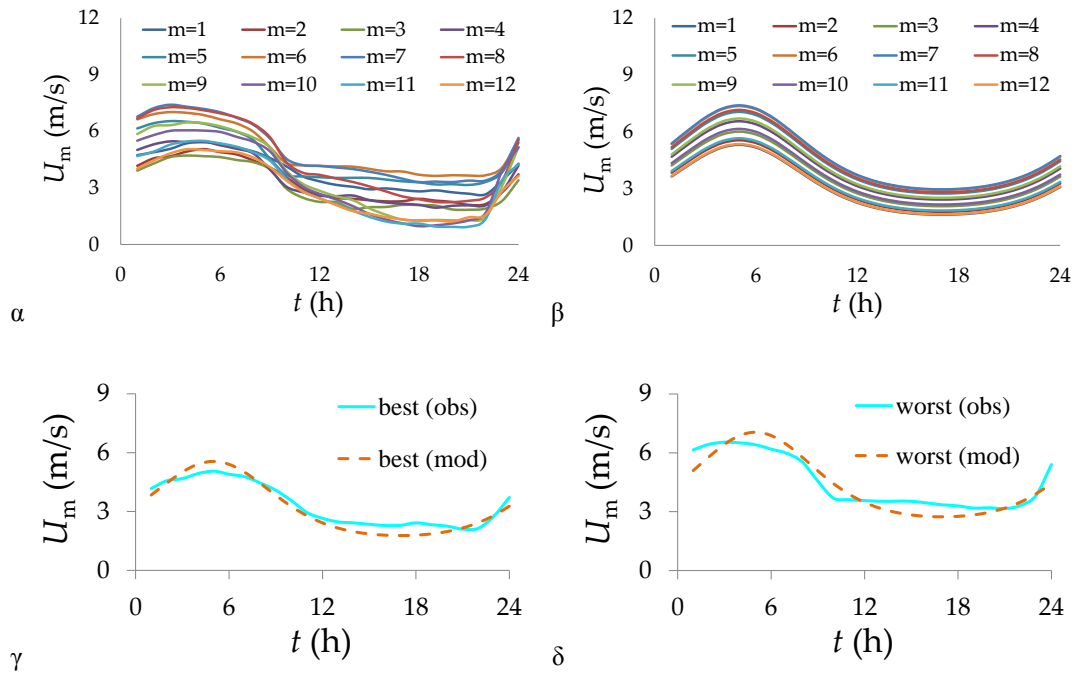
Διάγραμμα A3: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 5846 (Brisbane, Australia, Oceania).



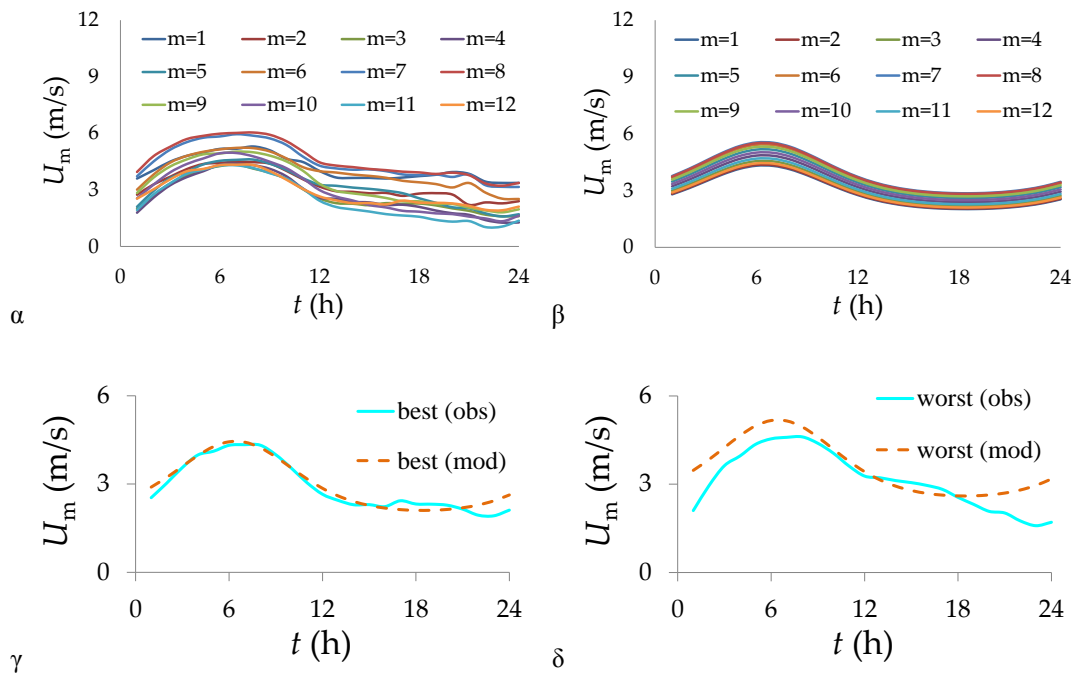
Διάγραμμα A4: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 5847 (Hook Island, Australia, Oceania).



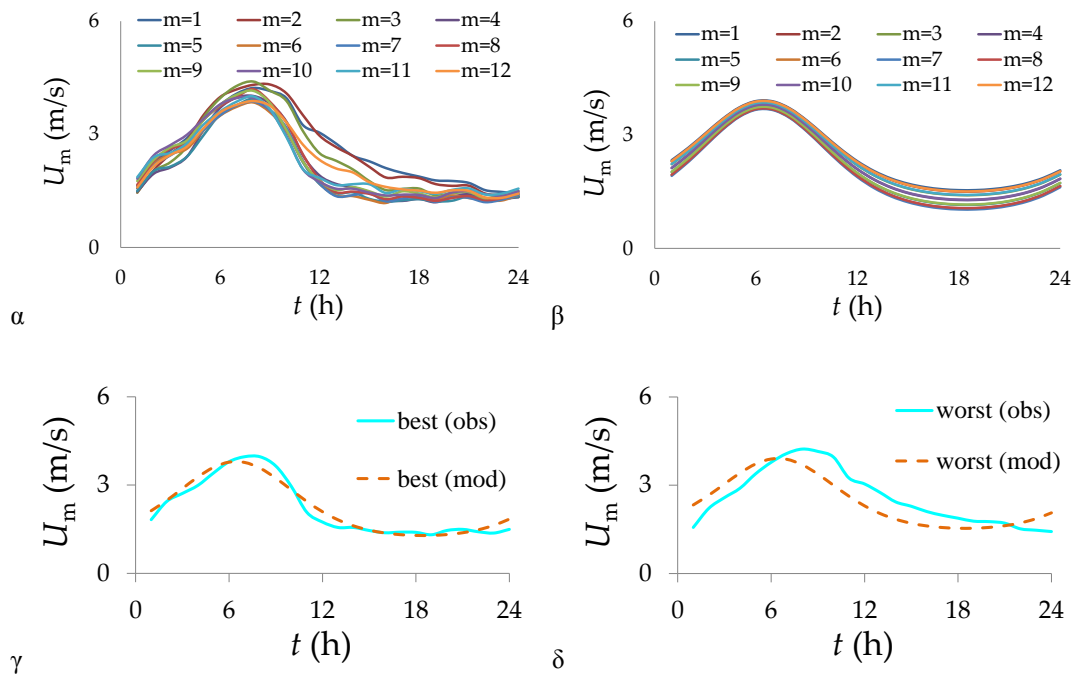
Διάγραμμα A5: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 5737 (Northern Territory, Australia, Oceania).



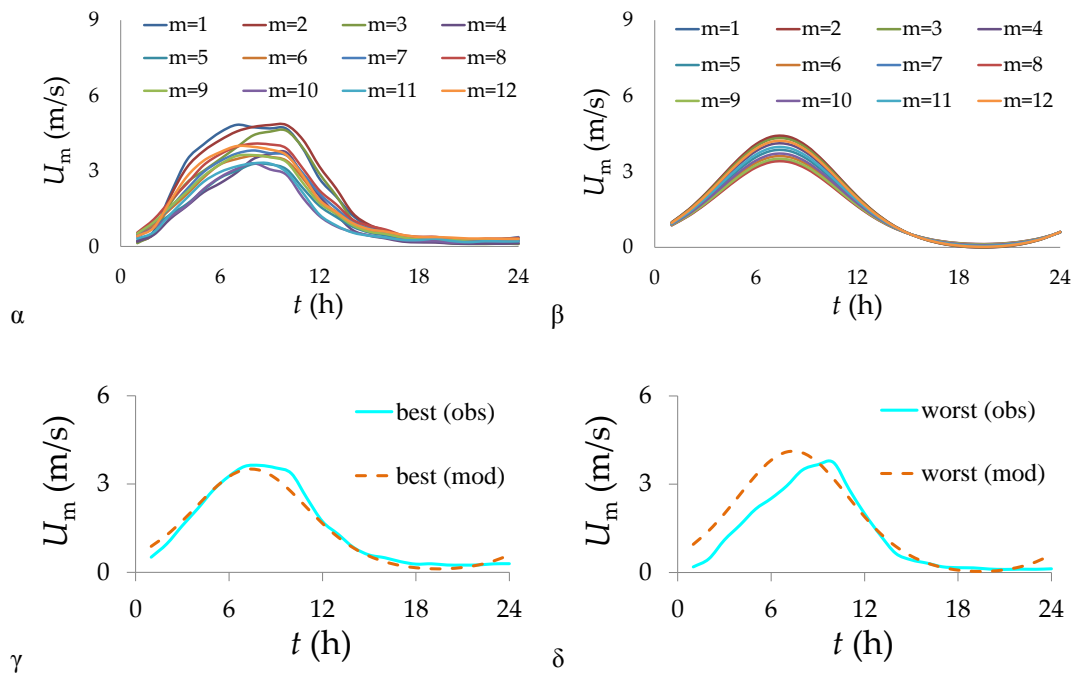
Διάγραμμα A6: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 5849 (Bremer Island, Australia, Oceania).



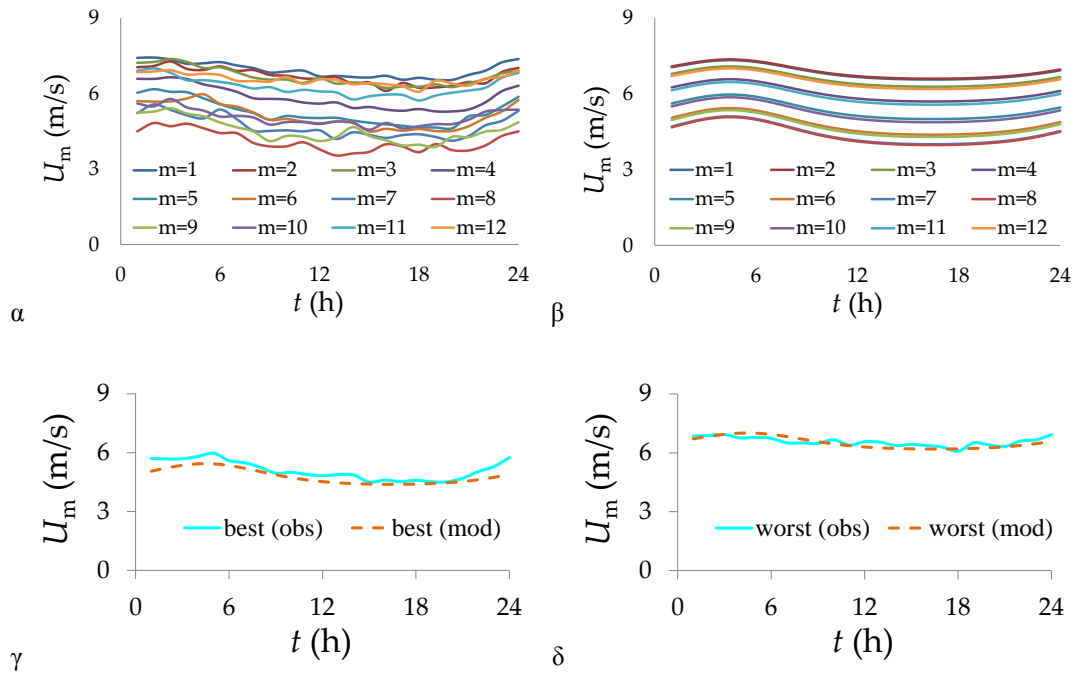
Διάγραμμα A7: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 6241 (Denpasar, Indonesia, Asia).



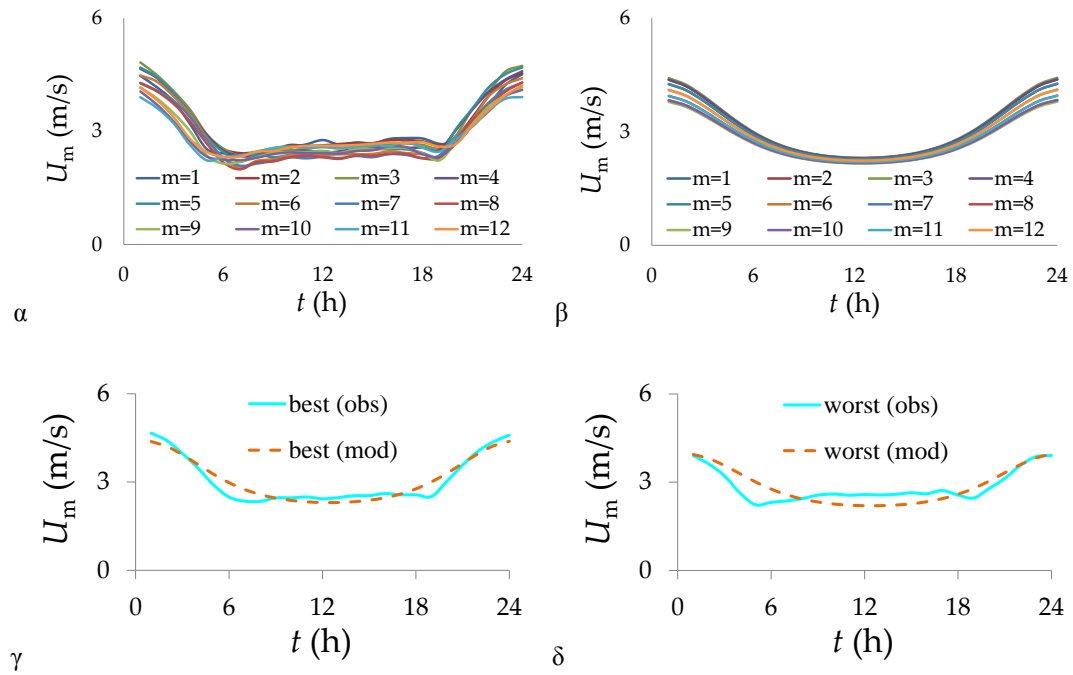
Διάγραμμα A8: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 6218 (Brunei, Asia).



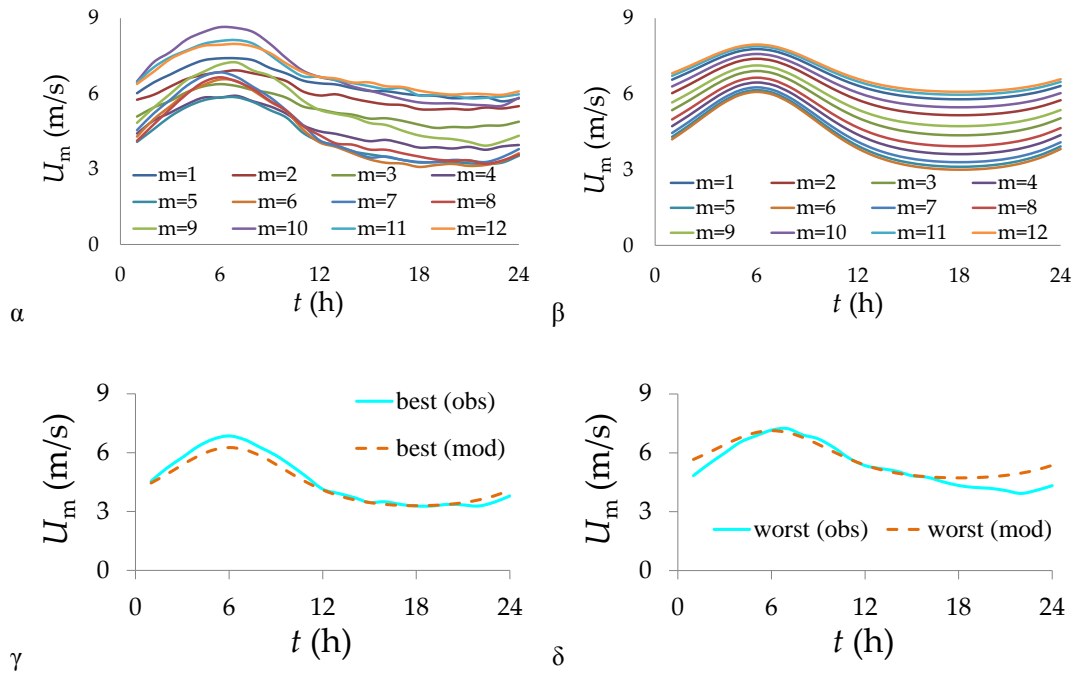
Διάγραμμα A9: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 2221 (Kedah, Malaysia, Asia ).



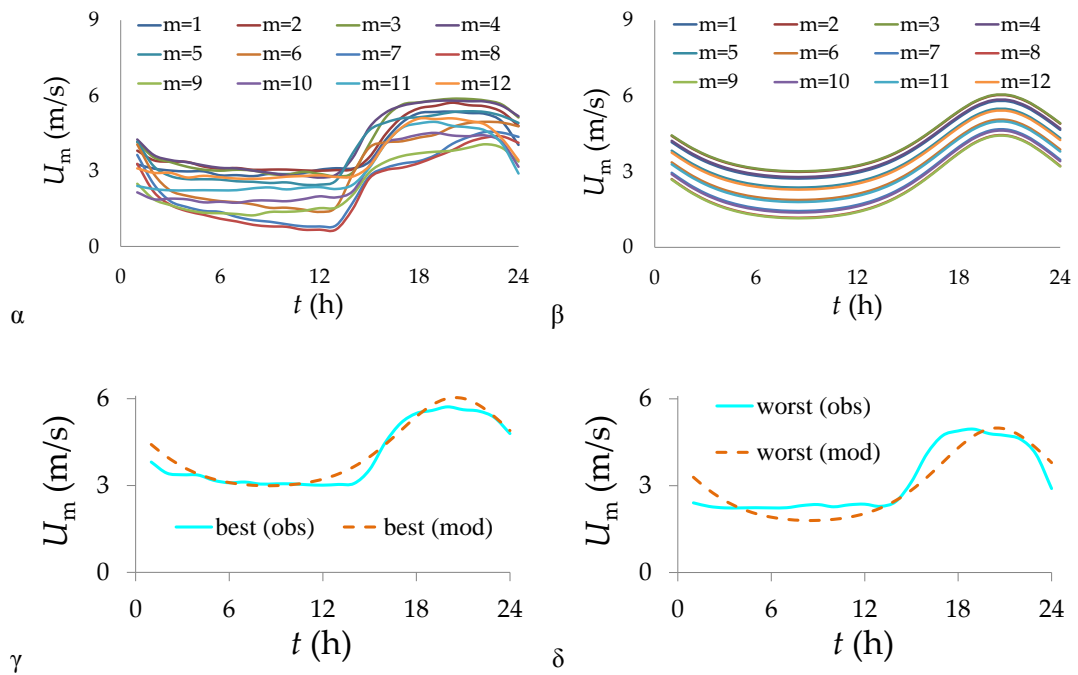
Διάγραμμα A10: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 5617 (Mariana Islands, Pacific Ocean).



Διάγραμμα A11: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 5622 (Hawaii, Pacific Ocean).

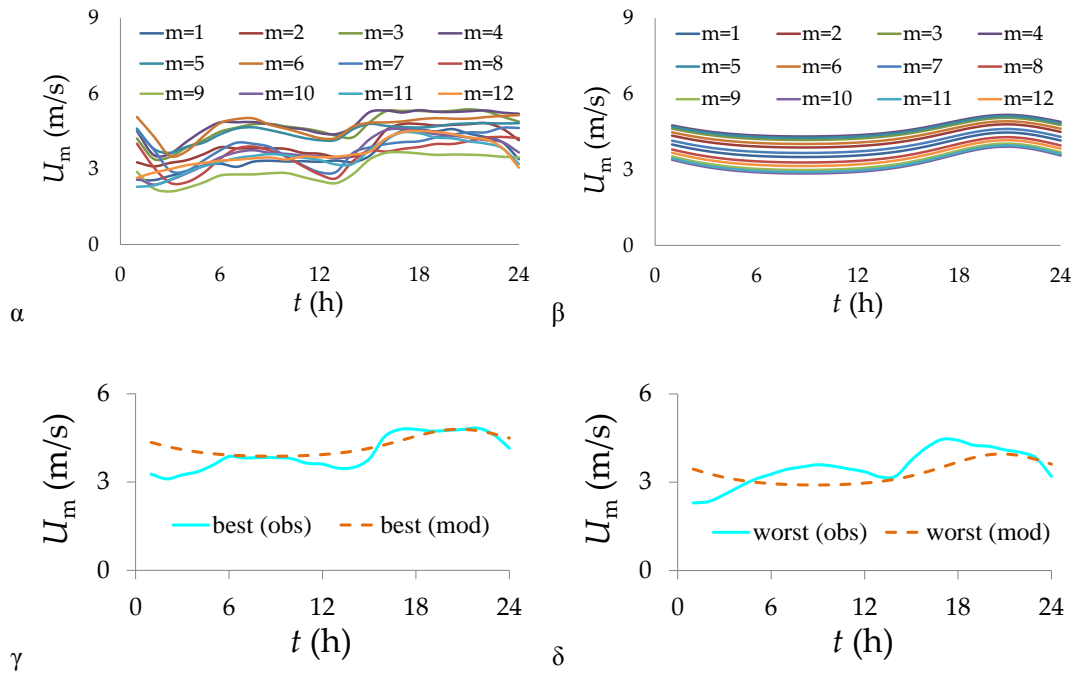


Διάγραμμα A12: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 1963 (Taipei, Taiwan, Asia).

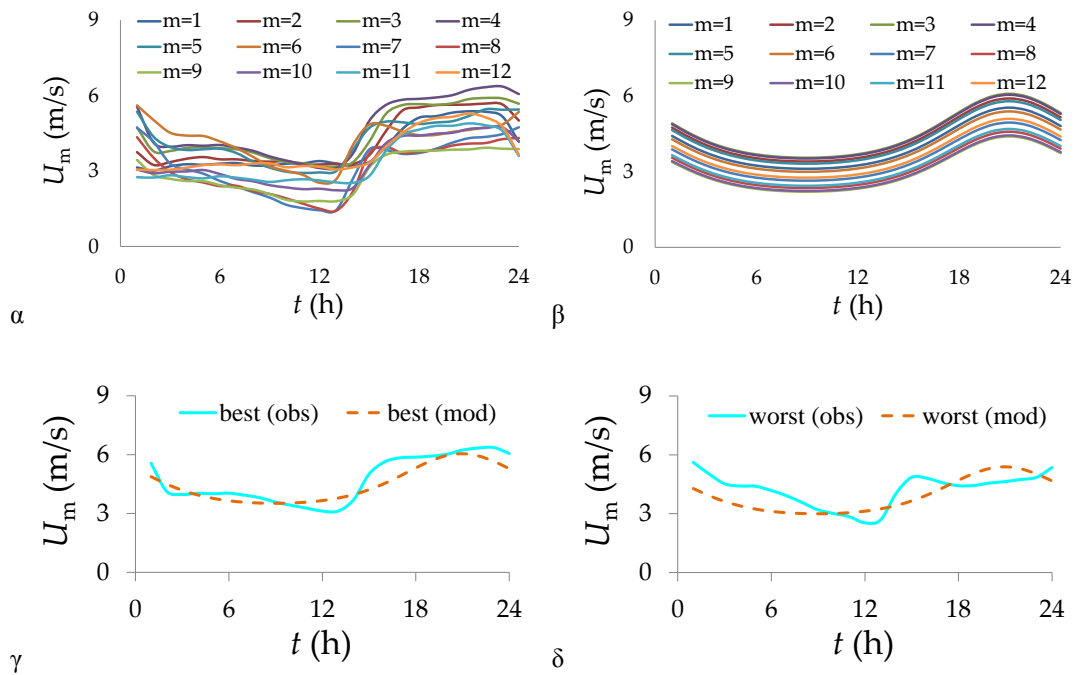


Διάγραμμα A13: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 3308 (Texas, USA).

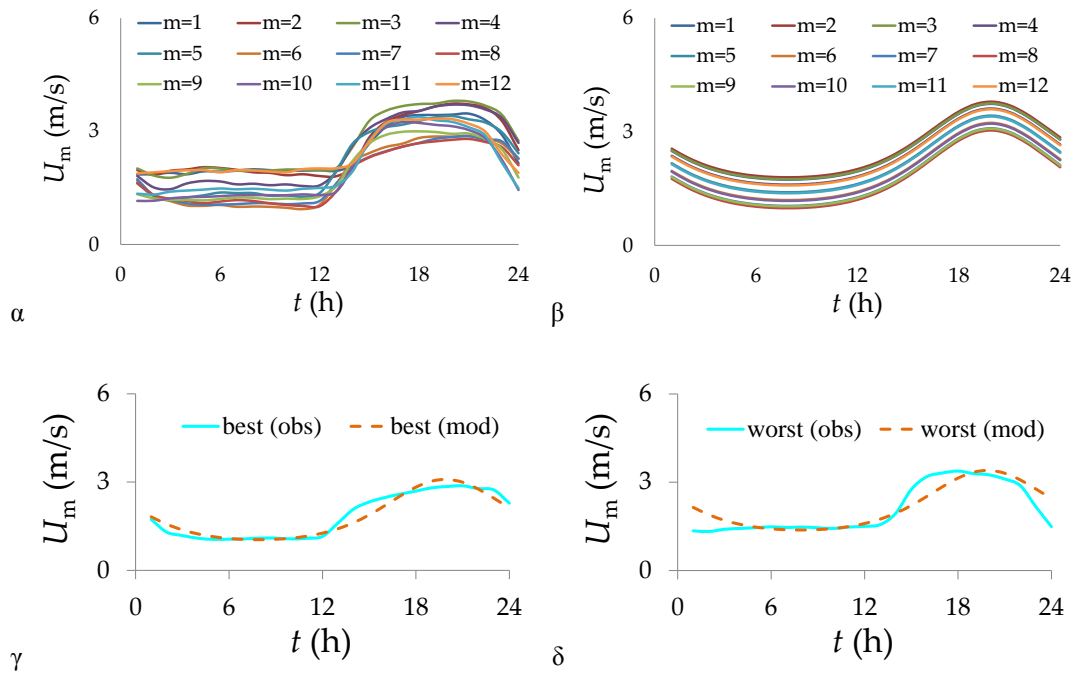




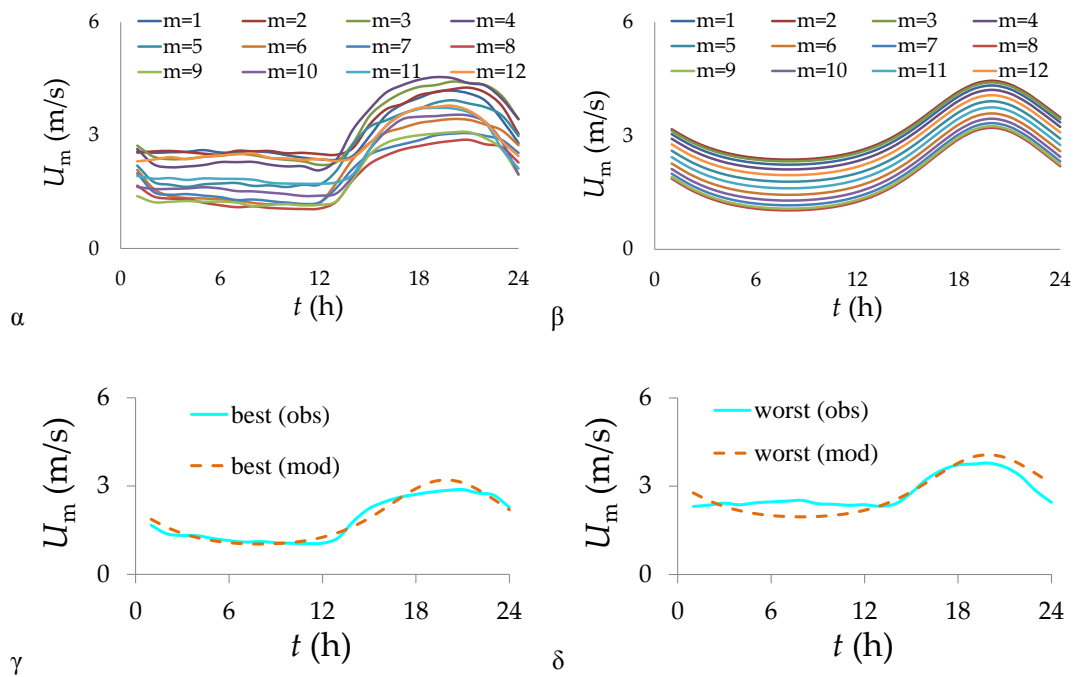
Διάγραμμα A14: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 4088 (Texas, USA).



