



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**  
**ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ**  
**ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΠΜΣ**  
**«ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ»**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΩΝ ΑΝΕΜΟΥ:  
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΕΔΙΟΥ ΚΑΙ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ**

**Ψωφογεώργου Πολυξένη**

**Επιβλέπων: Θ. ΚΑΡΑΚΑΣΙΔΗΣ**

Βόλος 2010



## Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η ανάλυση χρονοσειρών ταχύτητας ανέμου για την έκλυση συμπερασμάτων όσον αφορά την δυναμική του συστήματός τους. Χρησιμοποιήθηκαν δύο ομάδες χρονοσειρών προκειμένου να προκύψουν συγκεντρωτικά και πιο ολοκληρωμένα αποτελέσματα, αυτές οι ομάδες είναι οι χρονοσειρές πεδίου και οι χρονοσειρές προσομοίωσης.

Οι χρονοσειρές πεδίου σχετίζονται συγκεκριμένα με την ταχύτητα και την γωνία του ανέμου. Οι μετρήσεις έχουν πραγματοποιηθεί στην περιοχή του Αιγίου και αφορούν ελάχιστες τιμές, μέγιστες τιμές, τιμές μέσου όρου και τυπικής απόκλισης αντίστοιχα για το κάθε μέγεθος. Η κάθε χρονοσειρά (τέσσερις για κάθε μέγεθος) αποτελείται από 38.540 μετρήσεις, οι οποίες έγιναν σε διάστημα περίπου ενός χρόνου (23/03/2005 – 16/12/2005).

Στην συνέχεια οι χρονοσειρές προσομοίωσης αφορούν σε χρονοσειρές ταχύτητας ανέμου σε λόφο. Η πρώτη ομάδα αυτών των χρονοσειρών σχετίζεται με την ταχύτητα ανόδου του ανέμου σε λόφο και η δεύτερη με την ταχύτητα καθόδου. Σε αυτές τις χρονοσειρές γνωρίζουμε τις συνιστώσες της ταχύτητας του ανέμου στον χώρο, οι οποίες μελετώνται και είναι η συνιστώσα στον άξονα  $x$ , άξονα  $y$  και στον άξονα  $z$ . Από όλες τις συνιστώσες προέκυψε αρχικά το μέτρο της ταχύτητας και κατόπιν υπολογίστηκε ξανά το μέτρο λαμβάνοντας υπόψη μόνο τις δύο πρώτες συνιστώσες. Στην συνέχεια μελετήθηκε η γωνία της ταχύτητας αντίστοιχα με το κάθε μέτρο. Συνεπώς για την ταχύτητα ανόδου και καθόδου του ανέμου προέκυψε η ανάλυση εφτά χρονοσειρών για κάθε περίπτωση. Επιπλέον πρέπει να αναφερθεί ότι τόσο οι χρονοσειρές ανόδου όσο και οι καθόδου αποτελούνται από 16.504 μετρήσεις η κάθε μία.

Αρχικά δίνονται γενικές και βασικές έννοιες για την ανάλυση χρονοσειρών. Γίνεται η ανάλυση με τις κλασικές γραμμικές μεθόδους όπως φασματική ανάλυση και εύρεση των μέτρων στατιστικών δεδομένων. Δεδομένου όμως ότι είναι αναγκαία η έκλυση συμπερασμάτων όσον αφορά την χαοτική συμπεριφορά του συστήματος χρησιμοποιούνται και μη γραμμικές μέθοδοι ανάλυσης όπως η διαδικασία της ανακατασκευής του χώρου των φάσεων που βασίζεται στην εκτίμηση της διάστασης

συσχέτισης και της διάστασης εμπύθισης. Τέλος γίνεται η εκτίμηση των μη γραμμικών χαρακτηριστικών του συστήματος που αφορούν στην διάσταση συσχέτισης και στους εκθέτες Lyapunov. Όλα τα παραπάνω βρίσκουν εφαρμογή στις υπό μελέτη χρονοσειρές.

Χρησιμοποιούνται επίσης για την ανάλυση των χρονοσειρών πεδίου και προσομοίωσης και νεότερες μη γραμμικές μέθοδοι όπως η μέθοδος της ποσοτικής ανάλυσης επαναφοράς (Reccurence Qualification Analysis) με την οποία γίνεται η οπτικοποίηση της επαναφοράς των τροχιών (γραφήματα επαναφοράς ΓΕ - Reccurence Plots) των δυναμικών συστημάτων στον ανακατασκευασμένο χώρο των φάσεων.

Η ανάλυση των χρονοσειρών μέσω των μεθόδων που αναφέρθηκαν παραπάνω έγινε επίσης με τη βοήθεια του προγράμματος Matlab, το πακέτο ανάλυσης χρονοσειρών Tisean, το πρόγραμμα γραφικών KGraph, το πρόγραμμα Visual Reccurence Analysis και το υπολογιστικό πρόγραμμα του Excel.

Τελικά προκύπτουν συμπεράσματα που αφορούν την δυναμική του συστήματος του ανέμου και γίνονται προτάσεις για περαιτέρω ανάλυση των χρονοσειρών προκειμένου διεξαχθούν και άλλα συμπεράσματα.

Καταλήγουμε στο ότι σημαντική πηγή προόδου τόσο της επιστήμης όσο και κατ'επέκταση του ανθρώπου αποτελεί σε μεγάλο ποσοστό και η κατανόηση της συμπεριφοράς των δυναμικών συστημάτων. Ένα σύστημα αποτελείται από ένα σύνολο παραγόντων που όσο καλύτερα προσδιοριστούν τόσο καλύτερα μπορούν τα αποτελέσματα να αξιολογηθούν και να χρησιμοποιηθούν προς όφελος του ανθρώπου. Αυτό προσπαθήσαμε και μέσα από την παρούσα εργασία.

## Abstract

The object of the current after graduate study is the analysis of time series of air wind for the purpose of making conclusions about the dynamic of their systems. Two groups of time series were used in such a way as to produce more concise and concrete results. These groups were space time series and simulation time series.

All the time series referred to wind velocity and angle velocity. The measurements were made in Aigio region and consist of minimum, maximum, median values and the standard deviation for each of these values. Every time series(four for each size)consists of 38.450 measurements which were made in the time space of one year(23/03/2005-16/12/2005)

As previously stated these simulation time series represent wind velocity on a hill time series. The first group of these are connected to uphill wind velocity and the second group are connected to downhill velocity. In these time series we know the components of wind velocity in space that are being studied and these are the component in the x axis, the y axis and the z axis. Initially the measure of velocity was calculated from all of these components and afterwards it was calculated using only the first two components. Later on the angle of the velocity was calculated for each value so for the uphill and downhill velocity the analysis of seven time tables was made. In addition it must be mentioned that each of uphill and downhill velocity time series consist of 16.504 measurements.

At the start the basic notions for the analysis of time series are explained.This analysis is made using classic linear methods like spectrum analysis and the acquisition of statistical data. Given the fact that it is necessary to extract conclusions of the chaotic performance of the system they were also used non linear methods of analysis like the procedure of reconstruction of space phases,a method that is based in the estimation of the correlation dimension and the immersion dimension. Finally an appreciation is made of the non linear characteristics of the system regarding the correlation dimension and Lyapunov exponents.All of the above are being used in the time series studied.

Another method used in the analysis of the time series is a newer non linear method called recurrence qualification analysis which permits the visualization of the recurrence of trajectories (recurrence plots)

The analysis of the time series were made using the help of Matlab computer software, Tisean time series analysis package, KGraph computer graphics software, Visual Recurrence Analysis software and Excel datasheets.

The conclusions being made refer to the dynamic of the wind system and propositions are being made for the analysis of time series so as to extract more conclusions.

We came to the conclusion that a source of scientific advancement is the understanding of the behavior of dynamic systems. A system consists of a multitude of factors and the better these are understood the more substantial the results for the advancement of mankind. This was what we tried to do in this paper.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>Περίληψη.....</b>	<b>1</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>3</b>
<b>1. ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΩΝ.....</b>	<b>5</b>
1.1 Δυναμικά Συστήματα.....	5
1.2 Χρονοσειρές.....	6
1.3 Ελκυστής.....	8
1.4 Γραμμική Ανάλυση Χρονοσειρών.....	9
1.4.1 Μέτρα Στατιστικών Δεδομένων και Συνάρτηση Αυτοσυσχέτισης.....	9
1.4.2 Φάσμα Ισχύος (Power Spectrum).....	11
1.5 Μη Γραμμική Ανάλυση Χρονοσειρών.....	13
1.5.1 Ανακατασκευή Χώρου Φάσεων.....	13
1.5.1.1 Εκτίμηση Χρονικής Υστέρησης ( $\tau$ ).....	15
1.5.1.2 Εκτίμηση Διάστασης Εμβύθισης ( $m$ ).....	16
1.5.2 Εκτίμηση Μη-Γραμμικών Χαρακτηριστικών του Δυναμικού Συστήματος.....	18
1.5.2.1 Διάσταση συσχέτισης.....	19
1.5.2.2 Εκθέτες Lyapunov.....	23
1.5.3 Ανάλυση Χρονοσειρών με την Μέθοδο των Γραφημάτων Επαναφοράς και της Ποσοτικής Ανάλυσης Επαναφοράς.....	25
1.5.3.1 Γραφήματα Επαναφοράς (Reccurence Plots).....	25
1.5.3.2 Ποσοτική Ανάλυση Επαναφοράς (Reccurence Quantification Analysis – RQA).....	28
<b>2. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ 1 - ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΩΝ ΠΕΔΙΟΥ ΚΑΙ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....</b>	<b>31</b>

2.1 Υπό Μελέτη Χρονοσειρές.....	31
2.2 Έλεγχος Στασιμότητας .....	36
2.3 Αφαίρεση Τάσης με την Μέθοδο των Πρώτων Διαφορών .....	37
2.4 Ανακατασκευή του Χώρου των Φάσεων των Χρονοσειρών Πεδίου και Προσομοίωσης .....	39
2.4.1 Εκτίμηση Χρονικής Υστέρησης ( $\tau$ ).....	40
2.4.1.1 Συνάρτηση Αυτοσυσχέτισης (autocorrelation function).....	40
2.4.1.2 Συνάρτηση Μέσης Αμοιβαίας Πληροφορίας (average mutual Information function).....	46
2.4.2 Εκτίμηση Διάστασης Εμβύθισης ( $m$ ).....	52
2.4.2.1 Μέθοδος των Ψευδών Κοντινότερων Γειτόνων.....	53
2.4.3 Αποτελέσματα Ανακατασκευής του Χώρου των Φάσεων των Χρονοσειρών Πεδίου και Προσομοίωσης.....	58
2.5 Φάσμα Ισχύος Χρονοσειρών Πεδίου και Προσομοίωσης .....	66
2.6 Διάσταση Συσχέτισης Χρονοσειρών Πεδίου και Προσομοίωσης .....	74
2.7 Εκθέτες Lyapunov Χρονοσειρών Πεδίου και Προσομοίωσης .....	96
<b>3. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ 2 - ΜΕΘΟΔΟΥ ΠΟΣΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΠΑΝΑΦΟΡΑΣ.....</b>	<b>101</b>
3.1 Ανάλυση Χρονοσειρών πεδίου.....	102
3.1.1 Χρονοσειρές Ταχύτητας Ανέμου.....	102
3.1.1.1 Χρονοσειρά Ελαχίστων Τιμών Ταχύτητας Ανέμου.....	102
3.1.1.2 Χρονοσειρά Μεγίστων Τιμών Ταχύτητας Ανέμου .....	106
3.1.1.3 Χρονοσειρά Τιμών Μέσου Όρου Ταχύτητας Ανέμου.....	110
3.1.1.4 Χρονοσειρά Τιμών Τυπικής Απόκλισης Ταχύτητας Ανέμου.....	113
3.1.2 Χρονοσειρές Γωνίας Ανέμου.....	117
3.1.2.1 Χρονοσειρά Ελαχίστων Τιμών Γωνίας Ανέμου.....	117



3.1.2.2 Χρονοσειρά Μεγίστων Τιμών Γωνίας Ανέμου.....	121
3.1.2.3 Χρονοσειρά Τιμών Μέσου Όρου Γωνίας Ανέμου.....	123
3.1.2.4 Χρονοσειρά Τιμών Τυπικής Απόκλισης Γωνίας Ανέμου.....	126
3.2 Ανάλυση Χρονοσειρών Προσομοίωσης.....	130
3.2.1 Χρονοσειρές Ταχύτητας Ανέμου Ανόδου σε Λόφο.....	130
3.2.1.1 Ταχύτητα Ανέμου στον Άξονα x.....	131
3.2.1.2 Ταχύτητα Ανέμου στον Άξονα y.....	135
3.2.1.3 Ταχύτητα Ανέμου στον Άξονα z.....	138
3.2.1.4 Χρονοσειρά Μέτρου Ταχύτητας Ανέμου Συναρτήσει Όλων των Συνιστωσών $f(x,y,z)$ .....	140
3.2.1.5 Χρονοσειρά Γωνίας Ταχύτητας Ανέμου Συναρτήσει Όλων των Συνιστωσών $f(x,y,z)$ .....	143
3.2.1.6 Χρονοσειρά Μέτρου Ταχύτητας Ανέμου Συναρτήσει των Δύο Συνιστωσών $f(x,y)$ .....	145
3.2.1.7 Χρονοσειρά Γωνίας Ταχύτητας Ανέμου Συναρτήσει των Δύο Συνιστωσών $f(x,y)$ .....	147
3.2.2 Χρονοσειρές Ταχύτητας Ανέμου Καθόδου σε Λόφο.....	149
3.2.2.1 Ταχύτητα Ανέμου στον Άξονα x.....	150
3.2.2.2 Ταχύτητα Ανέμου στον Άξονα y.....	152
3.2.2.3 Ταχύτητα Ανέμου στον Άξονα z.....	155
3.2.2.4 Χρονοσειρά Μέτρου Ταχύτητας Ανέμου Συναρτήσει Όλων των Συνιστωσών $f(x,y,z)$ .....	157
3.2.2.5 Χρονοσειρά Γωνίας Ταχύτητας Ανέμου Συναρτήσει Όλων των Συνιστωσών $f(x,y,z)$ .....	160
3.2.2.6 Χρονοσειρά Μέτρου Ταχύτητας Ανέμου Συναρτήσει των Δύο Συνιστωσών $f(x,y)$ .....	163
3.2.2.7 Χρονοσειρά Γωνίας Ταχύτητας Ανέμου Συναρτήσει των Δύο Συνιστωσών $f(x,y)$ .....	165

<b>4. ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>168</b>
4.1 Σύγκριση Χρονοσειρών Πεδίου Ταχύτητας Ανέμου.....	168
4.2 Σύγκριση Χρονοσειρών Πεδίου Γωνίας Ανέμου.....	174
4.3 Σύγκριση Χρονοσειρών Προσομοίωσης Ταχύτητας Ανόδου Ανέμου σε Λόφο.....	178
4.4 Σύγκριση Χρονοσειρών Προσομοίωσης Ταχύτητας Καθόδου Ανέμου σε Λόφο.....	180
4.5 Σύγκριση Μεγεθών Χρονοσειρών Πεδίου με Προσομοίωσης.....	182
<b>5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....</b>	<b>185</b>
<b>6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>187</b>

## 1. ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΩΝ

### 1.1 Δυναμικά Συστήματα

Σύστημα είναι η διάταξη αλληλεπιδρώντων μερών σε ένα ενιαίο σύνολο. Δυναμικό σύστημα είναι ένα σύστημα που εξελίσσεται στον χρόνο. Η εξέλιξη του συστήματος από κάποια αρχική κατάσταση περιγράφεται συνήθως από ένα σύνολο εξισώσεων. Οι εξισώσεις που συνδέουν τις μεταβλητές ενός συστήματος μπορεί να αντιστοιχούν στην περιγραφή ενός φυσικού, βιολογικού ή οικονομικού υποδείγματος. Μια μεγάλη ομάδα δυναμικών συστημάτων μπορεί να περιγραφεί μαθηματικά από ένα σύστημα  $n$  διαφορικών εξισώσεων πρώτης τάξης.

$$\frac{dx}{dt} = \mathbf{F}(x, t, c) \quad (1.1)$$

Το  $x$  είναι ένα διάνυσμα  $n$  πραγματικών συναρτήσεων ως προς το χρόνο  $t$ , που συνήθως περιγράφεται από την σχέση

$$x(t) \equiv \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)\} \quad (1.2)$$

ή από τον συμβολισμό  $x \in \mathbb{R}^n$ . Ο χώρος  $\mathbb{R}^n$  λέγεται χώρος φάσεων ή καταστάσεων. Οι μεταβλητές  $x_i$  ( $i=1, \dots, n$ ) συνήθως αντιπροσωπεύουν φυσικές ποσότητες όπως θέση, ταχύτητα, θερμοκρασία, πίεση, αλλά και μεγέθη από άλλους επιστημονικούς κλάδους, όπως χημικές συγκεντρώσεις και πληθυσμούς ειδών. Η σταθερά  $c \equiv (c_1, \dots, c_k)$  είναι εξωγενής μεταβλητή και οι  $c_i$  ( $i=1, \dots, k$ ) καλούνται παράμετροι ελέγχου του δυναμικού συστήματος. Μεταβάλλοντας την τιμή μιας παραμέτρου ελέγχου είναι δυνατόν να αλλάξει η συμπεριφορά του δυναμικού συστήματος. Κατά τη διάρκεια παρατήρησης της εξέλιξης ενός δυναμικού συστήματος οι παράμετροι ελέγχου παραμένουν σταθερές.

Τα δυναμικά συστήματα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- Αιτιοκρατικά (ντετερμινιστικά)

- Στοχαστικά

Τα αιτιοκρατικά δυναμικά συστήματα δεν περιέχουν στοχαστικές μεταβλητές. Η συμπεριφορά τους μπορεί να προβλεφτεί μέσα στα όρια που καθορίζονται από τα λάθη των μετρήσεων και πιθανόν τη δράση και άλλων δευτερογενών παραγόντων που ασκούν την επίδρασή τους στο σύστημα καθώς η επόμενη κατάσταση εξαρτάται από τη προηγούμενη ή μια σειρά προηγούμενων καταστάσεων. Αντίθετα σε ένα στοχαστικό σύστημα η επόμενη κατάσταση δεν εξαρτάται από την προηγούμενη κατάσταση.

Επιπλέον τα συστήματα διακρίνονται σε δύο τύπους:

- Συνεχή
- Διακριτά

Στα συνεχή συστήματα κάθε μεταβλητή θεωρείται συνεχής συνάρτηση του χρόνου. Οι χρονοσειρές των συστημάτων αυτών μετρούνται με μικρό χρονικό βήμα. Επίσης έχουμε την δυνατότητα να αυξομειώσουμε τη συχνότητα δειγματοληψίας. Τέλος το σύνολο των διαφορικών εξισώσεων που απαρτίζουν ένα συνεχές σύστημα ορίζει μια ροή στο χώρο των φάσεων. Τα διακριτά συστήματα μετρούνται σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές και ενδιάμεσα από δυο μετρήσεις δεν είναι γνώστη η εξέλιξη των μεγεθών.

## 1.2 Χρονοσειρές

Με τον όρο Χρονοσειρές εννοούμε μια σειρά από παρατηρήσεις που παίρνονται σε ορισμένες χρονικές στιγμές ή περιόδους που ισαπέχουν μεταξύ τους. Συμβολίζοντας με  $X_i$  τις  $n$  χρονικές στιγμές (έτη, μήνες, μέρες κ.λπ.) και με  $Y_i$  τις τιμές των αντίστοιχων παρατηρήσεων, δημιουργούμε  $n$  ζεύγη της μορφής  $M(X_i, Y_i)$  που μπορούμε να παραστήσουμε στο σύστημα αξόνων.

Μια χρονοσειρά  $\{X_i\}$  για  $i = 1, \dots, N$ , μπορεί να θεωρηθεί ότι προέρχεται από ένα δυναμικό σύστημα ως η προβολή  $x_t$  κάθε σημείου  $s_t$  της τροχιάς του συστήματος, δηλαδή.

$$x_t = h(s_t) \quad (1.3)$$

όπου η συνάρτηση προβολής  $h : \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$  λέγεται και συνάρτηση παρατήρησης. Για ροές, δηλαδή λύσεις διαφορικών εξισώσεων, όπου ο χρόνος είναι συνεχής, η παρατήρηση γίνεται με κάποιο χρόνο δειγματοληψίας (sampling time)  $\tau_s$  και ο πραγματικός χρόνος που αντιστοιχεί σε μια παρατήρηση  $x_i$  είναι  $i\tau_s$ .

Το σύστημα μπορεί να περιέχει θόρυβο, ο οποίος διαχωρίζεται σε δύο τύπους:

- Θόρυβος παρατήρησης ή μέτρησης (observational / measurement noise)

$$x_t = h(s_t) + w_t \quad (1.4)$$

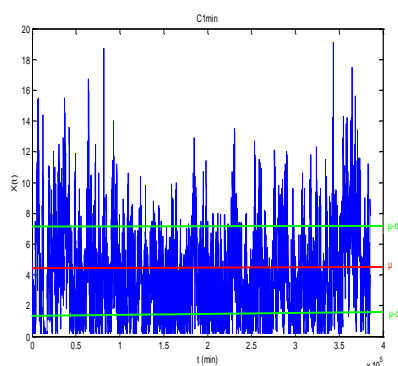
όπου το  $w_t$  συνήθως θεωρείται λευκός και προσθετικός θόρυβος, ασυσχέτιστος με το  $x_t$  και το  $s_t$ .

- Δυναμικός θόρυβος ή θόρυβος συστήματος (dynamical / system noise)

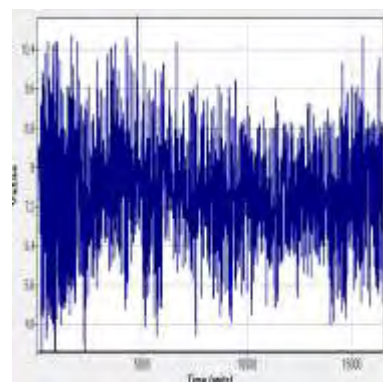
$$s_t = f^t(s_0) + \varepsilon_t \quad (1.5)$$

όπου το  $\varepsilon_t$  θεωρείται επίσης λευκός και συνήθως προσθετικός θόρυβος, ασυσχέτιστος με το  $s_u$  για κάθε  $u \leq t$ .

Παρακάτω δίνονται κάποια παραδείγματα χρονοσειρών.



(α) Χρονοσειρά ελαχίστων τιμών ταχύτητας ανέμου



(β) Χρονοσειρά μέτρου ταχύτητας ανέμου σε λόφο.

