

Π. Θ. Νάστος,¹ Κ. Μ. Φιλάνδρας,² Δ. Ι. Νικολάκης¹

¹Εργαστήριο Κλιματολογίας Γεωλογικού
Τμήματος Πανεπιστημίου Αθηνών

²Κέντρον Φυσικής της Ατμόσφαιρας και
Κλιματολογίας της Ακαδημίας Αθηνών

ΑΝΑΛΥΣΗ FOURIER ΤΩΝ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΒΟΙΩΤΙΑΣ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή επιχειρείται με την βοήθεια της Ανάλυσης Fourier να μελετηθούν οι αρμονικοί όροι, οι οποίοι εξηγούν το σύνολο της ετήσιας μεταβλητότητας των βροχοπτώσεων στην περιοχή της Βοιωτίας. Πιο συγκεκριμένα γίνεται ανάλυση των χρονοσειρών της βροχής των μετεωρολογικών σταθμών της Αλιάρτου, της Τανάγρας, της Λιβαδειάς, της Αράχοβας, της Αμφισσας, της Ιτέας, του Λιδωρικίου, της Χαλκίδας, της Λαμίας, της Ελευσίνας και του Φράγματος Μαραθώνα. Τα κλιματικά στοιχεία αφορούν μηνιαίες τιμές της περιόδου 1960 -1990.

Η μεταβολή της βροχόπτωσης μέσα στο έτος περιγράφεται καλά με δύο αρμονικούς όρους, που εξηγούν περίπου το 90% της ολικής μεταβλητότητας. Με τη βοήθεια των μαθηματικών μοντέλων που προέκυψαν, υπολογίζεται ο χρόνος που εμφανίζεται το μέγιστο της βροχόπτωσης μέσα στο έτος για κάθε ένα εκ των δύο αρμονικών σε κάθε ένα από τους προαναφερθέντες σταθμούς. Τέλος, παρουσιάζεται η χωρική κατανομή των χρόνων εμφάνισης των μεγίστων της βροχόπτωσης στην περιοχή της Βοιωτίας.

ABSTRACT

In the present study, the harmonic components which explain the total variability of the annual precipitation at the Boetian area are examined using Fourier Analysis. Specifically, we analyze the precipitation time series of the following meteorological stations: Aliartos, Tanagra, Levadia,

Araxova, Amfissa, Itea, Lidoriki, Chalkida, Lamia and Marathon Fence. The climatic data concern of monthly data of the period 1960 -1990.

The annual variation of precipitation is well described with two harmonic components, which explain approximately 90% of the total variability. Applying Fourier Analysis, mathematical models were constructed and using these models the dates of the occurrence of the maximum of precipitation were evaluated, for every harmonic term and for every meteorological station. Finally the spatial distribution of the dates of maximum precipitation at the Boetian area is presented.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι διακυμάνσεις και οι τάσεις της βροχής σε ελληνικούς σταθμούς έχουν μελετηθεί από διάφορους ερευνητές (Καραπιπέρης και Κατσούλης 1969, Maheras and Kolyva-Mahera, 1990, Flocas et al., 1990, Repapis et al., 1993, Nastos, 1993, Νικολάκης 1985, Κανδύλης 1988). Η ετήσια πορεία της βροχόπτωσης μπορεί να μελετηθεί ικανοποιητικά με την εφαρμογή της ανάλυσης Fourier, που είναι μία ευρέως διαδεδομένη μέθοδος κι έχει χρησιμοποιηθεί από πολλούς ερευνητές (Μπλούτσος 1993, Φωτιάδης και άλλοι 1996, Νάστος και Φιλάνδρας, 2000) για την περιγραφή περιοδικών φαινομένων, όπως στην εξεταζόμενη περίπτωση είναι ο κύκλος της ετήσιας μεταβλητότητας της βροχόπτωσης. Η εφαρμογή της ανάλυσης Fourier δίνει μαθηματικά μοντέλα, που αποτελούν συνδυασμό τριγωνομετρικών συναρτήσεων ημιτόνων και συνημιτόνων. Χαρακτηριστικά μεγέθη των μοντέλων αυτών είναι το πλάτος των διαφόρων αρμονικών όρων, καθώς και οι αντίστοιχες φάσεις. Το πλάτος κάποιου αρμονικού όρου αποτελεί και την μέγιστη τιμή που μπορεί να λάβει η εξεταζόμενη μεταβλητή, που στην περίπτωση μας είναι η μέση μηνιαία βροχόπτωση. Η φάση του αρμονικού όρου έχει σημαντική αξία, διότι με την χρήση της μπορεί να προσδιοριστεί ο χρόνος εμφάνισης του μεγίστου της βροχόπτωσης με μεγάλη ακρίβεια, που δεν είναι δυνατό να υπολογιστεί από την γραφική παράσταση της ετήσιας μεταβλητότητας της βροχόπτωσης.

Για την αρμονική ανάλυση της ετήσιας μεταβλητότητας των βροχοπτώσεων στην περιοχή της Βοιωτίας χρησιμοποιώντας μέσες μηνιαίες τιμές, εφαρμόστηκε η παρακάτω σχέση, που είναι η πλέον κοινή για μετεωρολογικές και κλιματολογικές έρευνες (Congrad and Pollak 1950):

$$y = a_0 + a_1 \sin\left(\frac{2\pi}{12}t + \phi_1\right) + a_2 \sin\left(\frac{2(2\pi)}{12}t + \phi_2\right) + \dots + a_k \sin\left(\frac{k(2\pi)}{12}t + \phi_k\right) + \dots$$

όπου a_0 είναι ο αριθμητικός μέσος των μέσων μηνιαίων τιμών, a_1, a_2, \dots, a_k είναι τα πλάτη και $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_k$ είναι οι γωνίες φάσης των αντιστοιχών αρμονικών όρων με $k=1, 2, 3, \dots$

Μία άλλη έκφραση της ίδιας σχέσης είναι η ακόλουθη :

$$y = a_0 + \sum_{k=1}^n a_k \sin\left(\frac{2k\pi}{12}t + \phi_k\right)$$

Επειδή η ετήσια μεταβολή της βροχοπτώσης περιγράφεται πολύ καλά με δύο αρμονικούς όρους, οι οποίοι εξηγούν πάνω από το 90% της συνολικής μεταβλητότητας, η εφαρμογή της παραπάνω εξίσωσης έγινε για $k=2$. Στη συνέχεια υπολογίστηκε ο χρόνος εμφάνισης του μεγίστου της βροχοπτώσης σε κάθε ένα σταθμό, με την βοήθεια της ακόλουθης εξίσωσης:

$$t_{\max} = \left(\frac{\pi}{2} - \phi_k\right) \frac{12}{2k\pi}$$

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ

Στην εργασία αυτή με τη βοήθεια της ανάλυσης Fourier, εξετάζονται οι αρμονικοί όροι που εξηγούν το σύνολο της ετήσιας μεταβλητότητας των βροχοπτώσεων στη περιοχή της Βοιωτίας.