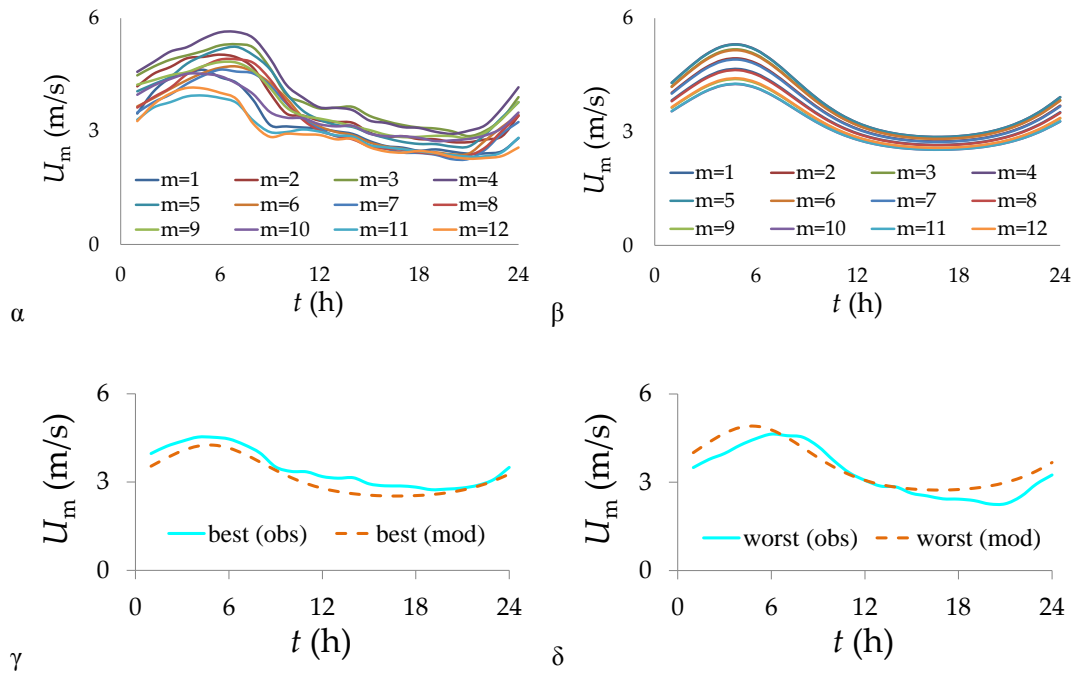
Διάγραμμα A15: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 3932 (New Mexico, USA).



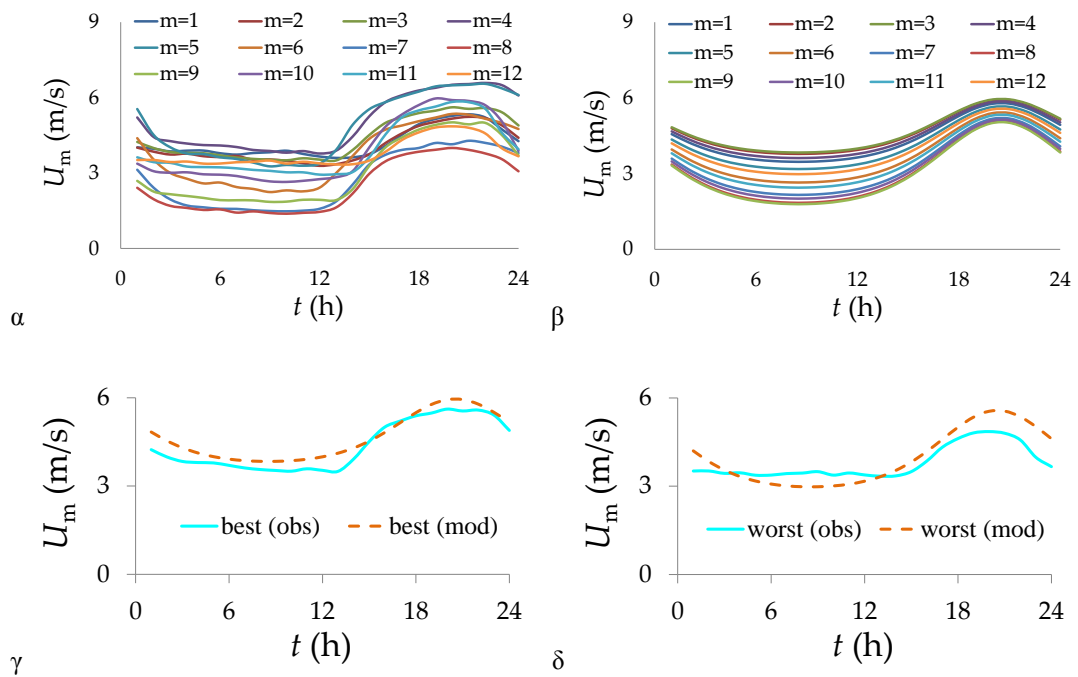
Διάγραμμα A16: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 7540 (Alabama, USA).



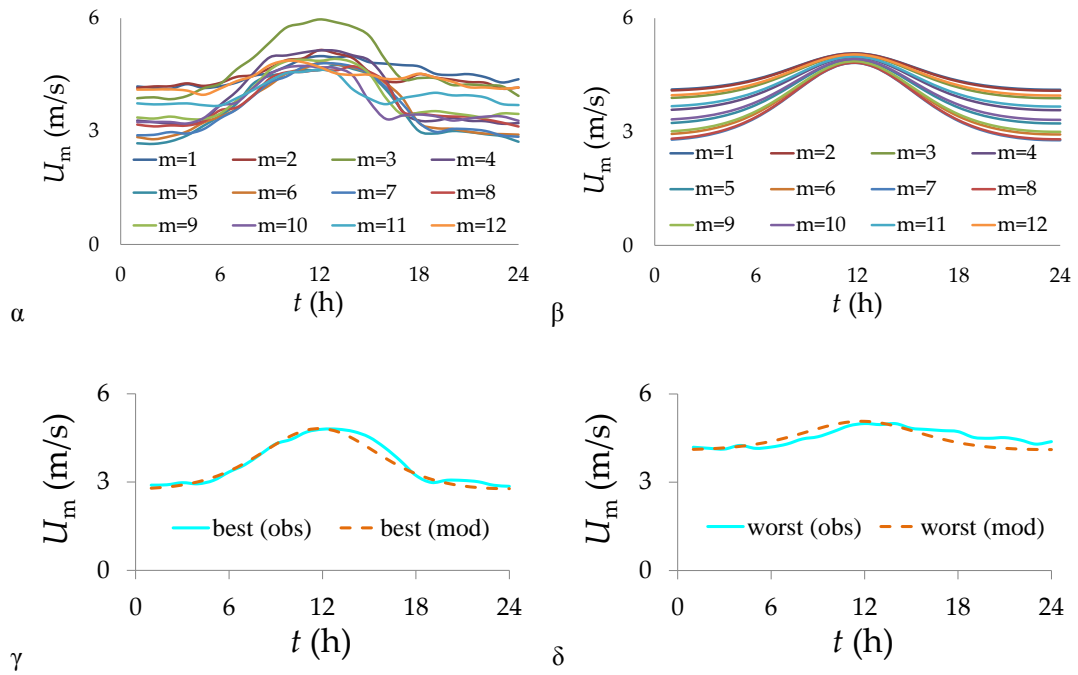
Διάγραμμα A17: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 7536 (Tennessee, USA).



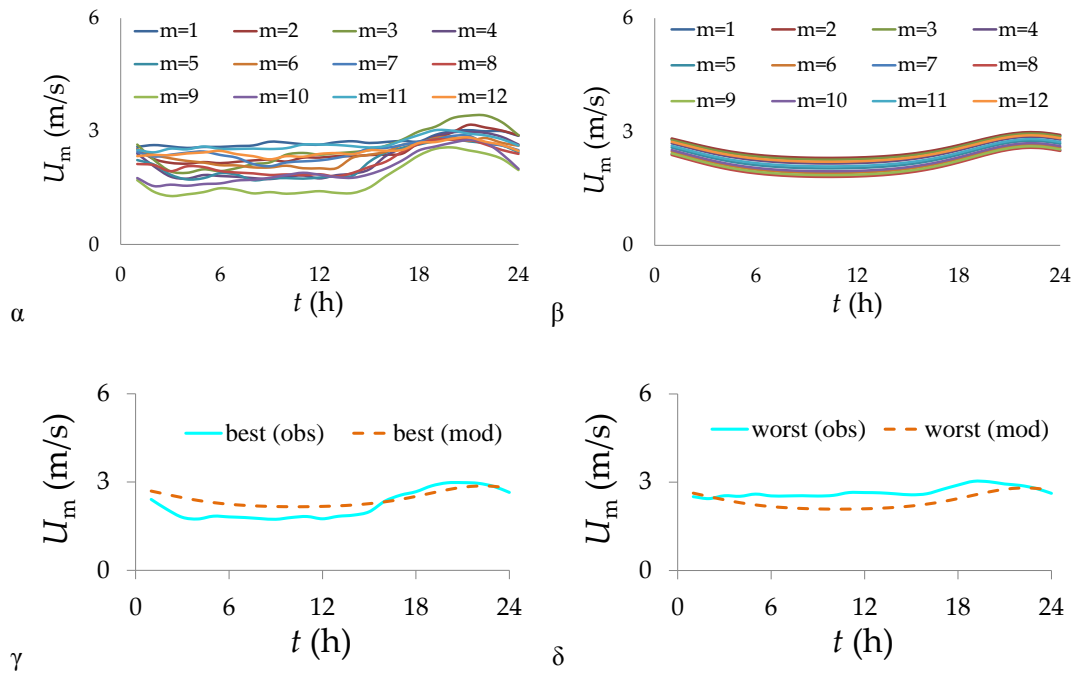
Διάγραμμα A18: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 2095 (Narita, Japan, Asia).



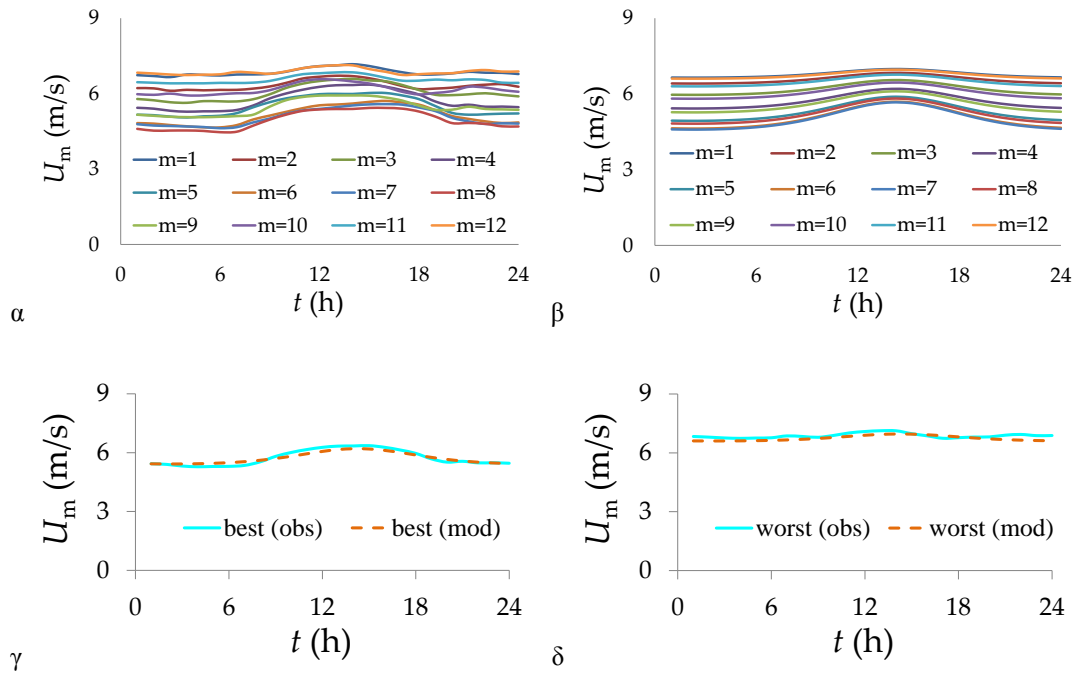
Διάγραμμα A19: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 3872 (Minnesota, USA).



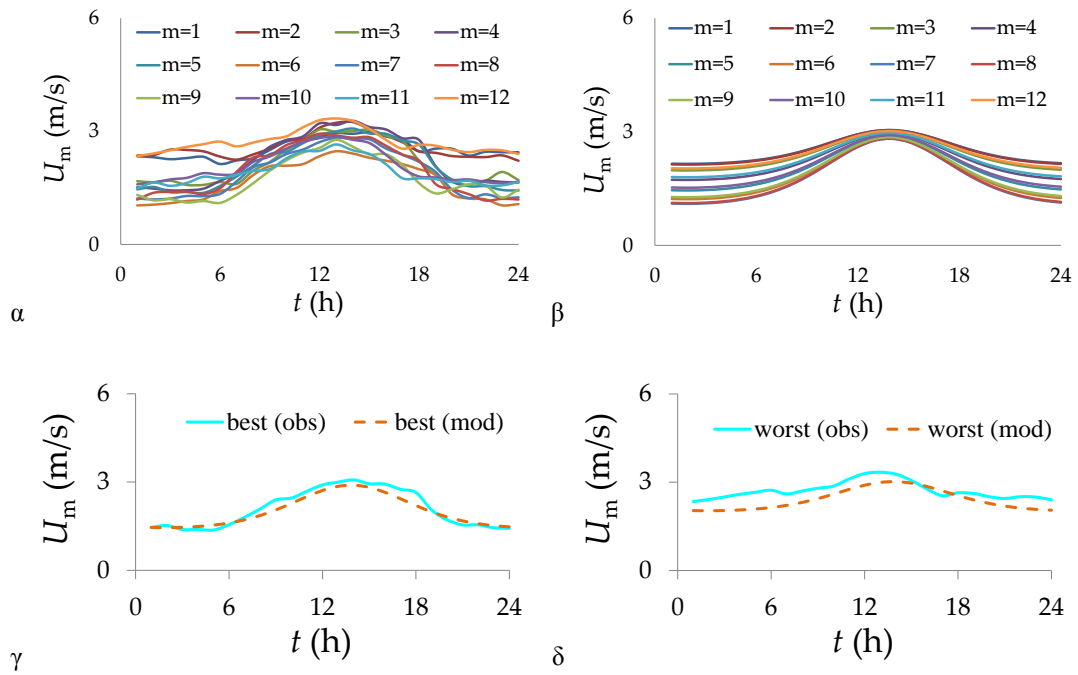
Διάγραμμα A20: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 1617 (Dniprodzerzhynsk, Ukraine, Europe).



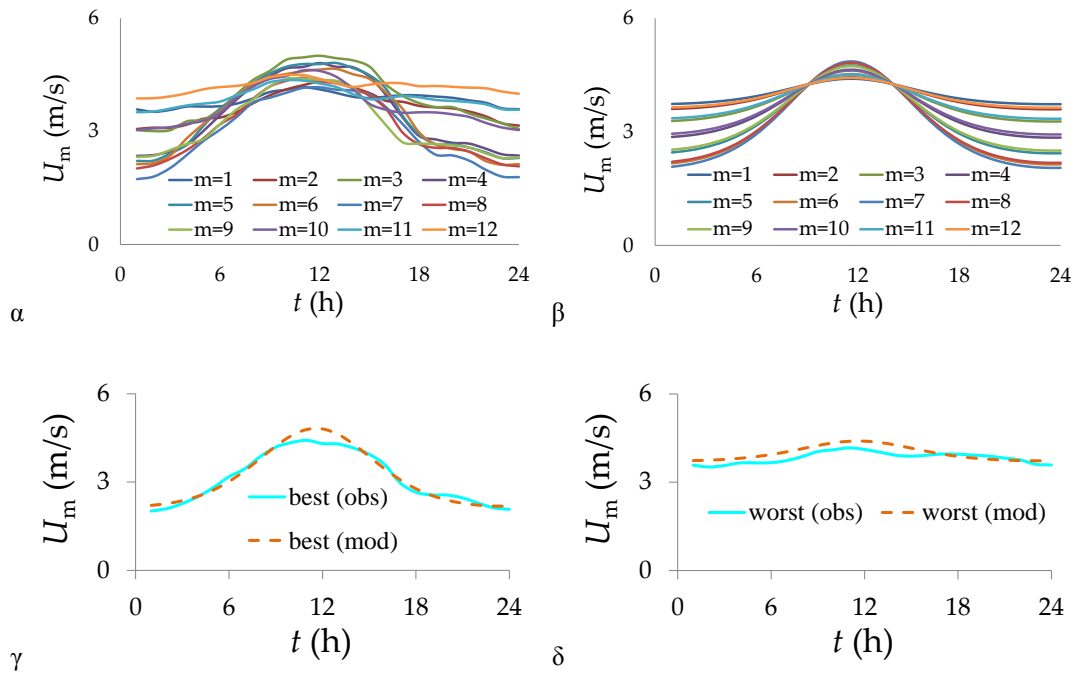
Διάγραμμα A21: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 4008 (Washington, USA).



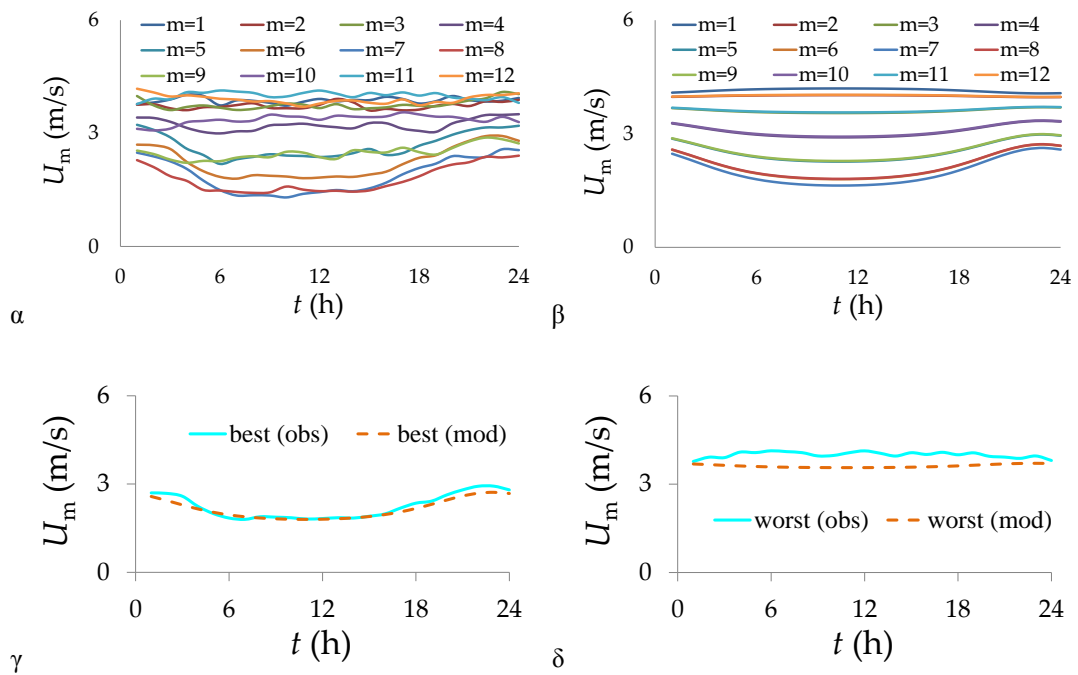
Διάγραμμα A22: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 634 (St Helier, France, Europe).



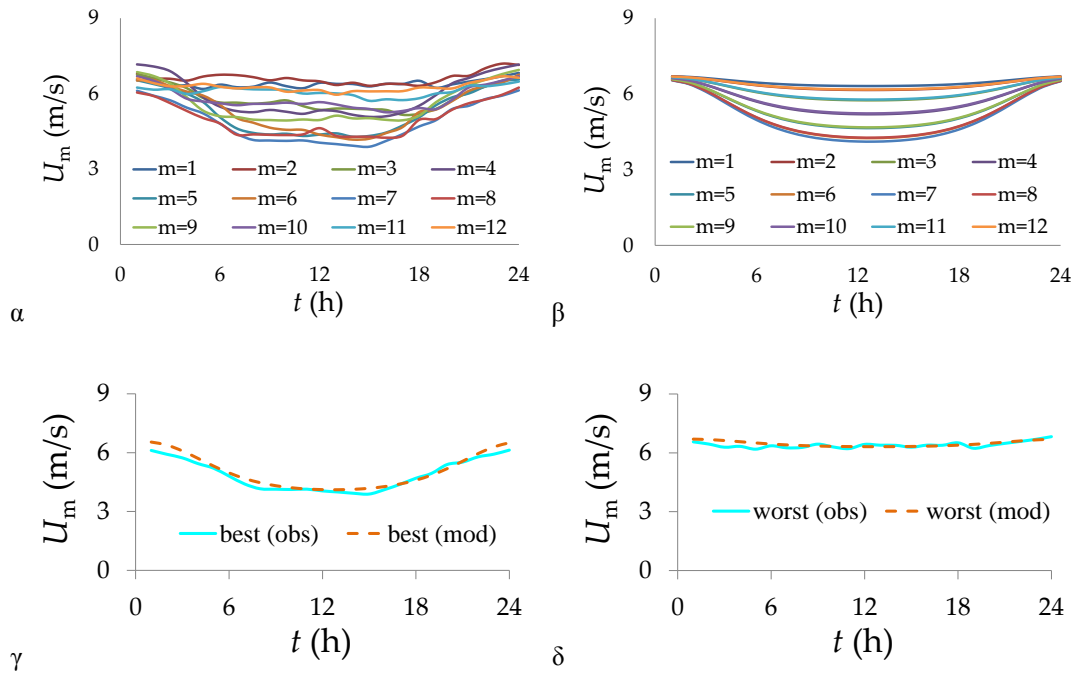
Διάγραμμα A23: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 798 (Mons, Belgium, Europe).



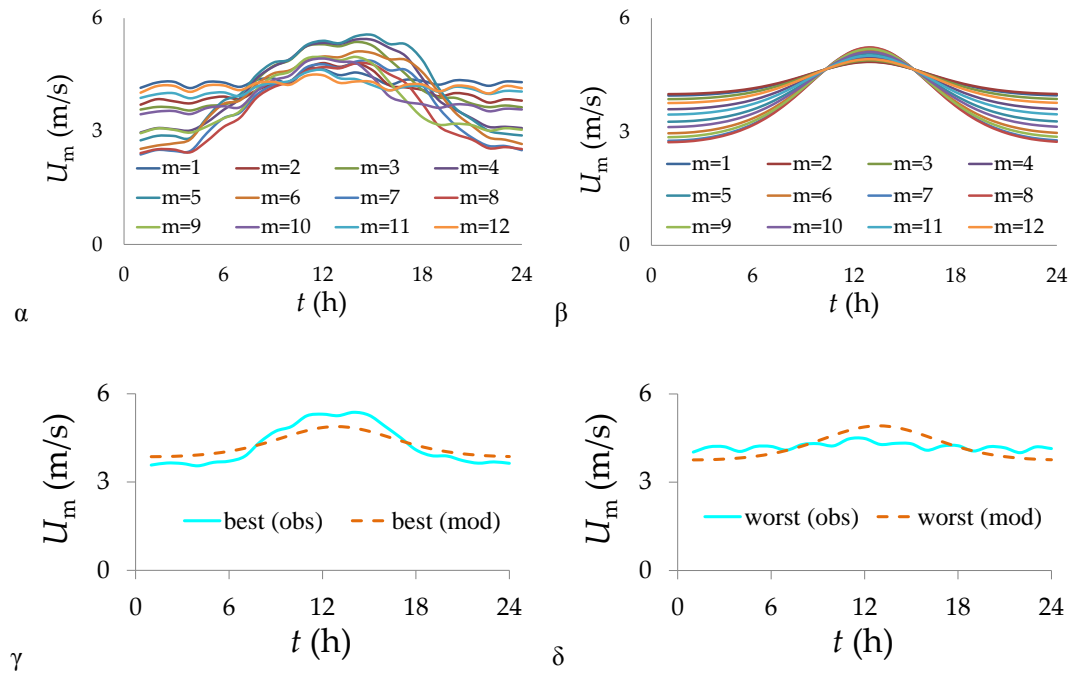
Διάγραμμα A24: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 1661 (Moscow, Russia, Europe).



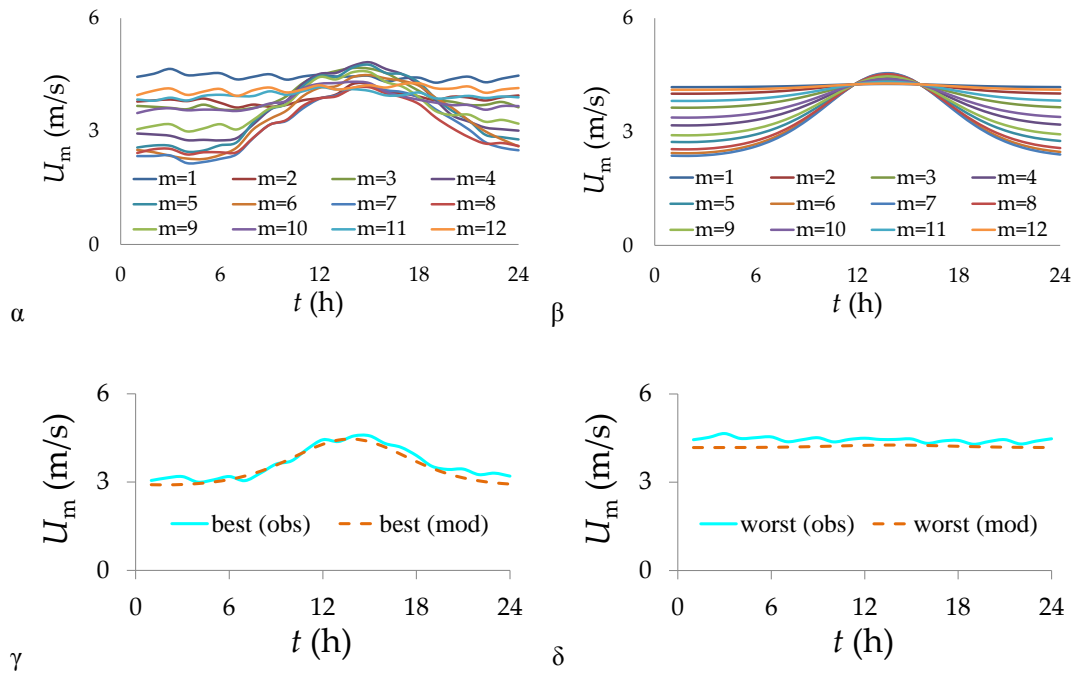
Διάγραμμα A25: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 2792 (Wrangell Island, Alaska).



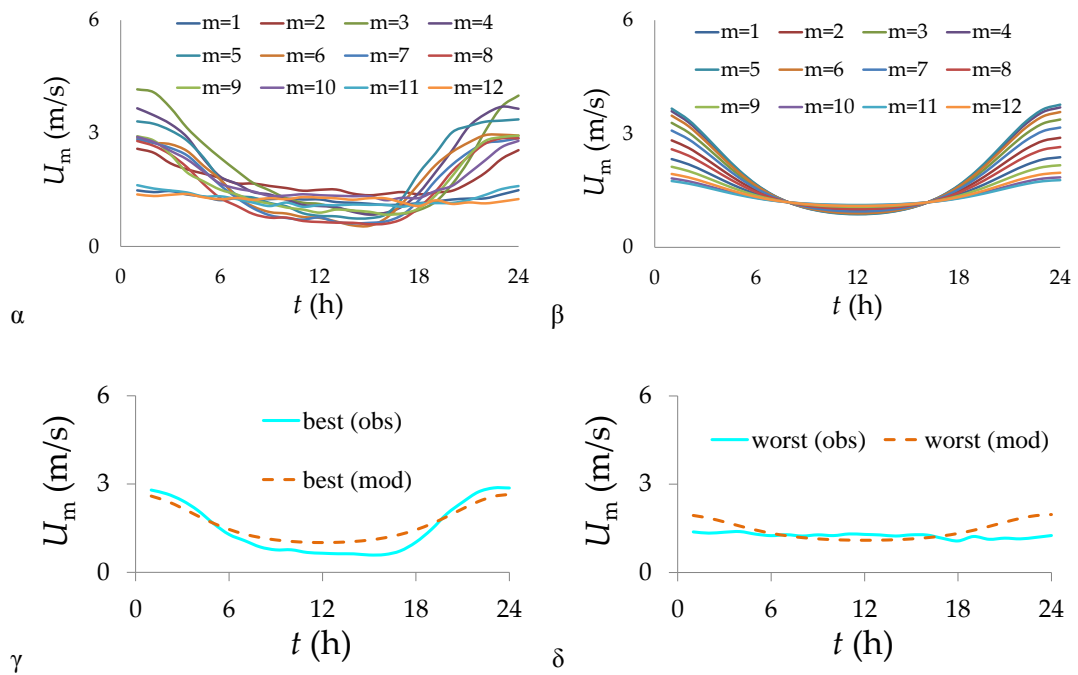
Διάγραμμα A26: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 2772 (Port Heiden, Alaska).



Διάγραμμα A27: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 243 (Uppsala, Sweden, Europe).