**Εικόνα 1. Παραδείγματα χρονοσειρών: (α) Χρονοσειρά ελαχίστων τιμών ταχύτητας ανέμου και (β) Χρονοσειρά μέτρου ταχύτητας ανέμου σε λόφο.**

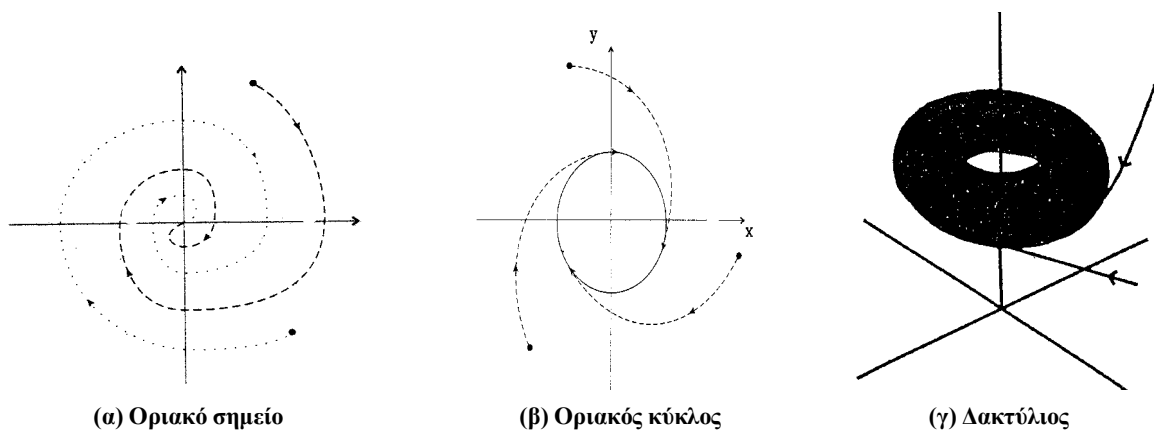
### 1.3 Ελκυστής

Τα περισσότερα δυναμικά συστήματα που αφορούν την ανάλυση χρονοσειρών είναι συστήματα απώλειας ενέργειας (dissipative systems), δηλαδή αν εφαρμόσουμε ένα τέτοιο σύστημα σε κάποιο όγκο αυτός συνεχώς θα μικραίνει. Κάθε τροχιά ενός συστήματος απώλειας ενέργειας περιορίζεται σε ένα χώρο  $\mathbb{R}^d$  και έλκεται από κάποιο αναλλοίωτο σύνολο σημείων που λέγεται ελκυστής (attractor). Η τροχιά του συστήματος καταλήγει ασυμπτωτικά σε αυτόν τον ελκυστή.

Ο ελκυστής μπορεί να είναι:

- ένα ευσταθές σημείο ισορροπίας του συστήματος (stable equilibrium point),
- ένα πεπερασμένο σύνολο τέτοιων σημείων (για περιοδικές τροχιές διακριτών συστημάτων),
- ένας οριακός κύκλος (limit cycle, για περιοδικές τροχιές συνεχών συστημάτων),
- ένας τόρος (torus, για ψευδο-περιοδικές τροχιές συνεχών συστημάτων)
- κάποιο άλλο μη-πεπερασμένο σύνολο σημείων που λέγεται παράξενος ελκυστής (strange attractor).

Οι παράξενοι ελκυστές παρουσιάζουν την ιδιότητα της αυτο-ομοιότητας (self-similarity) σε διαφορετικές κλίμακες του χώρου, είναι δηλαδή μορφοκλασματικά σύνολα (fractals). Τα μορφοκλασματικά σύνολα χαρακτηρίζονται από τη μορφοκλασματική διάσταση (fractal dimension), που είναι ένας μη-ακέραιος αριθμός και δηλώνει το βαθμό αυτό-ομοιότητας. Η μορφοκλασματική διάσταση είναι πάντα μικρότερη της τοπολογικής διάστασης της πολλαπλότητας (ή της Ευκλείδειας διάστασης αν η πολλαπλότητα είναι ο Ευκλείδειος χώρος) στην οποία βρίσκεται ο ελκυστής. Οι παράξενοι ελκυστές σχηματίζονται από τις τροχιές δυναμικών συστημάτων που παρουσιάζουν ευαισθησία στις αρχικές συνθήκες (sensitivity to initial conditions) και λέγονται χαοτικά δυναμικά συστήματα (chaotic dynamical systems).



Εικόνα 2. Παραδείγματα ελκυστών.

Τα χαοτικά δυναμικά συστήματα παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον γιατί λόγω της ιδιότητας της ευαισθησίας στις αρχικές συνθήκες, κοντινές τροχιές τους αποκλίνουν πολύ γρήγορα με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν στοχαστική συμπεριφορά. Αντίστροφα, πολλά πραγματικά συστήματα που φαίνονται τυχαία ίσως να έχουν αιτιοκρατική μη-γραμμική κι ενδεχομένως χαοτική δομή. Αυτό σημαίνει ότι χρησιμοποιώντας κατάλληλες μεθόδους που βασίζονται στη θεωρία των δυναμικών συστημάτων και του χάους έχουμε τη δυνατότητα να εξηγήσουμε και να προβλέψουμε τέτοια συστήματα (σε μικρό χρονικό ορίζοντα), στην παρούσα όμως εργασία δεν θα ασχοληθούμε με το πεδίο της πρόβλεψης.

## 1.4 Γραμμική Ανάλυση Χρονοσειρών

### 1.4.1 Μέτρα Στατιστικών Δεδομένων και Συνάρτηση Αυτοσυσχέτισης

- Δειγματική μέση τιμή ή μέσος όρος ( $\mu$ )

Έστω ότι έχουμε την χρονοσειρά  $X(t_i)$ ,  $i=1,2,3,\dots,N$  προκύπτει

$$\mu := \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(t_i) \quad (1.7)$$

- Διασπορά

Έστω ότι έχουμε την χρονοσειρά  $X(t_i)$ ,  $i=1,2,3,\dots,N$  προκύπτει

$$\sigma^2 := \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X(t_i) - \mu)^2 \quad (1.8)$$

Βασικό στοιχείο της γραμμικής ανάλυσης είναι η μελέτη της αυτοσυσχέτισης που συνοψίζει τις συσχετίσεις σε διάφορες υστερήσεις, δηλαδή χρόνους. Η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης είναι αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier του φάσματος ισχύος. Είναι η συσχέτιση που έχει μια χρονοσειρά με μία χρονική μετατοπισμένη εκδοχή του εαυτού της κατά χρόνο  $\tau$ . Η εκτίμησή της γίνεται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση.

$$\hat{\rho}_\tau = r_\tau = \text{Corr}(x_t, x_{t-\tau}) = \frac{\sum_{t=\tau+1}^n (x_t - \bar{x})(x_{t-\tau} - \bar{x})}{\sum_{t=\tau+1}^n (x_t - \bar{x})^2} \quad (1.6)$$

Όπου  $X_t$  η τιμή της χρονοσειράς στον χρόνο  $t$ ,  $\bar{X}$  η μέση τιμή της χρονοσειράς και  $\tau$  η χρονική διαφορά (υστέρηση) για την οποία υπολογίζεται η αυτοσυσχέτιση.

Ισοδύναμα με την συνάρτηση αυτοσυσχέτισης μπορούμε να μελετήσουμε το φάσμα ισχύος, δηλαδή την κατανομή της ‘ισχύος’ της χρονοσειράς σε όλες τις δυνατές συχνότητες. Για παράδειγμα αν η χρονοσειρά έχει έντονη περιοδικότητα με περίοδο  $k$ , τότε η αυτοσυσχέτιση δείχνει αυξημένη συσχέτιση για υστέρηση  $k$  και, αντίστοιχα, το φάσμα ισχύος δείχνει έντονη ισχύ για συχνότητα  $1/k$ . Βέβαια οι χρονοσειρές δεν είναι συνήθως απλά διακριτά περιοδικά ή συνεχή ημιτονοειδή σήματα και η ανάλυση στο πεδίο των συχνοτήτων προσπαθεί να εντοπίσει συχνότητες που έχουν μεγαλύτερη σημασία (δηλαδή ισχύ) από άλλες.



### 1.4.2 Φάσμα Ισχύος (Power Spectrum)

Με το φάσμα ισχύος μελετάτε μια χρονοσειρά στο πεδίο των συχνοτήτων. Το φάσμα ισχύος και η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης είναι δύο ισοδύναμοι μέθοδοι για την μελέτη μιας στάσιμης χρονοσειράς, και παρέχουν την ίδια πληροφορία, αν και σε μερικές περιπτώσεις η περιγραφή στο πεδίο του των συχνοτήτων είναι προτιμότερη από την αντίστοιχη περιγραφή στο πεδίο του χρόνου και αντιστρόφως.

Τα φάσμα ισχύος ορίζεται από την συνάρτηση φασματικής κατανομής  $F(\lambda)$ . Μπορεί να αποδειχτεί ότι για μια στάσιμη διακριτή χρονοσειρά με συνάρτηση αυτοδιασποράς  $\gamma(k)$  υπάρχει μια μονοτονικά αύξουσα συνάρτηση  $F(\lambda)$  τέτοια ώστε:

$$\gamma(k) = \int_{-\pi}^{\pi} e^{i\lambda k} dF(\lambda) \quad (1.9)$$

όπου  $\lambda \in [-\pi, \pi]$ . Η τιμή  $F(\lambda)$  ισούται με την διασπορά που αντιστοιχεί στις συνιστώσες του σήματος με συχνότητες στο διάστημα  $(-\pi, \lambda)$  και άρα η τιμή  $F(\pi)$  ισούται με την ολική διασπορά της χρονοσειράς. Η συνάρτηση φάσμα ισχύος ή φασματική συνάρτηση πυκνότητας  $f(\lambda)$  ορίζεται από τη σχέση.

$$f(\lambda) = \frac{dF(\lambda)}{d\lambda} \quad (1.10)$$

Το φυσικό νόημα του φάσματος ισχύος είναι ότι η ποσότητα  $f(\lambda)d\lambda$  ισούται με την διασπορά των συνιστωσών του σήματος που έχουν συχνότητες στο διάστημα  $(\lambda, \lambda+d\lambda)$  και άρα το ολοκλήρωμα της συνάρτησης  $f(\lambda)$  δίνει την ολική διασπορά. Από τις σχέσεις (1.9) και (1.10) βρίσκουμε.

$$\gamma(k) = \int_{-\pi}^{\pi} e^{i\lambda k} f(\lambda) d\lambda \quad (1.11)$$

οπότε αντιστρέφοντας την (1.11) παίρνουμε τη σχέση

$$f(\lambda) = \frac{1}{2\pi} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \gamma(k) e^{-i\lambda k} \quad (1.12)$$

που δείχνει ότι το φάσμα ισχύος είναι ο μετασχηματισμός Fourier της  $\gamma(k)$ . Ένας εκτιμητής του φάσματος ισχύος είναι η συνάρτηση του περιοδογράμματος που δίνεται από τη σχέση

$$I(\lambda_j) = \frac{1}{\pi N} \left\{ \left[ \sum_{t=1}^N x_t \cos \frac{2\pi j t}{N} \right]^2 + \left[ \sum_{t=1}^N x_t \sin \frac{2\pi j t}{N} \right]^2 \right\} \quad (1.13)$$

Αποδεικνύεται ότι το περιοδόγραμμα είναι ο πεπερασμένος μετασχηματισμός της συνάρτησης αυτοδιασποράς, δηλ.

$$I(\lambda_j) = \frac{1}{\pi} \sum_{k=-(N-1)}^{k=N-1} c_k e^{-i\lambda_j k} \quad (1.14)$$

Το περιοδόγραμμα είναι ασυμπτωτικά αμερόληπτος εκτιμητής επειδή η μέση τιμή του τείνει στην τιμή του φάσματος ισχύος καθώς το  $N \rightarrow \infty$ , όμως αποδεικνύεται ότι η διασπορά του είναι σταθερή και δίνεται από τη σχέση  $\text{Var}[I(\lambda)] = \sigma^2/\pi^2$ , δεν τείνει στο μηδέν για  $N \rightarrow \infty$ , και επομένως το περιοδόγραμμα δεν είναι συνεπής εκτιμητής του φάσματος ισχύος.

Ένας συνεπής εκτιμητής του φάσματος ισχύος δίνεται από τη σχέση

$$\hat{f}(\lambda_j) = \frac{1}{2\pi} \left\{ w_0 c_0 + 2 \sum_{k=1}^M w_k c_k \cos\left(\frac{2\pi j k}{M}\right) \right\} \quad (1.15)$$

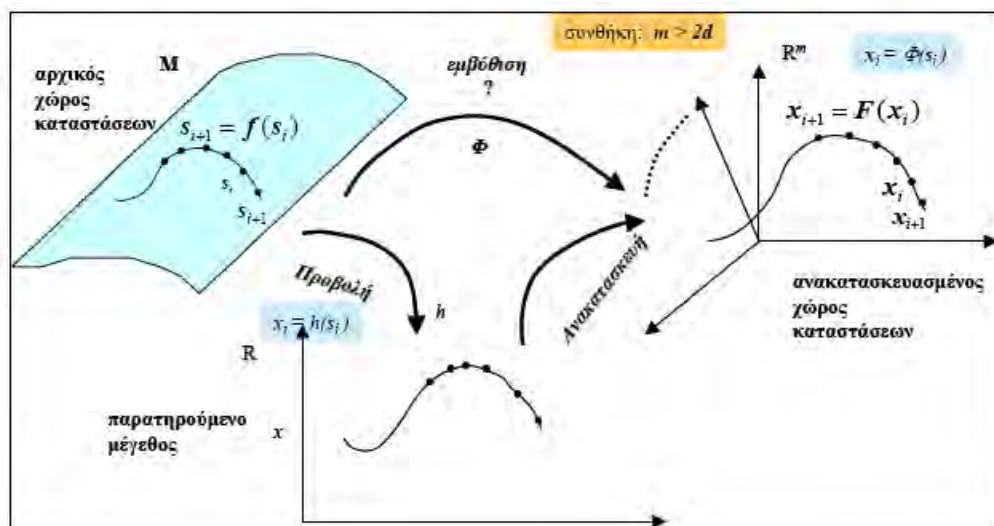
όπου  $w_k$  είναι το σύνολο βαρών (Tukey, Parzen, κλπ) και  $M$  μικρότερο του  $N$  είναι το σημείο αποκοπής των συντελεστών αυτοδιασποράς.

## 1.5 Μη Γραμμική Ανάλυση Χρονοσειρών

### 1.5.1 Ανακατασκευή Χώρου Φάσεων

Το θεώρημα του Takens (Takens (1981), Sauer et al (1991)) επιτρέπει κάτω από κάποιες συνθήκες να κατασκευάσουμε ένα καινούριο χώρο καταστάσεων διάστασης  $m$  στον οποίο οι ανακατασκευασμένες τροχιές  $\{\vec{x}_i\} \in \mathbb{R}^m$  από τη χρονοσειρά  $\{X_i\}$ , δηλαδή ο ανακατασκευασμένος ελκυστής, διατηρεί τις τοπολογικές ιδιότητες του αρχικού ελκυστή και το ανακατασκευασμένο δυναμικό σύστημα,  $\vec{x}_{i+1} = F(\vec{x}_i)$ , έχει τα ίδια δυναμικά χαρακτηριστικά με το αρχικό σύστημα,  $\vec{s}_{i+1} = f(\vec{s}_i)$ , δηλαδή επιτυγχάνεται εμβύθιση (embedding)  $\Phi$  του αρχικού συστήματος στο ανακατασκευασμένο σύστημα,  $\vec{x}_i = \Phi(\vec{s}_i)$ .

Το θεώρημα του Takens δίνει τη συνθήκη  $m \geq 2D + 1$  για την ανακατασκευή του χώρου καταστάσεων, όπου  $D$  είναι η μορφοκλασματική διάσταση του ελκυστή. Αν η διάσταση  $m$  του ανακατασκευασμένου χώρου καταστάσεων δεν είναι ικανοποιητικά μεγάλη, τότε ο ανακατασκευασμένος ελκυστής δεν «απλώνεται» πλήρως αλλά παρουσιάζει αυτό-τομές (intersections) κι άρα δεν είναι τοπολογικά ισοδύναμος με τον αρχικό ελκυστή (σημειώνεται ότι ένα δυναμικό σύστημα δεν μπορεί να έχει δύο λύσεις για την ίδια αρχική συνθήκη κι άρα δε μπορούν δύο τροχιές του να τέμνονται). Η συνθήκη βεβαιώνει ότι στον Ευκλείδειο χώρο διάστασης  $m$  όπου  $m \geq 2D + 1$  δε θα υπάρχουν αυτό-τομές του ελκυστή. Θα πρέπει να σημειωθεί επίσης ότι το θεώρημα του Takens αναφέρεται σε χρονοσειρές με άπειρο μήκος και χωρίς θόρυβο. Στην πράξη αυτές οι συνθήκες φυσικά δε συναντώνται και γι αυτό τα αποτελέσματα της ανακατασκευής μπορούν να θεωρηθούν μόνο προσεγγιστικά. Στο παρακάτω σχεδιάγραμμα παρουσιάζεται το πρόβλημα της ανακατασκευής του χώρου καταστάσεων από τη χρονοσειρά.



Η ανακατασκευή του χώρου καταστάσεων γίνεται απλά με τη δημιουργία σημείων  $m$ -διάστατων  $x_i \in \mathbb{R}^m$  από τις μονοδιάστατες παρατηρήσεις  $\{x_i\}$  για  $i = 1, \dots, N$ . Η πιο απλή μέθοδος ανακατασκευής του χώρου καταστάσεων είναι η μέθοδος των υστερήσεων και τα σημεία  $x_i$  σχηματίζονται απλά ως

$$x_i = [x_i, x_{i-\tau}, \dots, x_{i-(m-1)\tau}]^T \quad (1.16)$$

Οι παράμετροι της ανακατασκευής είναι:

- Η διάσταση εμβύθισης (embedding dimension)  $m$  που ορίζει τον αριθμό των παρατηρήσεων που γίνονται συνιστώσες του ανακατασκευασμένου διανύσματος.
- Η υστέρηση (delay)  $\tau$  που ορίζει με ποια χρονική διαφορά επιλέγονται οι  $m$  παρατηρήσεις για χρόνους μικρότερους της χρονικής στιγμής  $i$  (εννοώντας σε πραγματικό χρόνο τη χρονική στιγμή  $i\tau$  αν  $\tau \neq 1$ ).

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η πληροφορία που διοχετεύεται από τη χρονοσειρά στο κάθε ανακατασκευασμένο διάνυσμα  $x_i$  καλύπτει το χρονικό παράθυρο  $\tau_w = (m-1)\tau$ . Για να επιτευχθεί σωστή ανακατασκευή θα πρέπει το παράθυρο αυτό να μην είναι ούτε πολύ μικρό, αλλιώς δε θα έχει χρησιμοποιηθεί αρκετή πληροφορία, ούτε πολύ μεγάλο, αλλιώς θα υπάρχει περιττή πληροφορία που θα περιπλέξει την ανακατασκευή. Για την ανακατασκευή του χώρου καταστάσεων πρέπει να επιλέξουμε κατάλληλες τιμές για τις παραμέτρους  $m$  και  $\tau$ . Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιες μέθοδοι εκτίμησης των  $m$  και  $\tau$ .

### 1.5.1.1 Εκτίμηση Χρονικής Υστέρησης ( $\tau$ )

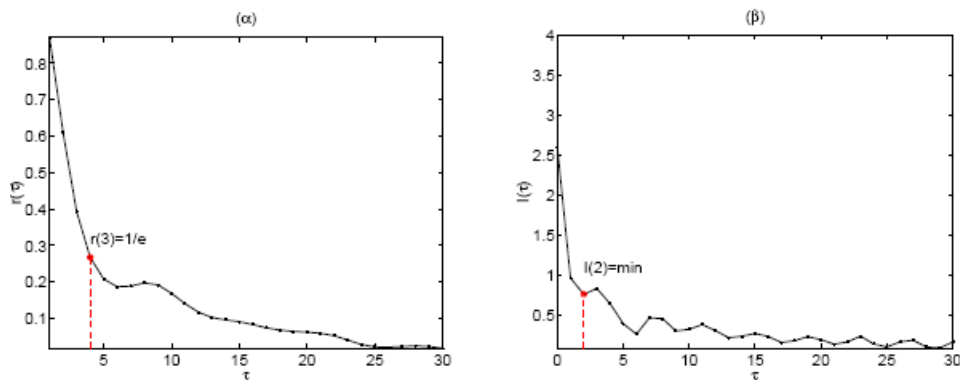
Το πρόβλημα επιλογής κατάλληλου  $\tau$  παρουσιάζεται όταν οι παρατηρήσεις έχουν γίνει με μικρό χρόνο δειγματοληψίας  $\tau_s$  και διαδοχικές παρατηρήσεις δε διαφέρουν σημαντικά. Σε μια τέτοια περίπτωση αν χρησιμοποιήσουμε μικρό  $\tau$  δημιουργείται πλεονασμός πληροφορίας και διαδοχικές συνιστώσες είναι περίπου ίδιες. Από την άλλη, αν διαλέξουμε μεγάλο  $\tau$  η δυναμική του συστήματος, όπως αυτή προβάλλεται στη χρονοσειρά, αποκόπτεται. Δεν είναι ξεκάθαρο που βρίσκονται τα όρια μικρού και μεγάλου  $\tau$  και κάποιος θα μπορούσε ακόμα και να αμφισβητήσει την εγκυρότητα των κριτηρίων του πλεονασμού και της αποκοπής της πληροφορίας για τη δυναμική του συστήματος.