Τα κλιματικά στοιχεία αφορούν μέσες μηνιαίες τιμές βροχοπτώσης της περιόδου 1960-1990 για τους σταθμούς της Βοιωτίας (ΤΑΝΑΓΡΑΣ, ΑΛΙΑΡΤΟΥ, ΛΙΒΑΔΕΙΑΣ, ΑΡΑΧΟΒΑΣ) και τους περιφερειακούς σταθμούς (ΛΑΜΙΑΣ, ΛΙΔΩΡΙΚΙΟΥ, ΑΜΦΙΣΣΑΣ, ΙΤΕΑΣ, ΕΛΕΥΣΙΝΑΣ ΚΑΙ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΜΑΡΑΘΩΝΑ), όπως αυτοί παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.

Η ετήσια μεταβολή της βροχοπτώσης, όπως έδειξε η ανάλυση, περιγράφεται καλά με δύο αρμονικούς όρους, που εξηγούν πάνω από το 90% της συνολικής μεταβλητότητας. Στον Πίνακα I παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης Fourier στις μέσες μηνιαίες τιμές βροχοπτώσης των 11 μετεωρολογικών σταθμών, μαζί με τις γεωγραφικές συντε-

ταγμένες των σταθμών. Παρατηρούμε ότι ο πρώτος αρμονικός όρος ερμηνεύει περίπου το 90% της συνολικής μεταβλητότητας για το σύνολο σχεδόν των σταθμών (με εξαίρεση τους σταθμούς ΑΡΑΧΟΒΑΣ και ΛΑΜΙΑΣ).

Στο Σχήμα 2 παρουσιάζονται τα πλάτη του πρώτου και δεύτερου αρμονικού όρου, αντίστοιχα, για τους 11 μετεωρολογικούς σταθμούς του δικτύου. Είναι φανερό ότι τα μεγαλύτερα πλάτη για τον 1ο αρμονικό αντιστοιχούν στους σταθμούς της Άμφισσας (75.13 mm) και του Λιδωρικίου (72.39 mm) και ακολουθεί η Λιβαδειά (48.46 mm). Όσον αφορά τον δεύτερο αρμονικό, μεγάλα πλάτη εμφανίζουν το Λιδωρίκι (20.38 mm), η Άμφισσα (19.35 mm), η Αράχοβα (14.35 mm) και ακολουθεί η Ιτέα (11.86 mm). Όσον αφορά τώρα τη φυσική σημασία των δύο αρμονικών όρων, ο πρώτος αντιπροσωπεύει καλύτερα τις χειμερινές βροχοπτώσεις, που δίνουν και την μεγαλύτερη βαρύτητα στην ετήσια μεταβλητότητα, ενώ ο δεύτερος όρος εκφράζει τις καλοκαιρινές θερμικές καταγίδες, η συμβολή των οποίων στην ετήσια μεταβλητότητα είναι μικρή.

ΠΙΝΑΚΑΣ Ι

Γεωγραφικές συντεταγμένες των σταθμών (φ , λ) και αποτελέσματα της ανάλυσης Fourier, (α_1 , α_2 : τα πλάτη του πρώτου και δεύτερου αρμονικού αντίστοιχα και t_1 , t_2 : οι χρόνοι εμφάνισης μεγίστου του πρώτου και δεύτερου αρμονικού αντίστοιχα).

α/α	Σταθμός	φ	λ	α_1 (mm)	t_1 (ημέρα)	%	α_2 (mm)	t_2 (ημέρα)	%
1	ΛΑΜΙΑ	38.85	22.40	25.8	11/01	80.2	7.6	05/05	7.0
2	ΆΜΦΙΣΣΑ	38.53	22.38	75.1	31/12	91.3	19.4	11/06	6.1
3	ΛΙΔΩΡΙΚΙ	38.52	22.13	72.4	05/01	90.1	20.4	12/06	7.2
4	ΑΡΑΧΟΒΑ	38.48	22.58	35.3	02/01	75.9	15.3	17/05	14.4
5	ΧΑΛΚΙΔΑ	38.47	23.60	29.24	31/12	94.8	5.8	15/05	3.7
6	ΛΙΒΑΔΕΙΑ	38.43	22.87	48.5	03/01	87.2	6.4	13/06	1.5
7	ΙΤΕΑ	38.43	22.43	38.9	30/12	88.6	11.9	05/06	8.2
8	ΑΛΙΑΡΤΟΣ	38.38	23.12	37.4	06/01	87.6	7.3	26/04	3.3
9	ΤΑΚΑΓΓΡΑ	38.33	23.53	33.6	31/12	87.0	6.1	09/06	2.9
10	ΜΑΡΑΘΩΝΙΑΣ	38.17	23.90	40.8	01/01	89.2	7.5	31/05	3.0
11	ΕΛΕΥΣΙΝΑ	38.07	23.55	28.8	30/12	87.8	8.5	19/05	7.3

Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται η χωρική κατανομή του πλάτους (σε mm) του πρώτου αρμονικού όρου. Τα μεγαλύτερα ύψη βροχής παρατηρούνται στα δυτικά ορεινά όρια της Βοιωτίας με εξαίρεση κάπως την Λιβαδειά (50 mm), σε σχέση με την υπόλοιπη περιοχή της Κωπαΐδας. Η ίδια εικόνα όπως προηγουμένως εμφανίζεται και για τον δεύτερο αρμονικό (Σχήμα 4). Η Κωπαΐδα παρουσιάζει μικρές τιμές, ενώ στα δυτικά ορεινά εμφανίζονται μεγάλες τιμές λόγω των ανοιξιάτικων θερμικών καταιγίδων.