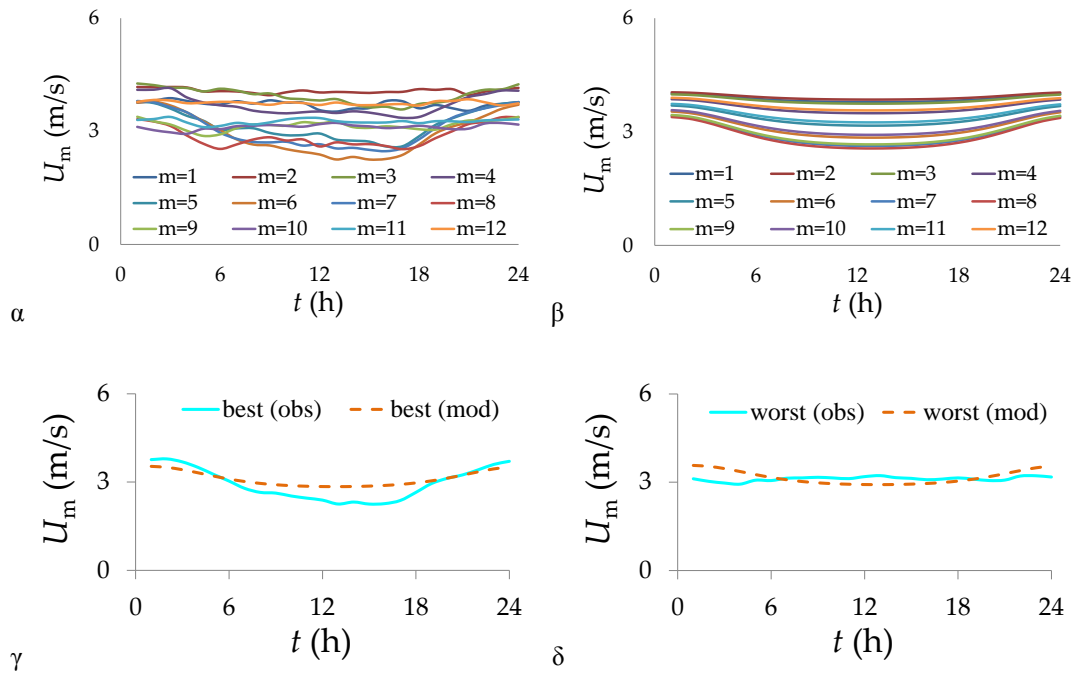


Διάγραμμα A28: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 100 (Bergen, Norway, Europe).

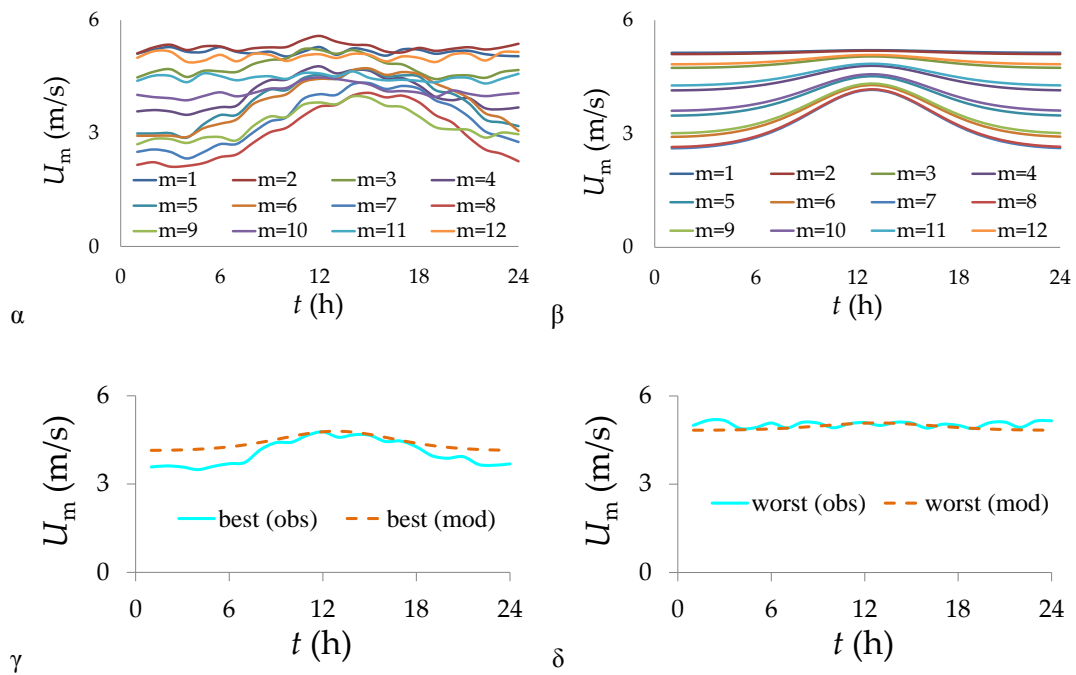


Διάγραμμα A29: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 2738 (McKinley Park, Alaska).

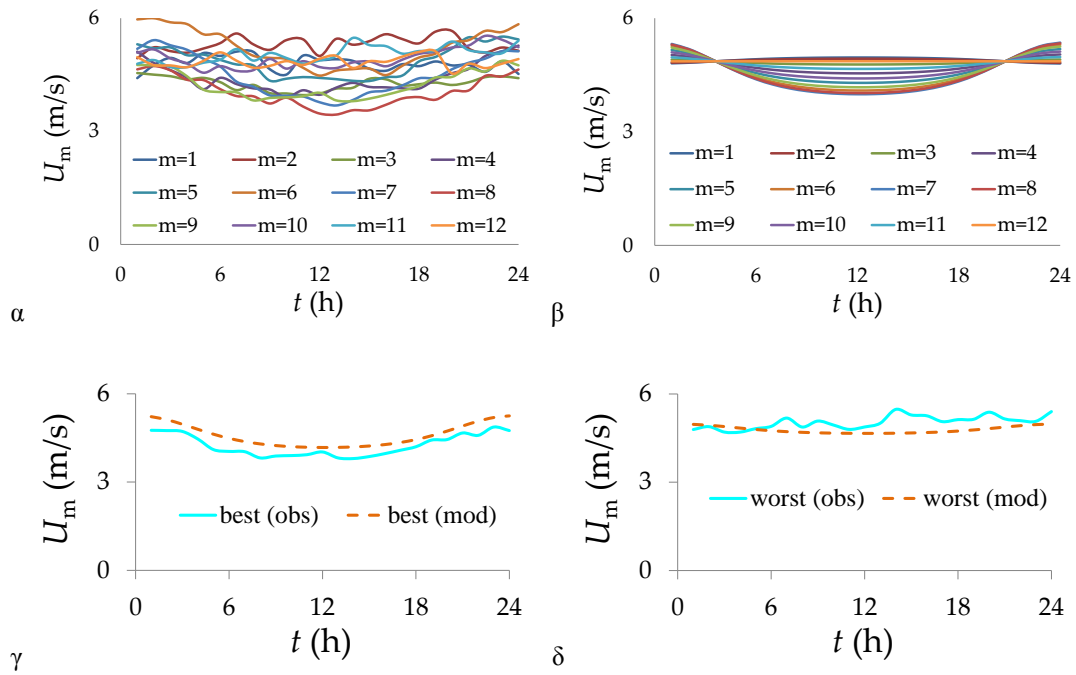




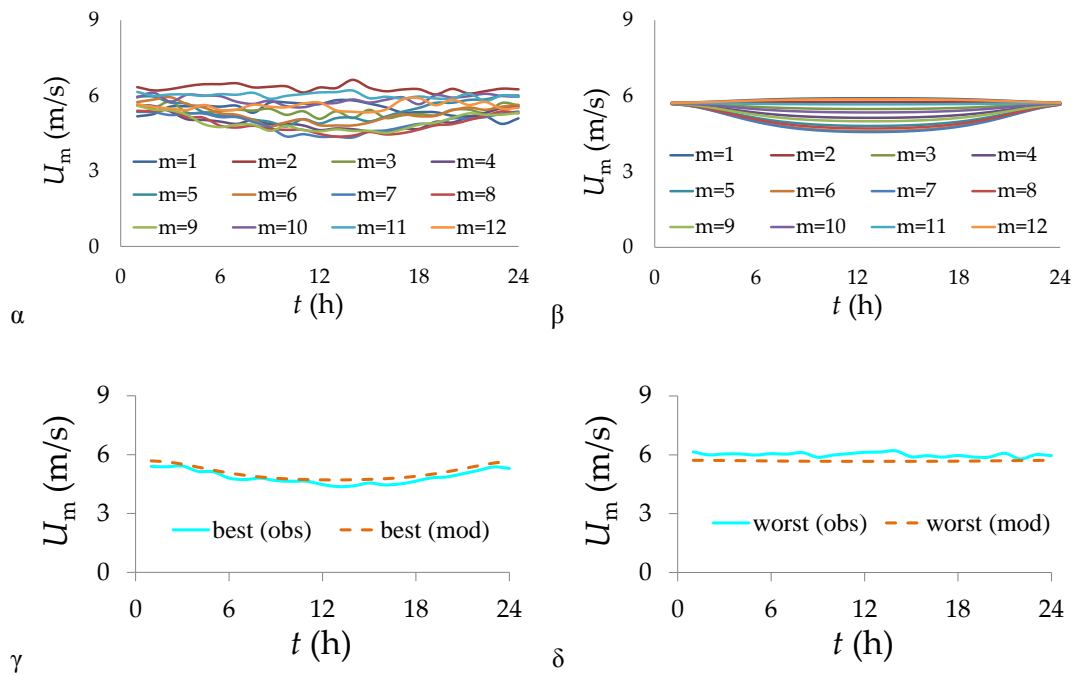
Διάγραμμα A30: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 2720 (Κογυκ, Alaska).



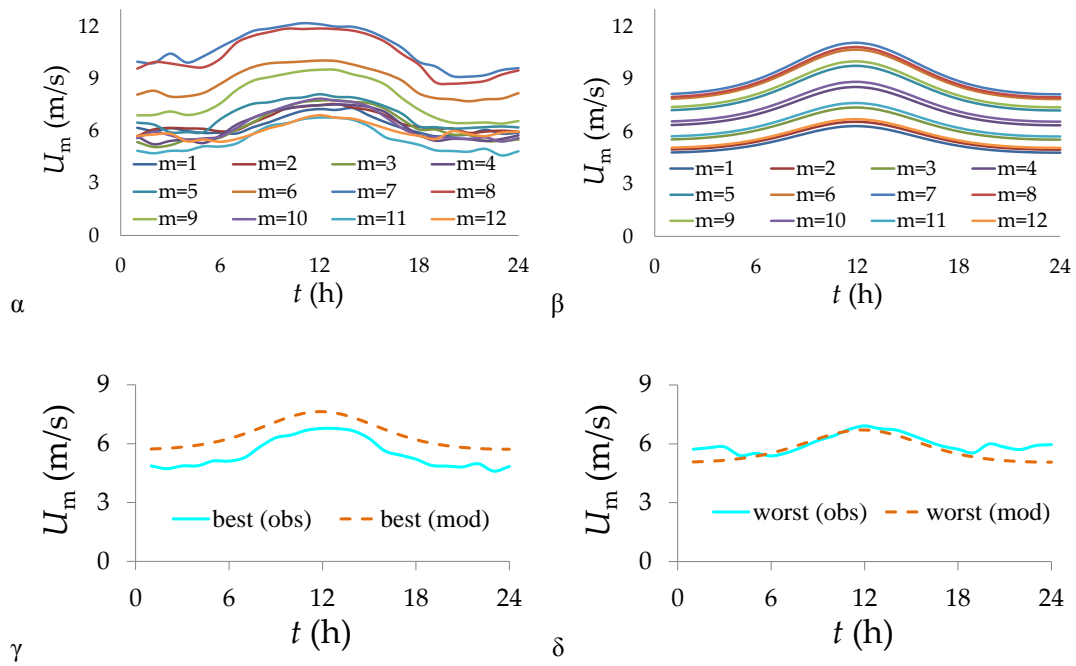
Διάγραμμα A31: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 6 (Tromso, Norway, Europe).



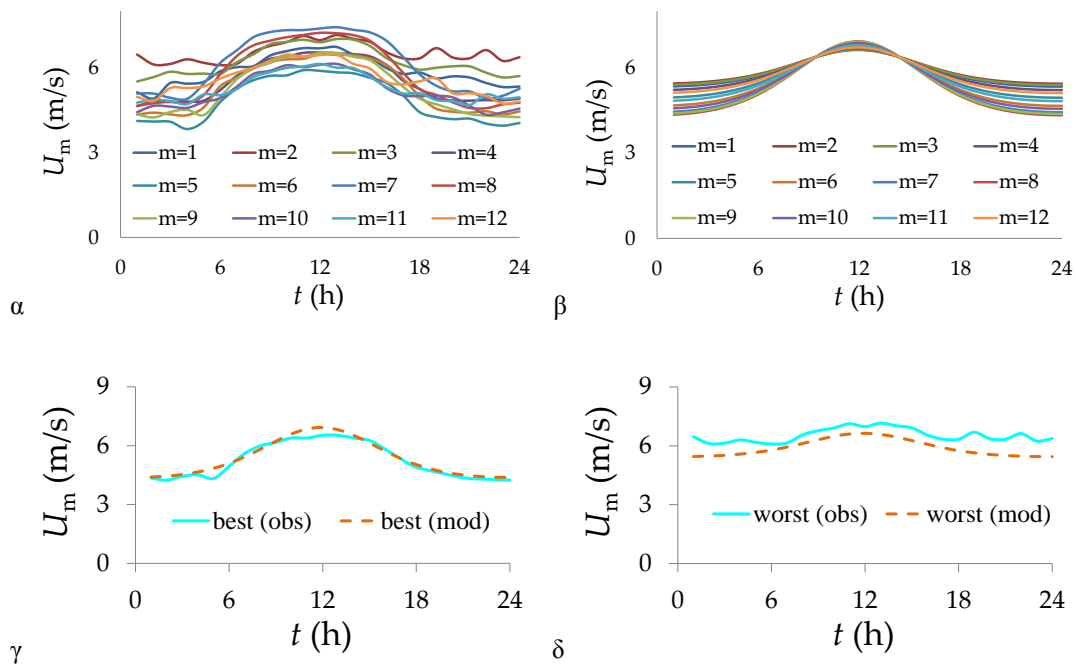
Διάγραμμα A32: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 2784 (Nuiqsut, Alaska).



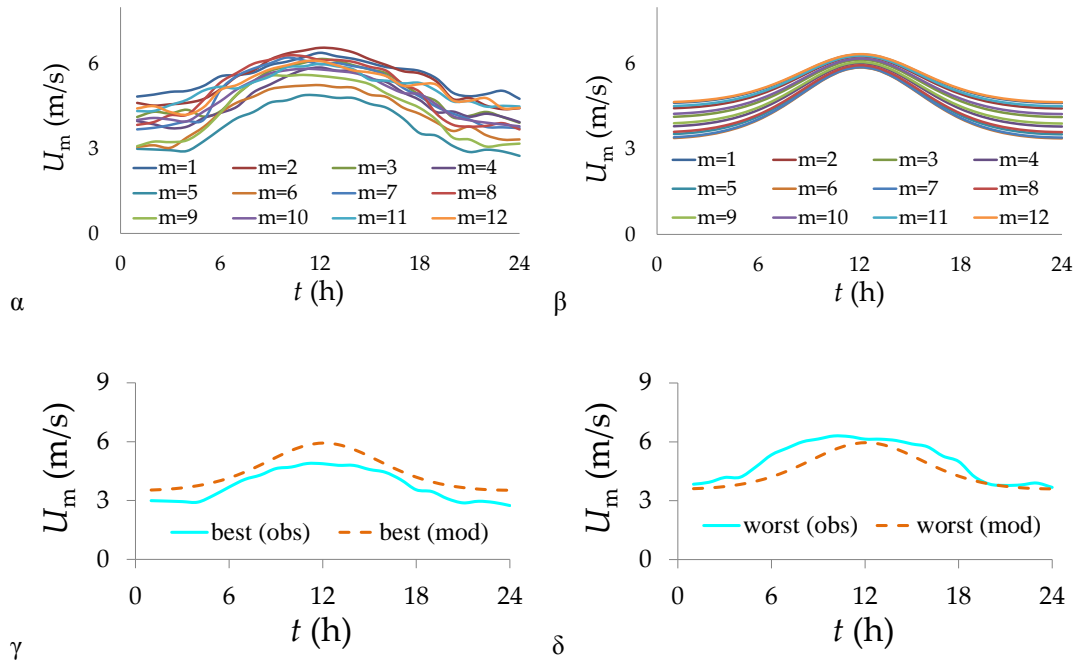
Διάγραμμα A33: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 2682 (Wainwright, Alaska).



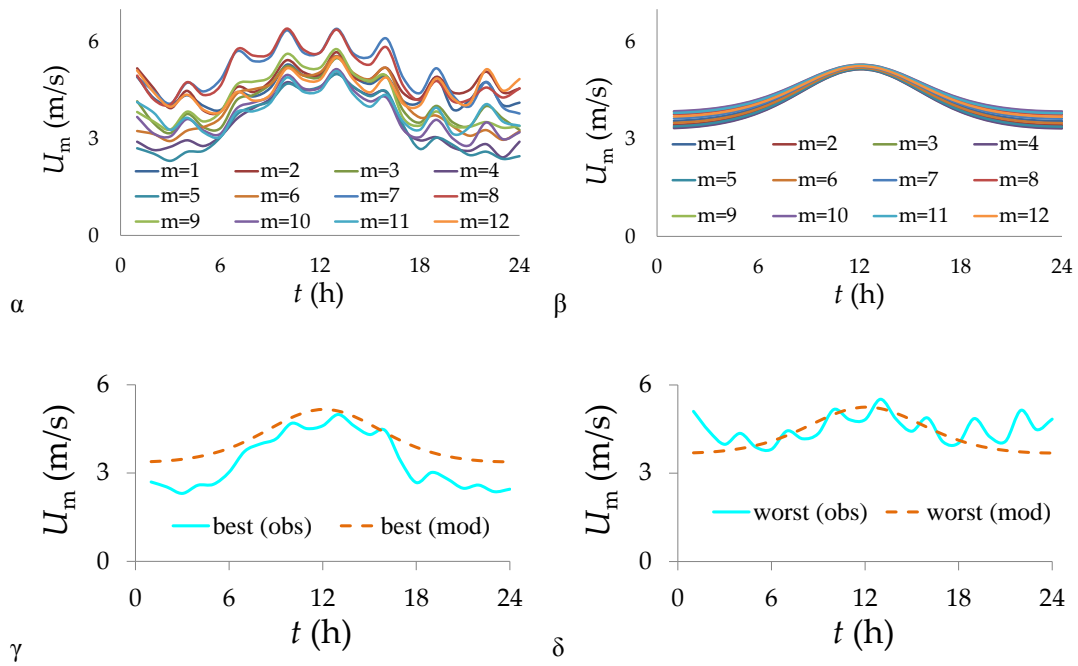
Διάγραμμα A34: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας (Κάρπαθος).



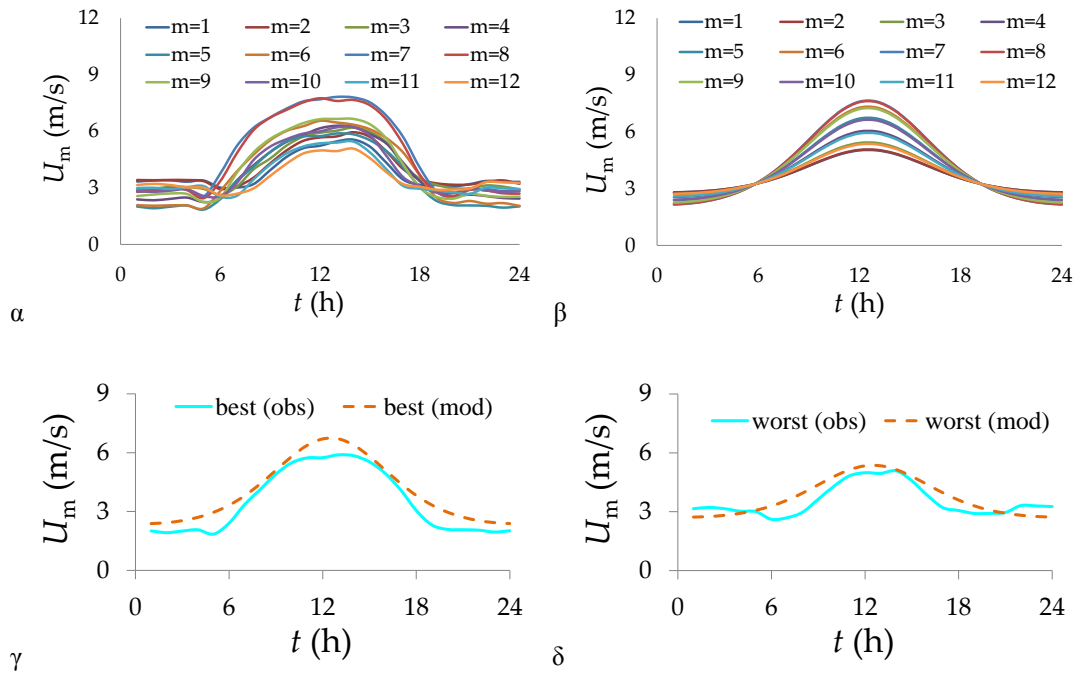
Διάγραμμα A35: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας (Σαντορίνη).



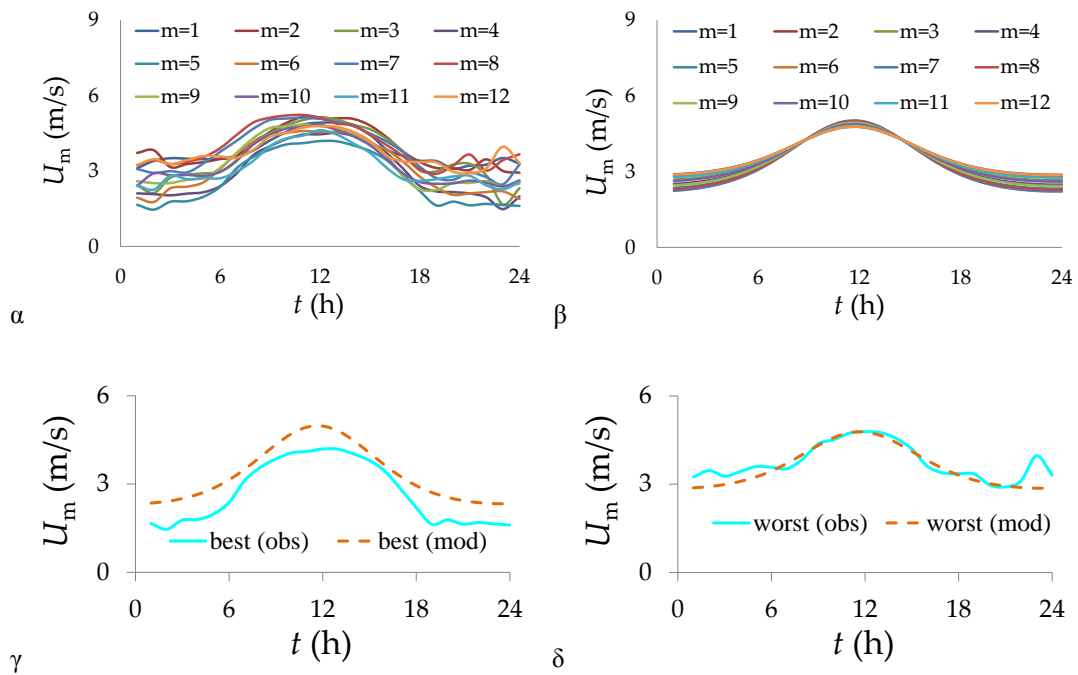
Διάγραμμα A36: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας (Σύρος).



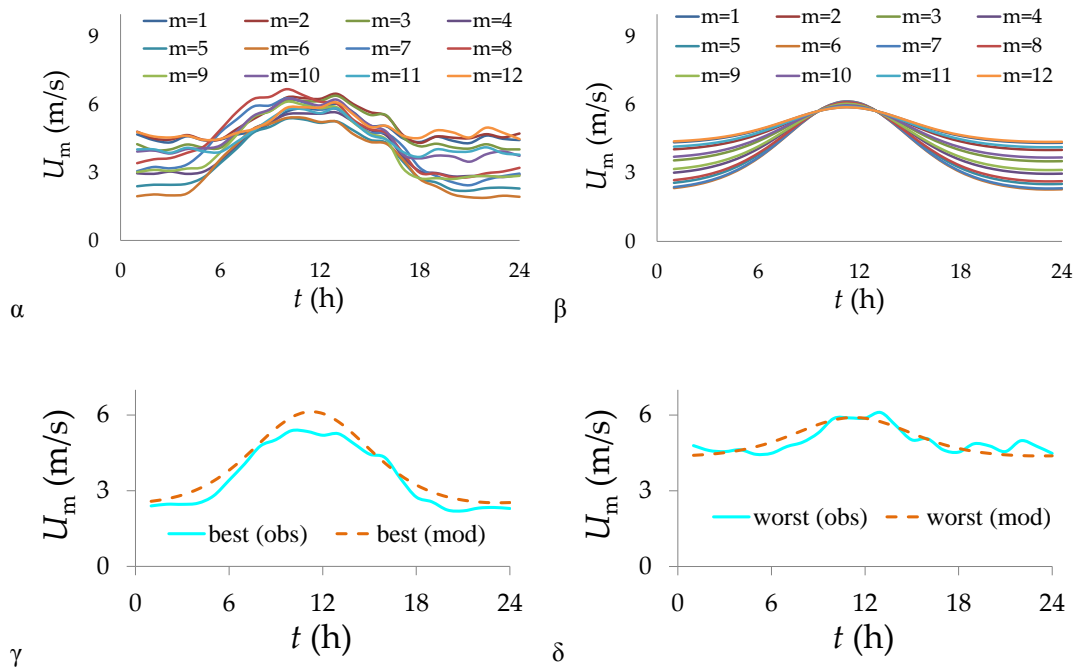
Διάγραμμα A37: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας (Σάμος).



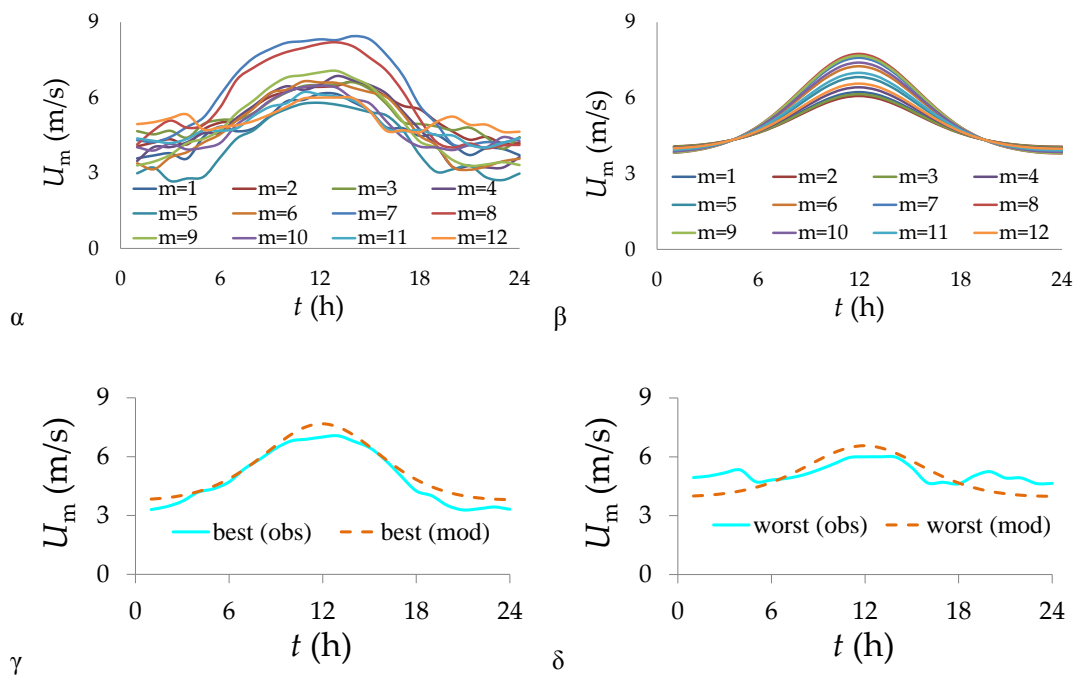
Διάγραμμα A38: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας (Ελ. Βενιζέλος).



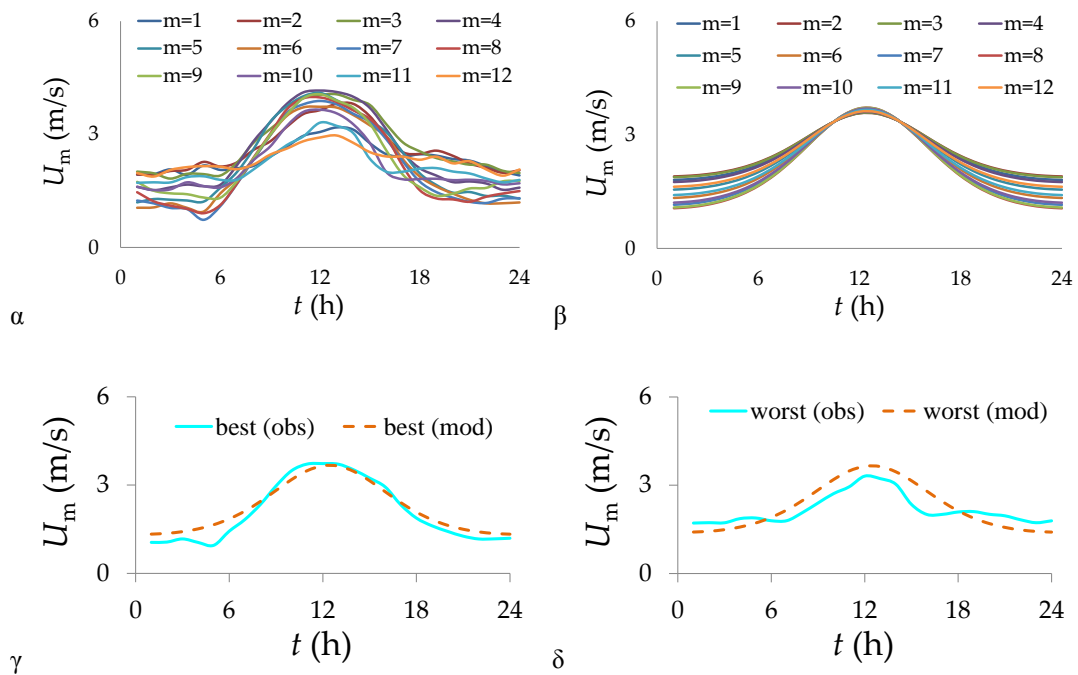
Διάγραμμα A39: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας (Χίος).