Έχει επικρατήσει ωστόσο να θεωρείται ως καλύτερη επιλογή η μικρότερη τιμή του  $\tau$  που καθιστά τις συνιστώσες του  $x_i$  ασυσχέτιστες:

- Χρησιμοποιώντας την συνάρτηση της **αυτοσυσχέτισης**, επιλέγεται ο χρόνος  $\tau$  για τον οποίο μηδενίζεται η αυτοσυσχέτιση για πρώτη φορά,  $r_x(\tau) = 0$ . Αν δε φθίνει γρήγορα προς το 0, επιλέγεται από τη σχέση  $r_x(\tau) = 1/e$ .
- Η συνάρτηση **αμοιβαίας πληροφορίας** (mutual information)  $I(X,Y)$  μετράει την γραμμική και μη γραμμική συσχέτιση δύο μεταβλητών  $X$  και  $Y$  και δίνεται ως

$$I(X,Y) = \sum_{x,y} P_{XY}(x,y) \log \frac{P_{XY}(x,y)}{P_X(x)P_Y(y)} \quad (1.17)$$

όπου  $p_x(X)$  είναι η πιθανότητα του  $X=x$ ,  $p_{XY}(x,y)$  είναι η κοινή πιθανότητα  $X=x$  και  $Y=y$  και το άθροισμα υπολογίζεται για όλες τις δυνατές τιμές των  $X$  και  $Y$  (για συνεχείς μεταβλητές  $X$  και  $Y$  εφαρμόζουμε κατάλληλο διαμερισμό των πεδίων τιμών τους). Για χρονοσειρές η αμοιβαία πληροφορία δίνεται ως  $I(\tau) = I(x_i, x_{i-\tau})$  και αφορά τις μεταβλητές  $x_i$  και  $x_{i-\tau}$ . Η συνάρτηση  $I(\tau)$  παίρνει πάντα θετικές τιμές. Η υστέρηση  $\tau$  που αντιστοιχεί στο πρώτο τοπικό ελάχιστο της  $I(\tau)$  προτείνεται ως η καταλληλότερη τιμή του  $\tau$  για την ανακατασκευή του χώρου καταστάσεων.



(α) Αυτοσυσχέτιση και επιλογή κατάλληλης υστέρησης  $\tau$  από το κριτήριο  $r_x(\tau) = 1/e$  για τη χρονοσειρά της  $x$ -μεταβλητής του συστήματος Lorenz με  $\tau_s = 0.1s$  (ο πρώτος μηδενισμός της αυτοσυσχέτισης γίνεται για μεγάλη υστέρηση  $\tau > 30$ ). (β) Αμοιβαία πληροφορία και επιλογή κατάλληλης υστέρησης  $\tau$  από το κριτήριο του πρώτου τοπικού για την ίδια χρονοσειρά.

### 1.5.1.2 Εκτίμηση Διάστασης Εμβύθισης ( $m$ )

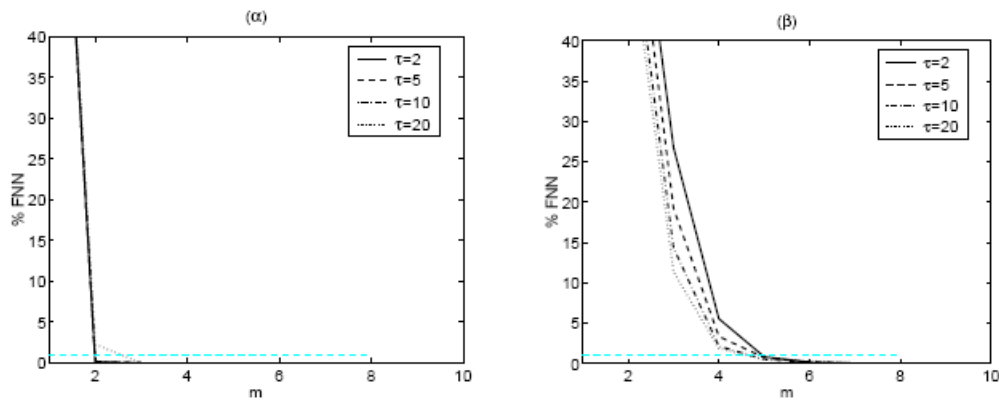
Το θεώρημα του Takens δίνει την ικανή συνθήκη  $m \geq 2D + 1$  για την αποφυγή αυτό-τομών στην ανακατασκευή του ελκυστή. Αυτή η συνθήκη δεν είναι και αναγκαία και θα θέλαμε να χρησιμοποιήσουμε όσο το δυνατόν μικρότερη διάσταση εμβύθισης  $m$ . Αν γνωρίζαμε την τοπολογική διάσταση  $d$  του Ευκλείδειου χώρου ή της πολλαπλότητας που τον καλύπτει, για τη ζητούμενη βέλτιστη διάσταση εμβύθισης  $m'$  θα ίσχυε  $2D + 1 \geq m' \geq d$ . Επειδή όμως  $d$  και  $D$  είναι άγνωστα δεν υπάρχουν ενδείξεις για την επιλογή του  $m$ .

Μια μέθοδος που χρησιμοποιείται συνήθως για την εύρεση του  $m'$  είναι η μέθοδος των ψευδών κοντινότερων γειτόνων (method of false nearest neighbors, FNN). Η μέθοδος βασίζεται στη σχέση ψευδών γειτόνων και αυτό-τομών και συνοψίζεται στα παρακάτω σημεία

- Αν για κάποια διάσταση εμβύθισης  $m$  δύο σημεία του ανακατασκευασμένου ελκυστή  $x_i^m$  και  $x_j^m$  (ο εκθέτης δηλώνει τη διάσταση) είναι πολύ κοντά, τότε είτε είναι πραγματικά γειτονικά σημεία και βρίσκονται κοντά λόγω της δυναμικής του συστήματος, ή είναι ψευδή γειτονικά σημεία και βρίσκονται κοντά λόγω αυτό-τομής του ελκυστή.

- Αυξάνουμε κατά 1 τη διάσταση εμβύθισης (στο διάνυσμα  $x^m_i$  προστίθεται η συνιστώσα  $x_{i-m\tau}$  για να δώσει το  $x^{m+1}_i$ ) και εξετάζουμε την απόσταση των  $x^{m+1}_i$  και  $x^{m+1}_j$ .
- Αν η απόσταση μεγάλωσε δραματικά (σύμφωνα με κάποιο όριο για το λόγο των αποστάσεων για  $m$  και  $m+1$ ) τότε τα σημεία  $x^m_i$  και  $x^m_j$  είναι ψευδείς γείτονες στο χώρο  $R^m$  και άρα το  $m$  δεν είναι ικανοποιητικά μεγάλο.
- Για κάθε σημείο  $x^m_i$  βρίσκουμε τον κοντινότερο του σημείο  $x^m_j$  και ελέγχουμε αν είναι ψευδή γειτονικό σημείο.
- Αν βρούμε σημαντικό ποσοστό ψευδών γειτονικών σημείων αυξάνουμε το  $m$  κατά 1.
- Συνεχίζουμε αυτή τη διαδικασία μέχρι τη διάσταση  $m'$  για την οποία η πρόσθεση μιας καινούριας συνιστώσας δε δίνει ψευδή γειτονικά σημεία. Τυπικό κριτήριο τερματισμού για το ποσοστό των ψευδών γειτονικών σημείων είναι το 1%.

Για την εφαρμογή της μεθόδου FNN θα πρέπει να κάνουμε ανακατασκευή του χώρου καταστάσεων για κάθε  $m$ , και άρα θα πρέπει να ορίσουμε πρώτα την παράμετρο υστέρησης  $\tau$ . Ένα από τα προβλήματα εφαρμογής αυτής της μεθόδου είναι λοιπόν η εξάρτηση του  $m'$  από το  $\tau$ . Επίσης η μέθοδος FNN είναι ευαίσθητη στην ύπαρξη θορύβου.



(α) Ποσοστό ψευδών γειτόνων (FNN) για τη χρονοσειρά της x-μεταβλητής του συστήματος Lorenz ( $\tau_s=0.1s$ ) για διάφορους χρόνους υστέρησης, όπως δίνονται στο ένθετο. (β) Όπως στο (α) αλλά στη χρονοσειρά προστέθηκε 10% λευκός θόρυβος.

### 1.5.2 Εκτίμηση Μη-Γραμμικών Χαρακτηριστικών του Δυναμικού Συστήματος

Στη γραμμική ανάλυση για τον καθορισμό του κατάλληλου μοντέλου μελετήσαμε πρώτα γραμμικά χαρακτηριστικά της χρονοσειράς, όπως είναι η αυτοσυσχέτιση και η φασματική ανάλυση. Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία στη μη-γραμμική ανάλυση, θα εκτιμήσουμε πρώτα κάποια μη-γραμμικά χαρακτηριστικά της χρονοσειράς. Τα χαρακτηριστικά αυτά δίνουν πληροφορίες για το υπό μελέτη σύστημα, όπως για τη διάσταση του ελκυστή του συστήματος και την πολυπλοκότητα του συστήματος.

Τα μη-γραμμικά χαρακτηριστικά ορίζονται στα πλαίσια της θεωρίας των μη-γραμμικών δυναμικών συστημάτων και του χάους ως αναλλοίωτα μέτρα του συστήματος (invariant measures), δηλαδή ως σταθερά μεγέθη που δεν αλλοιώνονται από την εξέλιξη του συστήματος, καθώς και τη διαδικασία παρατήρησης του όταν αναφερόμαστε σε χρονοσειρές. Τέτοια χαρακτηριστικά είναι η πυκνότητα των τροχιών, η μορφοκλασματική διάσταση, η εντροπία και οι εκθέτες Lyapunov.



### 1.5.2.1 Διάσταση συσχέτισης

Ένας ελκυστής, όπως κάθε γεωμετρικό αντικείμενο, χαρακτηρίζεται από την Ευκλείδεια διάσταση του Ευκλείδειου χώρου που περιέχει τον ελκυστή (π.χ. για τον ανακατασκευασμένο χώρο είναι η διάσταση εμβύθισης  $m$ ) και την τοπολογική διάσταση της πολλαπλότητας πάνω στην οποία βρίσκεται ο ελκυστής. Για να χαρακτηρίσουμε όμως την ιδιότητα της αυτό-ομοιότητας εισάγουμε τη μορφοκλασματική διάσταση. Η διάσταση αυτή είναι συνεπής με τη συνήθη έννοια της διάστασης, δηλαδή πεπερασμένα σύνολα σημείων έχουν διάσταση 0, γραμμές έχουν διάσταση 1 και επιφάνειες έχουν διάσταση 2. Επιπλέον, για γεωμετρικά αντικείμενα με την ιδιότητα της αυτό-ομοιότητας, όπως τυπικά είναι οι παράξενοι ελκυστές, η μορφοκλασματική διάσταση είναι μη-ακέραιος αριθμός.

Η διάσταση συσχέτισης (correlation dimension)  $\nu$  είναι ένα από τα αναλλοίωτα μέτρα που εκφράζουν τη μορφοκλασματική διάσταση (D. Kugiumtzis, 1996). Άλλα τέτοια μέτρα είναι η διάσταση της μέτρησης κουτιών (box counting dimension) και η διάσταση πληροφορίας (information dimension). Θα μελετήσουμε τη διάσταση συσχέτισης λόγω της ευκολίας του υπολογισμού της και της εκτενής χρήσης της σε εφαρμογές.

Ας θεωρήσουμε έναν ελκυστή ως ένα μη-πεπερασμένο σύνολο σημείων  $x_i$  και ας ορίσουμε την πιθανότητα  $P(|x_i - x_j| < r)$  η απόσταση δύο σημείων του ελκυστή να είναι μικρότερη από κάποια απόσταση  $r$ , όπου  $|x|$  είναι το μήκος του διανύσματος  $x$  ορισμένο με κάποια μετρική όπως η Ευκλείδεια μετρική. Αν  $\mu_i$  είναι ο αριθμός των σημείων που βρίσκονται μέσα σε σφαίρα με ακτίνα  $r$  και κέντρο  $x_i$ , τότε η μέση τιμή ως προς όλα τα  $x_i$   $\langle \mu_i \rangle_x$  προσεγγίζει την παραπάνω πιθανότητα. Σύμφωνα με το νόμο κλιμάκωσης (scaling law) είναι:

$$\langle \mu_i \rangle_x \sim r^\nu \quad \text{όταν} \quad r \rightarrow 0$$

δηλαδή για μικρές ακτίνες  $r$  η πιθανότητα η απόσταση δύο σημείων του ελκυστή να είναι μικρότερη του  $r$  αλλάζει αναλογικά με κάποια δύναμη της απόστασης  $r$  με σταθερό εκθέτη  $\nu$ . Αν ο ελκυστής έχει συνηθισμένη μορφή (πεπερασμένο σύνολο σημείων, γραμμή, επιφάνεια κτλ.) ο εκθέτης  $\nu$  είναι ακέραιος αριθμός ενώ αν είναι παράξενος το  $\nu$  είναι μη-ακέραιος και δηλώνει το βαθμό αυτό-ομοιότητας.

Για ένα σύνολο πεπερασμένων σημείων  $\{x_i\}$ ,  $i=1, \dots, N$ , όπως η ανακατασκευασμένη τροχιά από τη χρονοσειρά, το  $\langle \mu_i \rangle_x$  εκτιμάται από το άθροισμα συσχέτισης (correlation sum)  $C(r)$

$$C(r) = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N \sum_{j=i+1}^N \Theta(r - \|x_i - x_j\|) \quad (1.18)$$

όπου  $\Theta(x)$  είναι η λεγόμενη Heaviside συνάρτηση

$$\Theta(x) = \begin{cases} 0 & \text{όταν } x \leq 0 \\ 1 & \text{όταν } x > 0 \end{cases}$$

Το διπλό άθροισμα μετράει όλα τα δυνατά ζευγάρια  $(x_i, x_j)$  που έχουν απόσταση μικρότερη από  $r$ . Για  $N \rightarrow \infty$  και  $r \rightarrow 0$  από το νόμο κλιμάκωσης βρίσκουμε τη διάσταση συσχέτισης ως

$$\nu = \frac{d \log C(r)}{d \log r} \quad (1.19)$$

Είναι φανερό ότι τα δύο όρια ( $N \rightarrow \infty$  και  $r \rightarrow 0$ ) δεν ικανοποιούνται στην πραγματικότητα αφού οι χρονοσειρές έχουν πεπερασμένο μήκος και τα δεδομένα δίνονται με πεπερασμένη ακρίβεια. Περιμένουμε λοιπόν το γράφημα του  $\log C(r)$  vs  $\log r$  να σχηματίζει ευθεία γραμμή (δηλαδή να έχει σταθερή κλίση) για κάποιο διάστημα σχετικά μικρών τιμών του  $r$ , που το ονομάζουμε περιοχή κλιμάκωσης του  $r$  (scaling region). Εναλλακτικά, θα πρέπει για την περιοχή κλιμάκωσης του  $r$ , το γράφημα της παραγώγου που δίνεται στην να σταθεροποιείται σε μια οριζόντια γραμμή στο ύψος της τιμής  $\nu$ . Για την εκτίμηση χαρακτηριστικής για το σύστημα διάστασης συσχέτισης  $\nu$  από μια χρονοσειρά θα πρέπει επιπλέον το ίδιο οριζόντιο επίπεδο της παραγώγου της να παρατηρείται για διαφορετικές ανακατασκευές του ελκυστή. Για τις ανακατασκευές συνήθως χρησιμοποιούμε τη μέθοδο της υστέρησης με σταθερή κάποια κατάλληλη τιμή του  $\tau$  και αυξανόμενη διάσταση εμβύθισης  $m$ . Περιμένουμε η εκτίμηση της διάστασης συσχέτισης  $\nu$  ως συνάρτηση της διάστασης εμβύθισης  $m$ ,  $\nu(m)$ , να δίνεται ως εξής:

- Για μικρές τιμές του  $m$ , όπου η ανακατασκευή του ελκυστή δεν είναι ικανοποιητική, το οριζόντιο επίπεδο που δίνει την εκτίμηση του  $\nu$  ( $m$ ) θα αυξάνει με την αύξηση του  $m$ .
- Για μεγαλύτερες τιμές του  $m$  θα πρέπει το οριζόντιο επίπεδο να συγκλίνει στο ίδιο ύψος  $\nu = \nu(m)$ .
- Καθώς το  $m$  μεγαλώνει ακόμα περισσότερο η περιοχή κλιμάκωσης σταδιακά εξαφανίζεται και η εκτίμηση του  $\nu$  δεν είναι πια δυνατή.

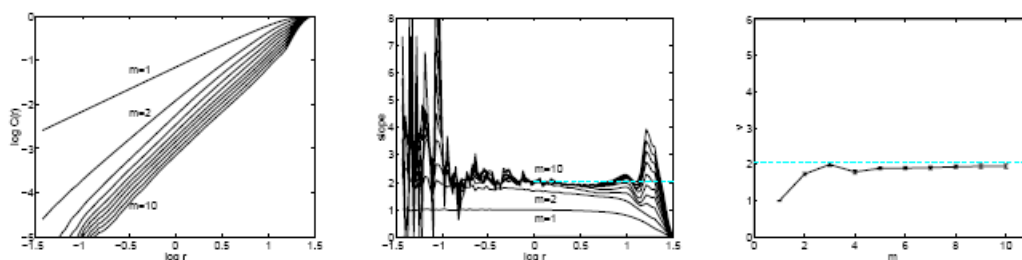
Η διαδικασία υπολογισμού της διάστασης συσχέτισης  $\nu$  παριστάνεται γραφικά με τρία σχήματα

- Το πρώτο σχήμα είναι το γράφημα  $\log C(r)$  vs  $\log r$  για ένα εύρος τιμών της  $m$ ,  $\max m = 1, 2, \dots, m$  (στο σχήμα παρουσιάζονται  $\max m$  διαφορετικές γραμμές).
- Το δεύτερο σχήμα είναι το γράφημα παρακάτω για το ίδιο εύρος τιμών της  $m$ .

$$\frac{d \log C(r)}{d \log r} \text{ vs } \log r$$

- Το τρίτο σχήμα είναι το γράφημα  $\nu(m)$  vs  $m$ , όπου  $\nu(m)$  είναι η εκτίμηση της κλίσης από τα γραφήματα στο πρώτο σχήμα ή του οριζοντίου επιπέδου από τα γραφήματα στο δεύτερο σχήμα αντίστοιχα για κάθε τιμή του  $m$ . Συνήθως σχηματίζουμε και το όριο  $\pm SD$  της απόκλισης για την κλίση ή το οριζόντιο επίπεδο, όπου  $SD$  είναι η τυπική απόκλιση.
- Το τέταρτο σχήμα είναι γράφημα  $[\log r_1, \log r_2]$  και δίνει τις περιοχές κλιμάκωσης

Παρακάτω δίνεται ένα παράδειγμα για το σύστημα Lorenz.



Εικόνα 2. Παράδειγμα σύστημα Lorenz.

Η εκτίμηση του  $\nu$  επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες:

- Για χρονοσειρές από συνεχή συστήματα με μικρό χρόνο δειγματοληψίας  $\tau_s$ , χρονικά κοντινά σημεία αλλοιώνουν την στατιστική  $C(r)$  γιατί ενώ είναι σε απόσταση μικρότερη του  $r$  ανήκουν στην ίδια τροχιά και δε θα έπρεπε να μετρηθούν στο  $C(r)$ . Η μέτρηση τέτοιων ζευγαριών δίνει υποεκτίμηση του  $\nu$ . Μπορούμε απλά να απαλείψουμε όλα αυτά τα ζευγάρια θέτοντας τη συνθήκη  $|i - j| < w$  στο άθροισμα της αντίστοιχης συνάρτησης, όπου  $w$  είναι ένας ικανά μεγάλος χρόνος (π.χ. ο μέσος χρόνος ταλάντωσης).
- Για χρονοσειρές από συνεχή συστήματα η επιλογή του χρόνου υστέρησης  $\tau$ , σε συνδυασμό και με την διάσταση εμβύθισης  $m$  μπορεί να επηρεάσει την εκτίμηση του  $\nu$ , κυρίως όταν η περιοχή κλιμάκωσης του  $r$  είναι μικρή. Για πολύ μικρά  $\tau$  μπορεί η σύγκλιση του  $\nu(m)$  για διάφορα  $m$  να δίνει υποεκτίμηση της πραγματική διάστασης συσχέτισης, ενώ για μεγάλα  $\tau$  μπορεί να μη συγκλίνουν οι εκτιμήσεις  $\nu(m)$  (εφαρμογή παραθύρου Theiler).
- Ο θόρυβος (συστήματος ή παρατήρησης) αλλοιώνει την κλιμάκωση για αποστάσεις  $r$  ως και το επίπεδο του εύρους του θορύβου. Σε τέτοιες μικρές περιοχές η αυτό-ομοιότητα καταστρέφεται από το θόρυβο και η κατανομή των σημείων καθορίζεται περισσότερο από την κατανομή του θορύβου παρά από τη δυναμική του συστήματος. Γι αυτό για μικρά  $r$  εμφανίζεται η κλίση να προσεγγίζει το  $m$ . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μικραίνει η περιοχή κλιμάκωσης του  $r$  που επιτρέπει την σωστή εκτίμηση του  $\nu$ . Αν μάλιστα το εύρος του θορύβου είναι μεγάλο μπορεί η περιοχή κλιμάκωσης να καλύπτεται πλήρως και να μην είναι δυνατή η εκτίμηση του  $\nu$ .
- Το μήκος  $N$  της χρονοσειράς καθορίζει επίσης το μέγεθος της περιοχής κλιμάκωσης. Για μικρό  $N$  το διάστημα των τιμών του  $r$  που υποστηρίζει το νόμο κλιμάκωσης συρρικνώνεται από τα αριστερά γιατί για μικρές τιμές του  $r$  η στατιστική των σημείων είναι φτωχή.

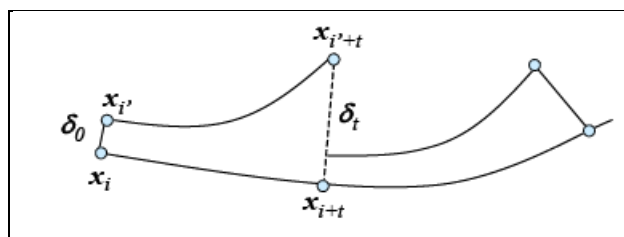
### 1.5.2.2 Εκθέτες Lyapunov

Η ιδιότητα των χαοτικών δυναμικών συστημάτων να έχουν ευαισθησία στις αρχικές συνθήκες κάνει τροχιές τους που αρχικά είναι πολύ κοντά να αποκλίνουν γρήγορα και μάλιστα εκθετικά. Ο μέσος εκθέτης που αντιστοιχεί στη διεύθυνση της μεγαλύτερης απόκλισης των τροχιών είναι ο μεγαλύτερος εκθέτης Lyapunov. Γενικά για ένα δυναμικό σύστημα που παράγει τροχιές σε κάποιο χώρο διάστασης  $m$  υπάρχουν  $m$  εκθέτες Lyapunov, ένας για κάθε διεύθυνση. Ένας αρνητικός εκθέτης Lyapunov δηλώνει το βαθμό σύγκλισης τροχιών στη διεύθυνση που του αντιστοιχεί ενώ ένας θετικός εκθέτης Lyapunov δηλώνει το βαθμό απόκλισης των τροχιών σε αυτήν τη διεύθυνση. Για ροές, τουλάχιστον ένας εκθέτης Lyapunov είναι 0 και αντιστοιχεί στη διεύθυνση της κίνησης της τροχιάς. Αν το αιτιοκρατικό δυναμικό σύστημα δεν είναι χαοτικό τότε δεν έχει κανένα θετικό εκθέτη Lyapunov. Για συστήματα απώλειας ενέργειας το άθροισμα των εκθετών Lyapunov είναι πάντα αρνητικό.