Αυτά βρίσκονται σε συμφωνία με τον Κανδύλη (1988), που έχει μελετήσει την κατανομή των βροχοπτώσεων στην Στερεά Ελλάδα. Πιο συγκεκριμένα το ύψος της βροχής, όσον αφορά την εποχική διανομή, αυξάνει από τα δυτικά παράλια της Στερεάς προς το εσωτερικό (ομβροπλευρά). Προχωρώντας ανατολικά η βροχή ελαττώνεται (ομβροσκιά), ενώ στην Εύβοια παρουσιάζεται μία αύξηση του ύψους της βροχής από τα παράλια του Ευβοϊκού (Χαλκίδα) προς τις ανατολικές περιοχές της νήσου. Η περιοχή της Αττικής εμφανίζεται ιδιαίτερα ξηρή όλες τις εποχές, κυρίως στα νότια των ορέων Γεράνεια, Πατέρας, Πάρνηθα, (Ελευσίνα) και Πεντέλη.

Η ετήσια μεταβολή του ύψους βροχής, όπως αυτή περιγράφεται από τον πρώτο αρμονικό όρο της ανάλυσης Fouquier, εμφανίζεται στο Σχήμα 5. Είναι φανερό ότι τα μεγαλύτερα ύψη βροχής παρουσιάζονται τους χειμερινούς μήνες. Δεν είναι δυνατόν, όμως, να προσδιοριστεί με ακρίβεια ο χρόνος εμφάνισης του μεγίστου της βροχής. Με χρήση, όμως, των φάσεων των πρώτων αρμονικών όρων και την επίλυση μιας τριγωνομετρικής εξίσωσης υπολογίζεται ο χρόνος εμφάνισης του μεγίστου των βροχοπτώσεων με ακρίβεια ημέρας.

Η χωρική κατανομή του χρόνου εμφάνισης του μεγίστου του ύψους της βροχόπτωσης για τον πρώτο αρμονικό όρο παρουσιάζεται στο Σχήμα 6. Οι ημερομηνίες εμφάνισης των μεγίστων της βροχόπτωσης παρουσιάζουν βαθμίδα αύξησης (31 Δεκεμβρίου-10 Ιανουαρίου) από νότο προς βορρά και από δυμάς προς ανατολάς. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα μέγιστα σημειώνονται πρώτα στα παράκτια και ακολουθεί η ενδοχώρα. Η αντίθετη σχεδόν εικόνα παρουσιάζεται για τον δεύτερο αρμονικό (Σχήμα 7). Πιο συγκεκριμένα τα ανοιξιάτικα μέγιστα εμφανίζονται νωρίτερα στα κεντρικά ορεινά της ενδοχώρας (10 Μαΐου) και αργότερα (9 Ιουνίου) στα νοτιότερα τμήματα. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι ο κάμπος της Κωπαΐδας (Αλιάρτος) εμφανίζει πολύ νωρίς το μέγι-

στο (26 Απριλίου) σε σχέση με τις γειτονικές περιοχές, όπως η Λιβαδειά (13 Ιουνίου) και η Τανάγρα (9 Ιουνίου).

Για την καλύτερη παρουσίαση της μεταβλητότητας των βροχοπτώσεων για κάθε ένα εκ των σταθμών του χρησιμοποιηθέντος δικτύου, χρησιμοποιήθηκε η τεχνική των διαγραμμάτων Box & Whiskers για τις μέσες μηνιαίες τιμές των υψών της βροχής της περιόδου 1960-1990 (Σχήμα 8). Τα όρια του κιβωτίου αντιπροσωπεύουν το εύρος της τυπικής απόκλισης ($\pm SD$), ενώ τα άκρα οριοθετούν την μέγιστη και ελάχιστη τιμή της βροχόπτωσης.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ετήσια μεταβολή της βροχόπτωσης, όπως έδειξε η ανάλυση Fourier, περιγράφεται καλά με δύο αρμονικούς όρους, που εξηγούν πάνω από το 90% της συνολικής μεταβλητότητας. Ο πρώτος αντιπροσωπεύει καλύτερα τις χειμερινές βροχοπτώσεις που δίνουν και την μεγαλύτερη βαρύτητα στην ετήσια μεταβλητότητα, ενώ ο δεύτερος όρος εκφράζει τις καλοκαιρινές θερμικές καταιγίδες, η συμβολή των οποίων στην ετήσια μεταβλητότητα είναι μικρή.

Οι ημερομηνίες εμφάνισης των μεγίστων της βροχόπτωσης παρουσιάζουν βαθμίδα αύξησης (31 Δεκεμβρίου-10 Ιανουαρίου) από νότο προς βορρά και από δυτικά προς ανατολάς. Τα μέγιστα σημειώνονται πρώτα στα παράκτια και ακολουθεί η ενδοχώρα. Η αντίθετη σχεδόν εικόνα παρουσιάζεται για τον δεύτερο αρμονικό. Πιο συγκεκριμένα τα αναιξιάτικα μέγιστα εμφανίζονται νωρίτερα στα κεντρικά ορεινά της ενδοχώρας (10 Μαΐου) και αργότερα (9 Ιουνίου) στα νοτιότερα τμήματα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Conrad, V. and L.W. Pollak, 1950: *Methods in Climatology*, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 118-133.
2. Flocas, A. A., Bloutsos, A. A., Giles, B. D., 1990: trends and periodicities of rainfall over Greece, In Brazdil R. (ed.), *Historical and the Instrumental Periods*, Masaryk University Brno, pp. 298-305.
3. Κωνδύλης, Φ., 1988: Ο υετός στην Στερεά Ελλάδα, Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα 1988.
4. Καραπιτέρης, Α. Ν., Κατσούλης, Β. Δ., 1969: Συμβολή εις την μελέτην των βροχοπτώσεων περιοχών τινών της κεντρικής και δυτικής

Στερεάς Ελλάδας. Υπομν. ΕΑΑ, αρ. 19, σελ. 27.