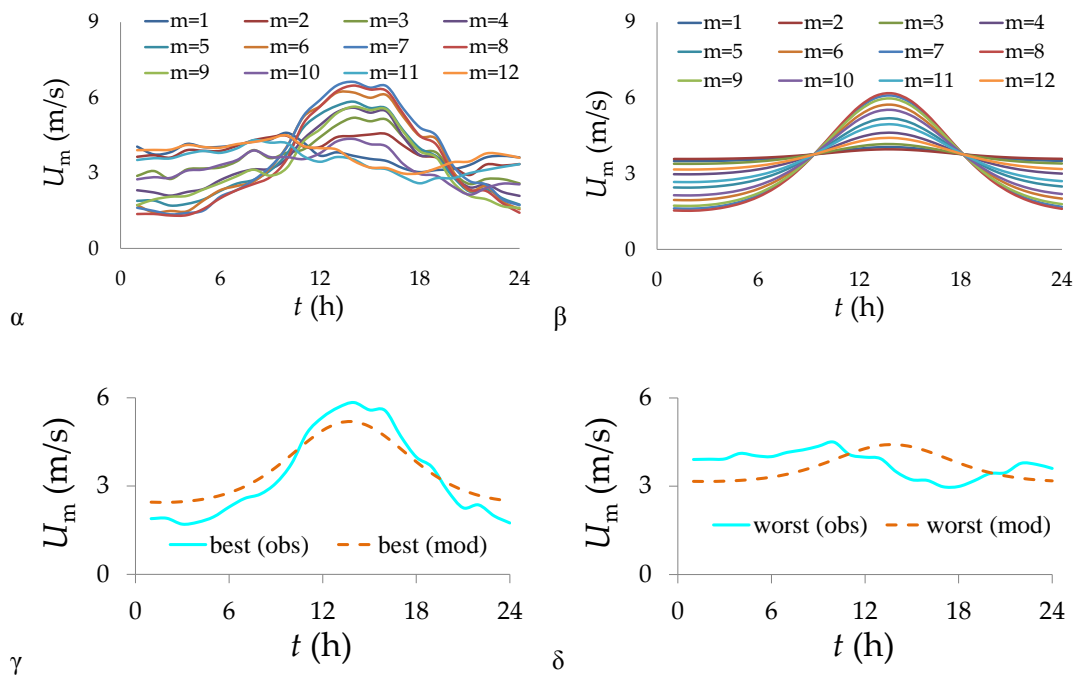
Διάγραμμα A40: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας (Λήμνος).



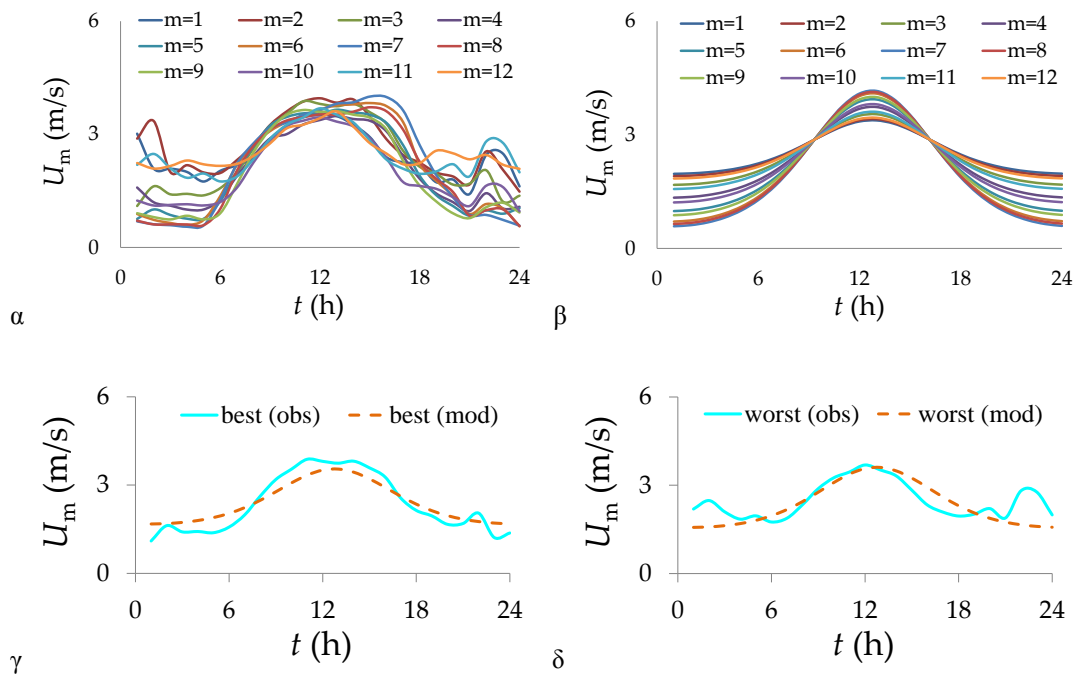
Διάγραμμα A41: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας (Πάρος).



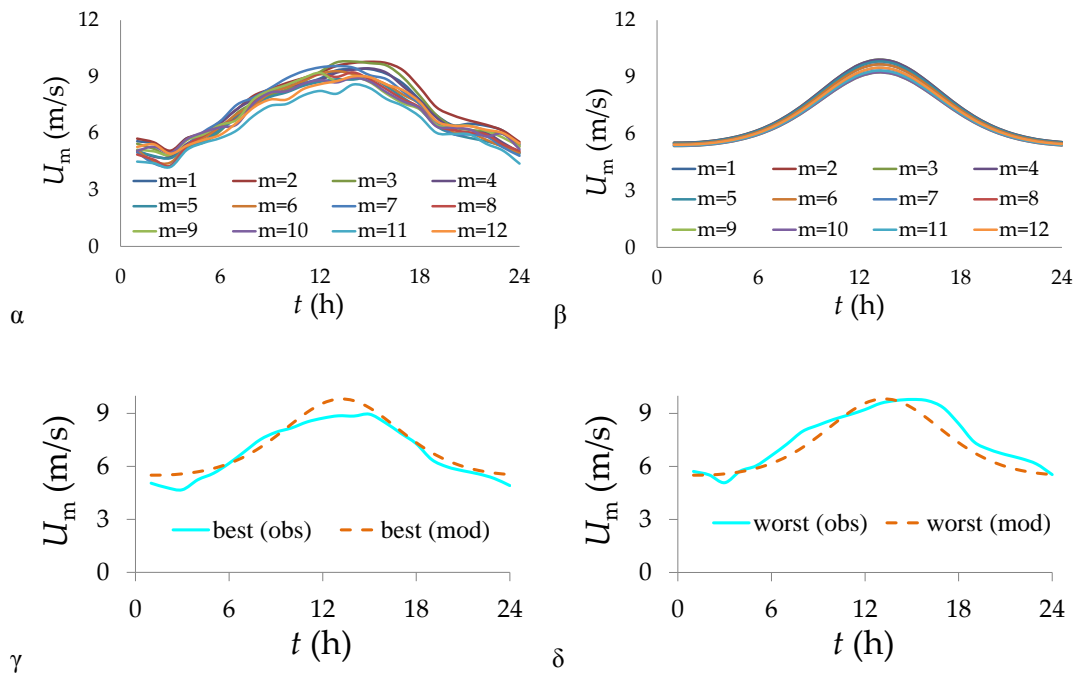
Διάγραμμα A42: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας (Καβάλα).



Διάγραμμα A43: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας (Μεγανήσι).

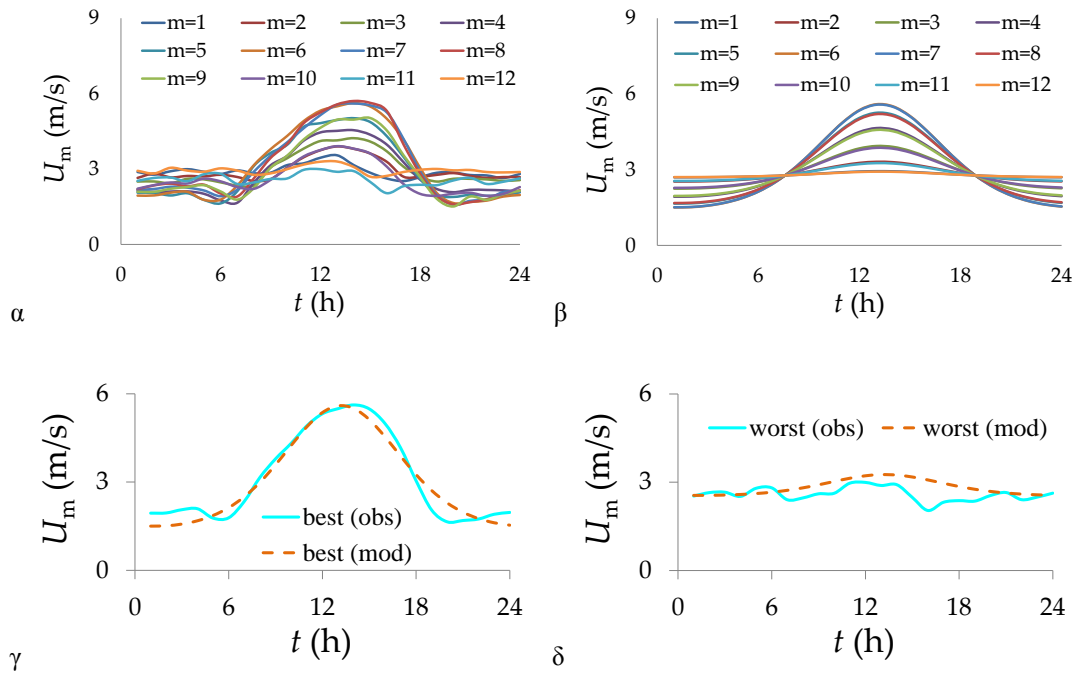


Διάγραμμα A44: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας (Ζάκυνθος).

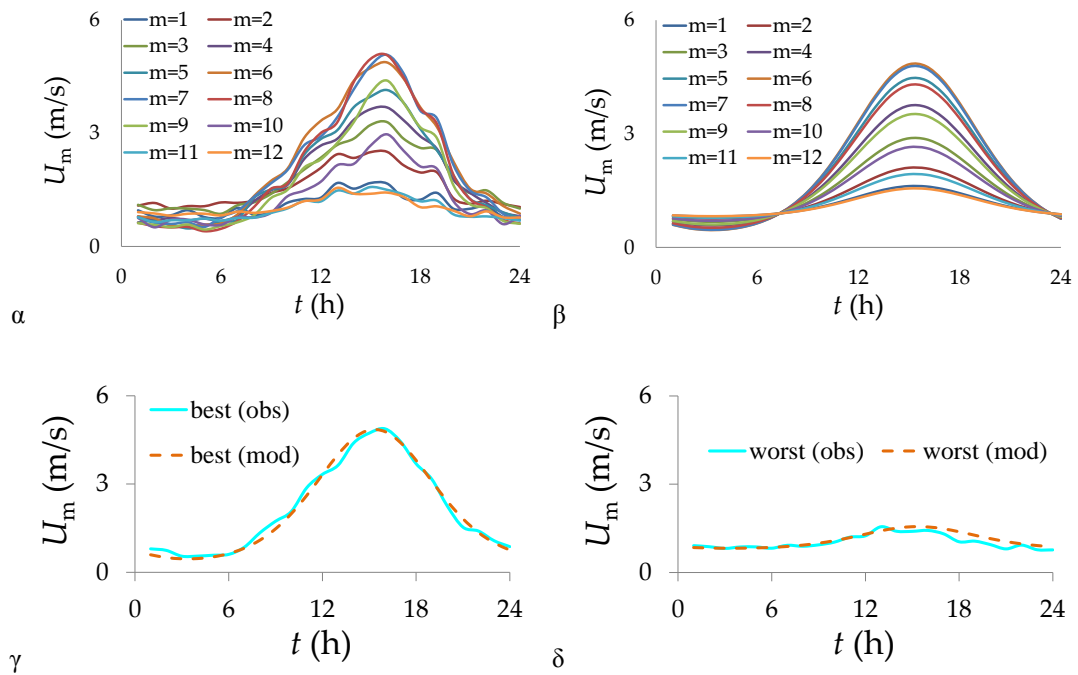


Διάγραμμα A45: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας (Κως).

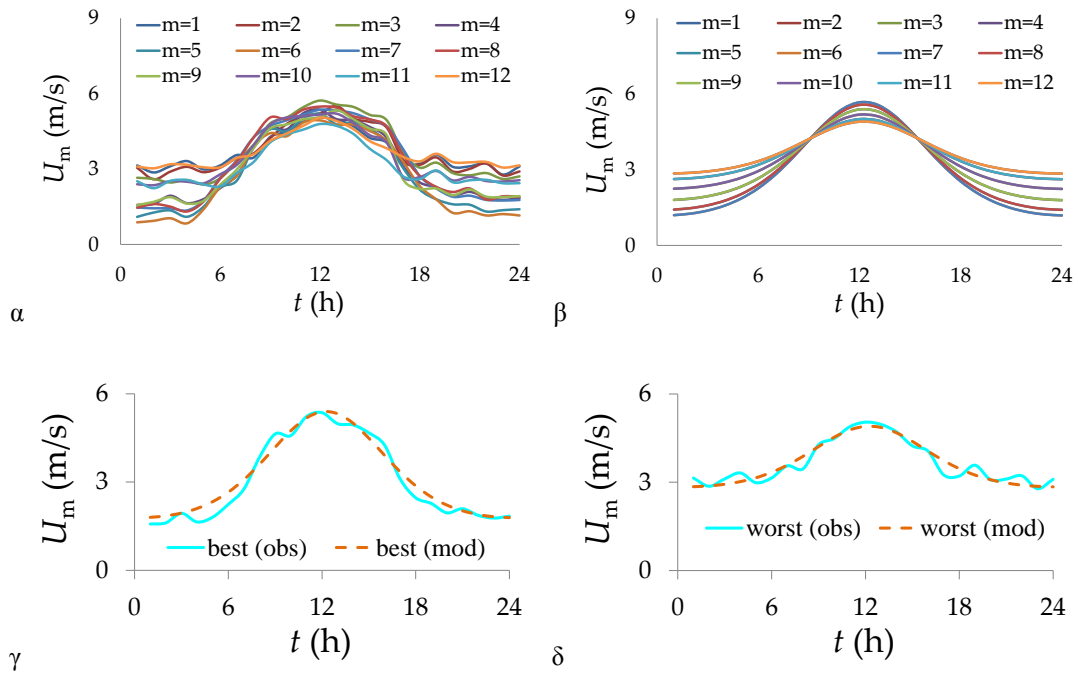




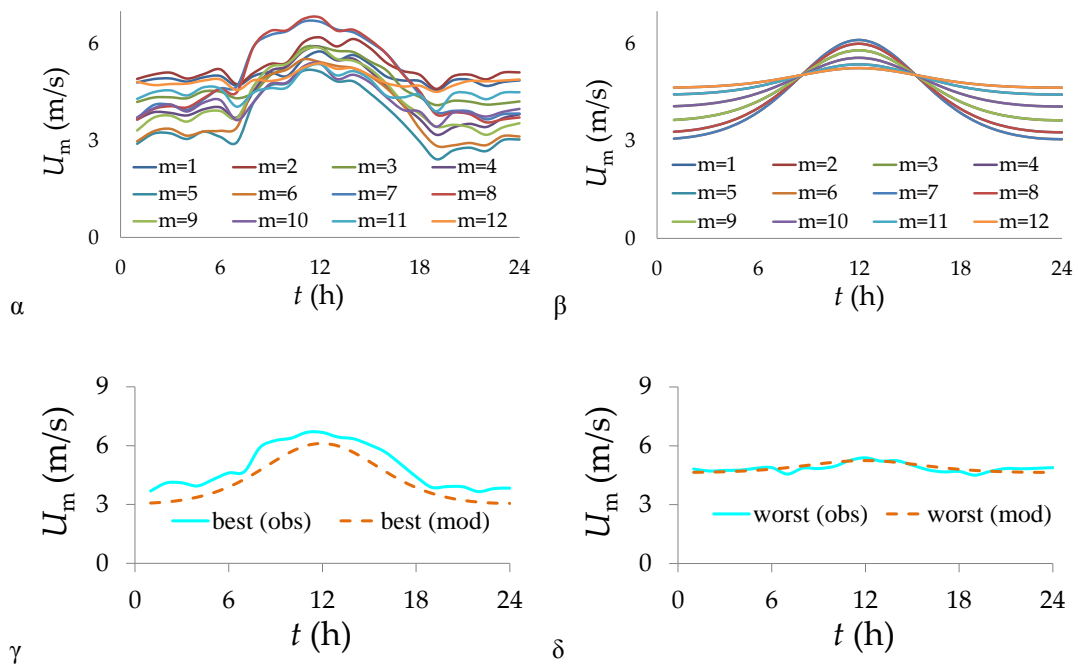
Διάγραμμα A46: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας (Αγκιάλος).



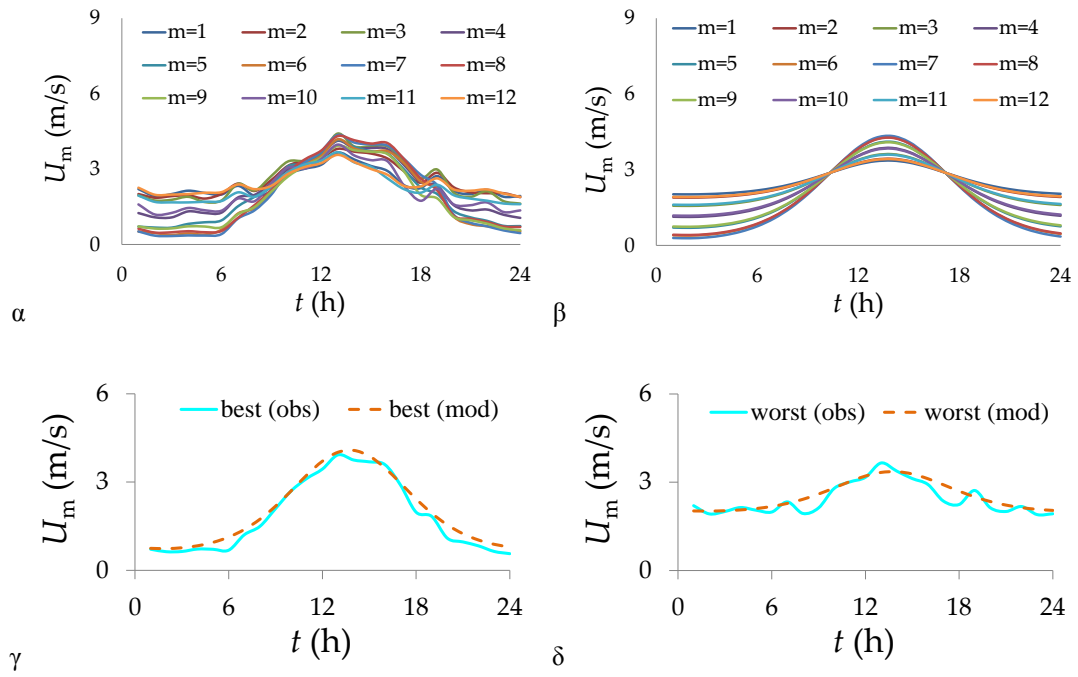
Διάγραμμα A47: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας (Λάρισα).



Διάγραμμα A48: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας (Αλεξανδρούπολη).



Διάγραμμα A49: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας (Ηράκλειο).



Διάγραμμα A50: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας (Άραξος).

## 9 Παράρτημα Β. Εφαρμογή μοντέλου θερμοκρασίας

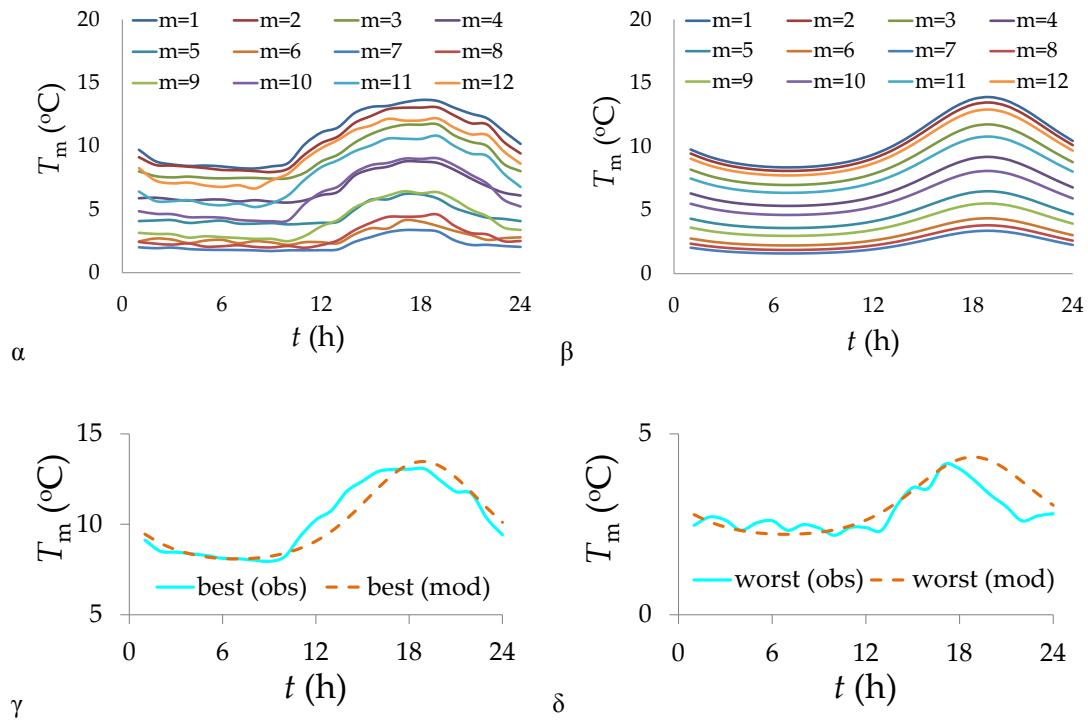
Στο παράρτημα αυτό παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της εφαρμογής του μοντέλου θερμοκρασίας στους 33 σταθμούς παγκοσμίως και σε 11 από τους 17 σταθμούς της Ελλάδας. Στους δύο πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα του μοντέλου, και ακολουθούν τέσσερα διαγράμματα για κάθε σταθμό, όπως ακριβώς και στο παράρτημα Α.

**Πίνακας Β1: εφαρμογή μοντέλου θερμοκρασίας σε 33 σταθμούς παγκοσμίως.**

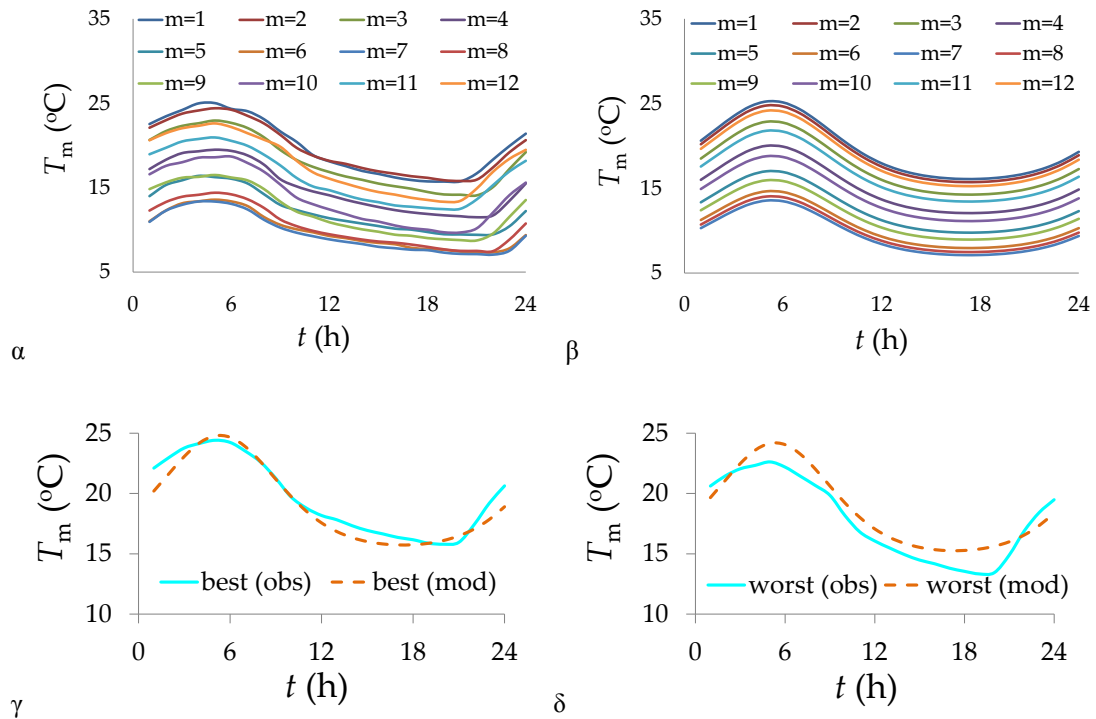
Location	Constants		Coefficients				model performance		
	$a_h$	$a_m$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$r_h$	$r_m$	$e_N$
Falkland Islands, S. America	18,87	1,20	0,472	0,243	0,943	0,691	0,90	1,00	0,500
Melbourne, Australia	5,34	1,20	0,725	0,127	0,935	0,711	0,97	0,99	0,298
Brisbane, Australia	4,79	1,20	0,824	-0,212	1,232	0,680	0,97	0,98	0,314
Hook Island, Australia	5,04	1,20	0,327	0,031	1,286	0,951	0,91	0,99	0,701
Northern Territory, Australia	6,15	1,20	0,921	-0,324	1,026	0,767	0,97	0,74	0,500
Bremer Island, Australia	5,85	1,20	0,858	-0,136	0,970	0,883	0,91	0,95	0,513
Denpasar, Indonesia	7,29	1,20	1,039	0,037	0,387	0,923	0,94	0,78	0,439
Brunei, Asia	7,31	7,23	1,141	0,153	-0,048	0,882	0,96	0,66	0,311
Kedah, Malaysia	8,27	7,23	1,106	-0,003	0,219	0,860	0,96	0,57	0,390
Mariana Islands, Pacific Oc.	5,31	7,23	0,912	0,018	0,419	0,950	0,87	0,64	0,650
Hawaii, Pacific Ocean	1,31	7,23	1,019	0,002	0,564	0,865	0,94	0,91	0,396
Taipei, Taiwan	6,89	7,23	0,300	0,103	1,215	0,912	0,93	0,99	0,581
Texas, USA	21,36	7,23	0,544	0,014	1,215	0,790	0,95	0,99	0,397
Texas, USA	21,65	7,23	0,539	0,037	1,188	0,739	0,97	0,99	0,388
New Mexico, USA	21,81	7,23	0,616	-0,016	1,199	0,565	0,97	0,98	0,378
Alabama, USA	20,74	7,23	0,526	0,033	1,205	0,686	0,97	0,99	0,366
Tennessee, USA	20,79	7,23	0,459	0,058	1,211	0,690	0,97	0,99	0,396
Narita, Japan	5,61	7,23	0,353	-0,057	1,400	0,756	0,97	0,99	0,548
Minnesota, USA	21,38	7,23	0,313	0,107	1,214	0,406	0,97	0,99	0,484
Dniprodzerzhynsk, Ukraine	12,66	7,23	0,295	0,179	1,117	0,618	0,95	0,99	0,588
Washington, USA	23,16	7,23	0,375	0,232	1,009	0,788	0,96	0,99	0,732
St Helier, France	15,12	7,23	0,313	0,170	1,103	0,857	0,95	0,98	0,851
Mons, Belgium	14,70	7,23	0,387	0,169	1,093	0,743	0,95	0,99	0,638
Moscow, Russia	12,44	7,23	0,256	0,163	1,147	0,432	0,95	0,99	0,849
Wrangell Island, Alaska	23,79	7,23	0,237	0,141	1,184	0,770	0,96	0,99	1,360
Port Heiden, Alaska	1,55	7,23	0,200	0,095	1,222	0,340	0,92	0,97	1,488
Uppsala, Sweden	13,77	7,23	0,276	0,170	1,140	0,584	0,95	1,00	0,781
Bergen, Norway	14,62	7,23	0,273	0,151	1,163	0,770	0,93	0,99	0,806
McKinley Park, Alaska	0,90	7,23	0,243	0,076	1,243	2,442	0,93	0,98	1,532
Koyuk, Alaska	1,71	7,23	0,132	0,091	1,274	1,704	0,90	0,99	2,739
Tromso, Norway	13,71	7,23	0,186	0,155	1,174	0,604	0,86	0,99	2,340
Nuiqsut, Alaska	1,04	7,23	0,084	0,093	1,259	1,140	0,65	0,98	3,291
Wainwright, Alaska	1,64	7,23	0,071	0,063	1,289	1,114	0,57	0,97	3,811

Πίνακας Β2: εφαρμογή μοντέλου θερμοκρασίας σε 11 σταθμούς στην Ελλάδα.