Υπάρχουν μέθοδοι εκτίμησης όλου του φάσματος των εκθετών Lyapunov, πιο σημαντική είναι η εκτίμηση του μέγιστου εκθέτη Lyapunov  $\lambda_1$  (maximal Lyapunov exponent), που μας επιτρέπει να χαρακτηρίσουμε το σύστημα χαοτικό αν  $\lambda_1 > 0$ , καθώς και να μετρήσουμε το βαθμό πολυπλοκότητας του συστήματος με την τιμή του  $\lambda_1$ .

Ας υποθέσουμε ότι δύο σημεία  $x_i$  και  $x_{i'}$  που ανήκουν σε δύο διαφορετικές τροχιές βρίσκονται κοντά και σε απόσταση  $\delta_0 = ||x_{i'} - x_i||$ , όπως δείχνει το παρακάτω σχήμα. Μετά από κάποιο χρόνο  $t$  η απόστασή τους γίνεται  $\delta_t = ||x_{i'+t} - x_{i+t}||$ . Ο μέγιστος εκθέτης Lyapunov ορίζεται ως

$$\delta_t \cong \delta_0 e^{\lambda_1 t} \quad \text{για } t \rightarrow \infty$$



Αν το σύστημα είναι χαοτικό και οι τροχιές αποκλίνουν ο εκθέτης  $\lambda_1$  είναι θετικός. Βέβαια δύο τροχιές δε μπορεί συνέχεια να αποκλίνουν καθώς αυξάνει ο χρόνος  $t$  αφού ο ελκυστής περιορίζεται σε κάποια περιοχή του χώρου καταστάσεων. Άρα για την παραπάνω σχέση ισχύει για χρόνους  $t$ , όπου το  $\delta_t$  παραμένει μικρό. Για να είναι δυνατόν λοιπόν να μετρηθεί η απόκλιση θα πρέπει να ισχύει  $\delta_0 \rightarrow 0$ .

Ο ορισμός της παραπάνω σχέσης έχει πρακτικές δυσκολίες και δεν επιτρέπει τον υπολογισμό του  $\lambda_1$  από πεπερασμένη χρονοσειρά αφού δε μπορεί να ισχύει  $\delta_0 \rightarrow 0$  και  $t \rightarrow \infty$ . Η εκτίμηση του  $\lambda_1$ , όπου ο ελκυστής αποτελείται από το σύνολο των ανακατασκευασμένων σημείων, γίνεται ως εξής:

- Αρχίζουμε με ένα σημείο αναφοράς  $x_i$  του ανακατασκευασμένου ελκυστή και βρίσκουμε το κοντινότερο σημείο  $x_{i'}$  του ελκυστή, έστω σε απόσταση  $\delta_{0,i}$ .
- Υπολογίζουμε την απόσταση των δύο τροχιών που ξεκινούν ύστερα από χρόνο  $t$ , δηλαδή την απόσταση  $t, i$  των σημείων  $x_{i+t}$  και  $x_{i'+t}$ .
- Ορίζουμε ως νέο σημείο αναφοράς  $x_{i+t}$  και επαναλαμβάνουμε τα δύο προηγούμενα βήματα.

Επαναλαμβάνουμε την ίδια διαδικασία μέχρι τα σημεία αναφοράς να καλύψουν όλα τα σημεία. Ο μέγιστος εκθέτης Lyapunov εκτιμάται από το μέσο όρο της εκθετικής απόκλισης  $\delta_{t,i}$  από  $\delta_{0,i}$  όλων των σημείων αναφοράς  $x_i$  ως:

$$\lambda_1 = \frac{1}{Nt} \sum_{j=1}^N \log \frac{\delta_{t,j}}{\delta_{0,j}}$$

Για χρονοσειρές, τα σημεία  $x_i$  προέρχονται από την χρονοσειρά με την ανακατασκευή του χώρου καταστάσεων. Εκτός από τις παραμέτρους  $\tau$  και  $m$  της ανακατασκευής θα πρέπει να οριστούν κι άλλες παράμετροι του αλγόριθμου εκτίμησης του  $\lambda_1$ , όπως ο χρόνος  $t$ . Όπως και για την εκτίμηση της διάστασης συσχέτισης, η εκτίμηση του  $\lambda_1$  επηρεάζεται από το θόρυβο και το μήκος της χρονοσειράς κατά τον ίδιο τρόπο, δηλαδή περισσότερος θόρυβος ή μικρότερο μήκος δίνουν χειρότερες εκτιμήσεις του  $\lambda_1$ . Ένα βασικό πρόβλημα με την εκτίμηση του  $\lambda_1$  με την παραπάνω μέθοδο είναι η προϋπόθεση ότι η απόκλιση είναι εκθετική, όπως συμβαίνει στα χαοτικά συστήματα. Όταν εφαρμόζουμε τη μέθοδο σε κάποια χρονοσειρά δε ξέρουμε από πριν αν είναι χαοτική. Η μέθοδος αυτή δίνει επίσης θετική τιμή του  $\lambda_1$  για στοχαστικά συστήματα.

Για παράδειγμα για χρονοσειρά από λευκό θόρυβο, το  $\lambda_1$  αντιστοιχεί σε απόκλιση ίση με την τυπική απόκλιση του θορύβου για  $t=1$ . Η εκτίμηση του  $\lambda_1$  δε μπορεί λοιπόν να ξεχωρίσει ένα χαοτικό από ένα στοχαστικό σύστημα.

### 1.5.3 Ανάλυση Χρονοσειρών με την Μέθοδο των Γραφημάτων Επαναφοράς και της Ποσοτικής Ανάλυσης Επαναφοράς

Η ανάγκη τεκμηρίωσης της ύπαρξης κάποιων μη γραμμικών χαρακτηριστικών των δυναμικών συστημάτων, οδήγησε στην ανάπτυξη νέων μεθόδων (πέραν των μη γραμμικών μεθόδων ανάλυσης χρονοσειρών), οι οποίες βασίζονται κυρίως στο ρυθμό επαναληπτικότητας ή επαναφοράς (reccurence) των καταστάσεων του συστήματος στον ανακατασκευασμένο χώρο των φάσεων. Το 1987 ο Echmann (Echmann, 1987) εισήγαγε μία νέα μέθοδο για την οπτικοποίηση της επαναφοράς των τροχιών (γραφήματα επαναφοράς - Reccurence Plots) των δυναμικών συστημάτων στον ανακατασκευασμένο χώρο των φάσεων. Στην μέθοδο ποσοτικοποίησης γραφημάτων επαναφοράς στηρίχτηκαν οι Webber και Zbilut [Webber, Zbilut (1992) και Marvan (2007)] και εισήγαγαν την ποσοτική μέθοδο επαναφοράς (Reccurence Qualification Analysis)

#### 1.5.3.1 Γραφήματα Επαναφοράς (Reccurence Plots)

Τα Γραφήματα Επαναφοράς – ΓΕ (Reccurence Plots) (Echmann et al. 1987) είναι μία γραμμική μέθοδος που επιτρέπει την διεξαγωγή ποιοτικών χαρακτηριστικών των υποκείμενων δυναμικών συστημάτων από την ανάλυση μετρήσεων του συστήματος (χρονοσειρές). Σημαντικό πλεονέκτημα των γραφημάτων είναι ότι μπορούν να εφαρμοστούν και σε περιπτώσεις που χρονοσειρά δεν είναι στάσιμη (Marvan, 2002). Η μέθοδος βασίζεται στην ανακατασκευή του χώρου των φάσεων του υπό μελέτη δυναμικού συστήματος.

Θεωρούμε μία τροχιά  $\{x_i\}_{i=1}^N$  ενός συστήματος στο χώρο των φάσεων. Οι συνιστώσες του συστήματος μπορεί να είναι ποσότητες, όπως ταχύτητα, θερμοκρασία, πίεση αέρα κ.α. Η εξέλιξη των συστημάτων αυτών περιγράφεται από

χρονοσειρές. Αρχικά η χρονοσειρά  $x(t)$  εμβυθίζεται σε ένα  $m$ -διάστατο χώρο, δημιουργώντας μία ακολουθία διανυσμάτων  $x_i = [x(t_i - (m-1)t_d, x(t_i - (m-2)t_d, \dots, x(t_i)]$  όπου  $t_d$  είναι μία κατάλληλα επιλεγμένη χρονική υστέρηση και  $m$  η διάσταση εμβύθισης. Έπειτα υπολογίζεται η απόσταση  $d_{i,j} = \|x_i - x_j\|$  μεταξύ των σημείων  $i, j$  στον  $m$ -διάστατο ανακατασκευασμένο χώρο των φάσεων και δημιουργείται ένας τετραγωνικός πίνακας  $R_{i,j}$  διαστάσεων  $N \times N$  (όπου  $N$  ο αριθμός των ανακατασκευασμένων διανυσμάτων κατάστασης) με στοιχεία τις αποστάσεις  $d_{i,j}$ .

$$R_{i,j} = \begin{cases} 1, & \vec{x}_i \approx \vec{x}_j \\ 0, & \vec{x}_i \neq \vec{x}_j \end{cases} \quad i, j = 1, \dots, N$$

Όπου  $N$  ο αριθμός των υποτιθέμενων καταστάσεων του συστήματος. Με βάση τον πίνακα αυτόν, δημιουργείται ένα διδιάστατο γράφημα. Θέτοντας μία σκούρα κουκίδα στο στοιχείο  $(i, j)$ , εάν η απόσταση μεταξύ των  $i$  και  $j$  είναι μικρότερη από μία τιμή  $\varepsilon_i$ , δηλαδή στην περίπτωση που οι αποστάσεις  $d_{i,j}$  έχουν υπολογιστεί με την Ευκλείδεια νόρμα, εάν το σημείο  $x_j$  βρίσκεται εντός μιας υπερσφαίρας ακτίνας  $\varepsilon_i$  και κέντρου  $x_i$ .

Θέτοντας  $x_i = x_j$ , το παραγόμενο γράφημα είναι συμμετρικό και περιέχει μία σκούρα κύρια διαγώνιο, η οποία ονομάζεται γραμμή ταυτοποίησης. Συνεπώς τα σκούρα σημεία δείχνουν ότι τα αντίστοιχα σημεία του ανακατασκευασμένου χώρου των φάσεων βρίσκονται κοντά και ένα ΓΕ μπορεί να φανερώσει τη δομή αυτοσυσχέτισης του συστήματος. Το ΓΕ ορίζεται από την σχέση.

$$R_{i,j}^{m,\varepsilon_i} = \Theta(\varepsilon_i - \|x_i - x_j\|) \quad i, j = 1, \dots, N$$

Όπου  $\Theta(x)$  η συνάρτηση του Heaviside

$$\Theta(x) = \begin{cases} 0 & \text{αν } \|x_i - x_j\| < \varepsilon_i \\ 1 & \text{αλλιώς} \end{cases}$$

και  $N$  ο αριθμός των σημείων και  $\varepsilon_i$  η ακτίνα αποκοπής.

Υπάρχουν δύο τύποι γραφημάτων επαναφοράς, τα «μη οριοθετημένα» (unthresholded) και τα οριοθετημένα (thresholded). Στην περίπτωση των οριοθετημένων ΓΕ, η κουκκίδα στο σημείο  $(i, j)$  είναι μαύρου χρώματος, εάν η



απόσταση είναι μικρότερη από ένα δεδομένο όριο, αλλιώς έχει χρώμα λευκό. Σε ένα μη οριοθετημένο γράφημα επαναφοράς, η ακτίνα αποκοπής επιλέγεται να είναι η μέγιστη απόσταση μεταξύ των ανακατασκευασμένων σημείων κατάστασης, έτσι ώστε όλα τα σημεία να θεωρούνται σημεία επαναφοράς, οι κουκκίδες όμως χρωματίζονται ανάλογα με το μέγεθος της απόστασης  $d_{i,j}$  σε σχέση με την ακτίνα αποκοπής. Η ιδέα της κωδικοποίησης με χρώματα ανάλογα με τον βαθμό εγγύτητας των καταστάσεων μεταξύ τους στον ανακατασκευασμένο χώρο των φάσεων μπορεί, επίσης, να χρησιμοποιηθεί και στην περίπτωση των οριοθετημένων γραφημάτων επαναφοράς.

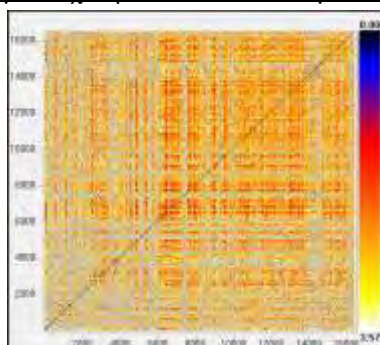
Εάν οι υπό εξέταση χρονοσειρές αντιστοιχούν σε στοχαστικά συστήματα, τα ΓΕ δεν παρουσιάζουν δομή, δηλαδή η κατανομή των χρωμάτων στο ΓΕ είναι ομογενής. Εάν υπάρχει κάποιου είδους ντετερμινισμός στο σύστημα από το οποίο προέρχεται η χρονοσειρά, τότε το αντίστοιχο ΓΕ έχει κάποιας μορφής δομή. Τα ΓΕ φέρνουν δομές μεγάλης και μικρής κλίμακας που επιτρέπουν την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων σχετικά με την δυναμική του συστήματος [Karakasidis et al (2007)].

*Ομογενή ΓΕ* αντιπροσωπεύουν στάσιμα συστήματα, των οποίων οι χαρακτηριστικοί χρόνοι είναι μικροί σε σχέση με αυτούς που διατρέχονται από ένα ΓΕ. Τέτοια ΓΕ μπορεί να εμφανιστούν στα στοχαστικά συστήματα.

Τα *περιοδικά δυναμικά συστήματα* εμφανίζουν ΓΕ με χαρακτηριστικές διαγώνιες γραμμές, παράλληλες προς την κύρια διαγώνιο, ή δομές σκακιέρας.

*Απότομες αλλαγές* στην δυναμική του συστήματος απεικονίζονται σε ένα ΓΕ με μεγάλες λευκές περιοχές, όπως φαίνεται και στο παρακάτω παράδειγμα για την χρονοσειρά που αφορά την ταχύτητα ανόδου του ανέμου σε λόφο (συνιστώσα στον άξονα x)

Παράδειγμα: ταχύτητα ανόδου του ανέμου σε λόφο



Από την συνολική επιθεώρηση ενός ΓΕ, είναι δυνατόν να παρατηρούνται:

- *Απλά μεμονωμένα σημεία* (ομογενές ΓΕ), τα οποία αντιπροσωπεύουν καταστάσεις που είναι σπάνιες ή παρουσιάζουν σημαντικές διακυμάνσεις.
- *Διαγώνιες γραμμές* (η τροχιά επισκέπτεται την ίδια περιοχή του χώρου των φάσεων σε διαφορετικούς χρόνους και μπορεί να υπάρχει αιτιοκρατική διαδικασία),  $R_{i+k,j+k}=1$  για  $k=1,\dots,l$  με  $l$  το μήκος της διαγωνίας γραμμής. Εμφανίζονται όταν ένα τμήμα της τροχιάς στο χώρο των φάσεων είναι παράλληλο σε άλλο, δηλαδή η τροχιά επισκέπτεται την ίδια περιοχή του χώρου των φάσεων σε διαφορετικούς χρόνους. Το μήκος της διαγωνίου γραμμής εξαρτάται από την διάρκεια της παραμονής της τροχιάς στην ίδια περιοχή του χώρου των φάσεων.
- *Οριζόντιες ή κάθετες γραμμές*, οι οποίες διαμορφώνουν συστάδες (η κατάσταση του συστήματος παραμένει «παγιδευμένη» για κάποιο χρόνο). Χαρακτηρίζουν τη χρονική διάρκεια κατά την οποία μία κατάσταση δεν αλλάζει ή αλλάζει πολύ αργά.
- και λευκές περιοχές (απότομες αλλαγές στην δυναμική του συστήματος).

Η δομή στην μικροκλίμακα (υφή-texture) του γραφήματος μπορεί να αποτελείται από:

- απλές κουκκίδες,
- γραμμές διαγώνιες, οριζόντιες ή κάθετες,

οι οποίες είναι ενδεικτικές της συμπεριφοράς του συστήματος.

### **1.5.3.2 Ποσοτική Ανάλυση Επαναφοράς (Recurrence Quantification Analysis - RQA)**

Τα γραφήματα επαναφοράς αποτελούν ένα ισχυρό οπτικό εργαλείο, αλλά είναι απλά ένα ποιοτικό εργαλείο διερεύνησης της συμπεριφοράς ενός δυναμικού συστήματος. Οι Webber και Zbilut [Webber, Zbilut (1992)] πρότειναν ένα αριθμό μετρήσιμων ποσοτήτων, οι οποίες είναι φυσικό να εξαχθούν από ένα ΓΕ, εισάγοντας την Ποσοτική Ανάλυση Επαναφοράς (ΠΑΕ). Κάποιοι από τους δείκτες της ΠΑΕ οι οποίοι προτάθηκαν, χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη και περιγράφονται παρακάτω.

- I. *Ποσοστό σημείων επαναφοράς (%Recurrence ή %REC)*, δίνει το λόγο του αριθμού των σημείων επαναφοράς (κουκκίδες) προς το συνολικό αριθμό των σημείων (κουκκίδων) ενός ΓΕ.

$$\%REC = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N R_{i,j} \quad R_{i,j} = \begin{cases} 1, & (i,j) \text{ recurrent} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

Η τιμή του εξαρτάται από την επιλεγμένη ακτίνα αποκοπής

- II. *Ποσοστό ντετερμινισμού (%Determinism ή %DET)*, είναι ο λόγος του αριθμού των σημείων επαναφοράς, τα οποία διαμορφώνουν τις διαγώνιες γραμμές προς το συνολικό αριθμό των σημείων επαναφοράς

$$\%DET = \frac{\sum_{i,j=1}^N D_{i,j}}{\sum_{i,j=1}^N R_{i,j}}$$

$$D_{i,j} = \begin{cases} 1, & (i,j), (i+1,j+1) \text{ or } (i-1,j-1) \text{ recurrent} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

- Τα περιοδικά σήματα έχουν μεγάλες διαγώνιες γραμμές,
- τα χαοτικά σήματα έχουν πολύ μικρές και
- τα στοχαστικά δεν έχουν διαγώνιες γραμμές.

Ωστόσο η χρήση του όρου ντετερμινισμού δεν έχει την κλασική σημασία του όρου (Marvan, 2002).

- III. *Μέγιστη διαγώνιος γραμμή (Maxline)*, είναι το μήκος της μεγαλύτερης διαγωνίου γραμμής, εξαιρουμένης της κύριας διαγωνίου.

$$L_{\max} = \max(\{l_i : i=1, \dots, N_l\})$$

Αυτή είναι μία σημαντική μεταβλητή, διότι σύμφωνα με τον Eckmann, το μήκος των διαγωνίων γραμμών συνδέεται με τον μεγαλύτερο εκθέτη Lyapunov (Eckmann J.P., Kamphorst S.O. and Ruelle D. (1987), Marwan et al. 2007).

IV. *Χρόνος Παγίδευσης (Trapping Time, TT)*, δείχνει το μέσο μήκος των οριζοντίων γραμμών,

$$TT = \frac{\sum_{u=u_{\min}}^N u P^{\varepsilon}(u)}{\sum_{u=u_{\min}}^N P^{\varepsilon}(u)}$$

Όπου  $u$  το μήκος των οριζοντίων γραμμών,  $u_{\min}$  είναι το ελάχιστο μήκος για το οποίο θεωρείται ότι υπάρχει γραμμή (συνήθως λαμβάνεται ίσο με δύο) και  $P^{\varepsilon}(u)$  είναι η στατιστική κατανομή των αντίστοιχων μηκών. Το TT δείχνει το χρόνο κατά τον οποίο το σύστημα είναι παγιδευμένο στην ίδια κατάσταση.

## **2. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ 1 - ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΩΝ ΠΕΔΙΟΥ ΚΑΙ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ**

### **2.1 Υπό Μελέτη Χρονοσειρές**

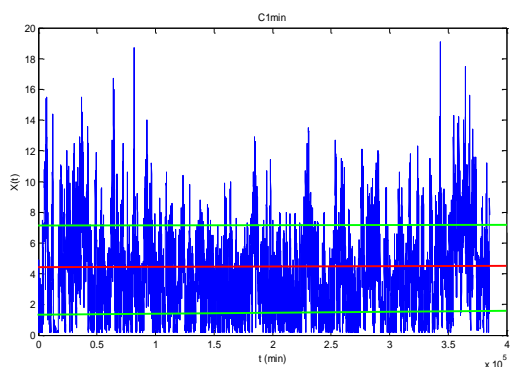
Η ανάλυση χρονοσειρών που θα ακολουθήσει έγινε με την βοήθεια του προγράμματος Matlab και του πακέτου ανάλυσης χρονοσειρών Tisean και αφορά σε χρονοσειρές πεδίου και χρονοσειρές προσομοίωσης. Οι χρονοσειρές πεδίου σχετίζονται με την ταχύτητα (C1) και την γωνία ανέμου (A1). Οι μετρήσεις έχουν πραγματοποιηθεί στην περιοχή του Αιγίου και αφορούν χρονοσειρές ελαχίστων τιμών, μεγίστων τιμών, τιμών μέσου όρου και τυπικών αποκλίσεων αντίστοιχα για το κάθε μέγεθος. Η κάθε χρονοσειρά (τέσσερις για κάθε μέγεθος) αποτελείται από 38.540 μετρήσεις, οι οποίες έγιναν σε διάστημα περίπου ενός χρόνου (23/03/2005 – 16/12/2005).

Οι χρονοσειρές προσομοίωσης αφορούν σε χρονοσειρές ταχύτητας ανέμου σε λόφο. Η πρώτη ομάδα των χρονοσειρών σχετίζεται με την ταχύτητα ανόδου του ανέμου σε λόφο και η δεύτερη με την ταχύτητα καθόδου αντίστοιχα. Σε αυτές τις χρονοσειρές γνωρίζουμε τις συνιστώσες της ταχύτητας του ανέμου στον χώρο, οι οποίες μελετώνται και είναι η συνιστώσα στον άξονα x, άξονα y και στον άξονα z. Από όλες τις συνιστώσες προέκυψε αρχικά το μέτρο της ταχύτητας και κατόπιν υπολογίστηκε ξανά λαμβάνοντας υπόψη μόνο τις δύο πρώτες. Στην συνέχεια μελετήθηκε η γωνία της ταχύτητας αντίστοιχα με το κάθε μέτρο. Συνεπώς για την ταχύτητα ανόδου και καθόδου του ανέμου προέκυψε η ανάλυση εφτά χρονοσειρών για κάθε περίπτωση. Επιπλέον πρέπει να αναφερθεί ότι τόσο οι χρονοσειρές ανόδου όσο και οι καθόδου αποτελούνται από 16504 μετρήσεις. Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι υπό μελέτη χρονοσειρές.