5. Maheras, P., Kolyva-Mahera, F., 1990: Temporal and spatial characteristics of annual precipitation over Balkans in the twentieth century, *Int. J. Climatol.*, 10, pp. 495-504.

6. Μπλούτσος, Α. Α., 1993: Αρμονική ανάλυση της ετήσιας πορείας της βροχοπτώσεως επάνω από την Ελλάδα. Εισ Λειψυδρίες και Πλημμύρες, Πρακτικά Συμποσίου Γεωτεχν. Επιμελ. Ελλάδας, Θεσσαλονίκη 17-18/3/1992, 181-191.

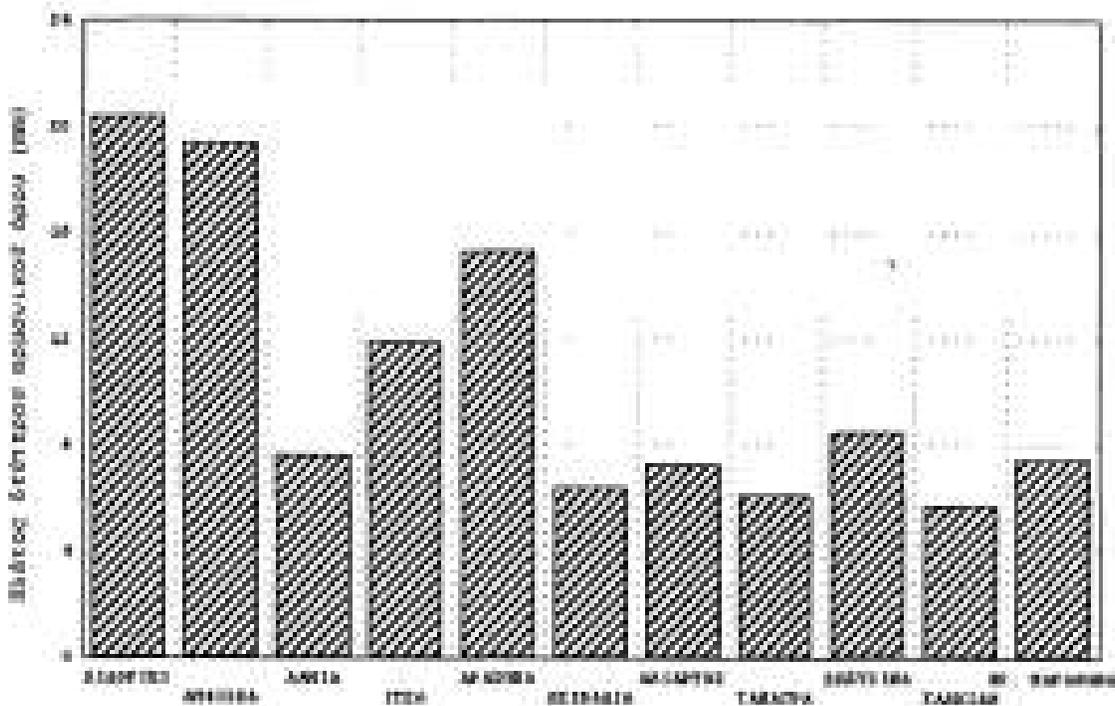
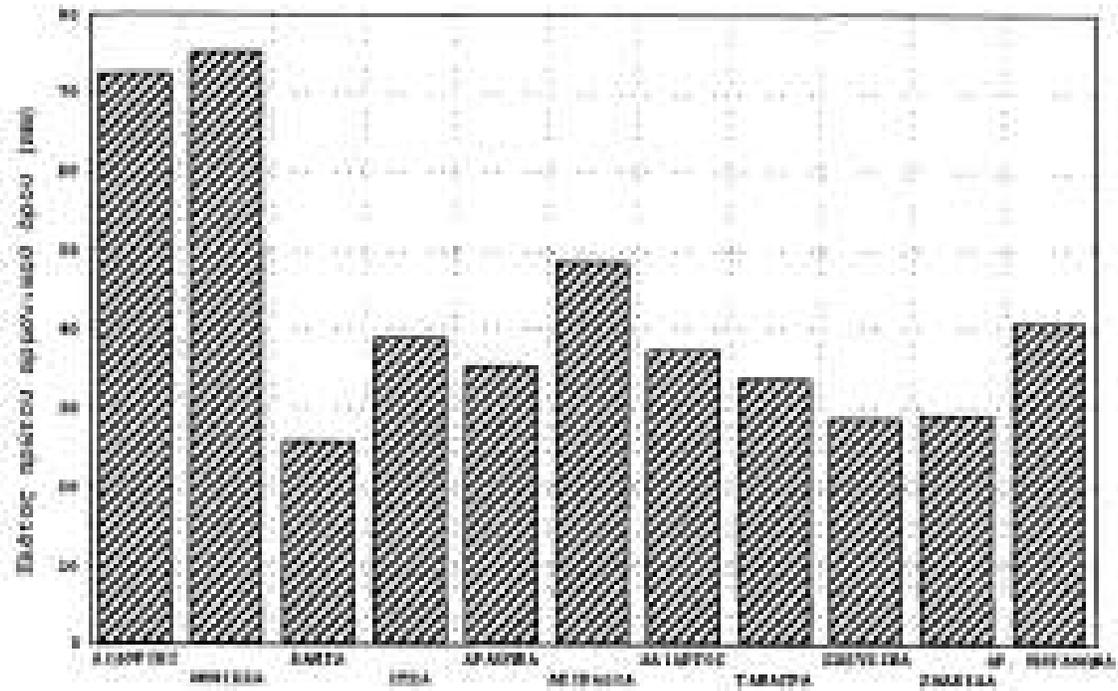
7. Νάστος, Π. Θ., Φιλάνδρας, Κ. Μ., 2000: Χωρική κατανομή των χρόνων εμφάνισης των μεγίστων της συγκέντρωσης όζοντος στην ευρύτερη περιοχή των Αθηνών, Συνέδριο: Τεχνολογίες Ήπιων Μορφών Ενέργειας και Περιβάλλοντος, Αθήνα, Δεκέμβριος 2000, σελ. 339-348.