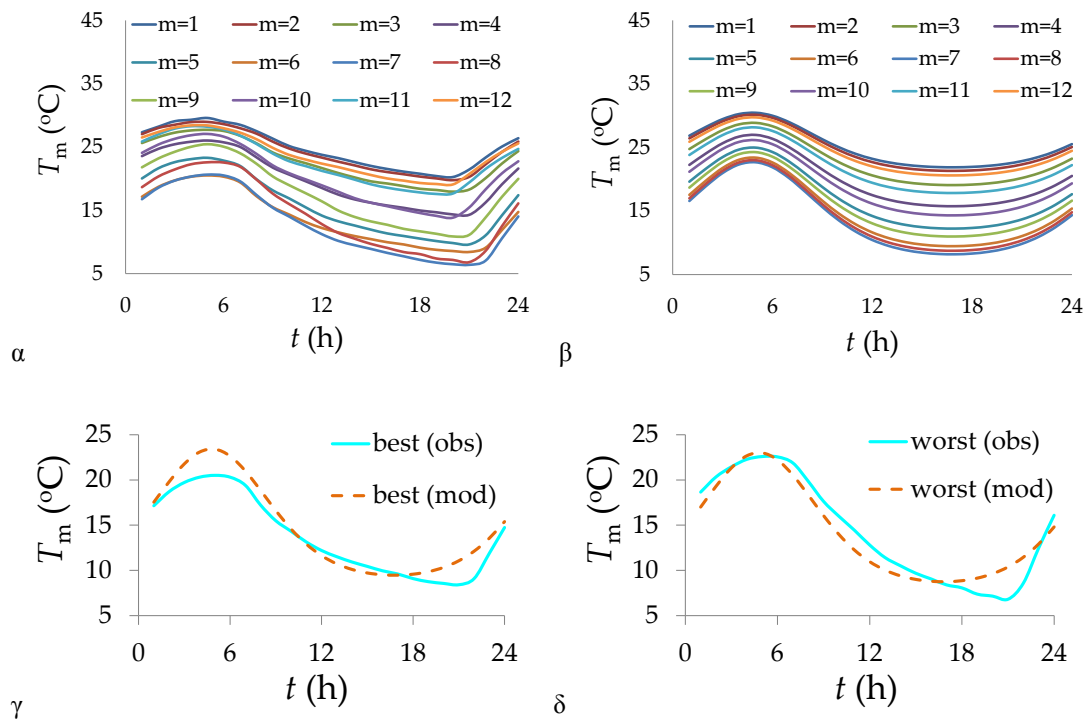
Station Name	Constants		Coefficients				model performance		
	$a_h$	$a_m$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$r_h$	$r_m$	$e_N$
Karpathos	13,16	7,23	0,341	0,093	1,188	0,889	0,94	0,97	0,762
Santorini	13,27	7,23	0,304	0,114	1,188	0,890	0,92	0,98	0,701
Syros	13,31	7,23	0,244	0,070	1,272	0,904	0,96	0,99	0,686
Samos	13,18	7,23	0,388	0,125	1,158	0,816	0,98	0,99	0,404
El. Venizelos	13,37	7,23	0,423	0,092	1,180	0,785	0,94	0,99	0,440
Chios	13,23	7,23	0,372	0,058	1,246	0,830	0,95	0,99	0,480
Limnos	13,29	7,23	0,366	0,124	1,169	0,801	0,96	0,99	0,442
Paros	13,29	7,23	0,331	0,199	1,064	0,877	0,86	0,98	0,704
Kavala	13,33	7,23	0,400	0,092	1,203	0,747	0,96	1,00	0,327
Meganisi	13,59	7,23	0,392	0,093	1,195	0,824	0,95	0,99	0,416
Zakynthos	13,58	7,23	0,514	0,198	0,978	0,762	0,94	0,99	0,467



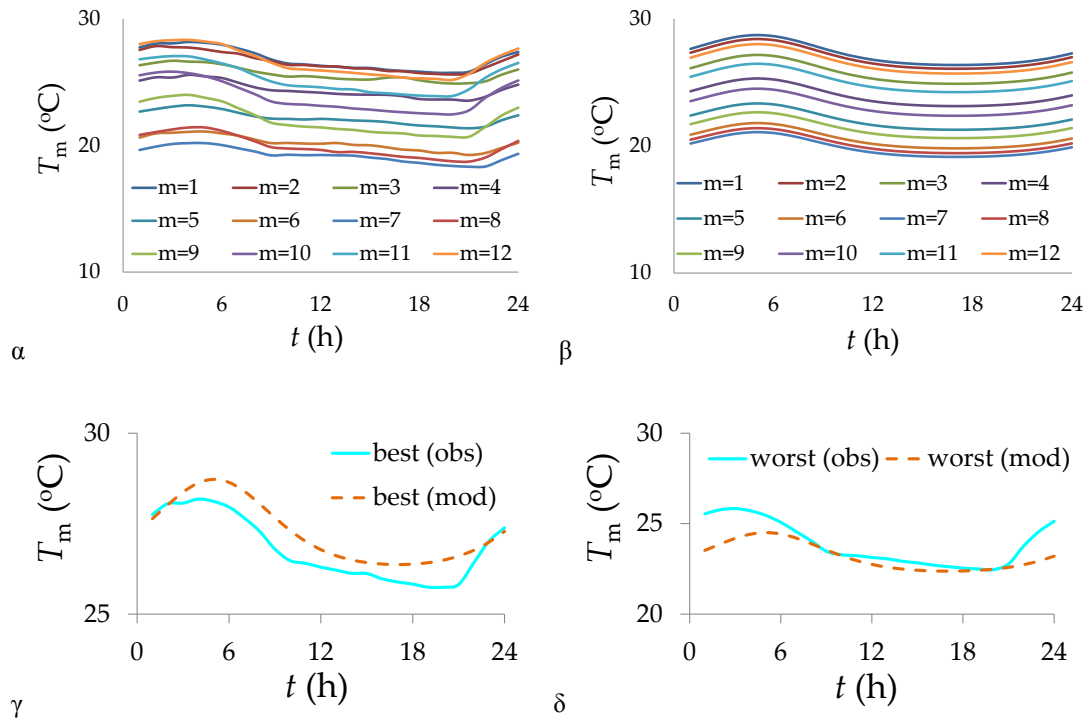
Διάγραμμα Β1: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 5539 (Falkland Islands, South America).



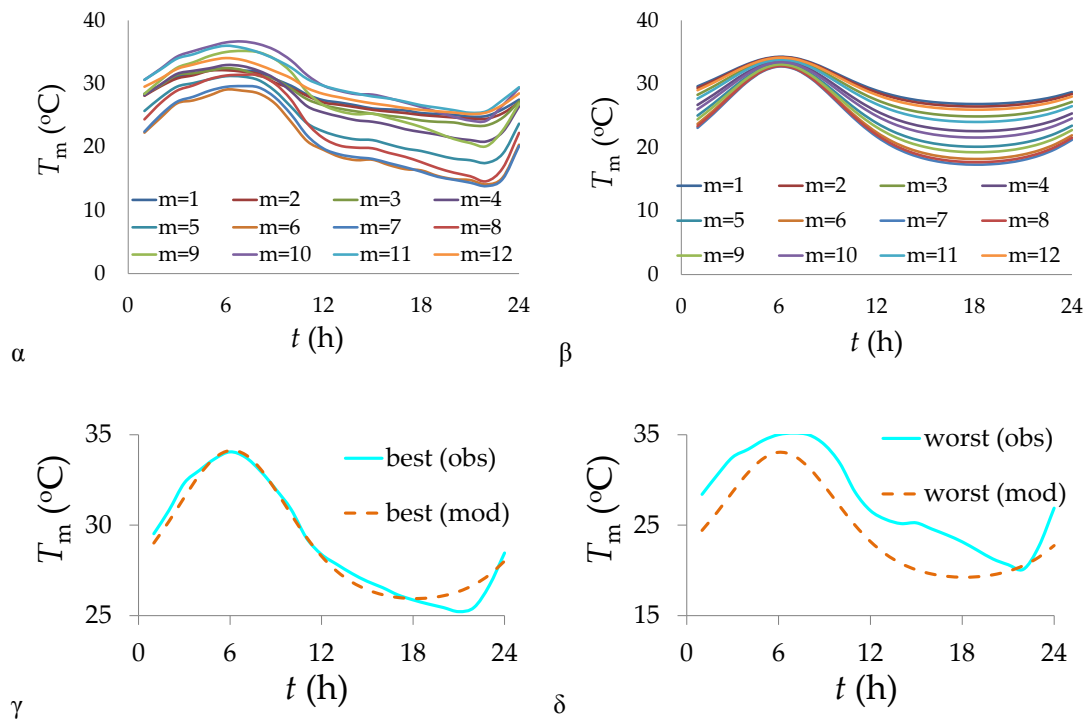
Διάγραμμα B2: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 5969 (Melbourne, Australia, Oceania).



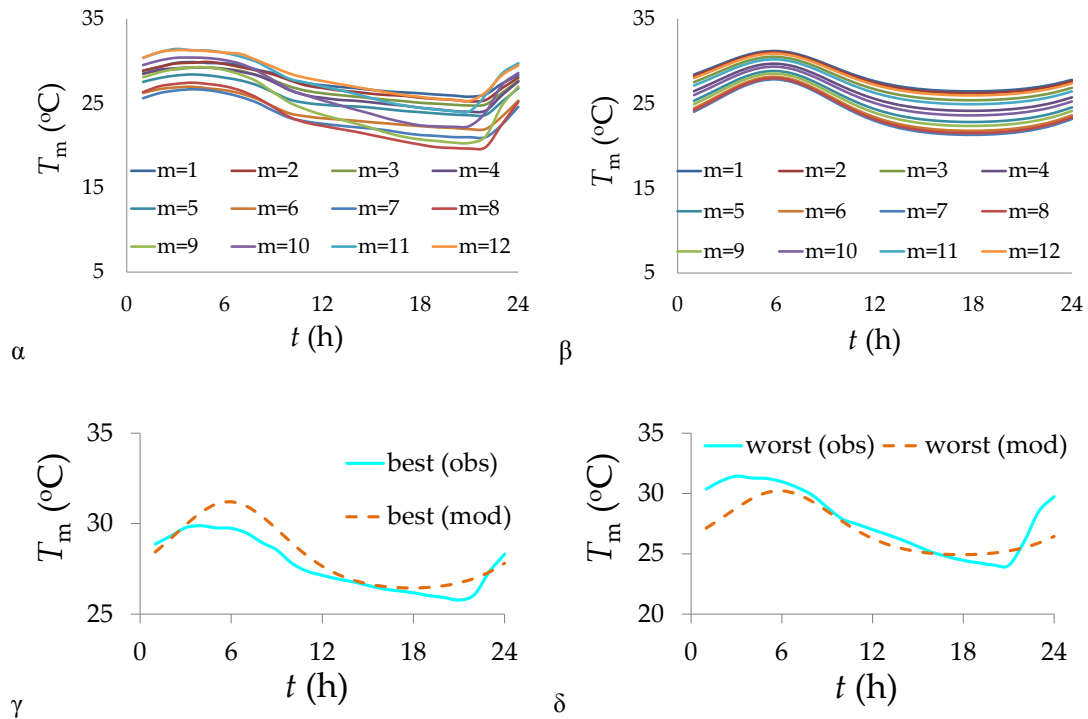
Διάγραμμα B3: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 5846 (Brisbane, Australia, Oceania).



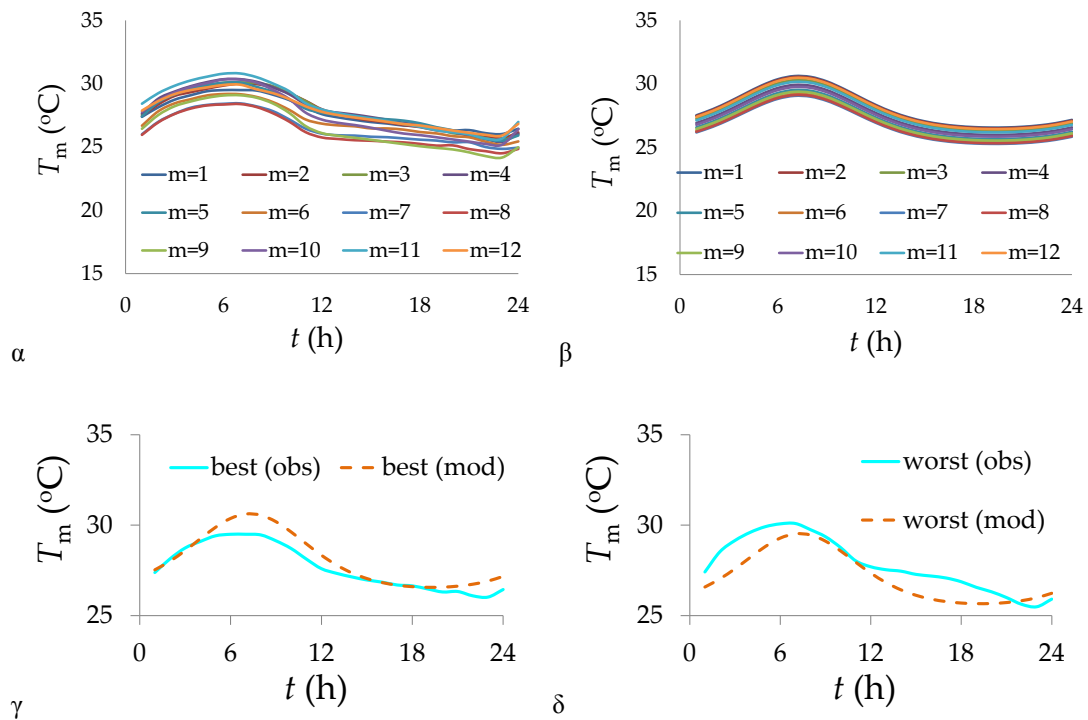
Διάγραμμα Β4: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 5847 (Hook Island, Australia, Oceania).



Διάγραμμα Β5: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 5737 (Northern Territory, Australia, Oceania).

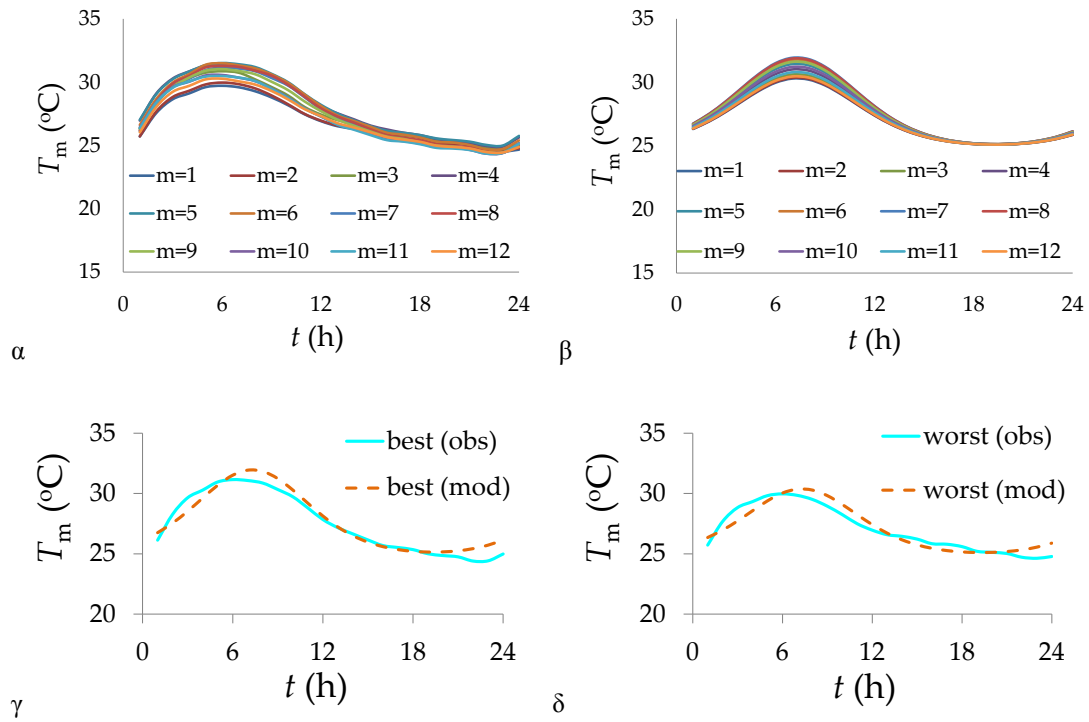


Διάγραμμα B6: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 5849 (Bremer Island, Australia, Oceania).

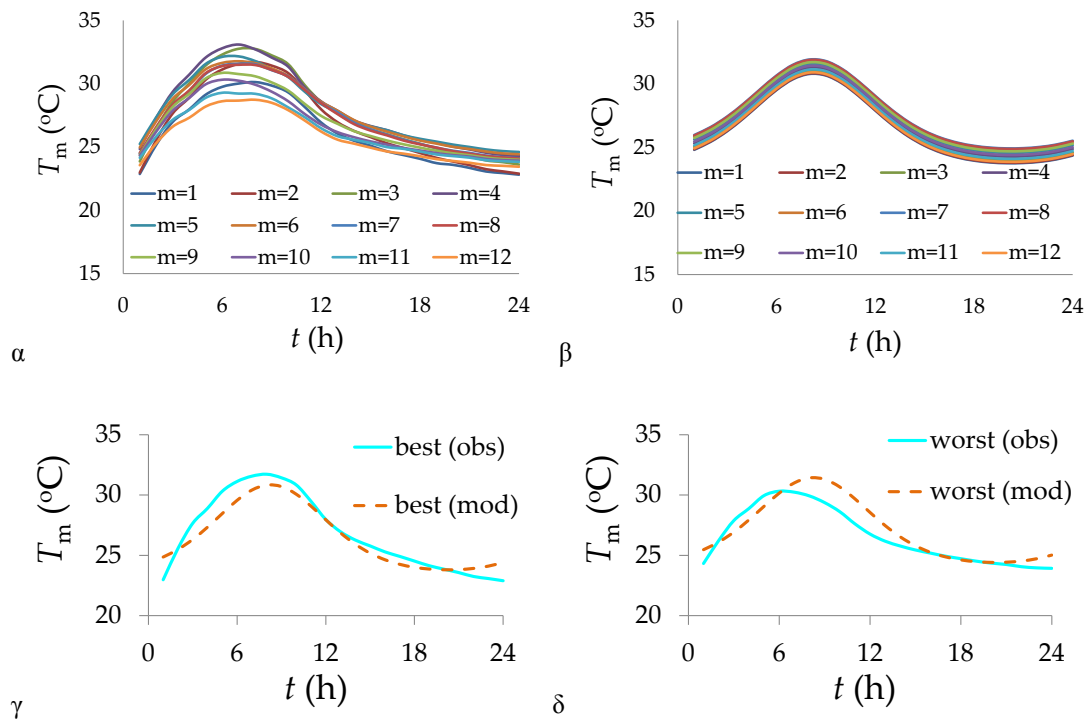


Διάγραμμα B7: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 6241 (Denpasar, Indonesia, Asia).

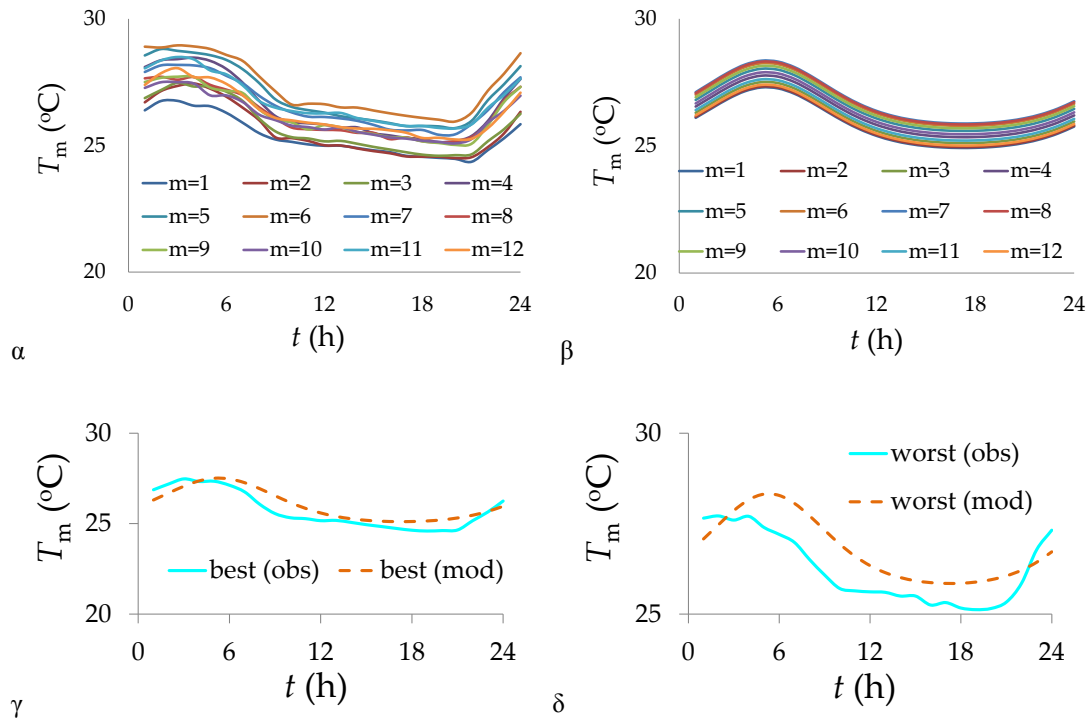




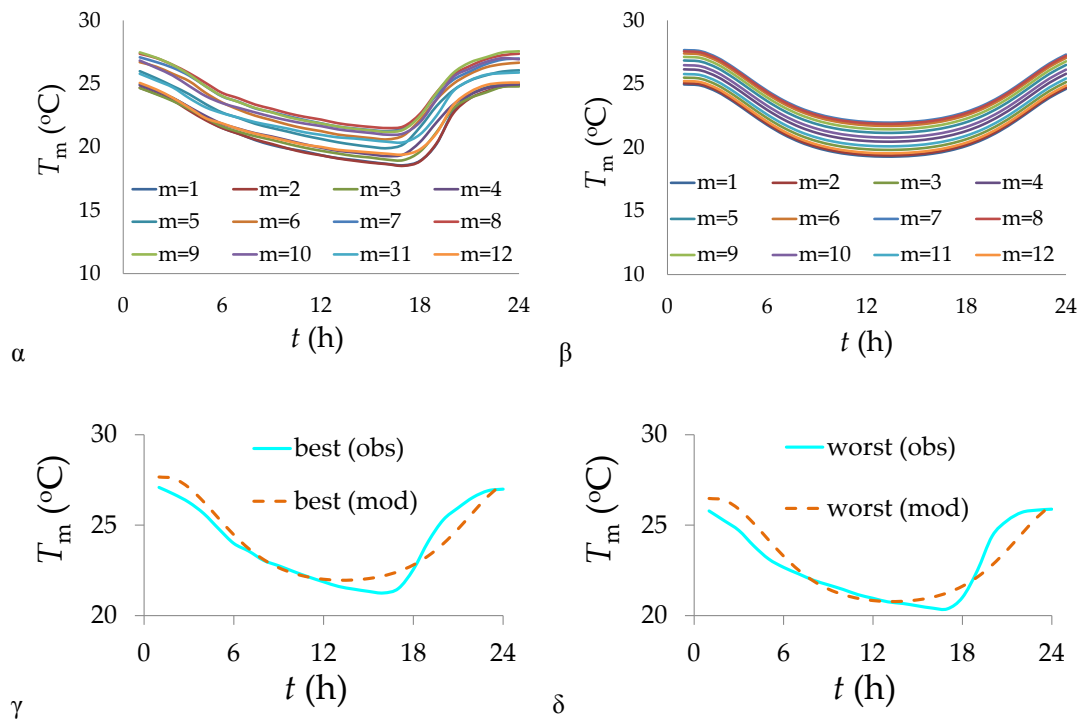
Διάγραμμα Β8: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 6218 (Brunei, Asia).



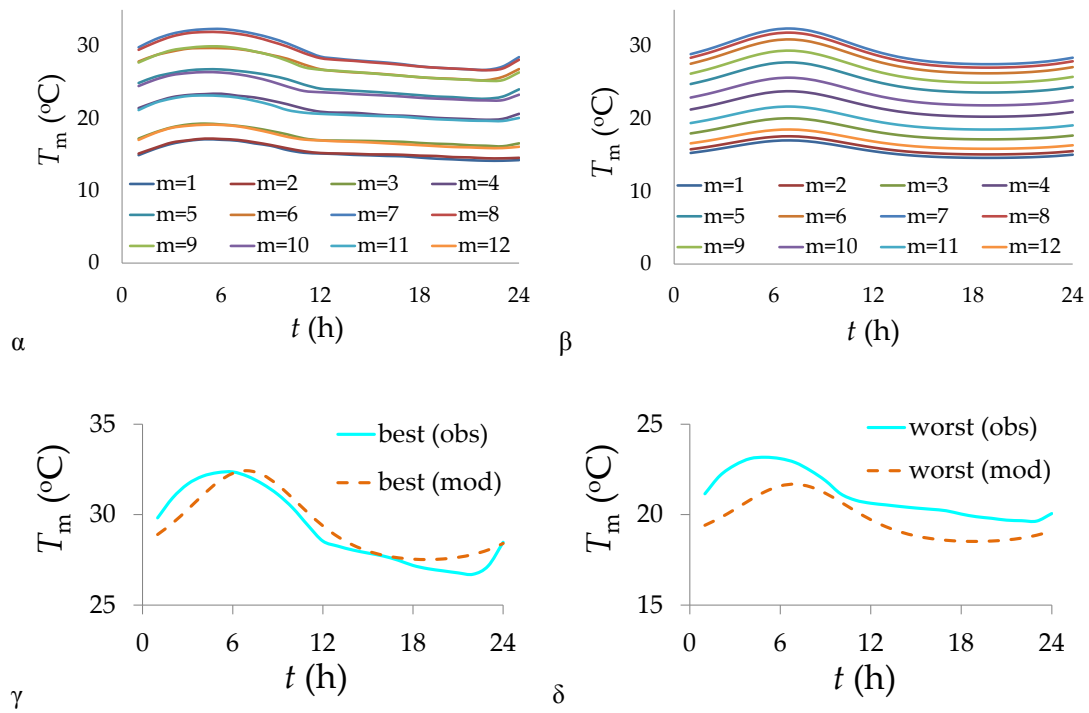
Διάγραμμα Β9: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 2221 (Kedah, Malaysia, Asia ).



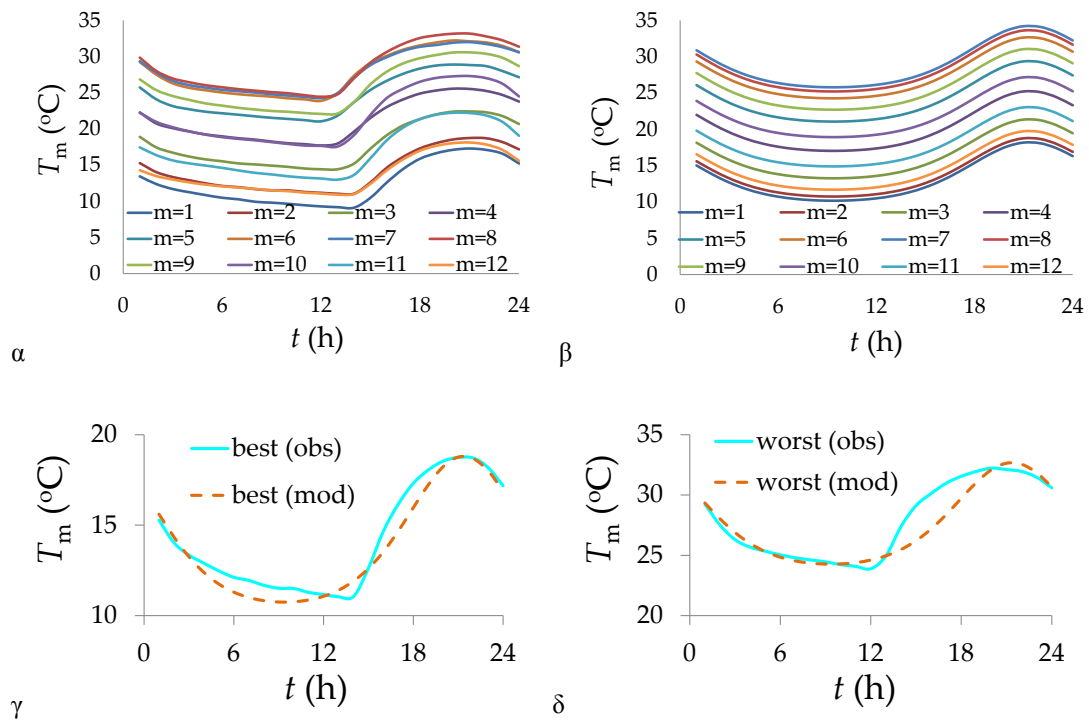
Διάγραμμα B10: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 5617 (Mariana Islands, Pacific Ocean).