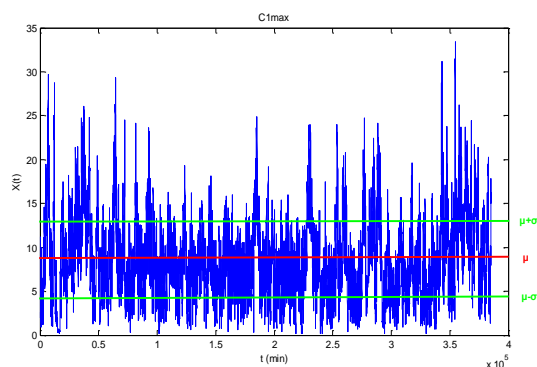
ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΕΣ ΠΕΔΙΟΥ							
Ταχύτητα ανέμου (C1)				Γωνία ανέμου (A1)			
C1-min	C1-max	C1-av	C1-sdv	A1-min	A1-max	A1-av	A1-sdv
ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ							
Ταχύτητα ανόδου σε λόφο							
Στον άξονα x	Στον άξονα y	Στον άξονα z	Μέτρο f(x,y,z)	Γωνία f(x,y,z)	Μέτρο f(x,y)	Γωνία f(x,y)	Γωνία f(x,y)
Ταχύτητα καθόδου σε λόφο							
Στον άξονα x	Στον άξονα y	Στον άξονα z	Μέτρο f(x,y,z)	Γωνία f(x,y,z)	Μέτρο f(x,y)	Γωνία f(x,y)	Γωνία f(x,y)

**Πίνακας 2.1** Υπό μελέτη χρονοσειρές πεδίου και χρονοσειρές προσομοίωσης: Χρονοσειρές πεδίου (min-ελαχίστων τιμών, max-μεγίστων τιμών, av-τιμών μέσου όρου, sdv-τιμών τυπικής απόκλισης). Χρονοσειρές προσομοίωσης συνιστώσες x, y, z, μέτρο και γωνία ταχύτητας ανόδου και καθόδου.

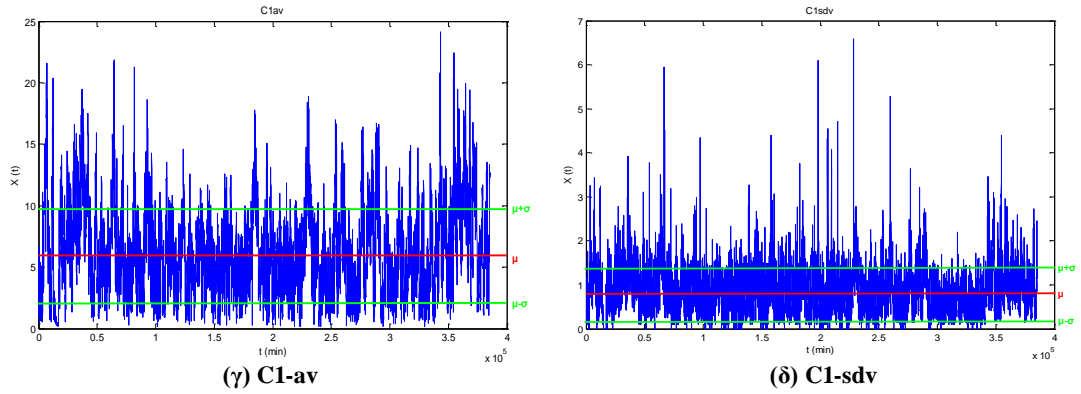
Ακολουθούν τα αντίστοιχα διαγράμματα των χρονοσειρών πεδίου και προσομοίωσης. Παρατηρείται ότι στον άξονα x απεικονίζεται ο χρόνος στον οποίο έλαβε χώρα η κάθε μέτρηση και στον άξονα y η αντίστοιχη τιμή της μέτρησης για το κάθε μέγεθος. Επιπλέον στα διαγράμματα διακρίνεται η μέση τιμή και η διακύμανση της κάθε χρονοσειράς, τιμές οι οποίες θα μας βοηθήσουν παρακάτω στον έλεγχο της στασιμότητας.



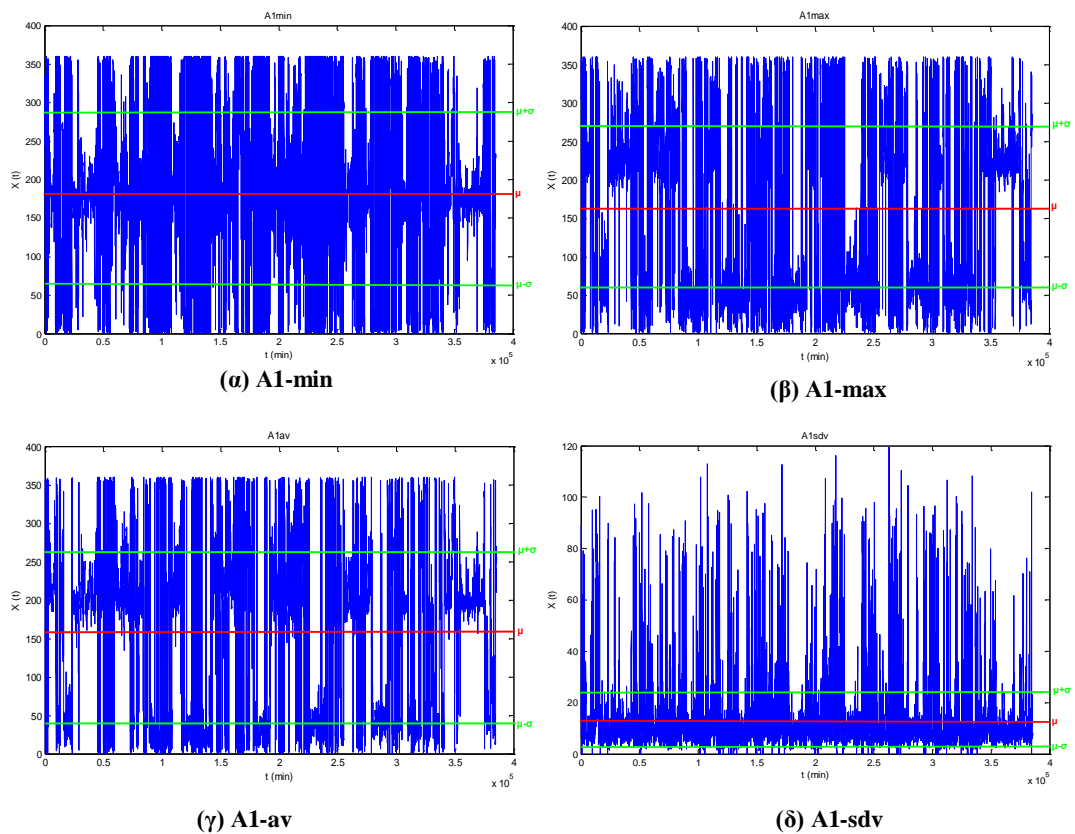
(α) C1-min



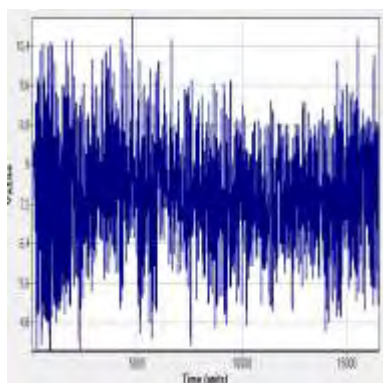
(β) C1-max



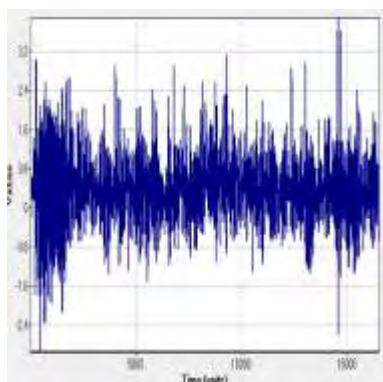
**Σχ.2.1 Χρονοσειρές πεδίου ταχύτητας ανέμου C1: (α) ελάχιστες τιμές, (β) μέγιστες τιμές, (γ) τιμές μέσου όρου και (δ) τυπικές αποκλίσεις.**



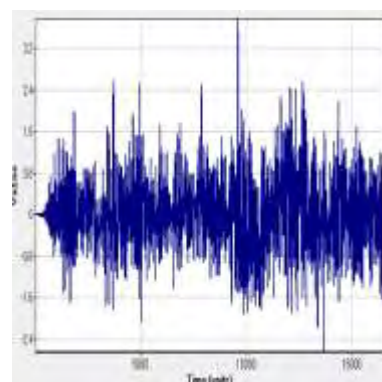
**Σχ.2.2 Χρονοσειρές πεδίου γωνίας ανέμου A1: (α) ελάχιστες τιμές, (β) μέγιστες τιμές, (γ) τιμές μέσου όρου και (δ) τυπικές αποκλίσεις.**



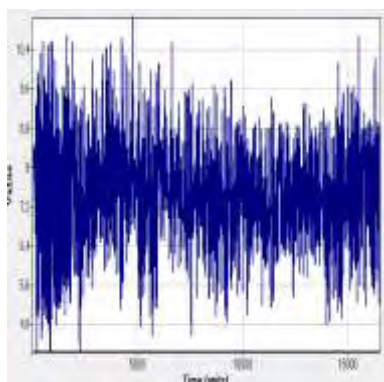
(α)



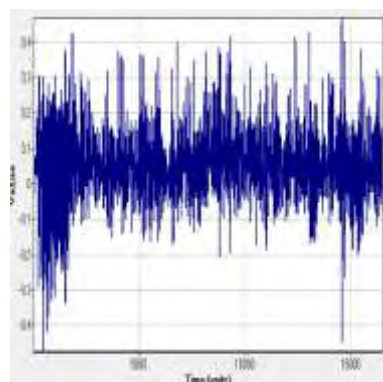
(β)



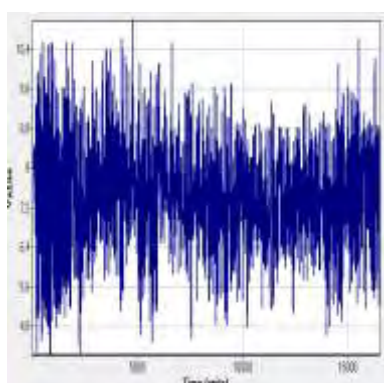
(γ)



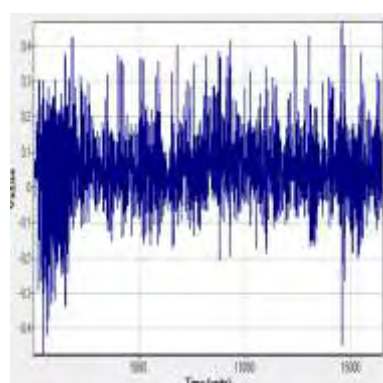
(δ)



(ε)



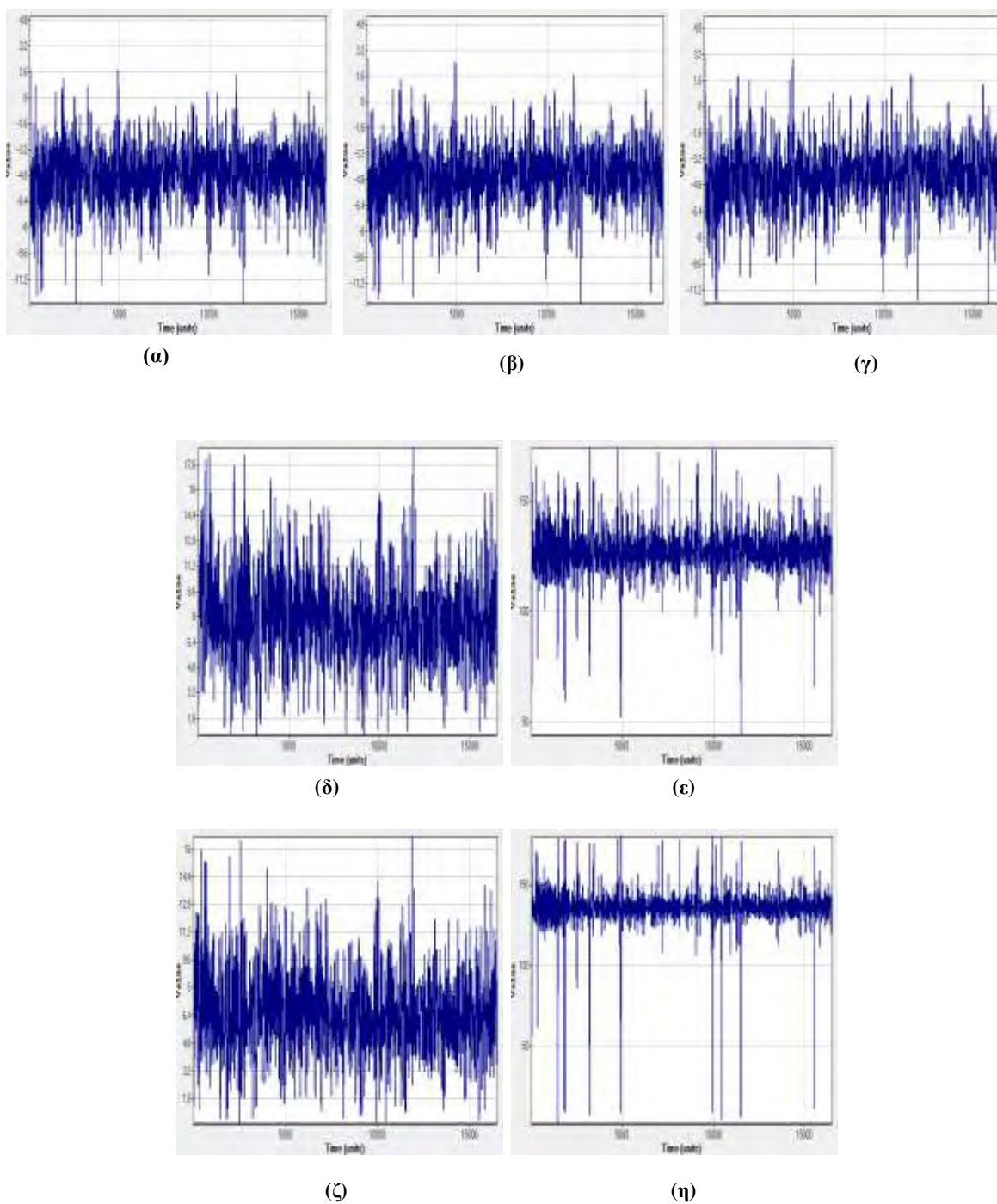
(ζ)



(η)

**Σχ.2.3 Χρονοσειρές προσομοίωσης ταχύτητας ανέμου σε λόφο: (α) ταχύτητα ανέμου στον άξονα x, (β) ταχύτητα ανέμου στον άξονα y, (γ) ταχύτητα ανέμου στον άξονα z, (δ) μέτρο ταχύτητας ανέμου  $f(x,y,z)$ , (ε) γωνία ταχύτητας ανέμου  $f(x,y,z)$ , (ζ) μέτρο ταχύτητας ανέμου  $f(x,y)$  και (η) γωνία ταχύτητας ανέμου  $f(x,y)$ .**





**Σχ.2.4 Χρονοσειρές προσομοίωσης ταχύτητας καθόδου του ανέμου σε λόφο: (α) ταχύτητα ανέμου στον άξονα x, (β) ταχύτητα ανέμου στον άξονα y, (γ) ταχύτητα ανέμου στον άξονα z, (δ) μέτρο ταχύτητας ανέμου  $f(x,y,z)$ , (ε) γωνία ταχύτητας ανέμου  $f(x,y,z)$ , (ζ) μέτρο ταχύτητας ανέμου  $f(x,y)$  και (η) γωνία ταχύτητας ανέμου  $f(x,y)$ .**

Για τις χρονοσειρές πεδίου ταχύτητας ανέμου στο σχ.2.1 παρατηρείται ότι ακολουθούν παρόμοια συμπεριφορά οι χρονοσειρές ελαχίστου, μεγίστου και μέσου όρου ενώ αντίθετα των τυπικών αποκλίσεων έχει διαφορετική μορφή. Στο σχ.2.2 διακρίνεται παρόμοια μορφή στις χρονοσειρές (β) και (γ), η μορφή της χρονοσειράς ελαχίστων τιμών έχει σχεδόν ίδια δομή με τις δύο προηγούμενες ενώ η (δ) διαφέρει και από τις τρεις χρονοσειρές του μεγέθους.

Στο σχ.2.3 η συνιστώσα της ταχύτητας που διακρίνεται στο διάγραμμα (α) (ταχύτητα στον άξονα x) έχει ομοιότητες με την αντίστοιχη στο διάγραμμα (β) (ταχύτητα στον άξονα y) ενώ αντίθετα η ταχύτητα στον άξονα z σύμφωνα με το διάγραμμα (γ) διαφέρει αρκετά από τις άλλες δύο. Επίσης ο υπολογισμός του μέτρου και της γωνίας της ταχύτητας ανόδου του ανέμου σε λόφο δεν διαφέρει όταν αυτά υπολογίζονται συναρτήσει όλων των συνιστωσών είτε συναρτήσει μόνο των δύο πρώτων, αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι η χρονοσειρά της ταχύτητας στον άξονα z δεν επηρεάζει γενικότερα το μέτρο και την γωνία.

Στο σχ.2.4 δίνεται η χρονοσειρά προσομοίωσης της ταχύτητας καθόδου του ανέμου σε λόφο. Οι συνιστώσες παρουσιάζουν σχεδόν την ίδια συμπεριφορά με αποτέλεσμα για το μέτρο και τη γωνία της ταχύτητας που υπολογίζεται με δύο τρόπους (συναρτήσει όλων των συνιστωσών ή μόνο των δύο πρώτων) να μην υπάρχουν μεγάλες διαφορές. Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ποσοτικής ανάλυσης των εν λόγω χρονοσειρών.

## 2.2 Έλεγχος Στασιμότητας

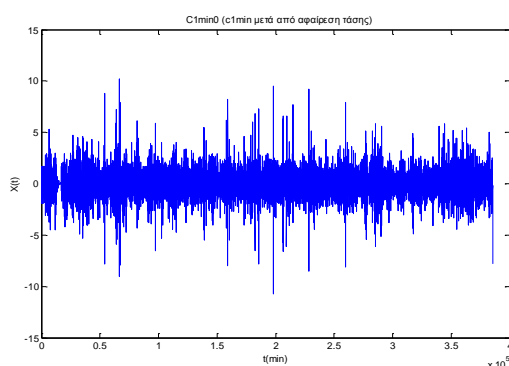
Προκειμένου να επιβεβαιώσουμε την χαοτική συμπεριφορά μιας χρονοσειράς και στην συνέχεια αν χρειαστεί να την προβλέψουμε, η χρονοσειρά δεν πρέπει να παρουσιάζει μακροχρόνιες τάσεις. Μια χρονοσειρά είναι ασθενώς στάσιμη όταν οι στατιστικές τις ιδιότητες (μέσος όρος, διακύμανση, τυπική απόκλιση) παραμένουν σταθερές σε οποιαδήποτε χρονική περίοδο. Για να ελεγχθεί η στασιμότητα μιας χρονοσειράς (ΧΣ) υπολογίζεται η μέση τιμή και η διασπορά για τα δύο μισά της. Εάν

αυτές οι ποσότητες διαφέρουν κατά μερικά τυπικά σφάλματα τότε η στασιμότητα είναι πρόβλημα. Συνεπώς μια ΧΣ είναι στάσιμη αν δεν υπάρχει συστηματική αλλαγή του μέσου όρου και της διασποράς στο χρόνο.

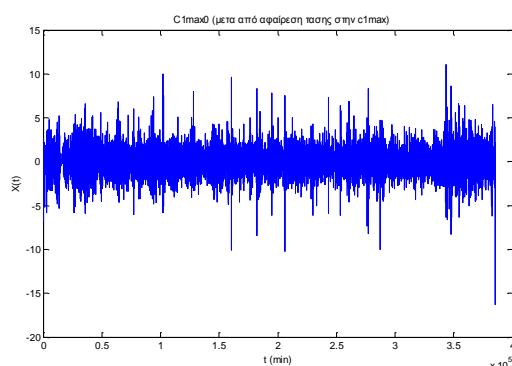
Προκύπτει λοιπόν με την βοήθεια των στατιστικών αποτελεσμάτων ότι η κάθε χρονοσειρά που μελετήθηκε εμφανίζεται ως ασθενώς στάσιμη. Προκύπτει ότι η μέση τιμή και η διασπορά για τα δύο μισά της κάθε χρονοσειράς διαφέρουν κατά μερικά τυπικά σφάλματα, συνεπώς μπορούμε να πούμε ότι η στασιμότητα είναι πρόβλημα. Εξαιτίας λοιπόν των χαρακτηριστικών του προβλήματος της στασιμότητας που έχουν οι χρονοσειρές πεδίου και προσομοίωσης στο παρακάτω κεφάλαιο εξετάζεται η αφαίρεσή της τάσης τους.

### 2.3 Αφαίρεση Τάσης με την Μέθοδο των Πρώτων Διαφορών

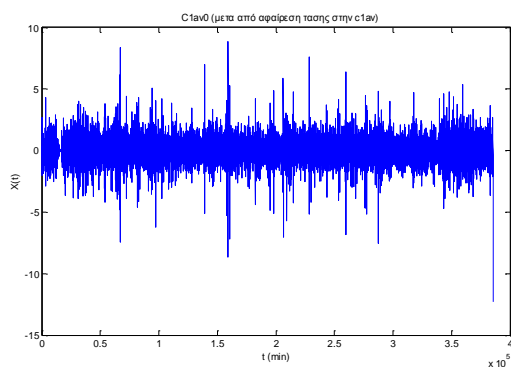
Στην περίπτωση μη στασιμότητας λόγω τάσεων, η χρονοσειρά μπορεί να γίνει στάσιμη με την βοήθεια της μεθόδου των πρώτων διαφορών ( $y_i = x_i - x_{i-1}$ ), με την οποία γίνεται απαλοιφή της τάσης, διαδικασία που όπως αναφέρθηκε και παραπάνω απαιτείται για την ανάλυση των χρονοσειρών. Στην συνέχεια ακολουθούν οι χρονοσειρές που προέκυψαν με την μέθοδο των πρώτων διαφορών.