8. Nastos, P. Th., 1993: Changements de la pluviosite en region Hellenique pendant la periode 1858 - 1992, *Publications de l' Association Internationale de Climatologie* 6, pp. 183-190.

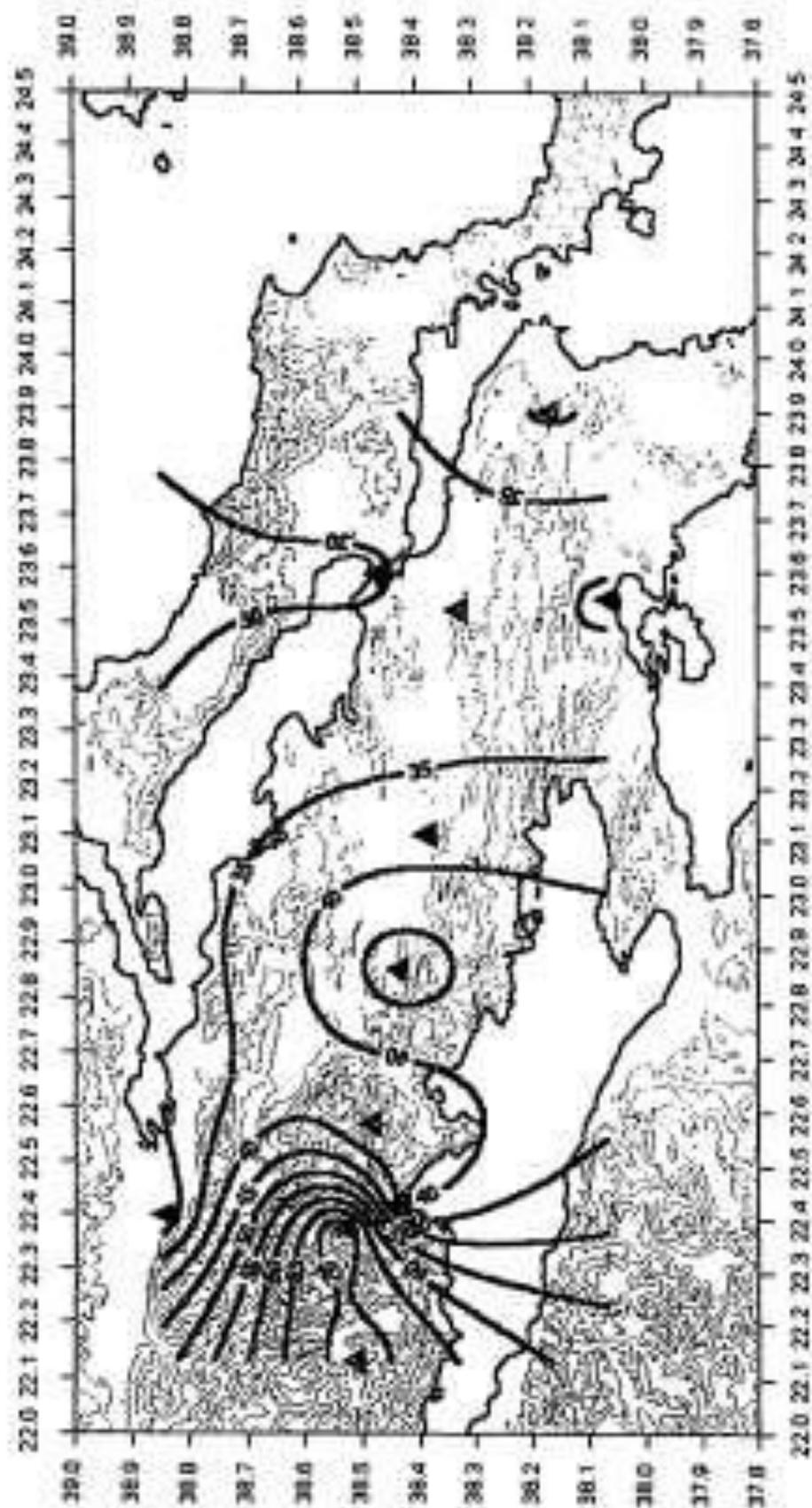
9. Νικολάκης, Δ., 1985: Ο υετός στην Θεσσαλία, Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα 1985.

10. Repapis, C., Amanatidis, A., Paliatsos, A., Mantis, H., 1993: Coherence spatiale des precipitations en Grece, *Publications de l' Association Internationale de Climatologie*, 6, pp. 333-340.