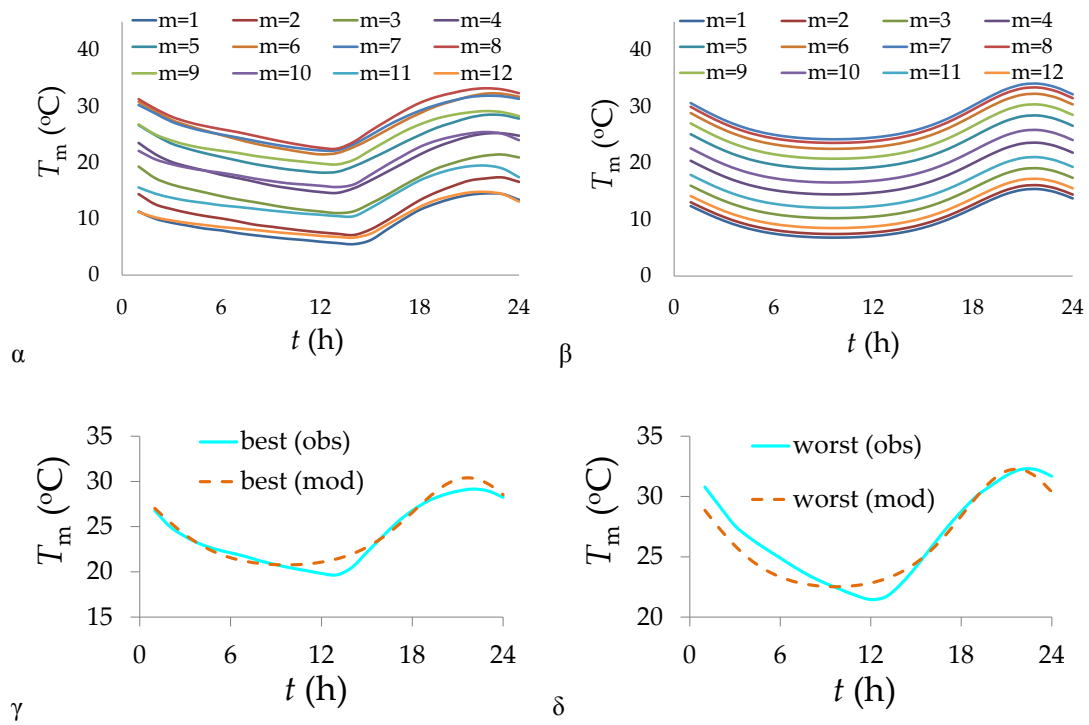
Διάγραμμα B11: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 5622 (Hawaii, Pacific Ocean).



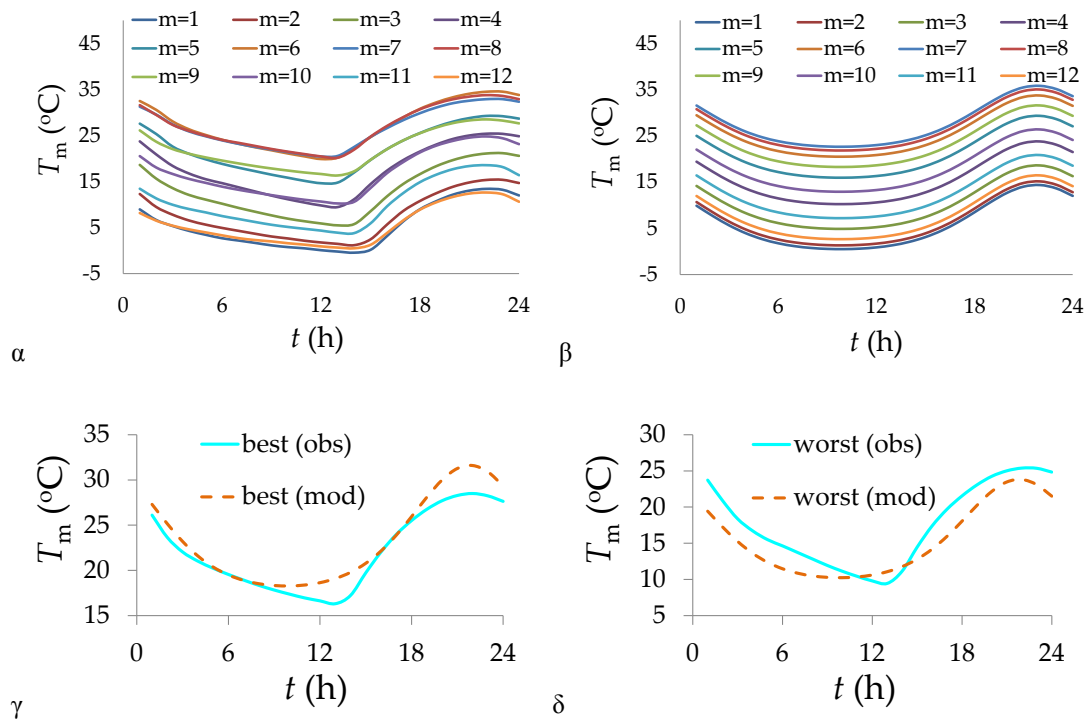
Διάγραμμα B12: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 1963 (Taipei, Taiwan, Asia).



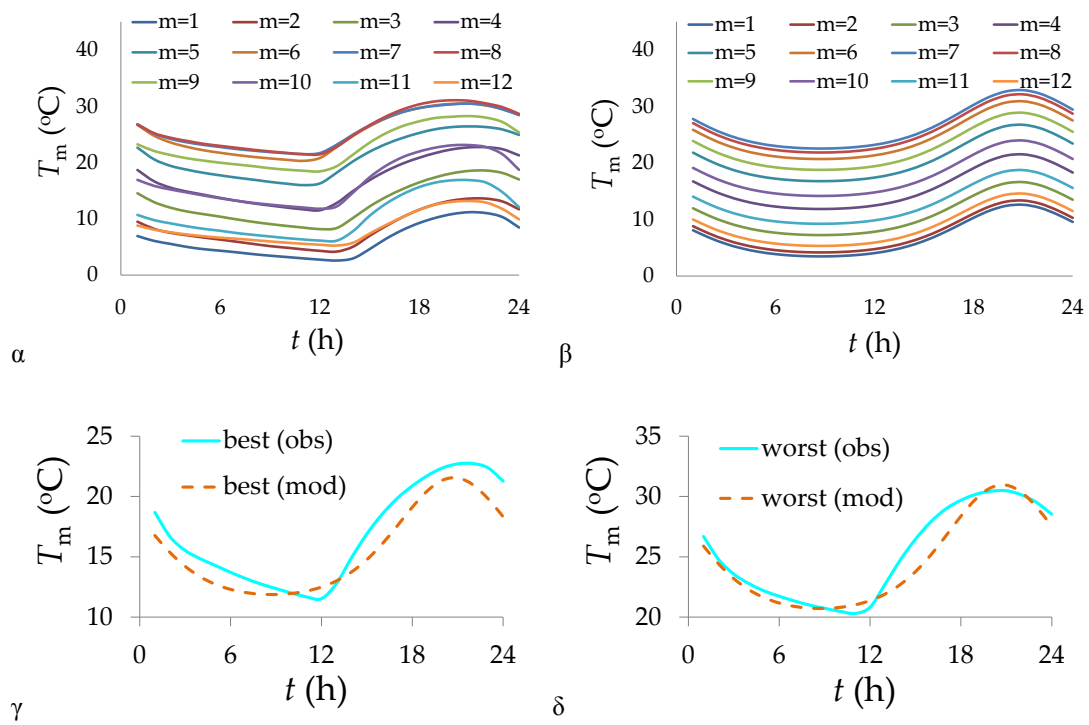
Διάγραμμα B13: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 3308 (Texas, USA).



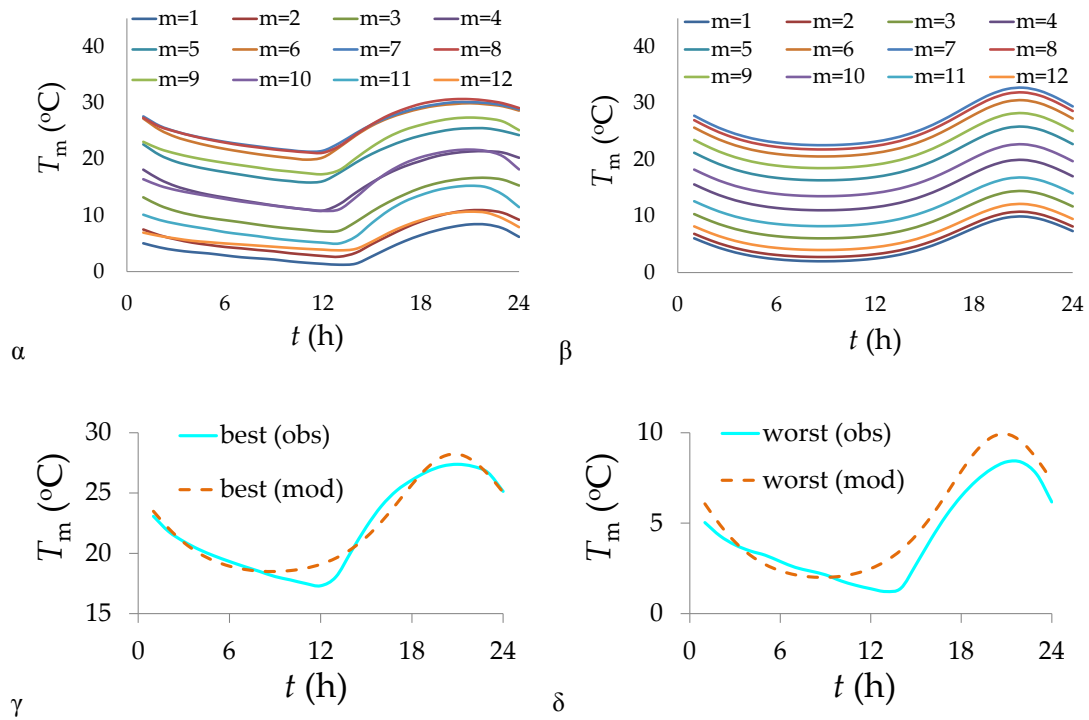
Διάγραμμα B14: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 4088 (Texas, USA).



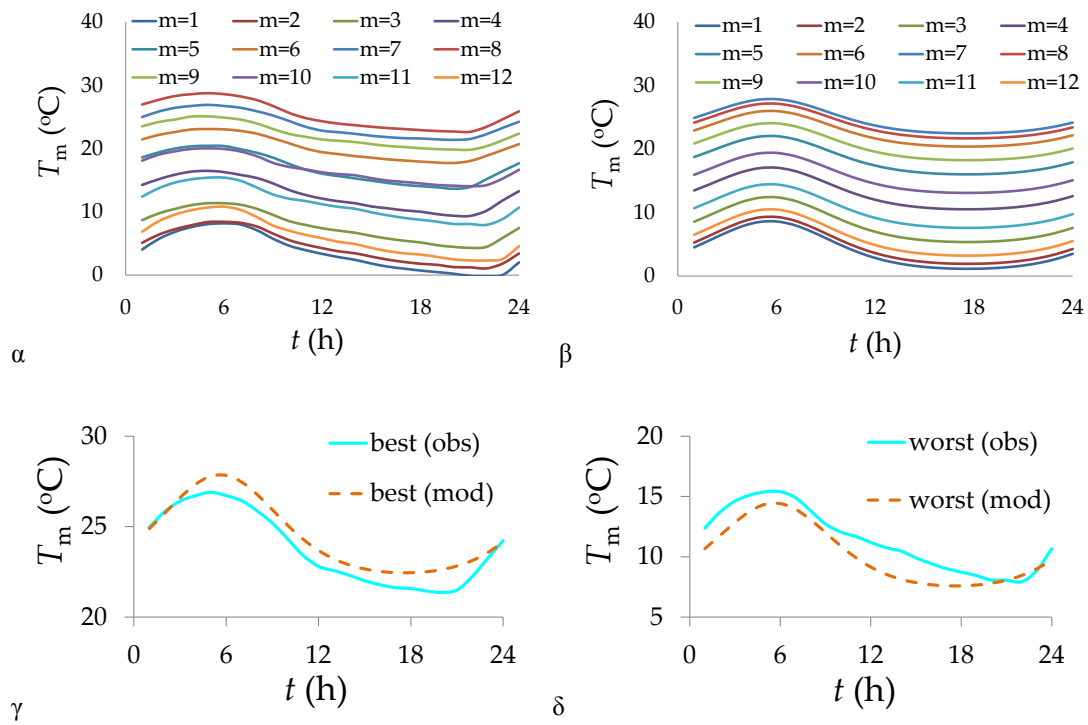
Διάγραμμα B15: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 3932 (New Mexico, USA).



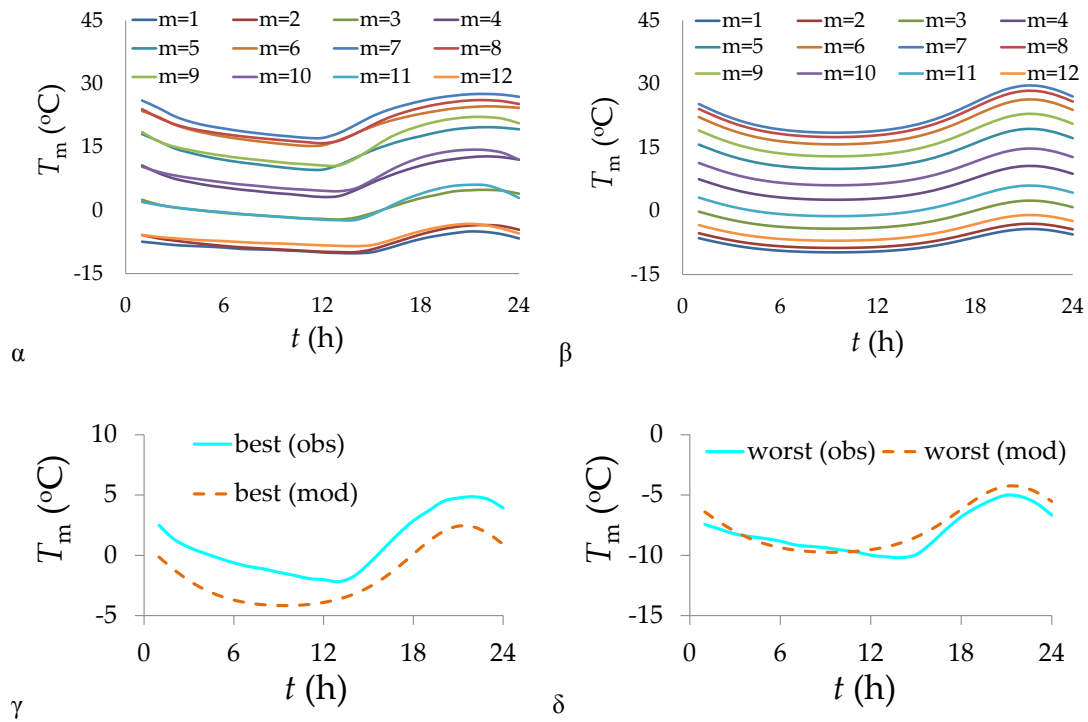
Διάγραμμα B16: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 7540 (Alabama, USA).



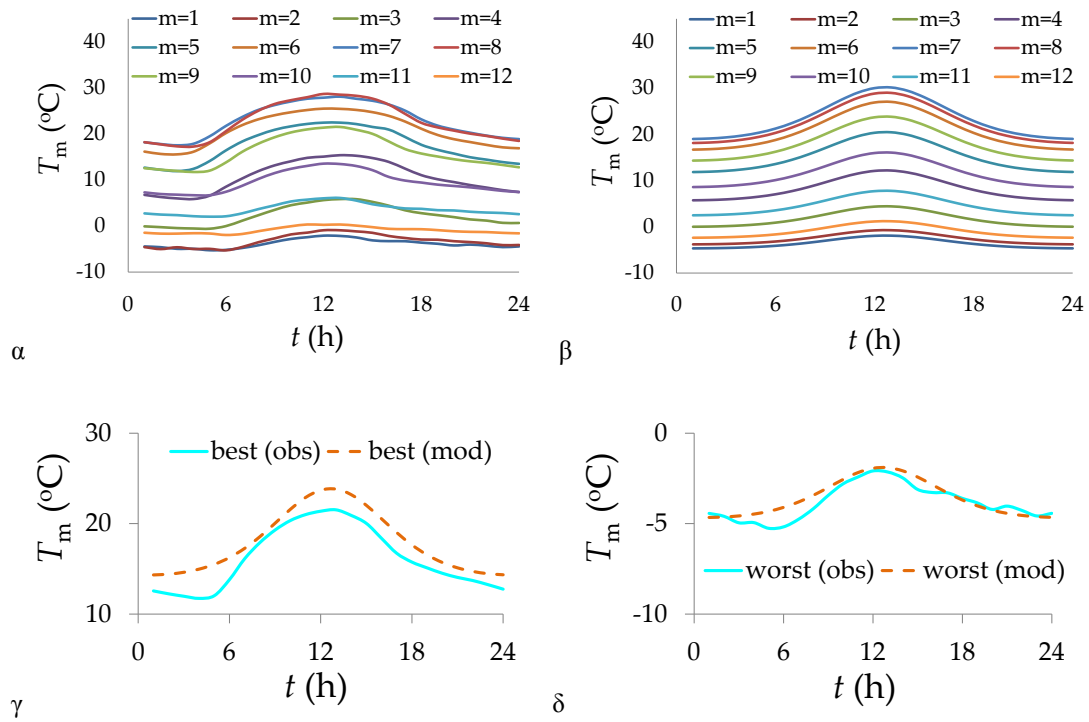
Διάγραμμα B17: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 7536 (Tennessee, USA).



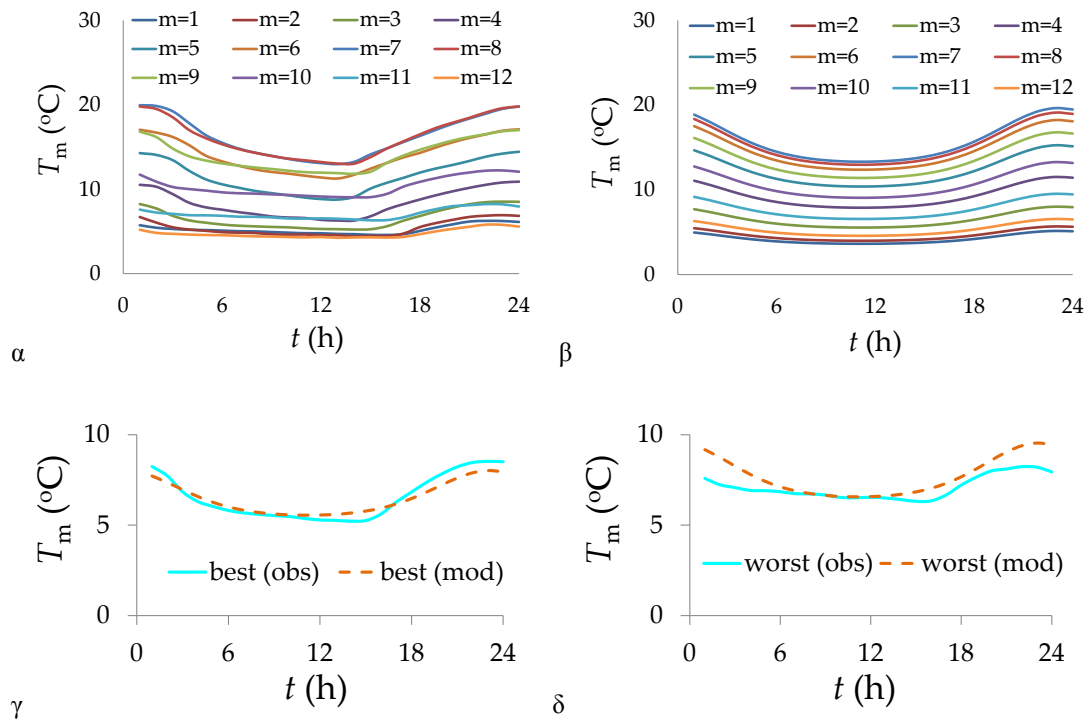
Διάγραμμα B18: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 2095 (Narita, Japan, Asia).



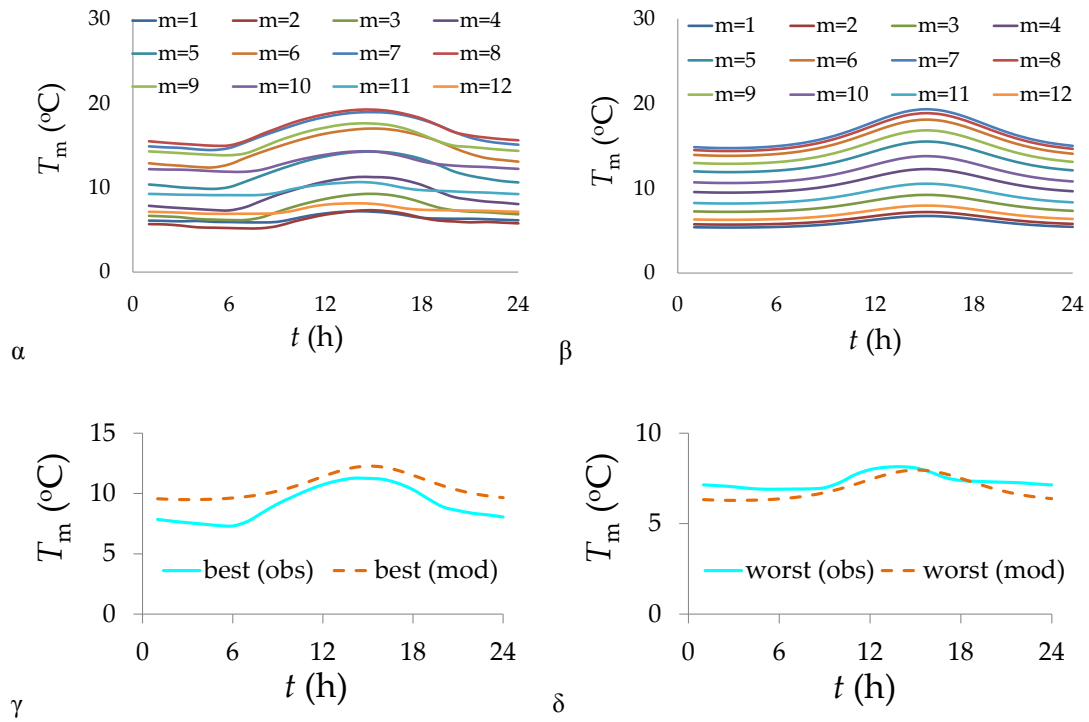
Διάγραμμα B19: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 3872 (Minnesota, USA).



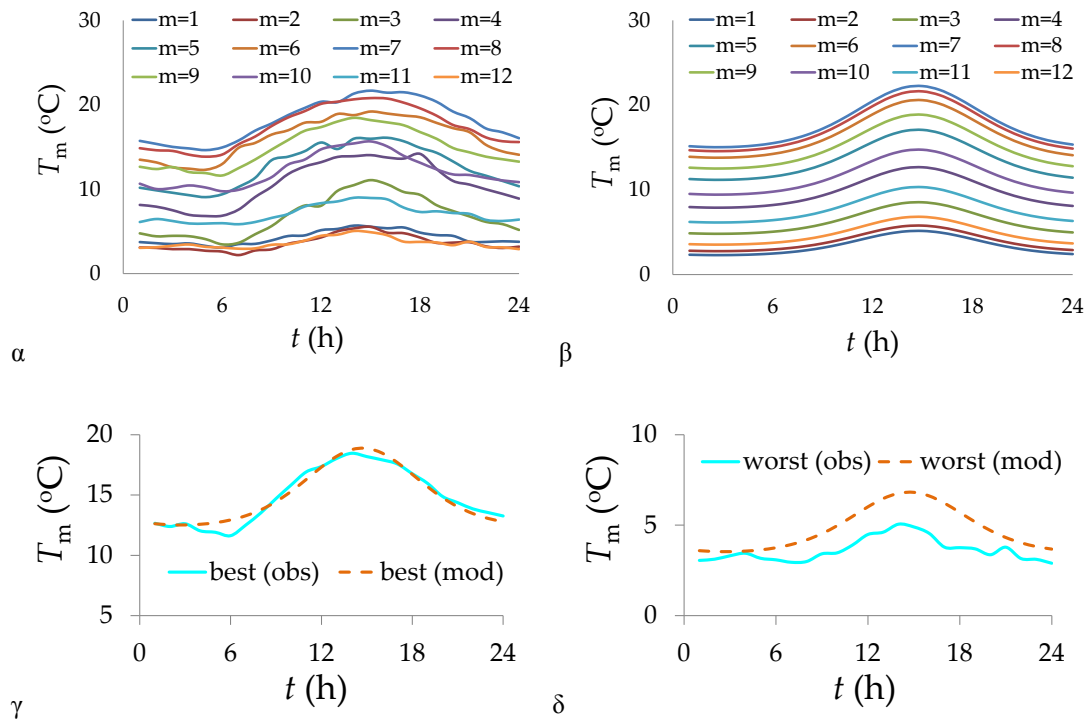
Διάγραμμα B20: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 1617 (Dniprodzerzhynsk, Ukraine, Europe).



Διάγραμμα B21: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 4008 (Washington, USA).

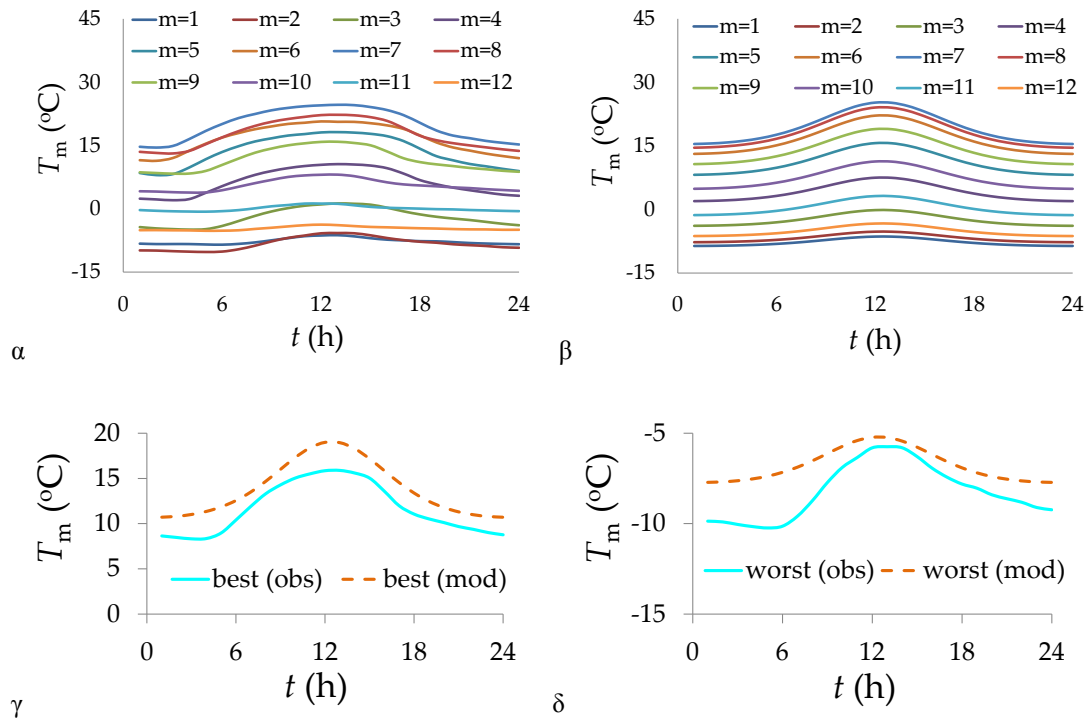


Διάγραμμα B22: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 634 (St Helier, France, Europe).

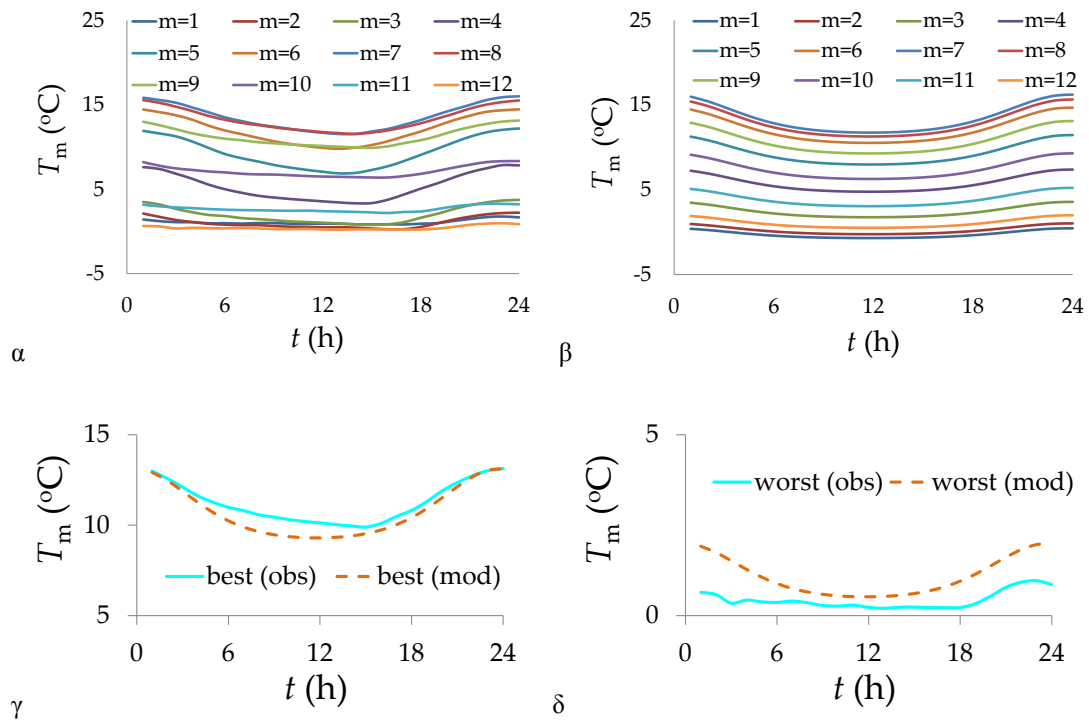


Διάγραμμα B23: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 798 (Mons, Belgium, Europe).