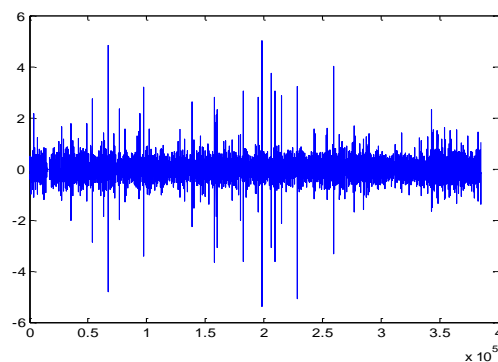
(α) C1-min μετά από αφαίρεση τάσης



(β) C1-max μετά από αφαίρεση τάσης



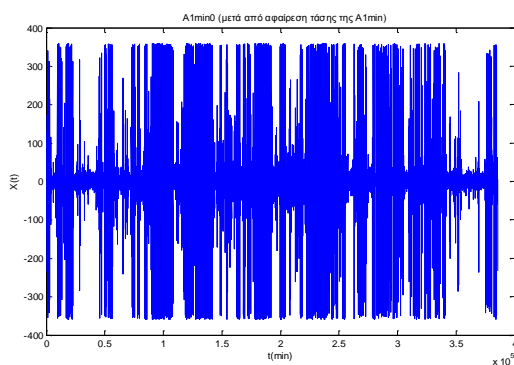
(γ) C1-av μετά από αφαίρεση τάσης



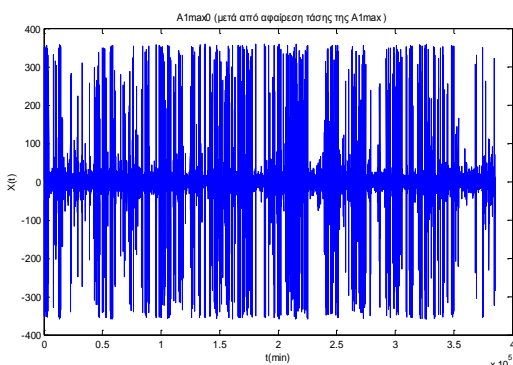
(δ) C1-sdv μετά από αφαίρεση τάσης

**Σχ.2.5 Χρονοσειρές ταχύτητας ανέμου C1 μετά από αφαίρεση τάσης: (α) ελάχιστες τιμές, (β) μέγιστες τιμές, (γ) μέσου όρου και (δ) τιμές τυπικής απόκλισης .**

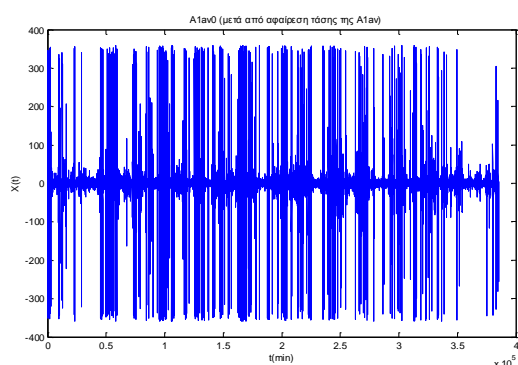
Στο σχ.2.3 διακρίνεται ότι όλες οι χρονοσειρές της ταχύτητας ανέμου ακολουθούν σχεδόν την ίδια μορφή και μετά από την αφαίρεση της τάσης. Ωστόσο εμφανίζονται κάποιες διαφορές τα ελάχιστα και τα μέγιστα που παρουσιάζονται.



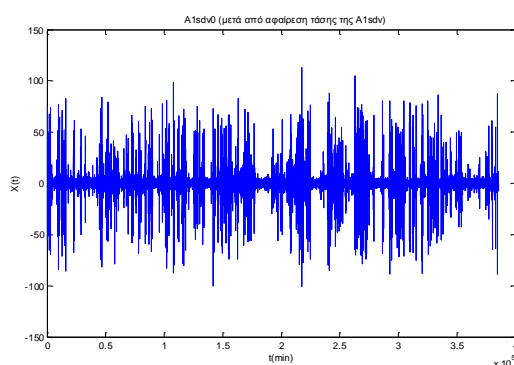
(γ) A1-av μετά από αφαίρεση τάσης



(δ) A1-sdv μετά από αφαίρεση τάσης



(α) A1-min μετά από αφαίρεση τάσης



(β) A1-max μετά από αφαίρεση τάσης

**Σχ.2.6 Χρονοσειρές γωνίας ανέμου A1 μετά από αφαίρεση τάσης: (α) ελάχιστες τιμές, (β) μέγιστες τιμές, (γ) τιμές μέσου όρου και (δ) τυπικές αποκλίσεις.**

Η χρονοσειρά γωνίας ανέμου σχ.2.6(δ) των τυπικών αποκλίσεων που προκύπτει με την μέθοδο των πρώτων διαφορών, έχει αισθητά διαφορετική μορφή από τις υπόλοιπες χρονοσειρές του μεγέθους. Όλες οι χρονοσειρές που προέκυψαν είναι πλέον στάσιμες, με αυτές θα ασχοληθούμε παρακάτω.

## 2.4 Ανακατασκευή του Χώρου των Φάσεων των Χρονοσειρών Πεδίου και Προσομοίωσης

Η ανακατασκευή των χώρων των φάσεων είναι ένα πολύ κρίσιμο βήμα στην μη γραμμική ανάλυση χρονοσειρών που προέρχονται από χαοτικά συστήματα, πριν από τον υπολογισμό των αναλλοίωτων και την κατασκευή μοντέλων για πρόβλεψη. Η κρισιμότητα της ανακατασκευής έγκειται στο ότι εάν δεν είναι ‘καλή’ τότε ο υπολογισμός των αναλλοίωτων της χρονοσειράς και τα αποτελέσματα που απορρέουν από τον υπολογισμό αυτό ενδέχεται να είναι λανθασμένα και αναξιόπιστα.

Η βασική ιδέα της ανακατασκευής του χώρου των φάσεων έγκειται στο ότι το παρελθόν και το μέλλον μίας χρονοσειράς περιέχουν πληροφορία, γύρω από τις μη παρατηρούμενες μεταβλητές, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καθορίσει την

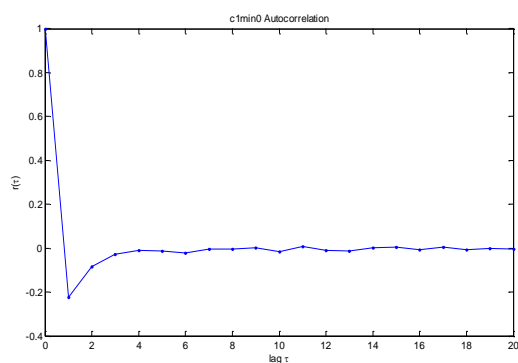
κατάσταση του συστήματος την παρούσα χρονική στιγμή. Παρακάτω εκτιμούνται οι τιμές των δύο βασικών παραμέτρων προκειμένου να προχωρήσουμε στην ανακατασκευή του χώρου των φάσεων των χρονοσειρών πεδίου.

### 2.4.1 Εκτίμηση Χρονικής Υστέρησης ( $\tau$ )

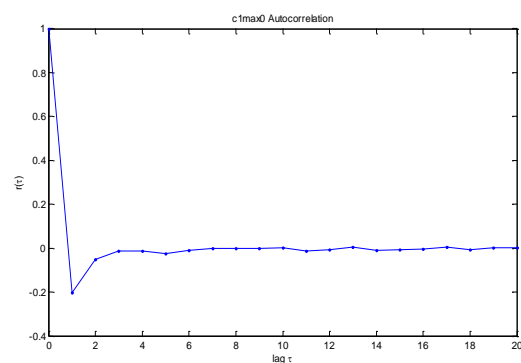
Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο για την ανακατασκευή του χώρου των φάσεων απαιτείται η εύρεση της χρονικής υστέρησης ( $\tau$ ). Η χρονική υστέρηση των χρονοσειρών (μετά την αφαίρεση τάσης) θα προκύψει με την βοήθεια της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης (autocorrelation function) και της συνάρτησης μέσης αμοιβαίας πληροφορίας (average mutual information).

#### 2.4.1.1 Συνάρτηση Αυτοσυσχέτισης (autocorrelation function)

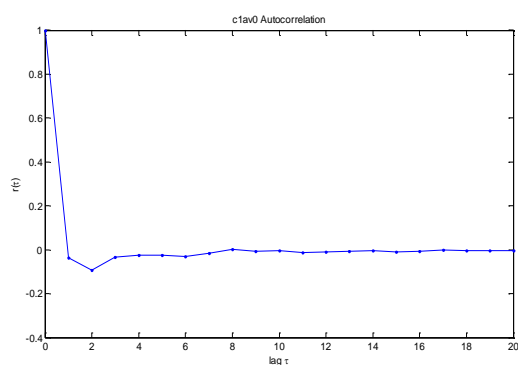
Παρακάτω δίνονται τα αποτελέσματα για την χρονική υστέρηση όπως αυτή προέκυψε με την βοήθεια της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης. Οι χρονοσειρές που μελετώνται (πεδίου και προσομοίωσης) είναι οι χρονοσειρές που προέκυψαν παραπάνω μετά από την αφαίρεση της τάσης τους.



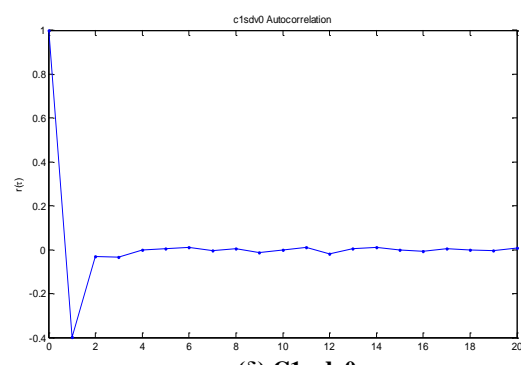
(α) C1-min0



(β) C1-max0

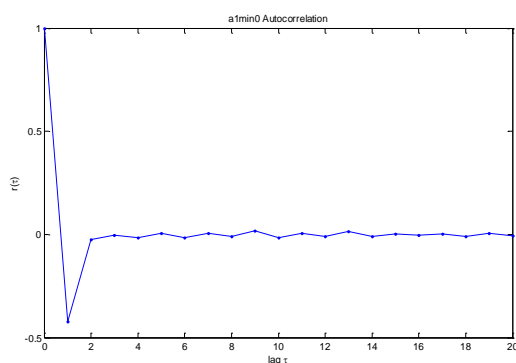


(γ) C1-av0

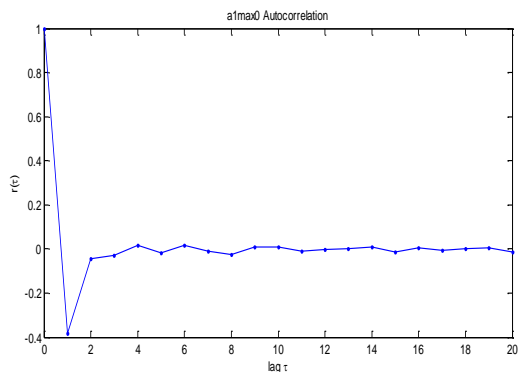


(δ) C1-sdv0

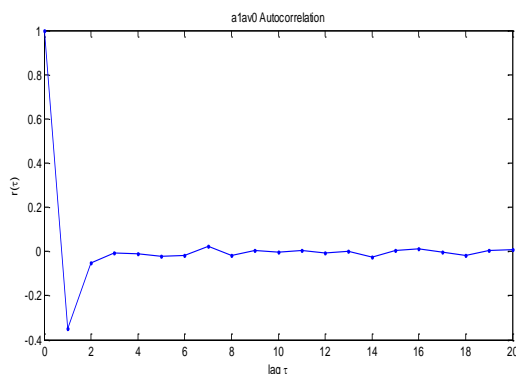
**Σχ.2.7 Εκτίμηση χρονικής υστέρησης (autocorrelation) για τις χρονοσειρές ταχύτητας ανέμου C1 μετά από αφαίρεση τάσης: (α) ελάχιστες τιμές, (β) μέγιστες τιμές, (γ) τιμές μέσου όρου και (δ) τυπικές αποκλίσεις.**



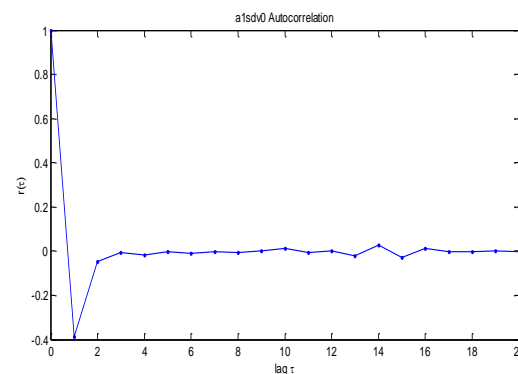
(α) A1-min0



(β) A1-max0



(γ) A1-av0



(δ) A1-sdv0

**Σχ.2.8 Εκτίμηση χρονικής υστέρησης (autocorrelation) για τις χρονοσειρές γωνίας ανέμου A1 (μετά από αφαίρεση τάσης) (α) ελάχιστες τιμές, (β) μέγιστες τιμές, (γ) τιμές μέσου όρου και (δ) τυπικές αποκλίσεις.**

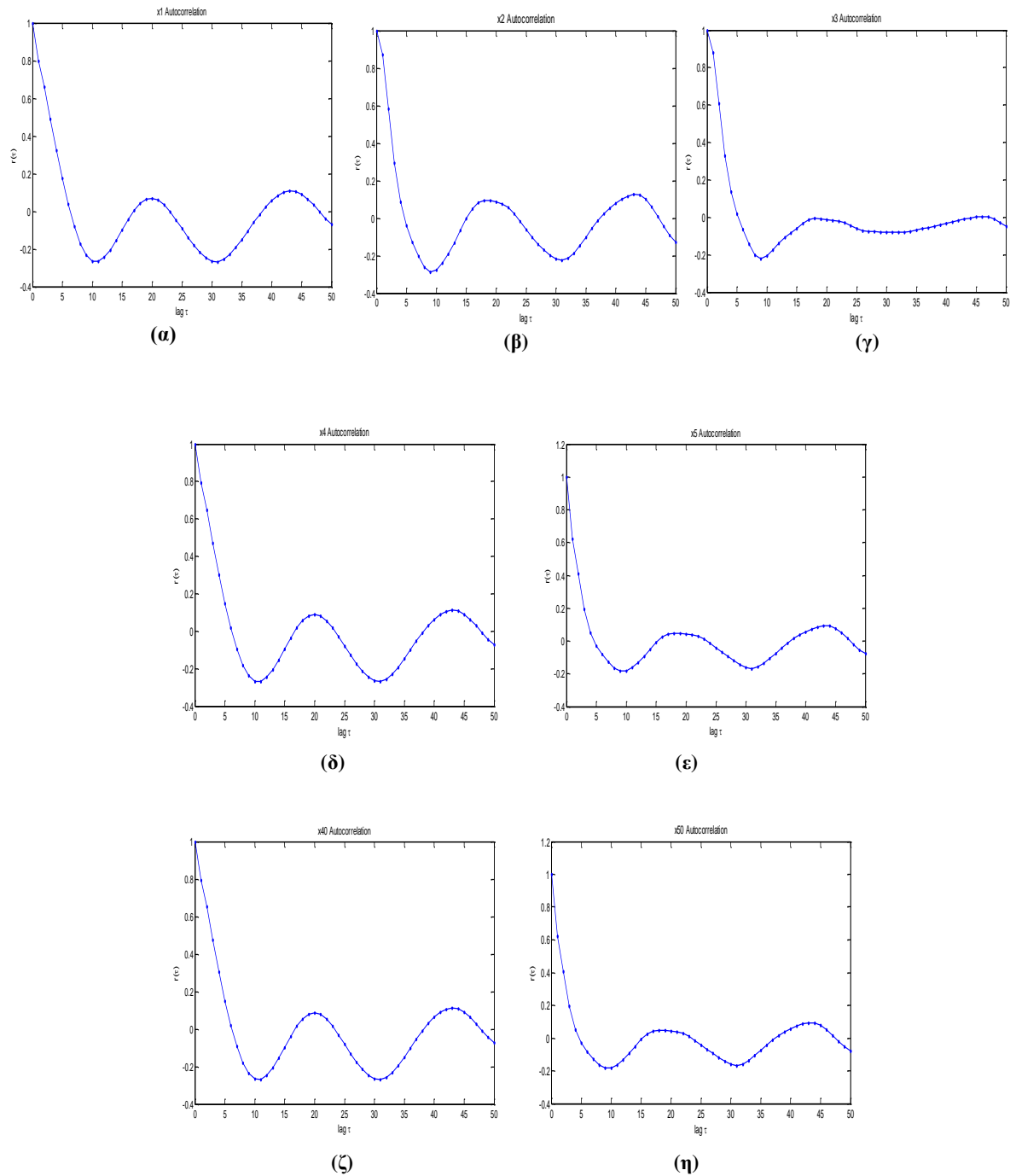
Στα διαγράμματα των σχημάτων 2.7 και 2.8 στον οριζόντιο άξονα διακρίνετε η χρονική υστέρηση (ο χρόνος στον οποίο γίνεται η κάθε μέτρηση είναι 10 λεπτά) και στον κατακόρυφο άξονα η τιμή της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης. Παρατηρείτε ότι η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης πέφτει απότομα περίπου γύρω από το 1 σε όλα τα διαγράμματα των χρονοσειρών πεδίου. Εξαίρεση αποτελεί η χρονοσειρά των τυπικών αποκλίσεων της ταχύτητας του ανέμου στο σχ.2.7(γ) όπου διακρίνεται πιο ομαλή μείωση στη συνάρτηση. Προκύπτουν λοιπόν για τις χρονοσειρές πεδίου οι αντίστοιχες τιμές χρονικής υστέρησης που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα 2.2.

ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΕΣ ΠΕΔΙΟΥ	ΧΡΟΝΙΚΗ ΥΣΤΕΡΗΣΗ (τ)
<b>Χρονοσειρά ταχύτητας ανέμου (μετά από αφαίρεση τάσης)</b>	
C1-min0 (ελαχίστου)	1
C1-max0 (μεγίστου)	1
C1-av0 (μέσου όρου)	1
C1-sdv0 (τυπικής απόκλισης)	1
<b>Χρονοσειρά γωνίας ανέμου (μετά από αφαίρεση τάσης)</b>	
A1-min0 (ελαχίστου)	1
A1-max0 (μεγίστου)	1
A1-av0 (μέσου όρου)	1
A1-sdv0 (τυπικής απόκλισης)	1

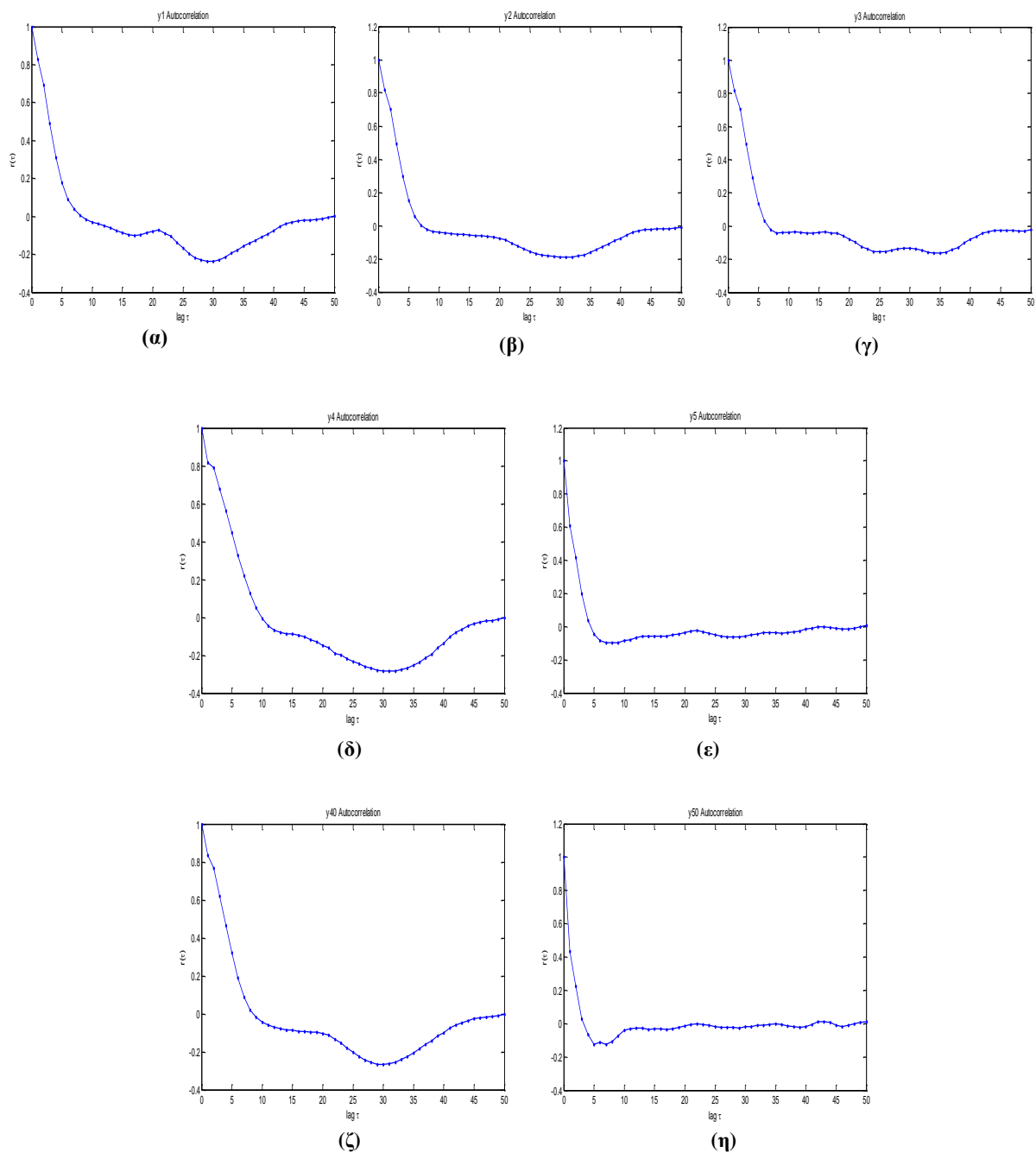
**Πίνακας 2.2 Εκτίμηση της χρονικής υστέρησης (autocorrelation) για τις χρονοσειρές πεδίου.**

Παρακάτω ακολουθούν τα αντίστοιχα διαγράμματα για τις χρονοσειρές προσομοίωσης, με την βοήθεια των οποίων γίνεται εκτίμηση της χρονικής υστέρησης. Παρατηρείται ότι το διάγραμμα της συνιστώσας της ταχύτητας στον άξονα x σύμφωνα με το σχ.2.9(α) παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά με το διάγραμμα (β) που αντιστοιχεί στην συνιστώσα της ταχύτητας στον άξονα y. Ενώ αντίθετα αυτά τα δύο διαφέρουν με το διάγραμμα (γ). Επίσης η απουσία της συνιστώσας της ταχύτητας στον άξονα z, στον υπολογισμό του μέτρου και της γωνίας της ταχύτητας αντίστοιχα (σχ.2.9(ζ) και (η)) δεν αλλάζει σχεδόν καθόλου τα αποτελέσματα συγκριτικά με τα διαγράμματα (δ) και (ε) του ίδιου σχήματος. Φαίνεται λοιπόν ότι η συνιστώσα z δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα.