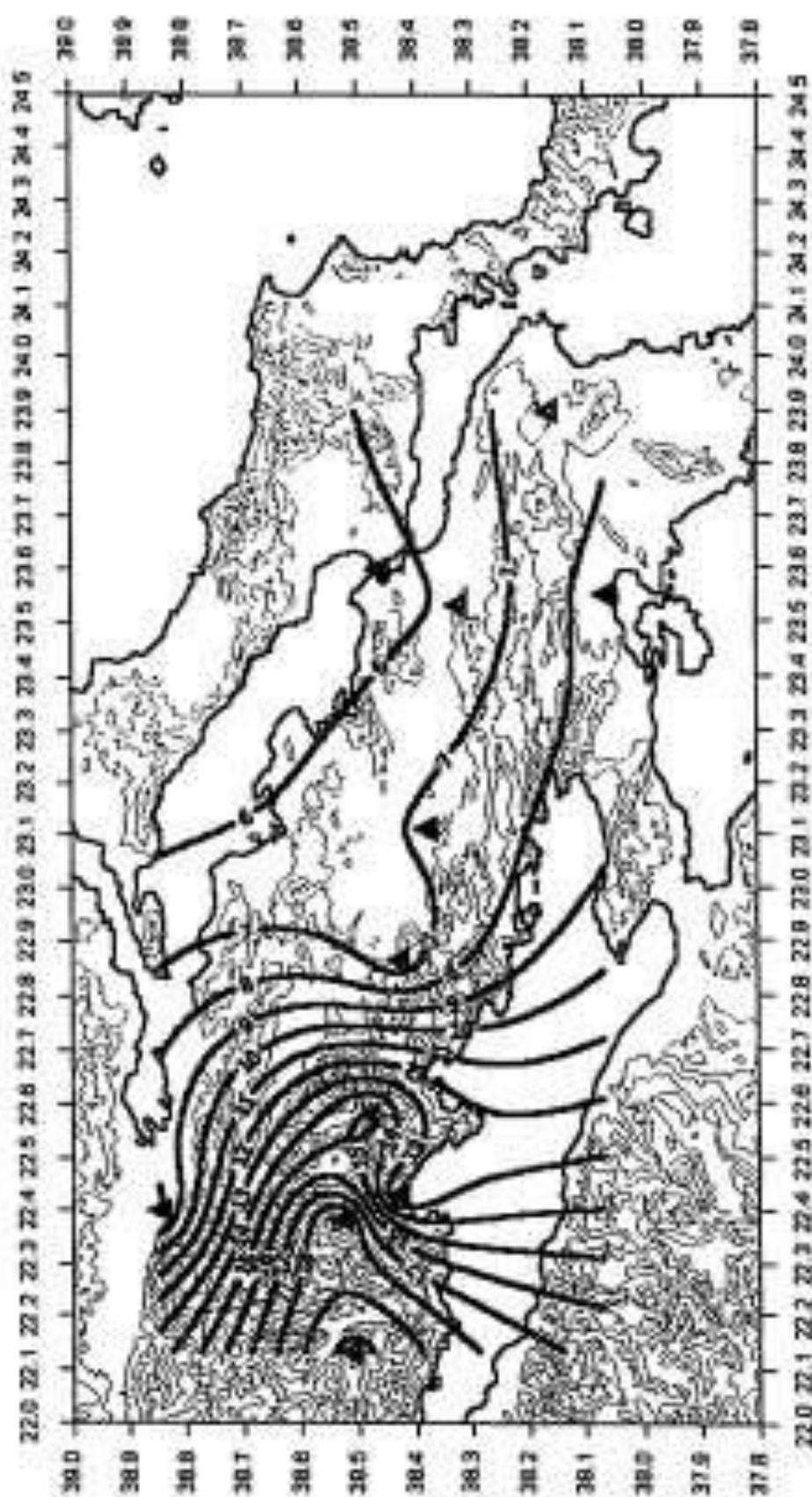
11. Φωτιάδη, Α. Κ., Μεταξάς, Δ. Α., Μπαρτζώκας, Α., 1996: Στατιστική μελέτη του καθεστώτος της βροχής στην βορειοδυτική Ελλάδα, 3ο Πανελλήνιο Επιστημονικό Συνέδριο Μετεωρολογίας-Κλιματολογίας-Φυσικής της Ατμόσφαιρας, Αθήνα 1996, σελ. 52-61.