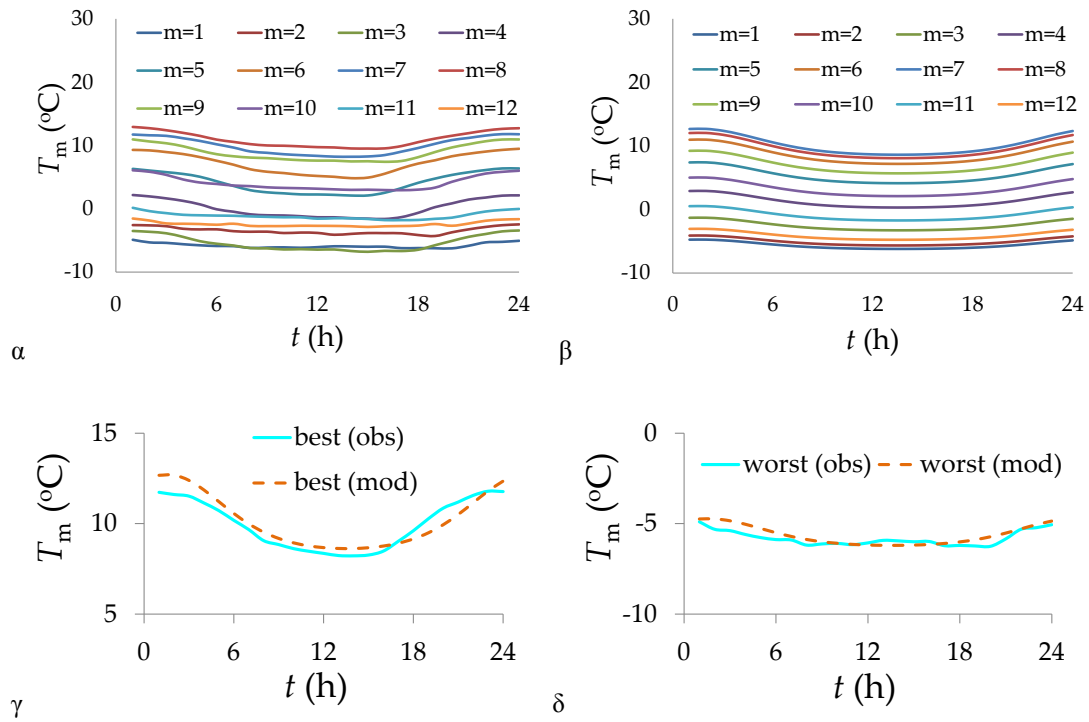




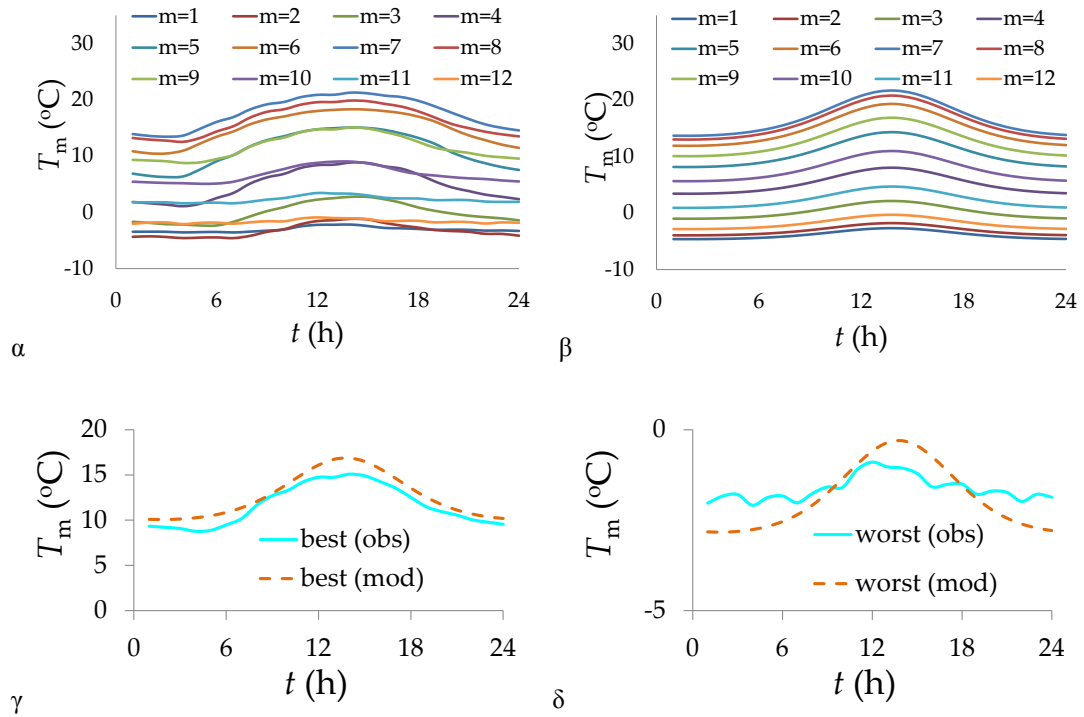
Διάγραμμα B24: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 1661 (Moscow, Russia, Europe).



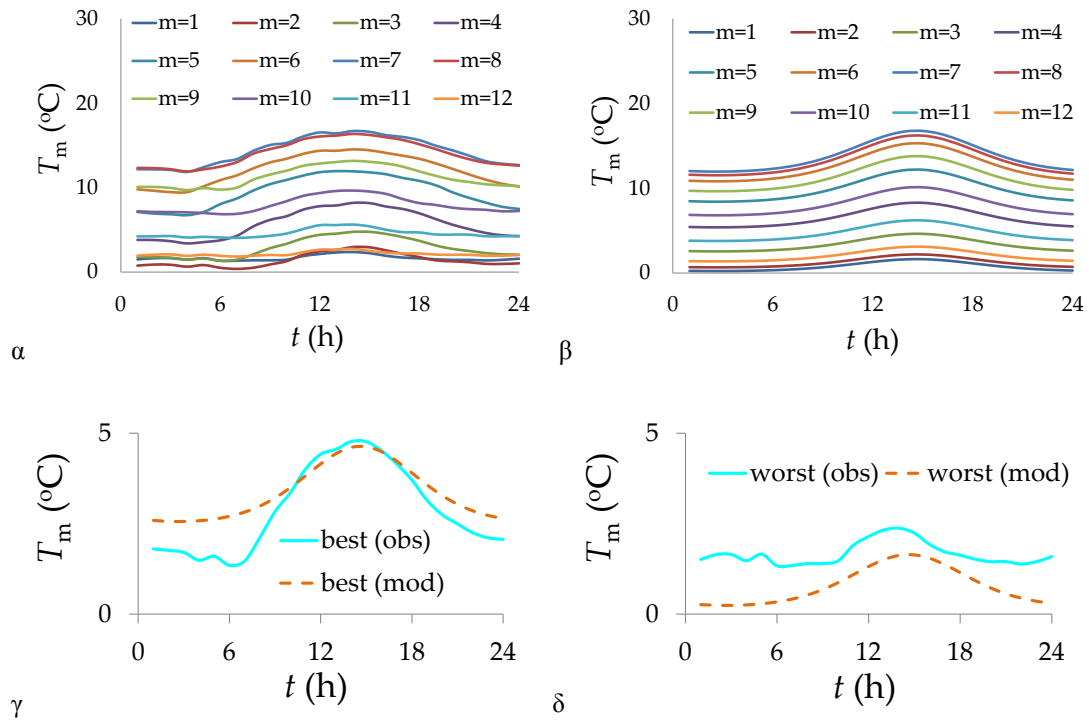
Διάγραμμα B25: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 2792 (Wrangell Island, Alaska).



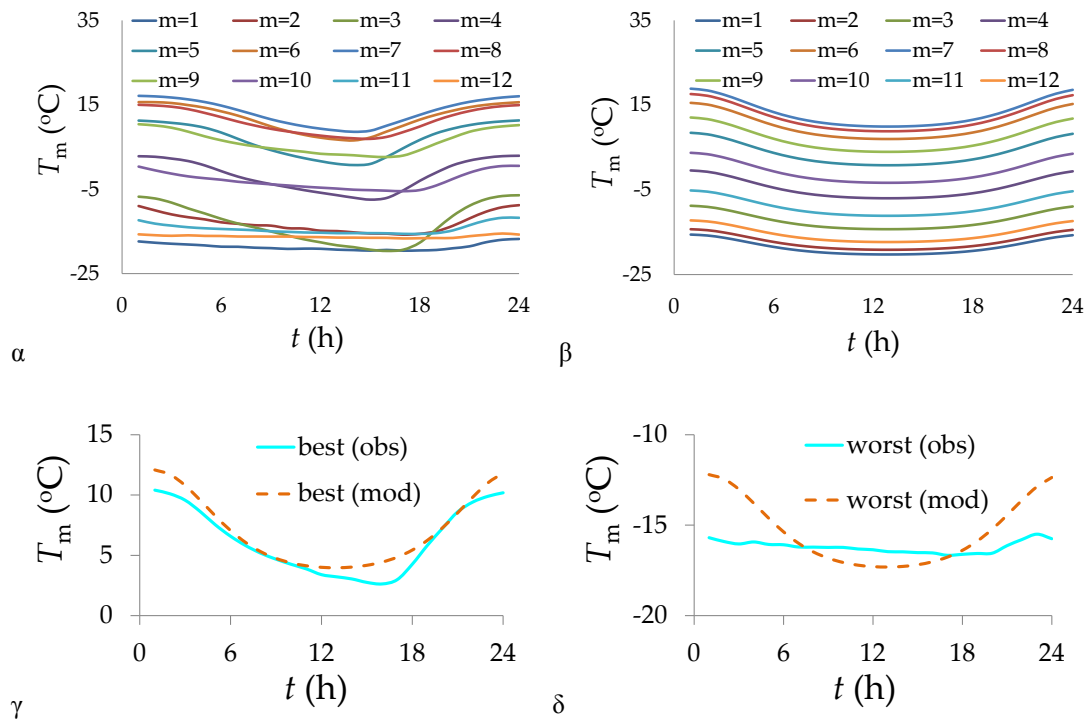
Διάγραμμα B26: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 2772 (Port Heiden, Alaska).



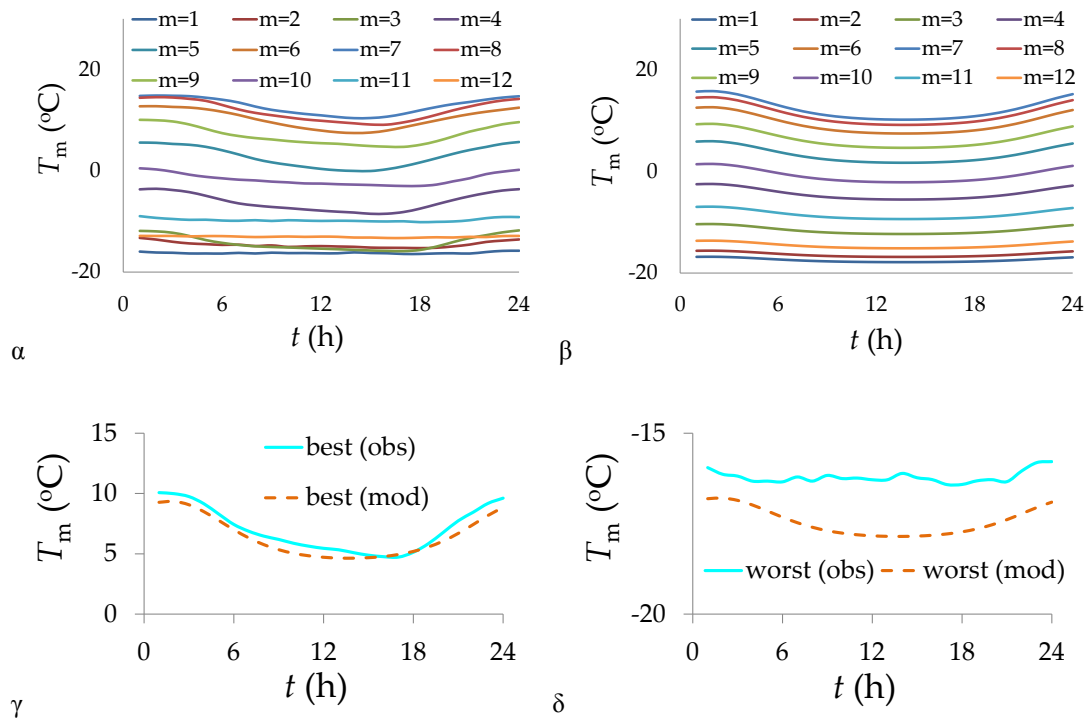
Διάγραμμα B27: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 243 (Uppsala, Sweden, Europe).



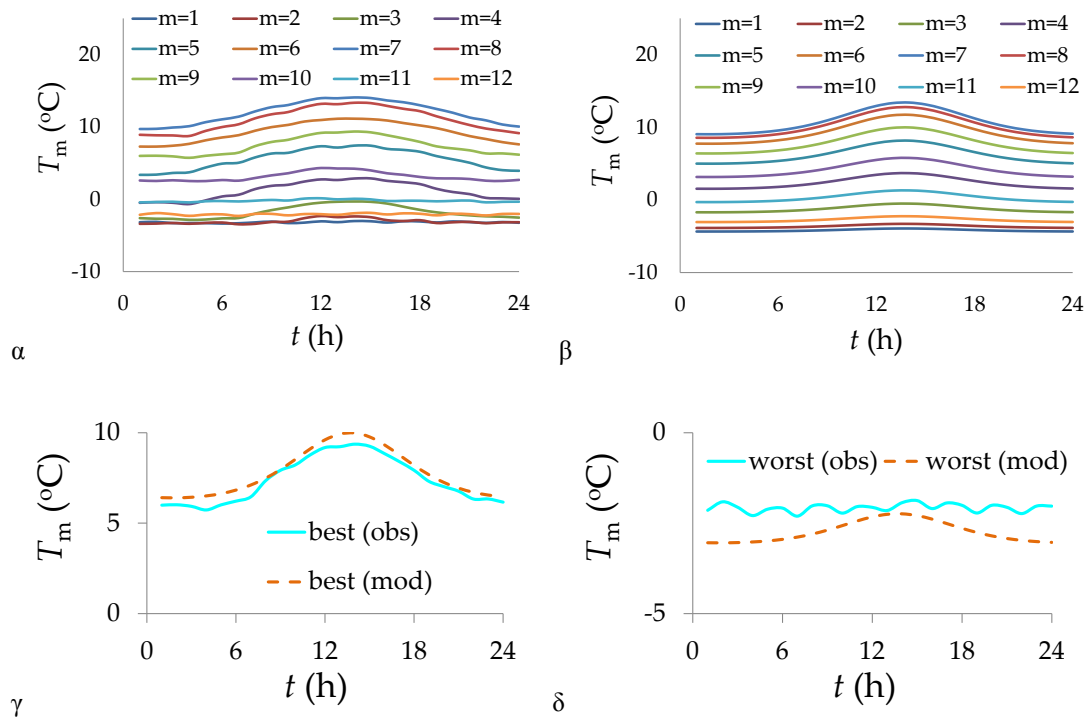
Διάγραμμα B28: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 100 (Bergen, Norway, Europe).



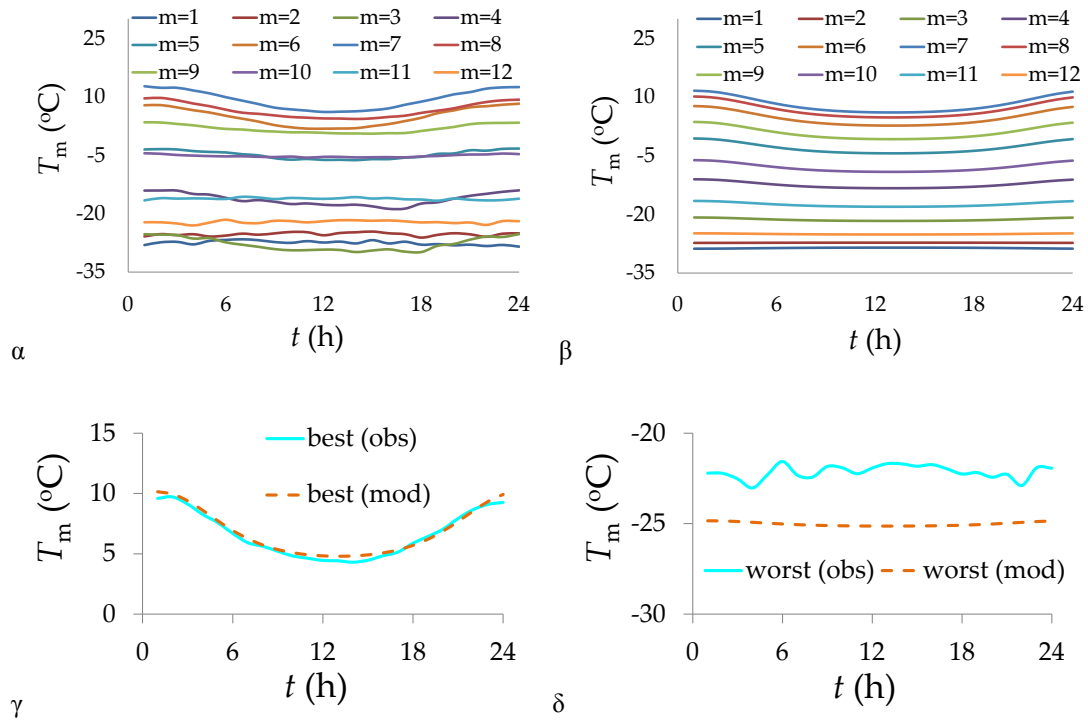
Διάγραμμα B29: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 2738 (McKinley Park, Alaska).



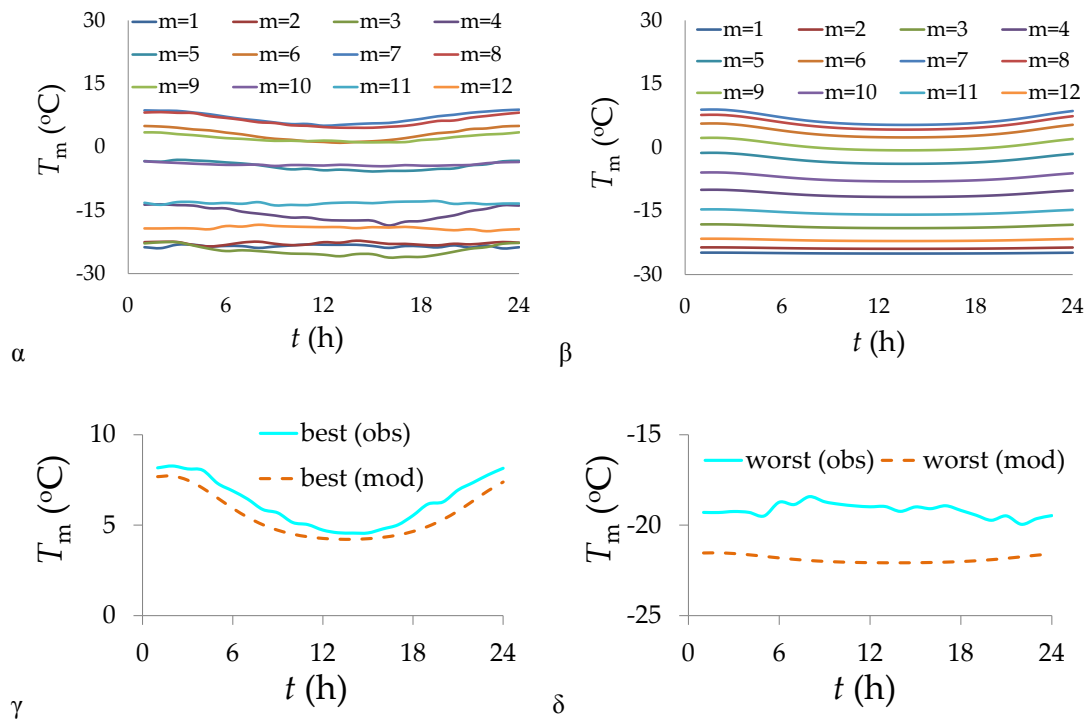
Διάγραμμα B30: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 2720 (Koyuk, Alaska).



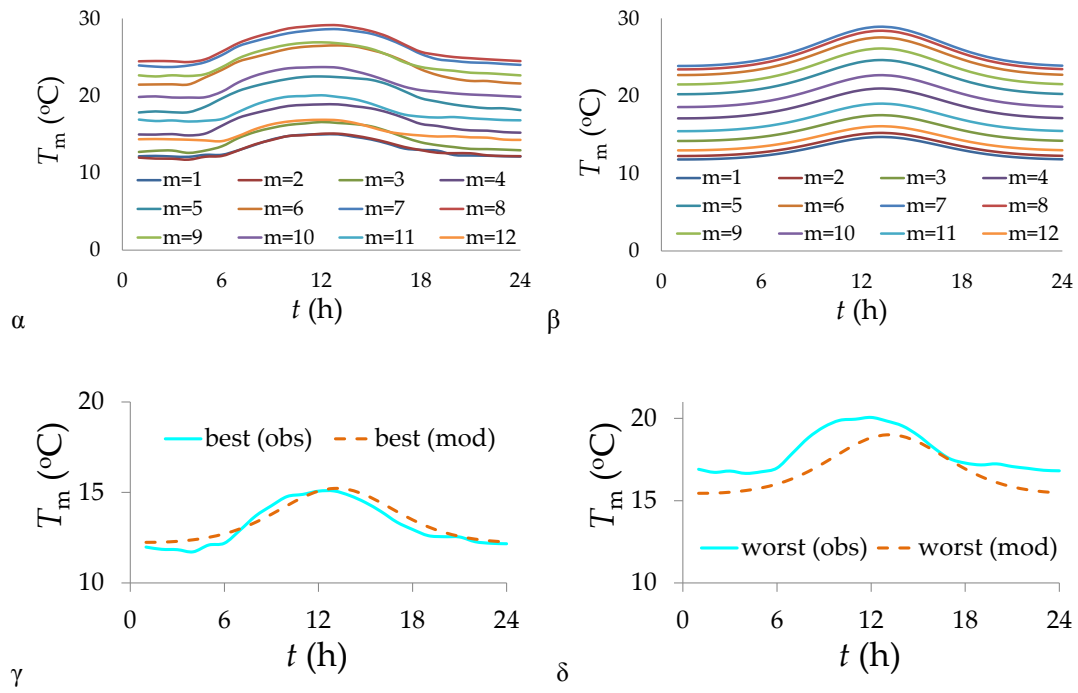
Διάγραμμα B31: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 6 (Tromso, Norway, Europe).



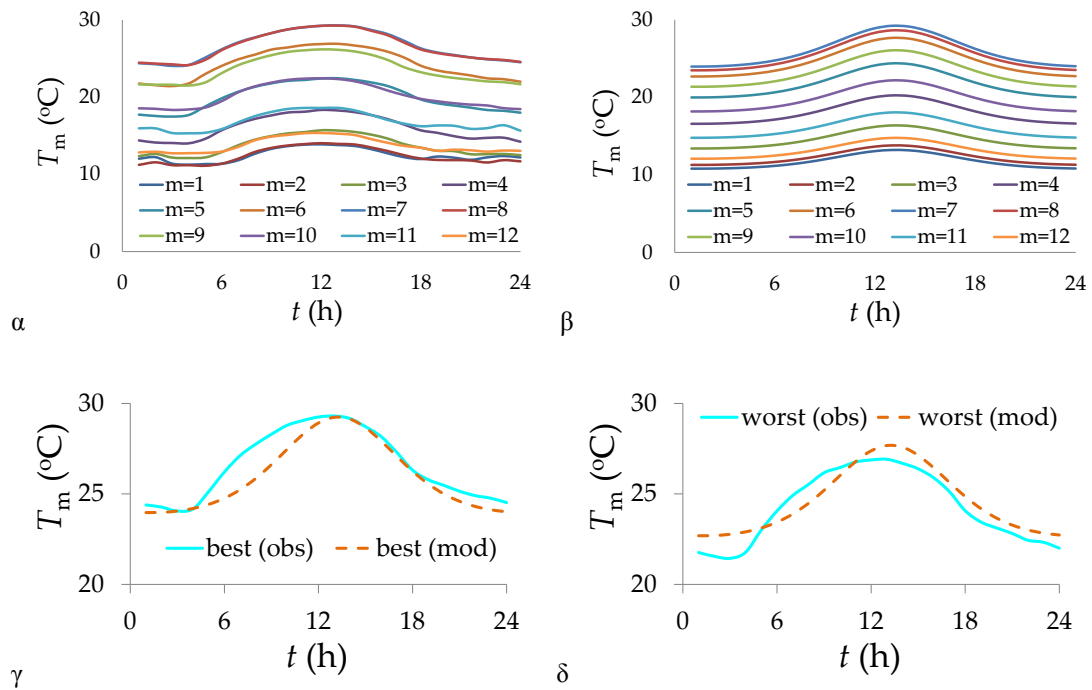
Διάγραμμα B32: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 2784 (Nuiqsut, Alaska).



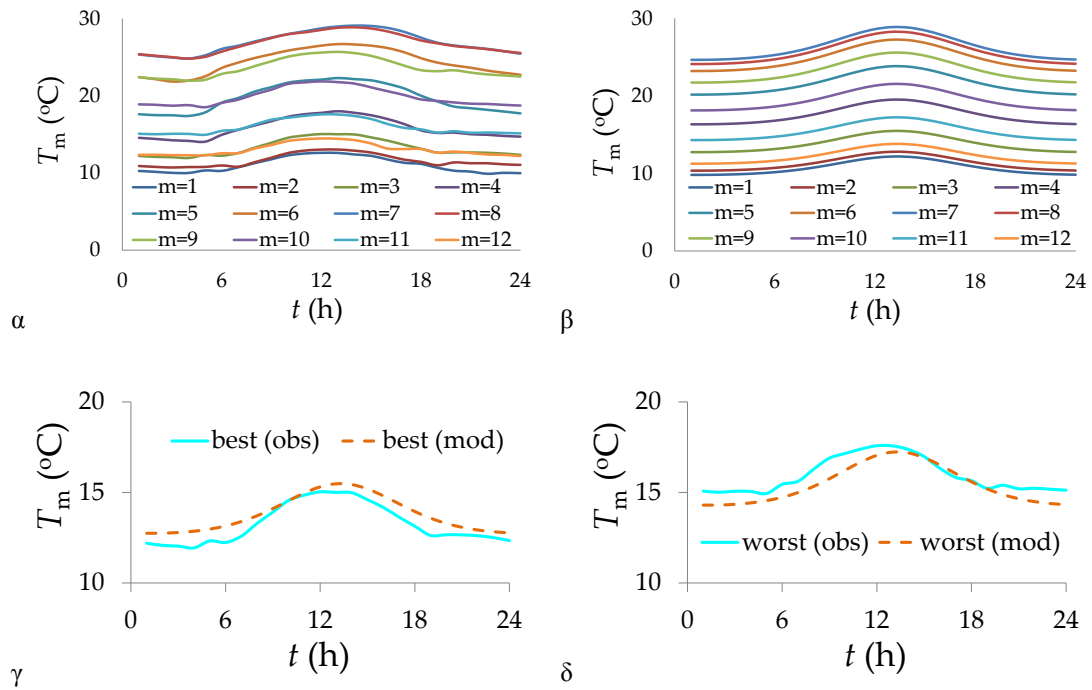
Διάγραμμα B33: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας, στο σταθμό 2682 (Wainwright, Alaska).



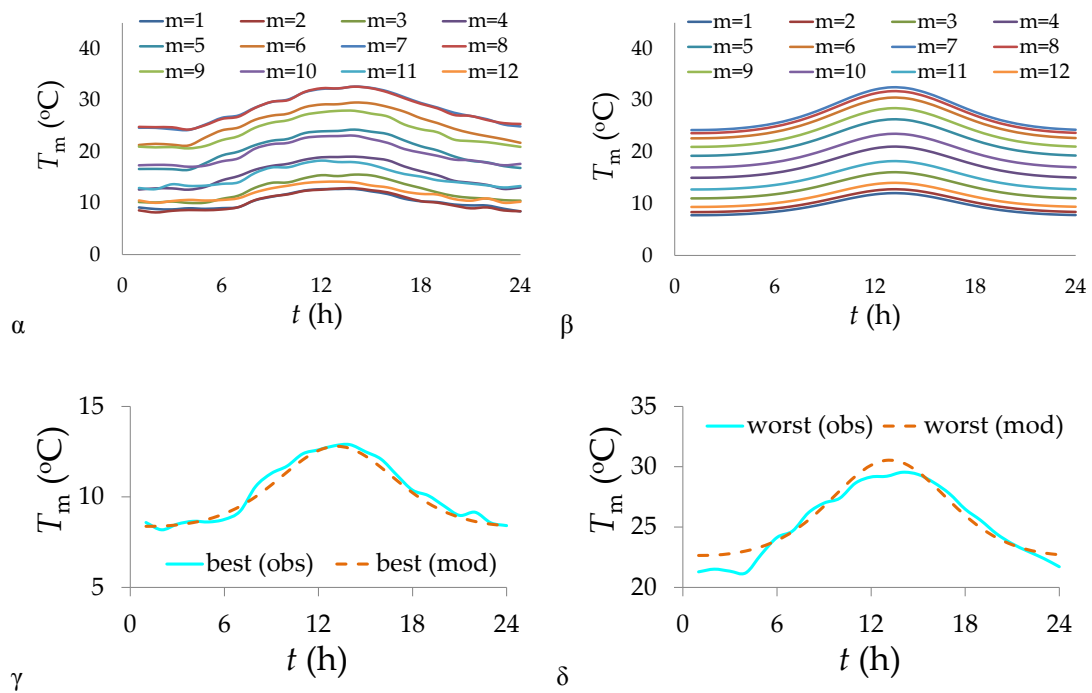
Διάγραμμα B34: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας (Κάρπαθος).