**Σχ.2.9 Εκτίμηση χρονικής υστέρησης (autocorrelation) για τις χρονοσειρές προσομοίωσης ταχύτητας ανέμου του ανέμου σε λόφο: (α) ταχύτητα ανέμου στον άξονα x, (β) ταχύτητα ανέμου στον άξονα y, (γ) ταχύτητα ανέμου στον άξονα z, (δ) μέτρο ταχύτητας ανέμου  $f(x,y,z)$ , (ε) γωνία ταχύτητας ανέμου  $f(x,y,z)$ , (ζ) μέτρο ταχύτητας ανέμου  $f(x,y)$  και (η) γωνία ταχύτητας ανέμου  $f(x,y)$ .**



**Σχ.2.10 Εκτίμηση χρονικής υστέρησης (autocorrelation) για τις χρονοσειρές προσομοίωσης ταχύτητας καθόδου του ανέμου σε λόφο: (α) ταχύτητα ανέμου στον άξονα x, (β) ταχύτητα ανέμου στον άξονα y, (γ) ταχύτητα ανέμου στον άξονα z, (δ) μέτρο ταχύτητας ανέμου  $f(x,y,z)$ , (ε) γωνία ταχύτητας ανέμου  $f(x,y,z)$ , (ζ) μέτρο ταχύτητας ανέμου  $f(x,y)$  και (η) γωνία ταχύτητας ανέμου  $f(x,y)$ .**

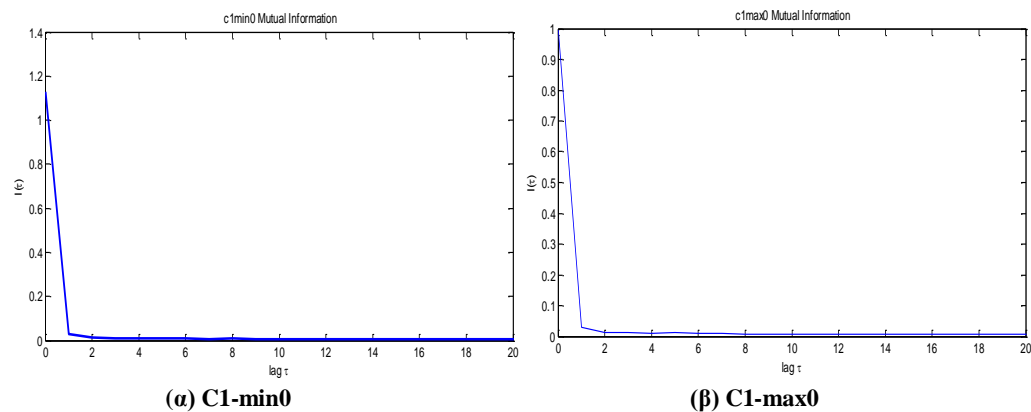
Στο σχ.2.10 δίνονται τα διαγράμματα, της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης για την χρονοσειρά προσομοίωσης της ταχύτητας καθόδου του ανέμου, από τα οποία θα γίνει η εκτίμηση της χρονικής υστέρησης. Παρατηρούμε ότι περισσότερες ομοιότητες παρουσιάζει η συνιστώσα  $y$  με την συνιστώσα  $z$ . Ωστόσο και για τις τρεις συνιστώσες το πρώτο ελάχιστο παρουσιάζεται περίπου γύρω στο 7. Τα αποτελέσματα για το μέτρο και την γωνία της ταχύτητας καθόδου που έχουν προκύψει συναρτήσει όλων των συνιστωσών και συναρτήσει μόνο των δύο πρώτων, υποδηλώνουν ότι όλες οι συνιστώσες επηρεάζουν τα αντίστοιχα μεγέθη έχοντας καθεμία τον ρόλο της, για το λόγο αυτό εντοπίζονται διαφορές στα διαγράμματα (δ), (ε) και (ζ), (η) αντίστοιχα στο σχ.2.10. Παρακάτω δίνεται πίνακας που περιλαμβάνει την εκτίμηση της χρονικής υστέρησης συνολικά για τις χρονοσειρές προσομοίωσης.

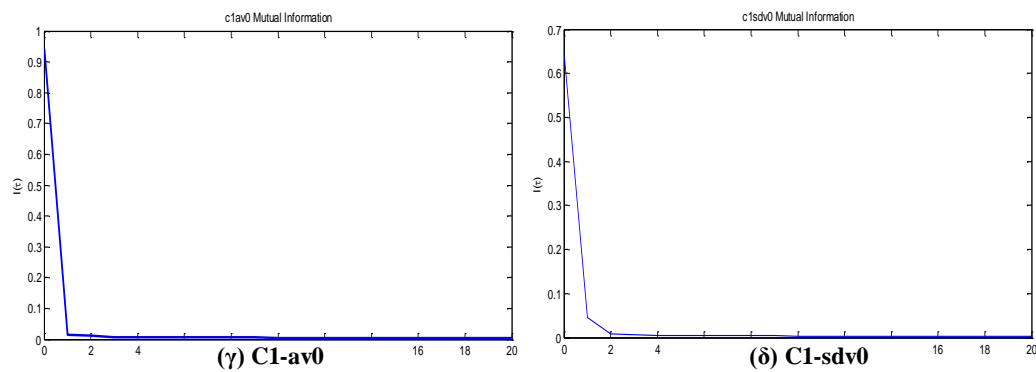
<b>ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ</b>	<b>ΧΡΟΝΙΚΗ ΥΣΤΕΡΗΣΗ (τ)</b>
<b>Ταχύτητα ανόδου του ανέμου σε λόφο</b>	
Στον άξονα $x$	10
Στον άξονα $y$	9
Στον άξονα $z$	9
Μέτρο $f(x,y,z)$	10
Γωνία $f(x,y,z)$	9
Μέτρο $f(x,y)$	10
Γωνία $f(x,y)$	9
<b>Ταχύτητα καθόδου του ανέμου σε λόφο</b>	
Στον άξονα $x$	10
Στον άξονα $y$	7
Στον άξονα $z$	7
Μέτρο $f(x,y,z)$	10
Γωνία $f(x,y,z)$	5
Μέτρο $f(x,y)$	10
Γωνία $f(x,y)$	5

**Πίνακας 2.3 Εκτίμηση της χρονικής υστέρησης (autocorrelation) για τις χρονοσειρές προσομοίωσης.**

#### 2.4.1.2 Συνάρτηση Μέσης Αμοιβαίας Πληροφορίας (average mutual information function)

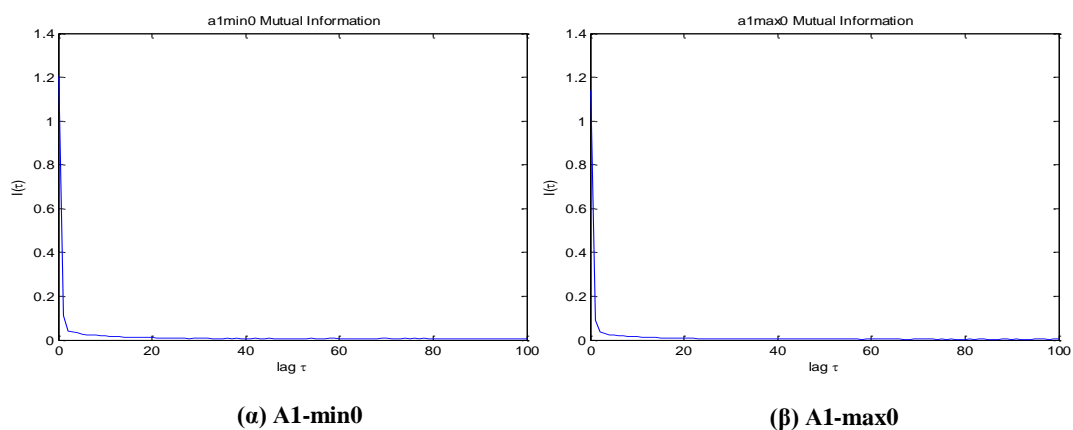
Πρέπει να σημειωθεί ότι η επιλογή της χρονικής υστέρησης μέσω της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης που μελετήθηκε παραπάνω υποδηλώνει απλά και μόνο την ύπαρξη γραμμικής εξάρτησης μεταξύ των συνιστωσών του διανύσματος καθυστέρησης. Έτσι με την διαδικασία αυτή δεν θίγεται το θέμα της πιθανής μη γραμμικής εξάρτησης μεταξύ των συνιστωσών του διανύσματος καθυστέρησης, που είναι όμως αρκετά πιο δύσκολο να εκτιμηθεί. Σε αντίθεση η αμοιβαία πληροφορία μας παρέχει ένα μέτρο γενικής εξάρτησης (γραμμικής και μη) και αναμένεται να μας δώσει ένα καλύτερο μέτρο αποφυγής χωρικού συσχετισμού και ανομοιογενής κάλυψης του ελκυστή από τα αντίστοιχα διανύσματα. Παρακάτω παραθέτονται τα διαγράμματα των χρονοσειρών πεδίου και προσομοίωσης όπως αυτά προέκυψαν με την μέθοδο της μέσης αμοιβαίας πληροφορίας.

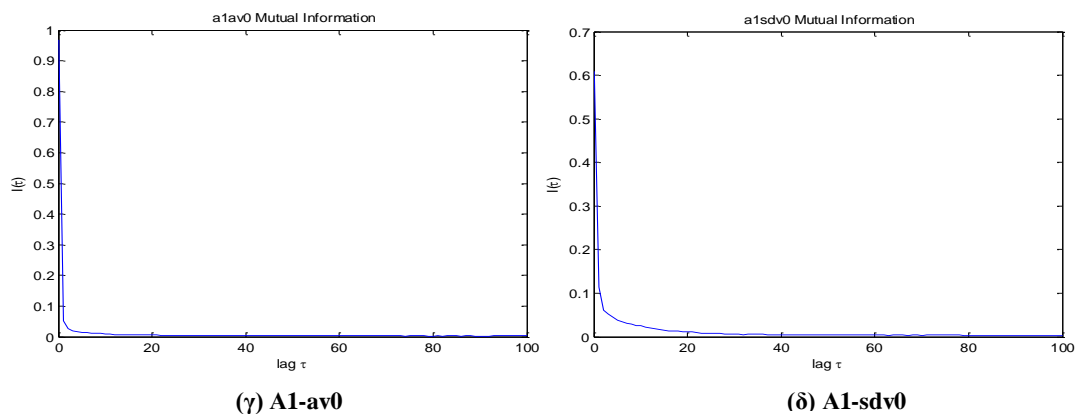




**Σχ.2.11 Εκτίμηση χρονικής υστέρησης (mutualinformation) για τις χρονοσειρές ταχύτητας ανέμου C1 (μετά από αφαίρεση τάσης) (α) ελάχιστες τιμές, (β) μέγιστες τιμές, (γ) τιμές μέσου όρου και (δ) τυπικές αποκλίσεις.**

Για τις χρονοσειρές ταχύτητας ανέμου (C1) στο σχ.2.11 διακρίνεται ένα σαφές ελάχιστο και κατόπιν οι χρονοσειρές σχεδόν μηδενίζονται ακολουθώντας μία σταθερή πορεία. Προκύπτει λοιπόν χρονική υστέρηση ( $\tau$ ) ίση με 7, 5, 7 και 5 αντίστοιχα για τις χρονοσειρές πεδίου της ταχύτητας ανέμου.





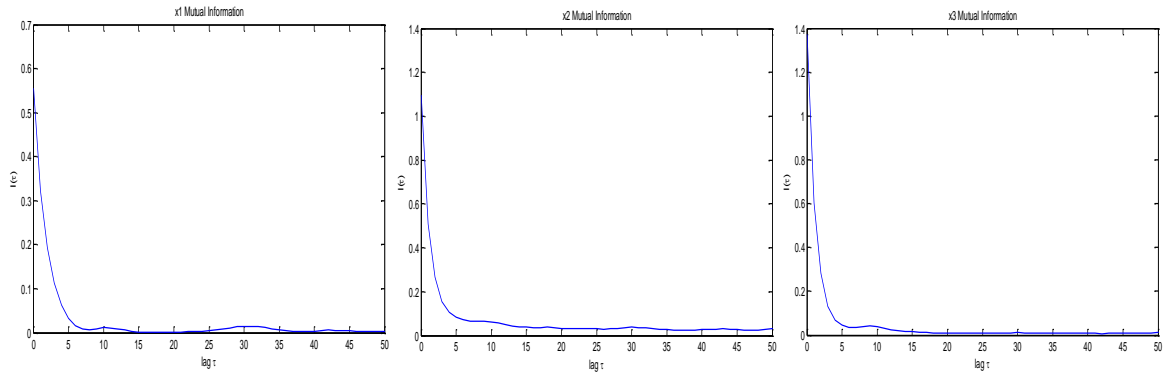
**Σχ.2.12 Εκτίμηση χρονικής υστέρησης (mutualinformation) για τις χρονοσειρές γωνίας ανέμου A1 (μετά από αφαίρεση τάσης): (α) ελάχιστες τιμές, (β)μέγιστες τιμές, (γ) τιμές μέσου όρου και (δ) τυπικές αποκλίσεις.**

Για τις χρονοσειρές γωνίας ανέμου (σχ.2.12) επίσης υπάρχει σχεδόν ένα σαφές ελάχιστο, όπου προκύπτει τιμή χρονικής υστέρησης ( $\tau$ ) ίση με 17, 23, 15 και 23 αντίστοιχα. Παρακάτω δίνεται πίνακας με τα συνολικά αποτελέσματα για την χρονική υστέρηση που προέκυψαν από την μέθοδο της μέσης αμοιβαίας πληροφορίας.

ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΕΣ ΠΕΔΙΟΥ	ΧΡΟΝΙΚΗ ΥΣΤΕΡΗΣΗ ( $\tau$ )
<b>Χρονοσειρά ταχύτητας ανέμου (μετά από αφαίρεση της τάσης)</b>	
C1-min0 (ελαχίστου)	7
C1-max0 (μεγίστου)	5
C1-av0 (μέσου όρου)	7
C1-sdv0 (τυπικής απόκλισης)	5
<b>Χρονοσειρά γωνίας ανέμου (μετά από αφαίρεση της τάσης)</b>	
A1-min0 (ελαχίστου)	17
A1-max0 (μεγίστου)	23
A1-av0 (μέσου όρου)	15
A1-sdv0 (τυπικής απόκλισης)	23

**Πίνακας 2.4 Εκτίμηση της χρονικής υστέρησης (mutualinformation)για τις χρονοσειρές πεδίου.**

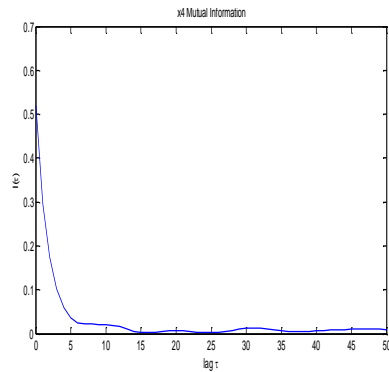
Στην συνέχεια γίνεται η εκτίμηση της χρονικής υστέρησης με την μέθοδο της μέσης αμοιβαίας πληροφορίας για τις χρονοσειρές προσομοίωσης.



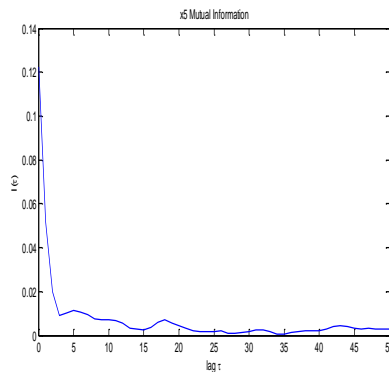
(α)  $\tau = 7$

(β)  $\tau = 5$

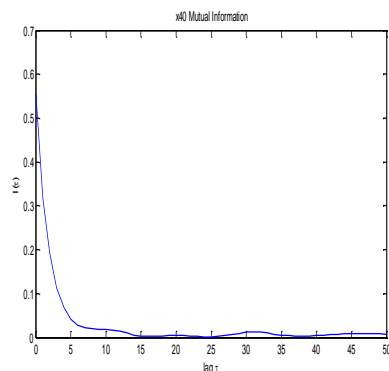
(γ)  $\tau = 8$



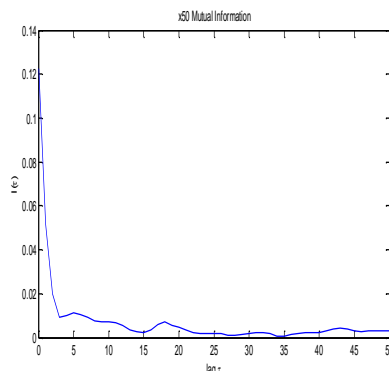
(δ)  $\tau = 6$



(ε)  $\tau = 3$



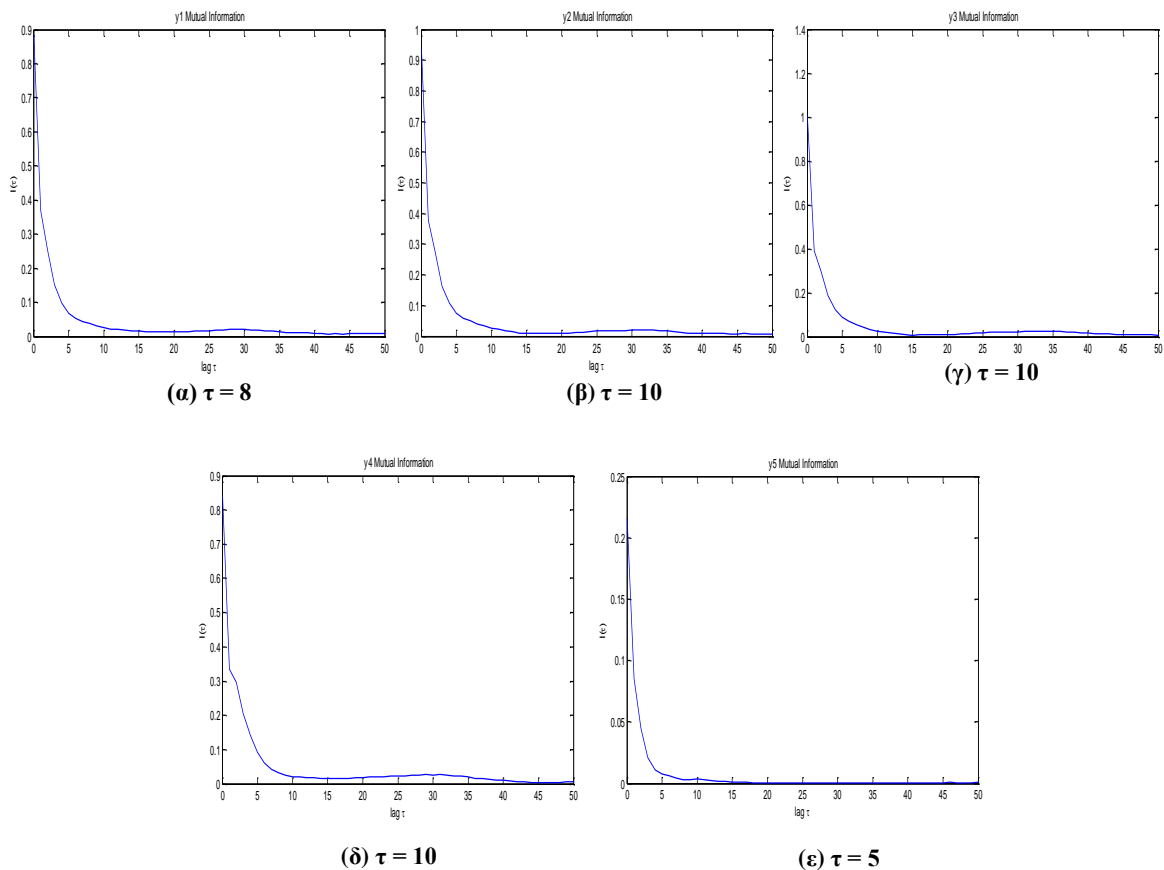
(ζ)  $\tau = 8$



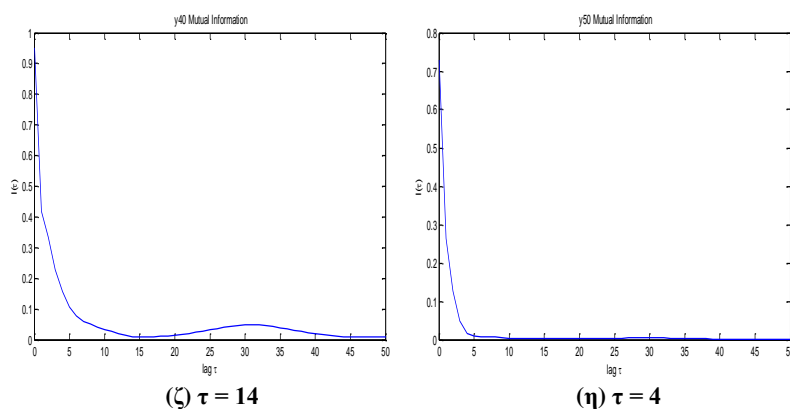
(η)  $\tau = 3$

**2.13 Εκτίμηση χρονικής υστέρησης (mutualinformation) για τις χρονοσειρές προσομοίωσης ταχύτητας ανέμου του ανέμου σε λόφο: (α) ταχύτητα ανέμου στον άξονα x, (β) ταχύτητα ανέμου στον άξονα y, (γ) ταχύτητα ανέμου στον άξονα z, (δ) μέτρο ταχύτητας ανέμου  $f(x,y,z)$ , (ε) γωνία ταχύτητας ανέμου  $f(x,y,z)$ , (ζ) μέτρο ταχύτητας ανέμου  $f(x,y)$  και (η) γωνία ταχύτητας ανέμου  $f(x,y)$ .**

Στο σχ.2.13 η συνάρτηση της χρονικής υστέρησης φαίνεται να μειώνεται απότομα κυρίως στις συνιστώσες  $x$  και  $z$ , ενώ αντίθετα πιο ομαλά στην συνιστώσα  $y$ , με αποτέλεσμα να προκύπτει χρονική υστέρηση 7, 5 και 8 για τις τρεις συνιστώσες αντίστοιχα, 6 και 3 για το μέτρο και την γωνία συναρτήσει των τριών συνιστωσών και τέλος 8 για το μέτρο που υπολογίστηκε συναρτήσει των δύο πρώτων συνιστωσών.