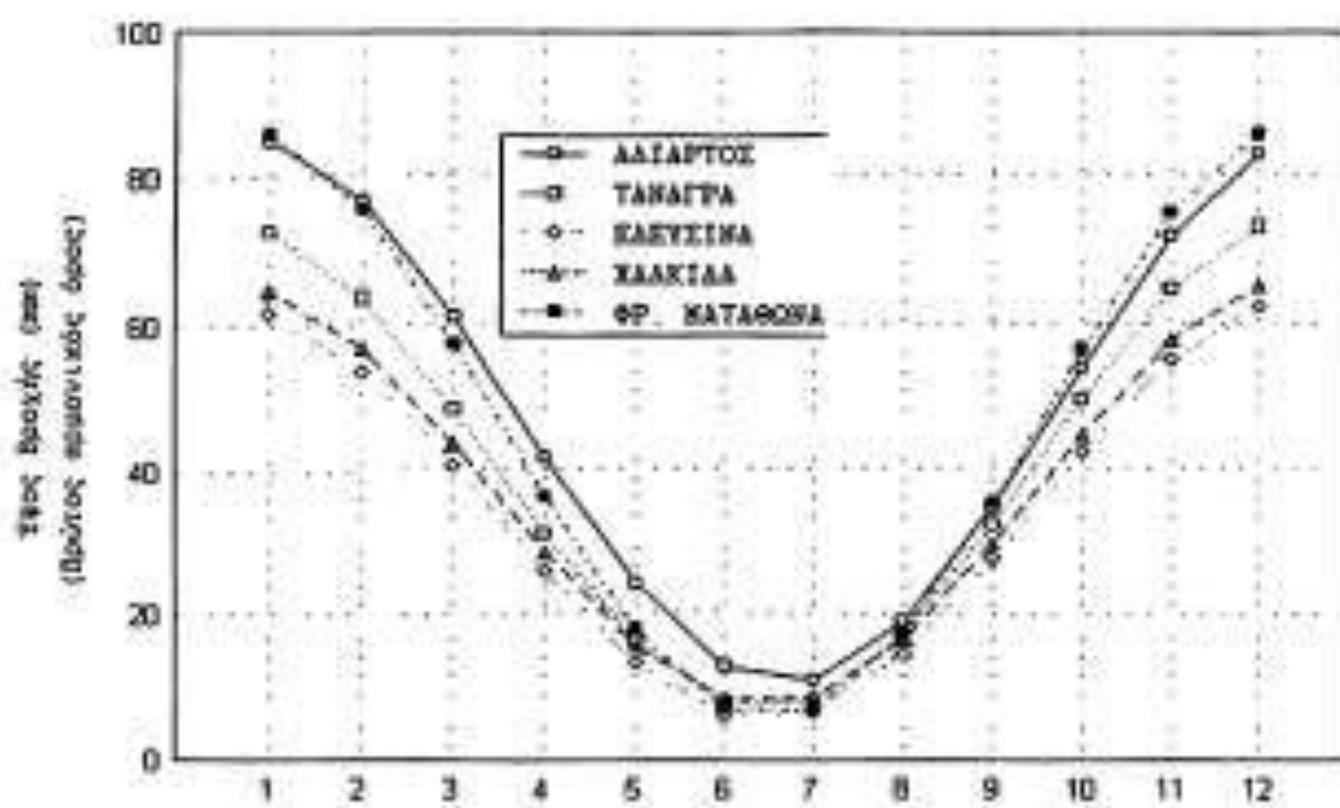
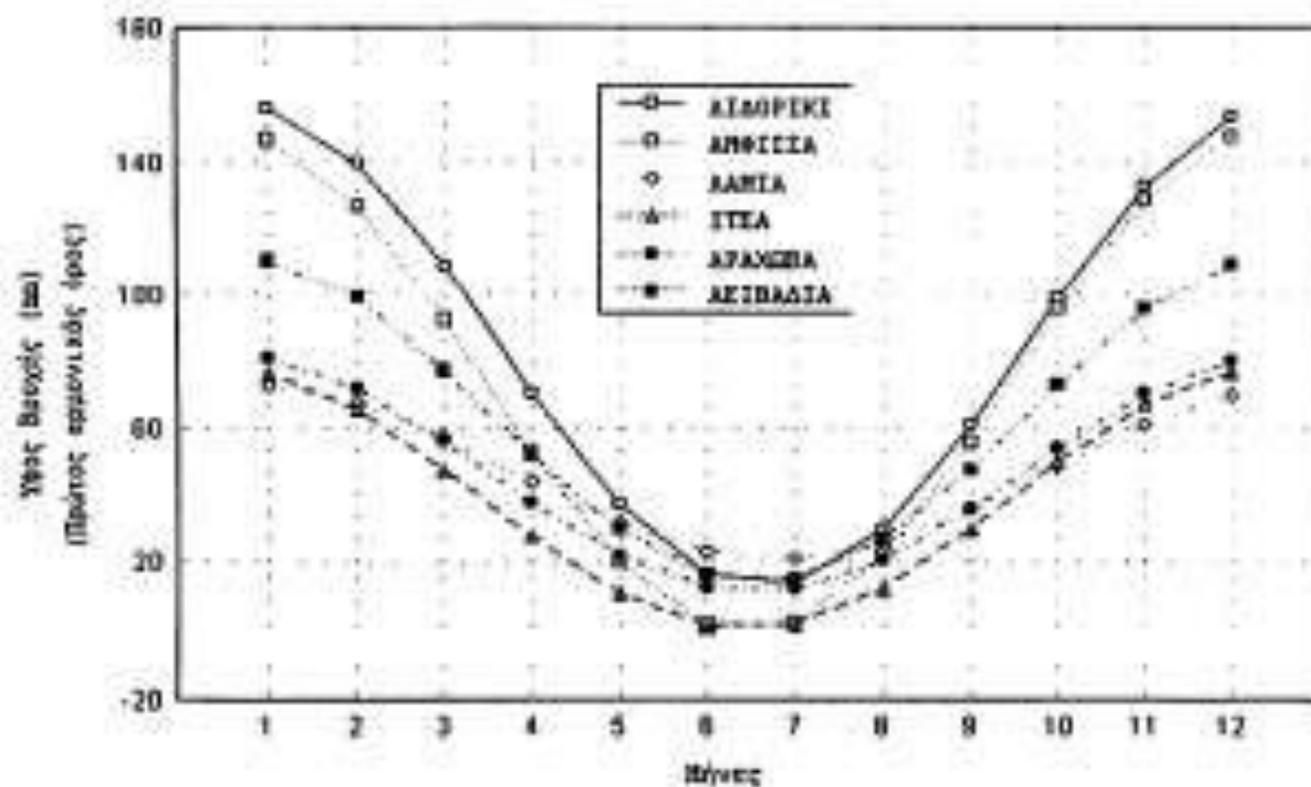
Σχήμα 2: Πρώτος και δεύτερος κύριος συστατικό άξονα για τους 11 σταθμούς του δικτύου.



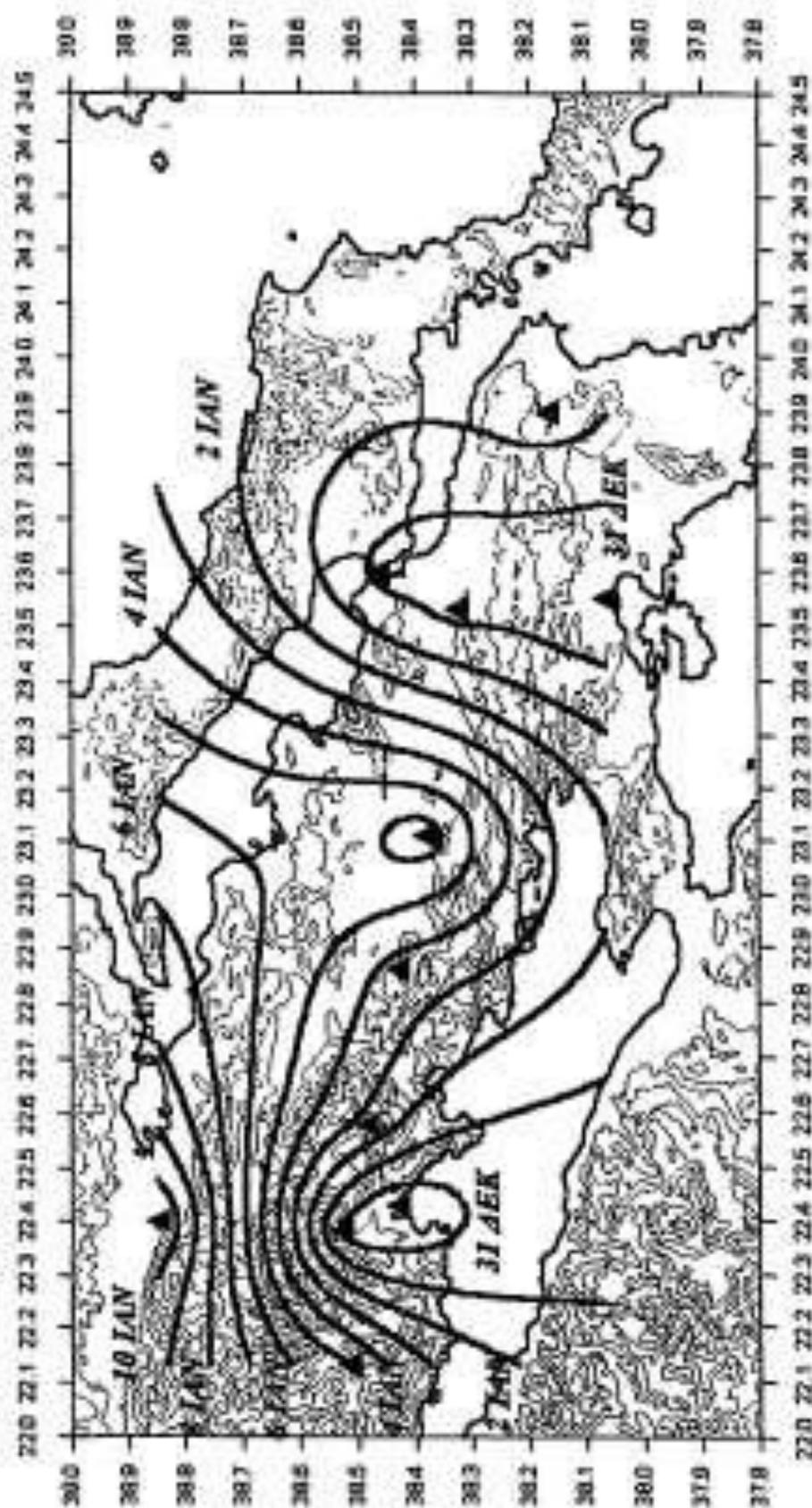
Σχήμα 3: Χωρική κατανομή του πλάτους του πρώτου αρμονικού όρου.