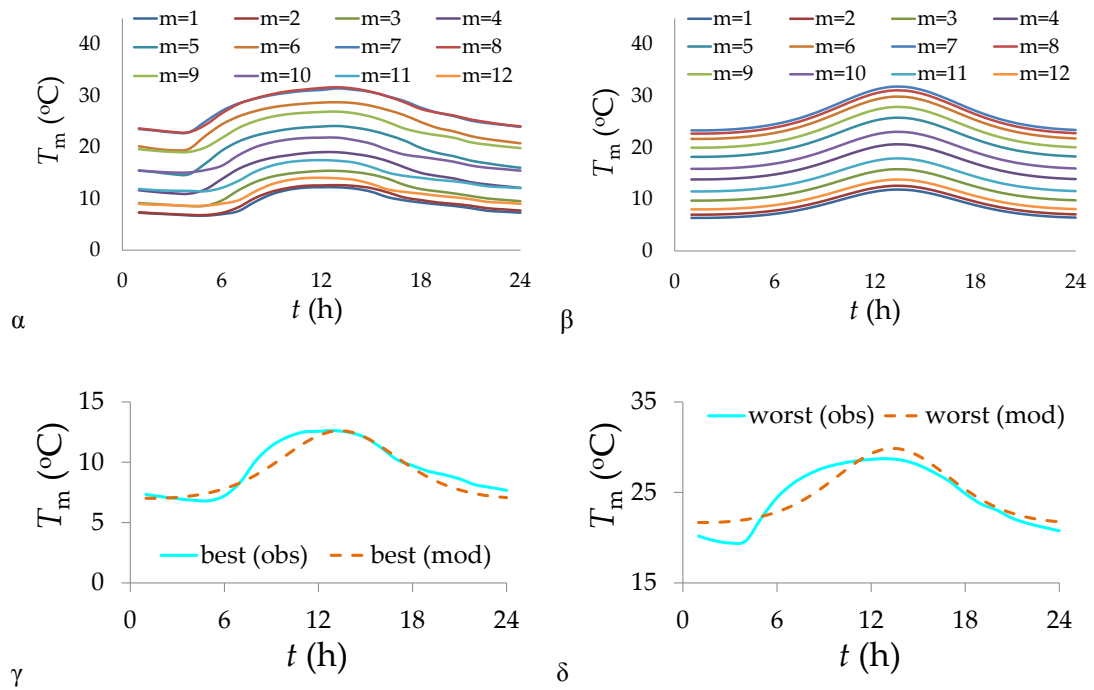
Διάγραμμα B35: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας (Σαντορίνη).



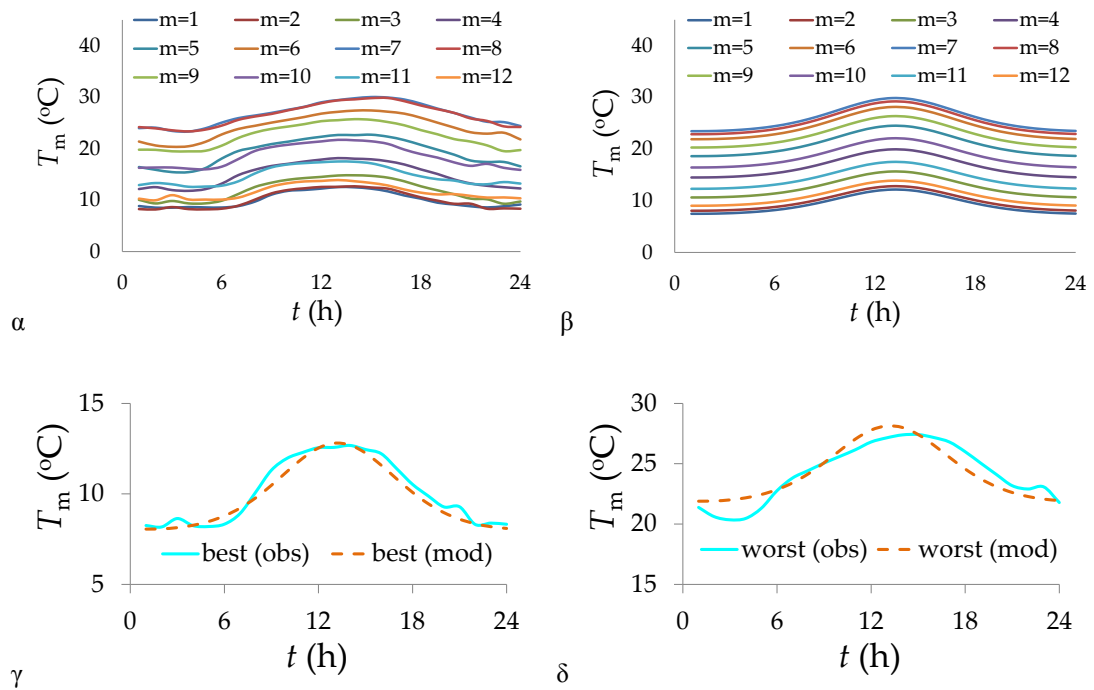
Διάγραμμα B36: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας (Σύρος).



Διάγραμμα B37: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας (Σάμος).

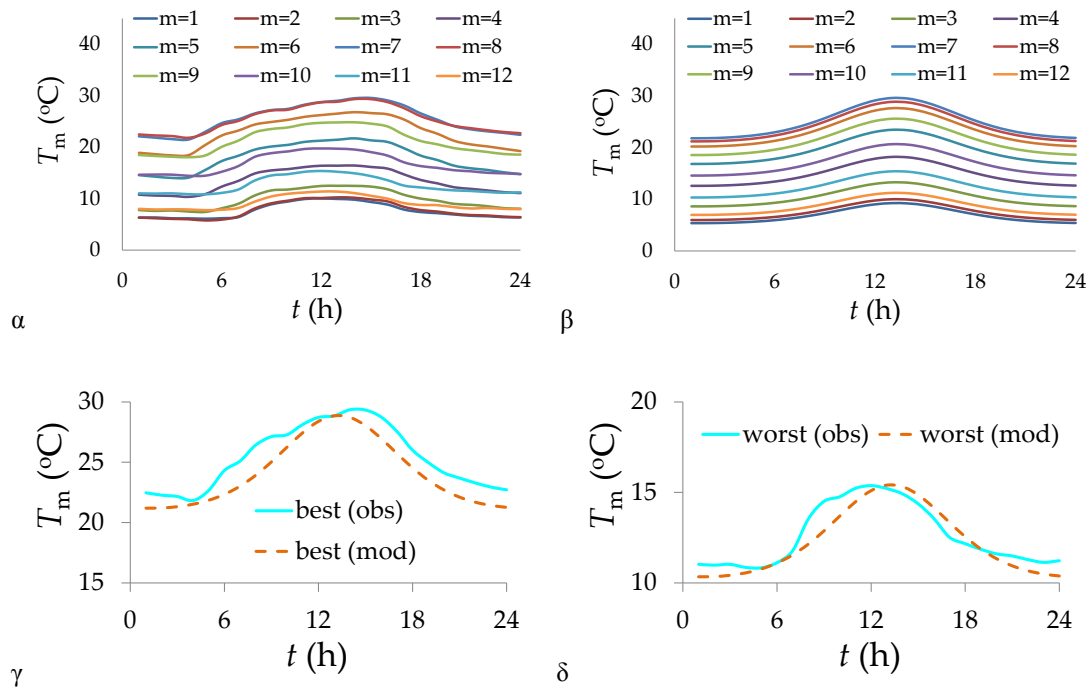


Διάγραμμα B38: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας (Ελ. Βενιζέλος).

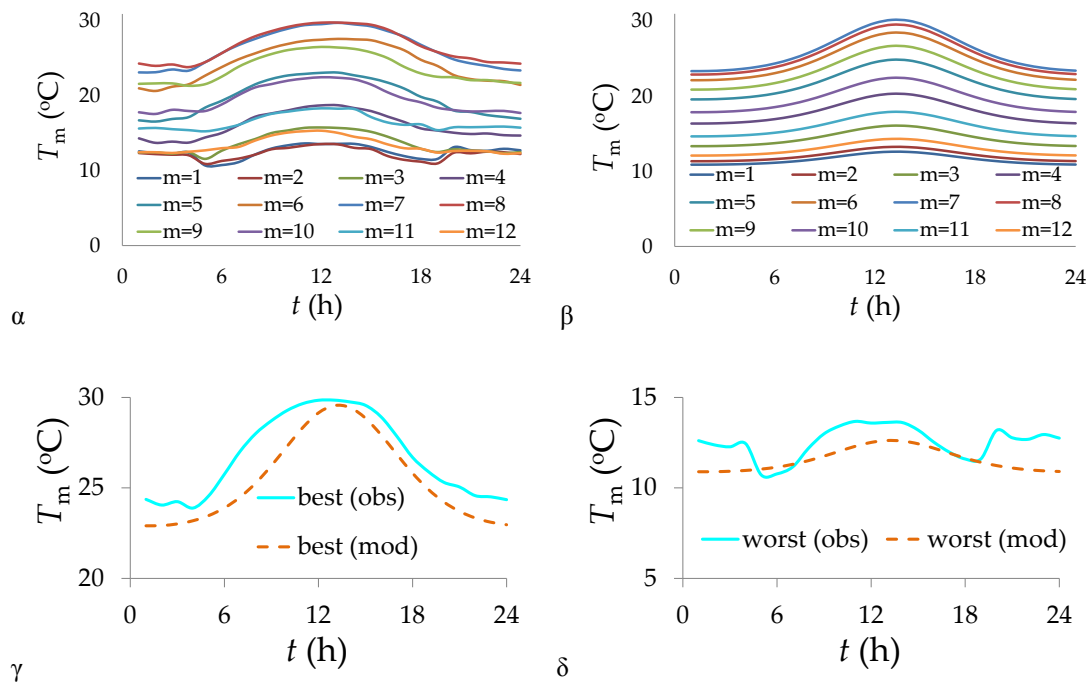


Διάγραμμα B39: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας (Χίος).

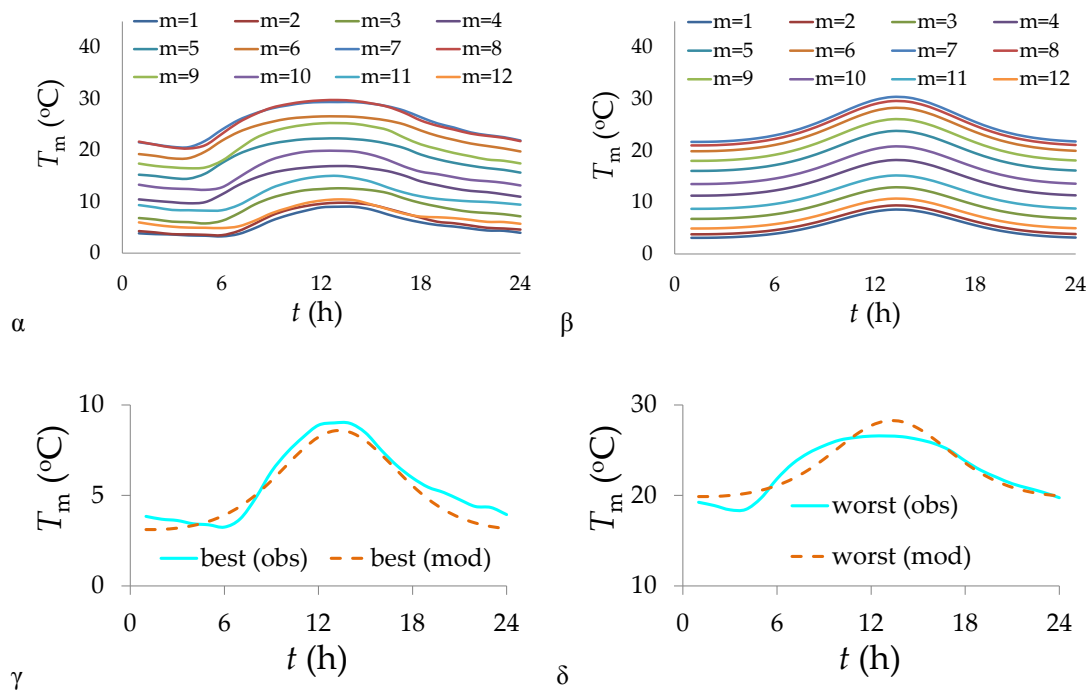




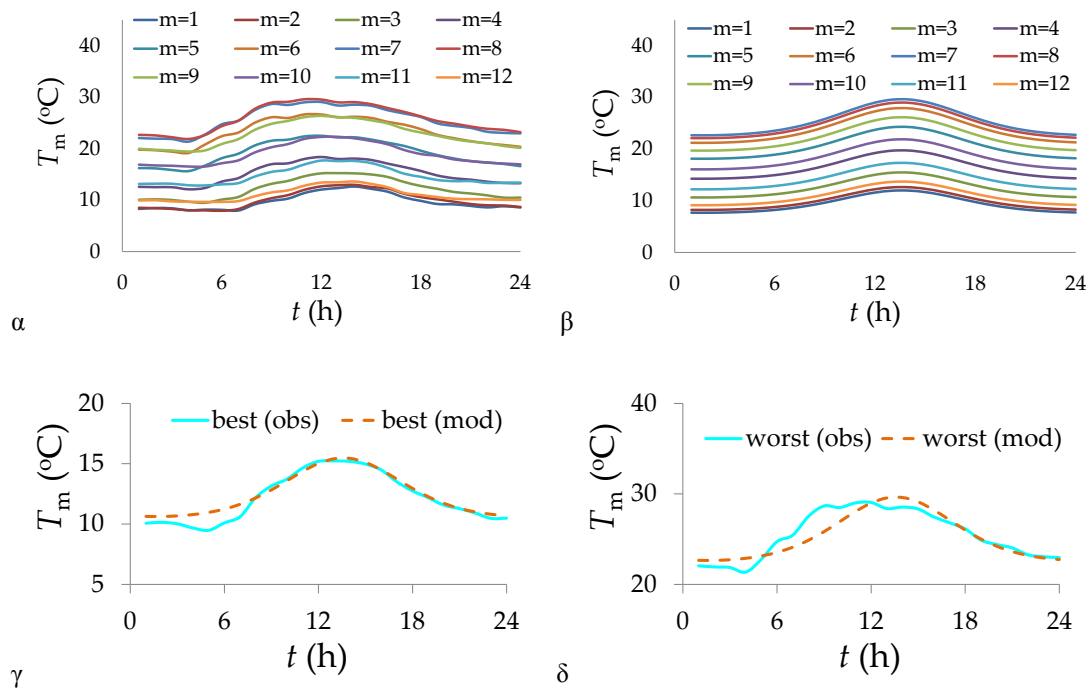
Διάγραμμα B40: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας (Λήμνος).



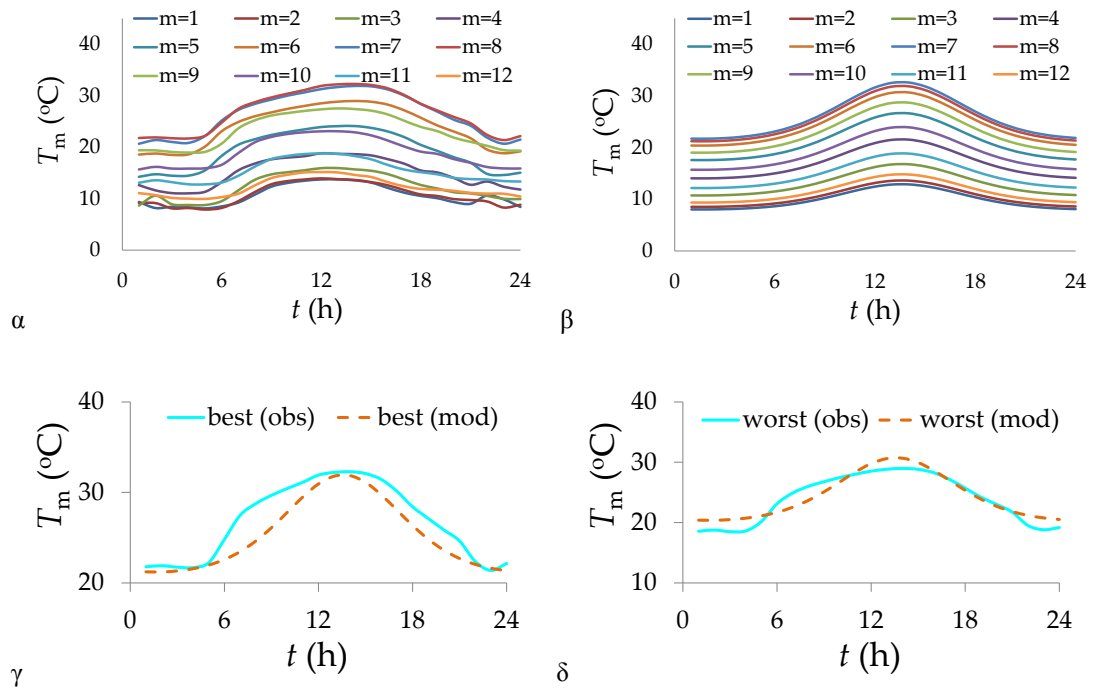
Διάγραμμα B41: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας (Πάρος).



Διάγραμμα B42: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας (Καβάλα).



Διάγραμμα B43: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας (Μεγανήσι).



Διάγραμμα B44: (α) παρατηρημένες τιμές (β) μοντέλο (γ) καλύτερος μήνας και (δ) χειρότερος μήνας (Ζάκυνθος).

## 10 Παράρτημα Γ. Προκαταρκτική έρευνα

Στο παράρτημα αυτό αναφέρονται συνοπτικά οι εκδοχές που διερευνήθηκαν στην αρχή της μελέτης σε 33 από τους καλύτερους σταθμούς παγκοσμίως. Τονίζονται επίσης και οι λόγοι απόρριψής τους από τη συνέχεια της μελέτης.

### 10.1 Εκδοχή Α

$$\mu_c = \left( \left( a_1 + a_2 \cos \left( 2\pi \frac{t_m}{T_m} \right) \right) \exp \left( \cos \left( 2\pi \frac{(t_h - a_h)}{T_h} \right) \right) + a_4 \right) \mu \quad (\Gamma.1)$$

Αρχικά εξετάστηκε το μοντέλο των Dimitriadis and Koutsoyiannis, 2015, μόνο που αντί για τη μέση τιμή της ανέλιξης, ως  $\mu$  θεωρήθηκε η μέση τιμή του κάθε μήνα. Τα αποτελέσματα ήταν καλά, όμως η εκδοχή απορρίφθηκε για 2 λόγους:

- Οι παράμετροι είναι πάρα πολλές, αφού για την εφαρμογή απαιτείται να γνωρίζουμε τις μέσες τιμές όλων των μηνών.
- Ο συντελεστής  $a_2$  δεν επιτελεί τη λειτουργία του που είναι να υποδεικνύει τη μηνιαία διακύμανση. Αντιθέτως αυτό γίνεται από τον όρο  $\mu$  που είναι μεταβλητός. Έτσι πολλές φορές προκύπτει η τιμή του  $a_2$  κοντά στο μηδέν.

### 10.2 Εκδοχή Β

Εφαρμόστηκε η ίδια εκδοχή, με σωστό πλέον τον όρο  $\mu$ . Η εκδοχή απορρίφθηκε για τον εξής λόγο:

- Δεν υπάρχει ο συντελεστής φάσης μηνιαίας αιχμής. Δηλαδή θεωρείται παντού μήνας αιχμής ο Δεκέμβριος. Στους σταθμούς που ο μήνας αιχμής είναι μακριά από το Δεκέμβριο ή τον Ιούνιο (πχ Μάρτιος), η ελαχιστοποίηση σφαλμάτων απαιτεί  $a_2 \approx 0$ . Έτσι, οι μηνιαίες καμπύλες ταυτίζονται, υποεκτιμώνται οι μισοί μήνες και υπερεκτιμώνται οι άλλοι μισοί. Το σφάλμα συνεπώς είναι μεγάλο.

### 10.3 Εκδοχή Γ

Εξετάστηκε στη συνέχεια μία γενικευμένη εκδοχή με πολλές παραμέτρους (9), ώστε να συμπεράνουμε ποιες από όλες είναι περιττές. Η εκδοχή περιγράφεται από τους Dimitriadis et al (2015):

$$\mu_c(t) = A(t)e^{-\cos(2\pi(t+B(t))/24)} + C(t)/\mu_h$$

$$A(t) = a_A \cos\left(2\pi \frac{(t + b_A)}{12 * 24 * 30.5}\right) + c_A/\mu_h$$

$$B(t) = a_B \cos\left(2\pi \frac{(t + b_B)}{12 * 24 * 30.5}\right) + c_B/\mu_h$$

$$C(t) = a_C \cos\left(2\pi \frac{(t + b_C)}{12 * 24 * 30.5}\right) + c_C/\mu_h$$

Απορρίφθηκε για τον εξής λόγο:

- Οι παράμετροι είναι υπερβολικά πολλές. Εξ άλλου παρατηρήθηκε ότι σε όλους τους σταθμούς η ώρα αιχμής είναι ίδια για όλους τους μήνες, συνεπώς δε χρειάζεται να είναι μεταβλητός ο όρος  $B(t)$ .

### 10.4 Εκδοχή Δ

Θεωρώντας τον όρο  $B(t)$  ως σταθερά συναρτήσεως του χρόνου, προκύπτει η εκδοχή Δ με 7 παραμέτρους. Απορρίφθηκε για τον εξής λόγο:

- Οι συντελεστές  $b_A$  και  $b_C$  αναφέρονται στο μήνα αιχμής, κατά συνέπεια θα πρέπει να είναι ίσοι. Πράγματι, έτσι έδειξε η εφαρμογή του μοντέλου οπότε καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι αντικαθίστανται από μία κοινή παράμετρο.

Έτσι, προέκυψε το μοντέλο της εκδοχής 1, η οποία αναλύεται στο κεφάλαιο 3.1.1. Η εκδοχή 1 λοιπόν έχει 6 παραμέτρους αλλά επειδή οι  $a_4$  και  $a_m$  θεωρούνται ως σταθερές, οι παράμετροι είναι μόνο 4.

## 11 Παράρτημα Δ. Παρατηρήσεις excel, matlab

Ο επιλυτής του excel είναι χειρότερος από εκείνον του matlab. Αυτό διαπιστώθηκε από το παρακάτω πρόβλημα.

Πολλές φορές το excel έθετε πρωτίστως  $a_2 = 0$  ή  $a_3 = 0$  και στη συνέχεια έκανε προσαρμογή της καμπύλης με τις υπόλοιπες παραμέτρους. Το τοπικό ελάχιστο που έβρισκε ήταν αρκετά άσχημο. Αυτό ακυρώνει το πλεονέκτημα που έχει η εκδοχή 1 να παίρνει τη μορφή πολλών συχνά παρατηρημένων καμπύλων, χάρη στο συνδυασμό  $a_2, a_3$ . Τρόπος επίλυσης του προβλήματος δεν υπάρχει, καθώς είναι αδύνατον να γνωρίζουμε εκ των προτέρων ποιες αρχικές συνθήκες πρέπει να δώσουμε στους 2 αυτούς συντελεστές. Το μόνο που μπορούμε να κάνουμε (σε περιβάλλον excel) είναι να δοκιμάσουμε πολλούς συνδυασμούς των δύο συντελεστών (και με αλλαγές προσήμων) και όταν παρατηρήσουμε ότι η μορφή των καμπύλων είναι αποδεκτή τότε να ξαναγίνει προσαρμογή με αρχικές συνθήκες αυτές που τέθηκαν στην τελευταία δοκιμή.

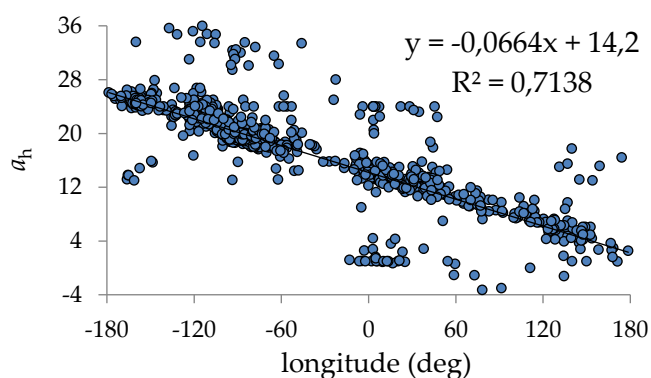
Ο επιλυτής MATLAB δεν έχει τέτοιο πρόβλημα, όμως είναι επίσης πολύ ευαίσθητος στις αρχικές συνθήκες, κυρίως όσον αφορά στην ώρα και το μήνα αιχμής. Η αβεβαιότητα στο μήνα αιχμής του ανέμου (σε αντίθεση με της θερμοκρασίας), καθιστά προτιμότερο να γίνει πρώτα εύρεση του μήνα αιχμής. Αυτό γίνεται με το solver της matlab από τη σχέση:

$$\mu_m = \left(1 + b_2 \cos\left(2\pi \frac{(t_m - b_m)}{T_m}\right)\right) \mu \quad (\Delta.1)$$

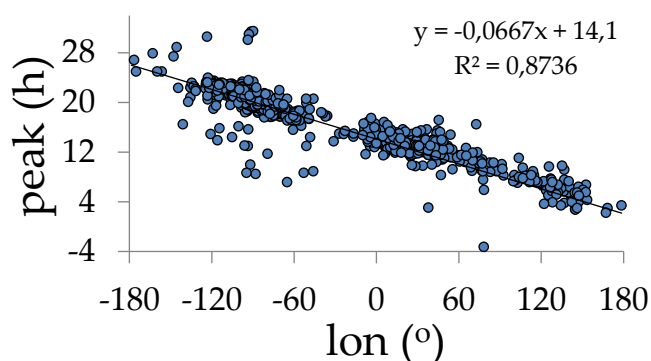
Έτσι, λαμβάνουμε το συντελεστή:  $\alpha_m = b_m$  (αν  $b_2 < 0$ , τότε  $\alpha_m = 6 - b_m$ ). Έπειτα θεωρείται ως σταθερά στην κανονική επίλυση ολόκληρου του μοντέλου, έτσι ώστε να αποφευχθούν τα σφάλματα που περιγράφηκαν.

Η διαδικασία αυτή γίνεται μόνο για το μήνα αιχμής ανέμου. Για τις υπόλοιπες 3 περιπτώσεις (μήνας αιχμής θερμοκρασίας και ώρα αιχμής ανέμου και θερμοκρασίας) κάτι τέτοιο δε χρειάζεται. Αυτό διότι έχουμε θέσει τις αιχμές αυτές ως σταθερές και ακριβέστερα συναρτήσει του γεωγραφικού μήκους.

Όσον αφορά στην ωριαία αιχμή, θα μπορούσε να πει κανείς ότι αυτή η θεώρηση έχει ένα μικρό σφάλμα λόγω των μικρών αποκλίσεων από την ευθεία ελαχίστων τετραγώνων. Δηλαδή η ελαφρώς διαφορετική πραγματική αιχμή επηρεάζει λίγο την απόδοση του μοντέλου. Όμως τα αποτελέσματα δείχνουν το αντίθετο: εάν δε θεωρήσουμε σταθερή την ώρα αιχμής τότε το μοντέλο πέφτει έξω σε πολλές περιπτώσεις. Για παράδειγμα στο Σχήμα Δ1 παρατηρούμε ότι η ώρα αιχμής συχνά διαφέρει κατά 12 h από την ευθεία της γραμμικής παλινδρόμησης (παρατηρούνται δύο νοητές γραμμές παράλληλες και απέχουσες 12 h από τη σωστή). Για αυτό φτάνει οι αρχικές συνθήκες οι οποίες είναι αδύνατον να αυτοματοποιηθούν με απόλυτη ακρίβεια για όλους τους σταθμούς παγκοσμίως, με αποτέλεσμα σε πολλούς σταθμούς η αιχμή να είναι το ελάχιστο σημείο. Έτσι, μετά την ανακριβή εφαρμογή του μοντέλου έχουμε συσχέτιση γραμμικής παλινδρόμησης των αιχμών συναρτήσει του γεωγραφικού μήκους ίση με  $R^2=0,71$ , ενώ οι παρατηρήσεις από μόνες τους υποδεικνύουν μία συσχέτιση πολύ μεγαλύτερη,  $R^2=0,87$  (Σχήμα Δ2).



Σχήμα Δ1. Ώρα αιχμής από την ανακριβή εφαρμογή μοντέλου.



Σχήμα Δ1. Εκτίμηση ώρας αιχμής από τις παρατηρήσεις (ίδιο με το Σχήμα 2.19α).