Σχήμα 4: Χωρική κατανομή του πλάτους του δεύτερου αρμονικού όρου.



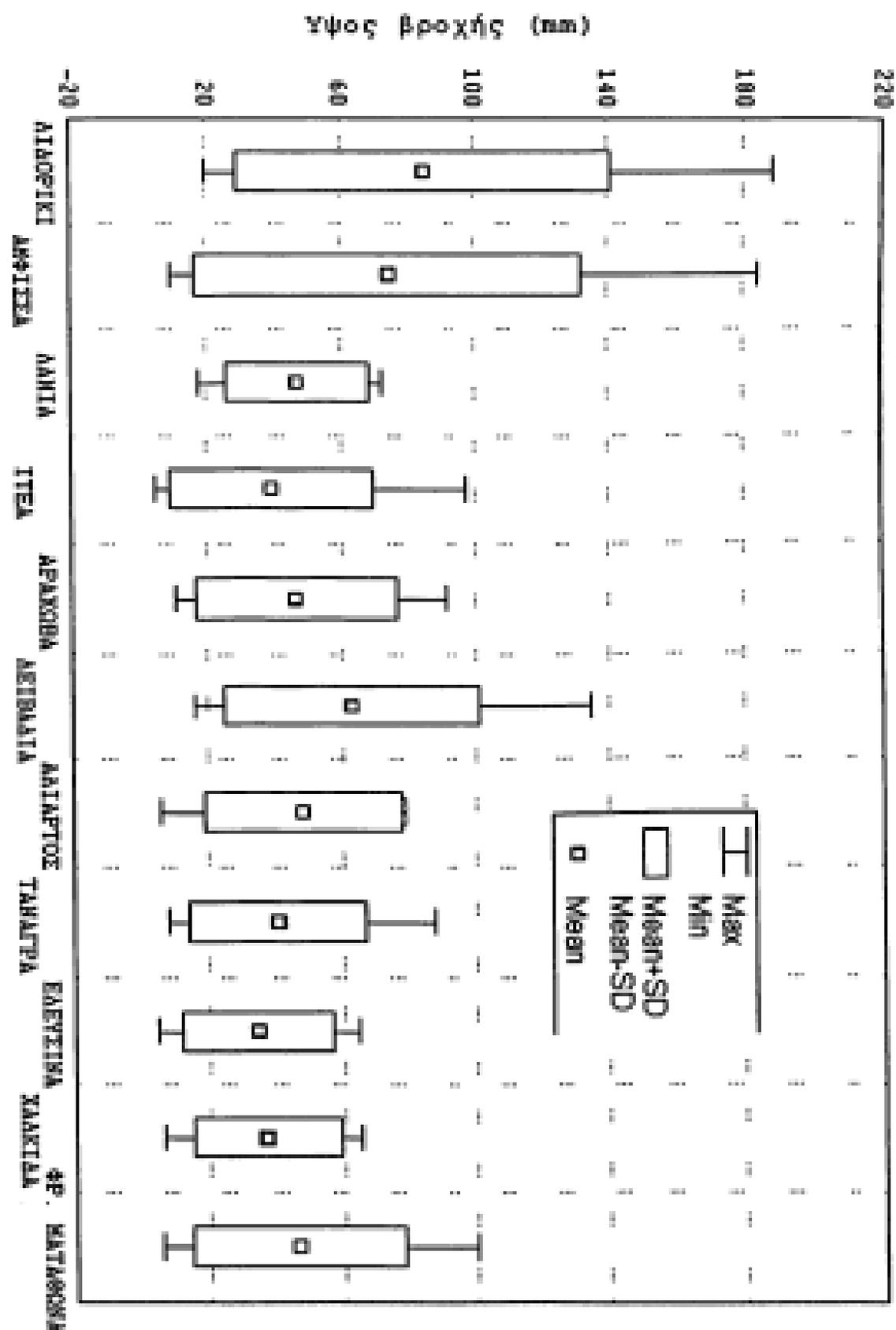
Σχήμα 5: Ετήσια μεταβολή του ύψους βροχής, όπως αυτή περιγράφεται από τον πρώτο αρμονικό όρο της Ανάλυσης Fourier.



Σχήμα 6: Χωρική κατανομή του χρόνου εμφάνισης του μεγίστου του ύψους της βροχής, για τον πρώτο αρμονικό όρο.



Σχήμα 7: Χειρική κατανομή του χρόνου εμφάνισης του μεγίστου του ύψους της βροχής για τον δεύτερο αμμονικό άρα.



Σχήμα 8: Διαγράμματα Box & Whiskers των μέσων μηνιαίων τιμών του ύψους βροχής της περιόδου 1960-1980, για τους 11 σταθμούς του δικτύου.