**2.14 Εκτίμηση χρονικής υστέρησης (mutualinformation) για τις χρονοσειρές προσομοίωσης ταχύτητας καθόδου του ανέμου σε λόφο: (α) ταχύτητα ανέμου στον άξονα x, (β) ταχύτητα ανέμου στον άξονα y, (γ) ταχύτητα ανέμου στον άξονα z, (δ) μέτρο ταχύτητας ανέμου  $f(x,y,z)$ , (ε) γωνία ταχύτητας ανέμου  $f(x,y,z)$ , (ζ) μέτρο ταχύτητας ανέμου  $f(x,y)$  και (η) γωνία ταχύτητας ανέμου  $f(x,y)$ .**

Στο σχ.2.14 για τις συνιστώσες της ταχύτητας καθόδου του ανέμου στα διαγράμματα (α), (β) και (γ) διακρίνεται χρονική υστέρηση με την τιμή 8, 10 και 8 αντίστοιχα. Επιπλέον οι χρονοσειρές αυτές εμφανίζουν παρόμοια δυναμική. Κατόπιν τα μέτρο και η γωνία που υπολογίζονται συναρτήσει όλων των συνιστωσών εμφανίζουν χρονική υστέρηση 10 και 5 σε αντίθεση με τα διαγράμματα (ζ) και (η) του σχ.2.4 όπου η χρονική υστέρηση είναι 14 και 4, ωστόσο οι ομοιότητες στην δυναμική συμπεριφορά τους είναι πολλές. Στην συνέχεια ακολουθεί ο συνολικός πίνακας για τις τιμές της χρονικής υστέρησης των χρονοσειρών προσομοίωσης.

<b>ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ</b>	<b>ΧΡΟΝΙΚΗ ΥΣΤΕΡΗΣΗ (τ)</b>
<b>Ταχύτητα ανόδου του ανέμου σε λόφο</b>	
Στον άξονα x	7
Στον άξονα y	5
Στον άξονα z	8
Μέτρο $f(x,y,z)$	6
Γωνία $f(x,y,z)$	3
Μέτρο $f(x,y)$	8
Γωνία $f(x,y)$	3
<b>Ταχύτητα καθόδου του ανέμου σε λόφο</b>	
Στον άξονα x	8
Στον άξονα y	10
Στον άξονα z	8
Μέτρο $f(x,y,z)$	10
Γωνία $f(x,y,z)$	5
Μέτρο $f(x,y)$	14
Γωνία $f(x,y)$	4

**Πίνακας 2.5 Εκτίμηση της χρονικής υστέρησης (mutualinformation) για τις χρονοσειρές προσομοίωσης.**

Τελικά για την ανακατασκευή του χώρου των φάσεων, για του λόγους που αναφέρθηκαν και στην αρχή του κεφαλαίου, θα επιλέξουμε τις τιμές υστέρησης που προέκυψαν από την συνάρτηση της μέσης αμοιβαίας πληροφορίας.

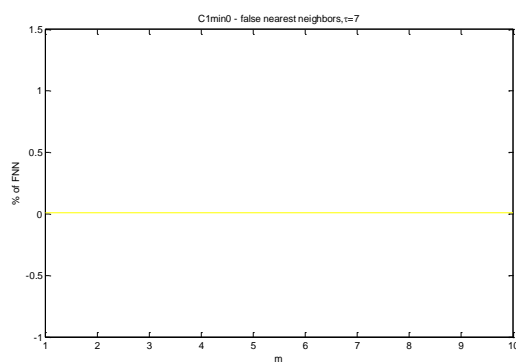
#### **2.4.2 Εκτίμηση Διάστασης Εμβύθισης (m)**

Εξίσου σημαντικό για την ανακατασκευή του χώρου των φάσεων είναι και η εκτίμηση της διάστασης εμβύθισης (m). Η επιλογή της διάστασης εμβύθισης (m)

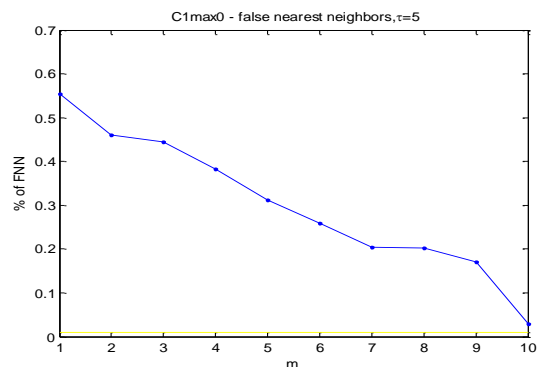
γίνεται με την βοήθεια της μεθόδου των ψευδών κοντινότερων γειτόνων (method of false nearest neighbors, FNN).

#### 2.4.2.1 Μέθοδος των Ψευδών Κοντινότερων Γειτόνων

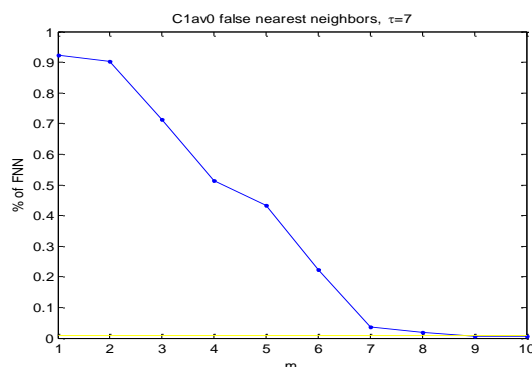
Με την μέθοδο των ψευδών κοντινότερων γειτόνων (FNN) επιλέγουμε τη βέλτιστη διάσταση εμβύθισης  $m$  για την οποία το ποσοστό των ψευδών γειτόνων είναι κάτω από το 1%. Ακολουθούν τα αντίστοιχα διαγράμματα για τις υπό μελέτη χρονοσειρές πεδίου.



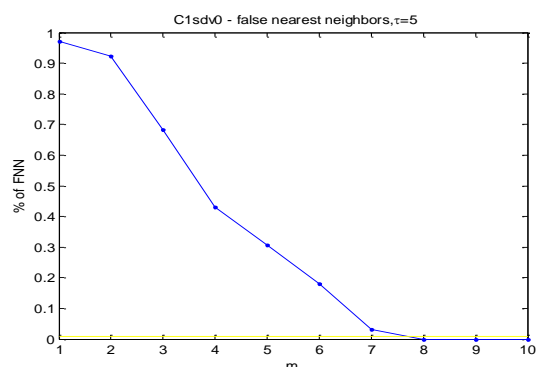
(α) C1-min0 (Not enough points found!)



(β) C1-max0,  $m=9$

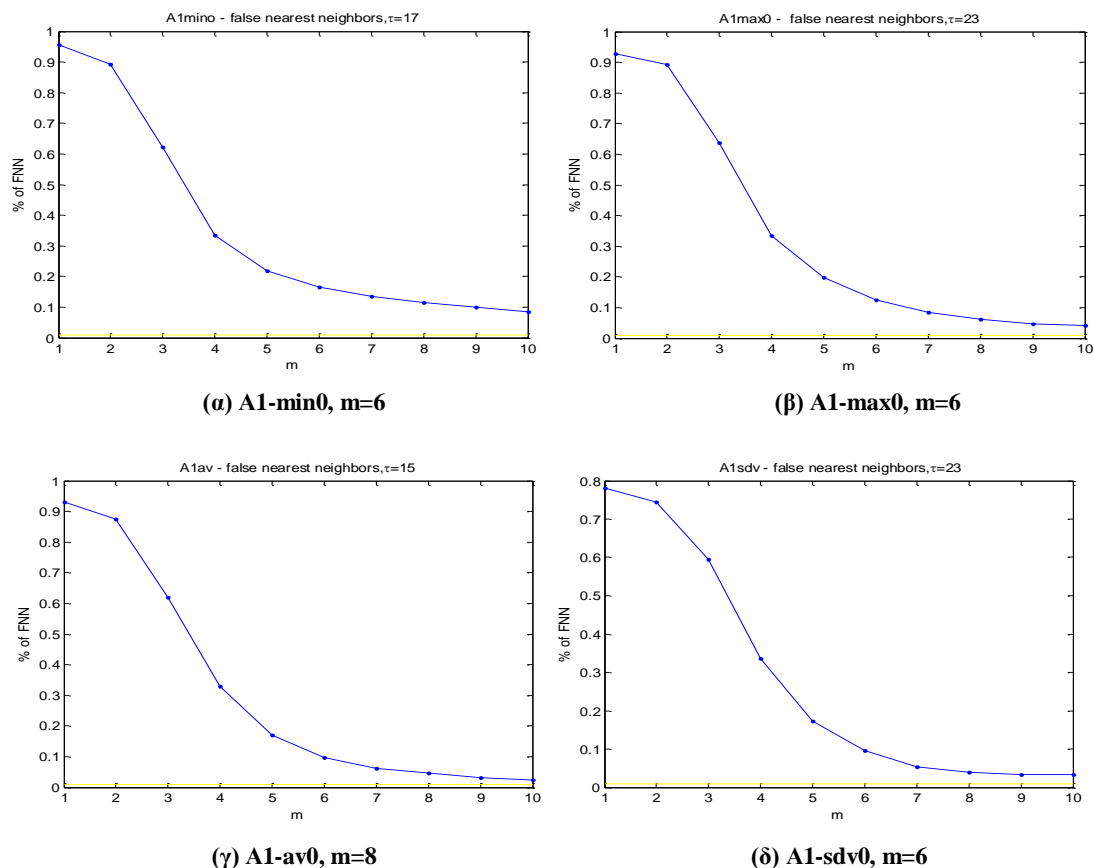


(γ) C1-av0,  $m=8$



(δ) C1-sdv,  $m=8$

**Σχ.2.15** Εκτίμηση διάστασης εμβύθισης (FNN) για τις χρονοσειρές ταχύτητας ανέμου C1 μετά από αφαίρεση τάσης (α) ελάχιστες τιμές, (β) μέγιστες τιμές, (γ) τιμές μέσου όρου και (δ) τυπικές αποκλίσεις.



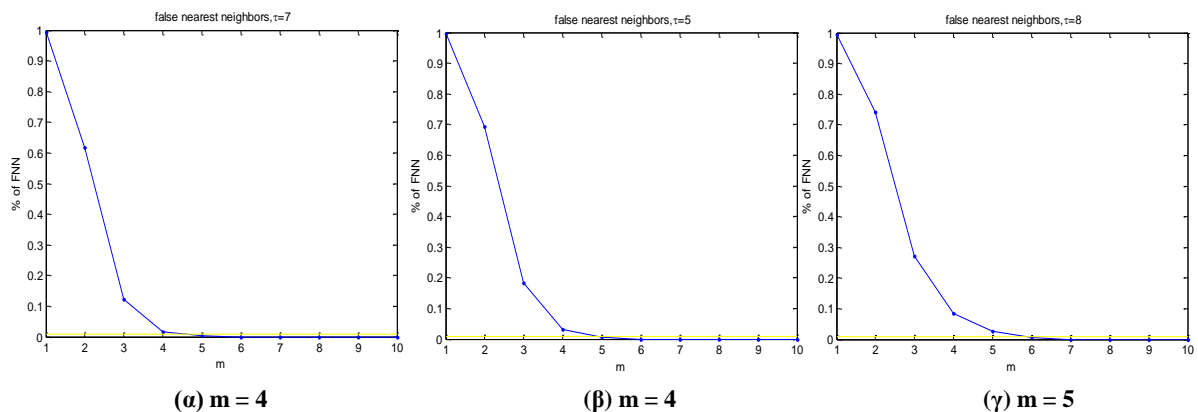
**Σχ.2.16 Εκτίμηση διάστασης εμπύθισης (FNN) για τις χρονοσειρές γωνίας ανέμου A1 μετά από αφαίρεση τάσης(α) ελάχιστες τιμές, (β)μέγιστες τιμές, (γ) τιμές μέσου όρου και (δ) τυπικές αποκλίσεις.**

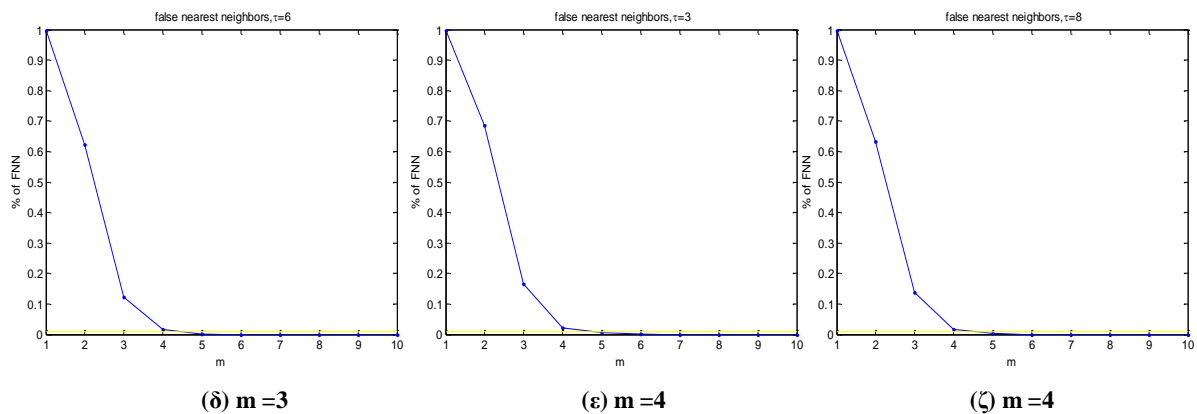
Παρατηρείται ότι οι χρονοσειρές ταχύτητας ανέμου μεγίστου, μέσου όρου και τυπικών αποκλίσεων ( $C1_{max}$ ,  $C1_{av}$  και  $C1_{sdv}$ ) στο σχ.2.15 εμφανίζουν διάσταση εμπύθισης 9, 8 και 8 αντίστοιχα. Ενώ η χρονοσειρά γωνίας ανέμου (σχ.2.16) δίνει τιμές 6, 6, 8 και 6. Πρέπει να σημειωθεί ότι όπως φαίνεται και στο σχ.2.15(α) για την χρονοσειρά  $C1_{min}$  δεν πήραμε αποτελέσματα με την βοήθεια του προγράμματος Matlab, ωστόσο σημειώνεται ότι με την βοήθεια της μεθόδου της Ποσοτικής Ανάλυσης Επαναφοράς που θα αναλυθεί σε παρακάτω κεφάλαιο προκύπτει διάσταση εμπύθισης 4. Συνεπώς προκύπτει συνολικά ο παρακάτω πίνακας.

ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΕΣ ΠΕΔΙΟΥ	ΔΙΑΣΤΑΣΗ ΕΜΒΥΘΙΣΗΣ (m)
<b>Χρονοσειρά ταχύτητας ανέμου (μετά από αφαίρεση της τάσης)</b>	
C1-min0 (ελαχίστου)	4
C1-max0 (μεγίστου)	9
C1-av0 (μέσου όρου)	8
C1-sdv0 (τυπικής απόκλισης)	8
<b>Χρονοσειρά γωνίας ανέμου (μετά από αφαίρεση της τάσης)</b>	
A1-min0 (ελαχίστου)	6
A1-max0 (μεγίστου)	6
A1-av0 (μέσου όρου)	8
A1-sdv0 (τυπικής απόκλισης)	6

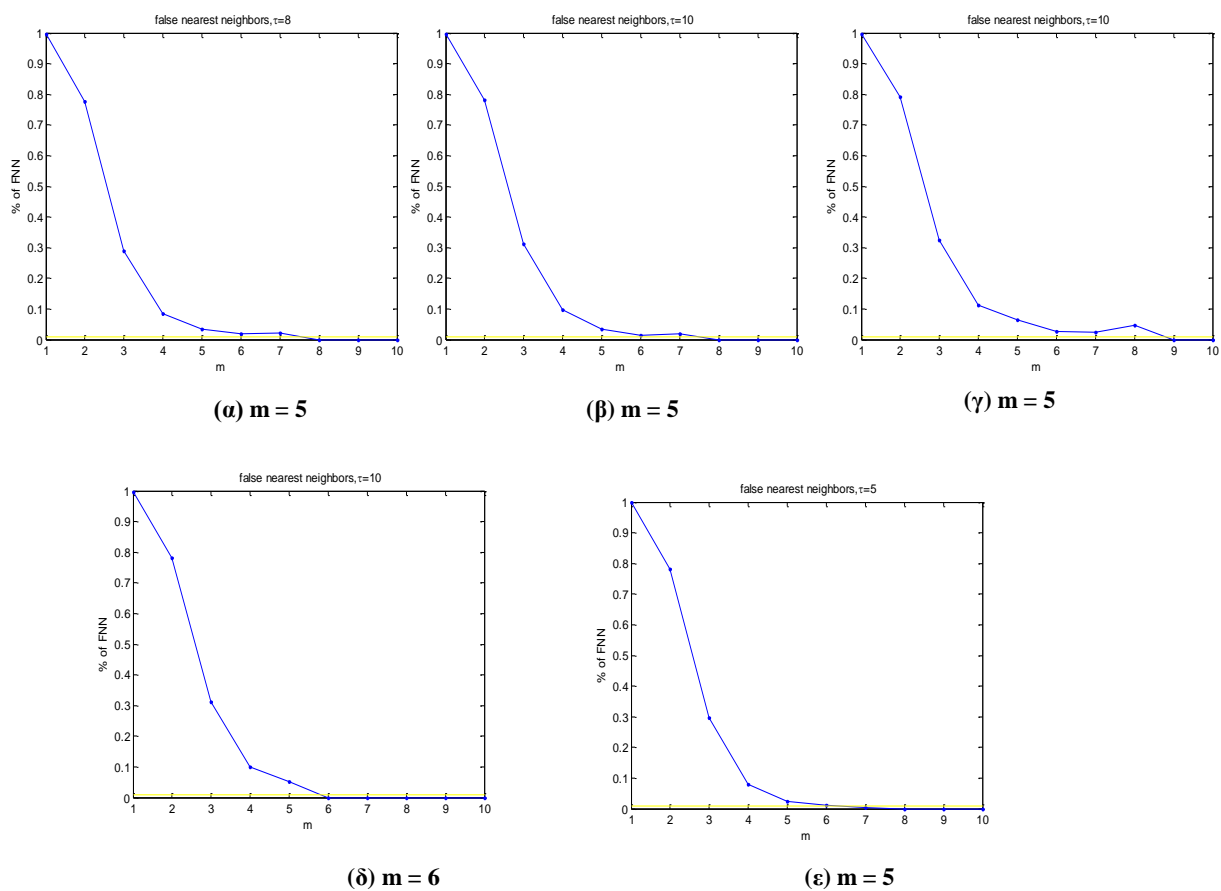
**Πίνακας 2.6** Εκτίμηση της διάστασης εμβύθισης (FNN) για τις χρονοσειρές πεδίου.

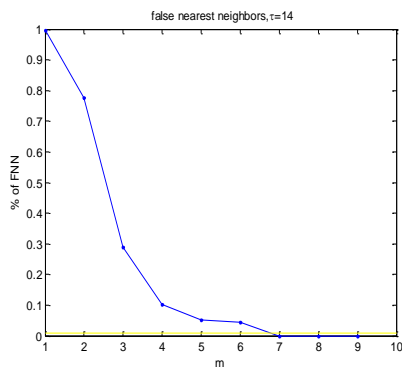
Ακολουθούν τα αντίστοιχα διαγράμματα για τις χρονοσειρές προσομοίωσης και η εκτιμώμενη διάσταση εμβύθισης για την κάθε μία χωριστά σε ένα συνολικό πίνακα.



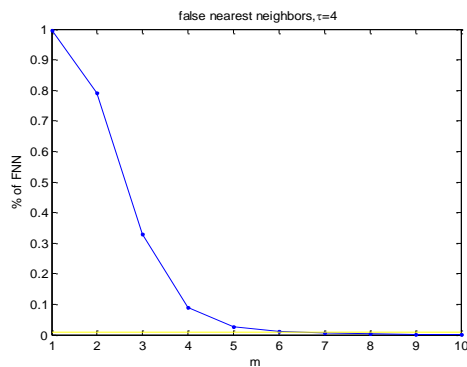


**2.17 Εκτίμηση διάστασης εμβύθισης (FNN) για τις χρονοσειρές προσομοίωσης ταχύτητας ανέμου σε λόφο: (α) ταχύτητα ανέμου στον άξονα x, (β) ταχύτητα ανέμου στον άξονα y, (γ) ταχύτητα ανέμου στον άξονα z, (δ) μέτρο ταχύτητας ανέμου  $f(x,y,z)$ , (ε) γωνία ταχύτητας ανέμου  $f(x,y,z)$ , (ζ) μέτρο ταχύτητας ανέμου  $f(x,y)$ .**





(ζ) m= 7



(η) m= 6

**2.18 Εκτίμηση διάστασης εμπύθισης (FNN) για τις χρονοσειρές προσομοίωσης ταχύτητας καθόδου του ανέμου σε λόφο: (α) ταχύτητα ανέμου στον άξονα x, (β) ταχύτητα ανέμου στον άξονα y, (γ) ταχύτητα ανέμου στον άξονα z, (δ) μέτρο ταχύτητας ανέμου  $f(x,y,z)$ , (ε) γωνία ταχύτητας ανέμου  $f(x,y,z)$ , (ζ) μέτρο ταχύτητας ανέμου  $f(x,y)$  και (η) γωνία ταχύτητας ανέμου  $f(x,y)$ .**

ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	ΔΙΑΣΤΑΣΗ ΕΜΒΥΘΙΣΗΣ (m)
<b>Ταχύτητα ανόδου του ανέμου σε λόφο</b>	
Στον άξονα x	4
Στον άξονα y	4
Στον άξονα z	5
Μέτρο $f(x,y,z)$	3
Γωνία $f(x,y,z)$	4
Μέτρο $f(x,y)$	4
<b>Ταχύτητα καθόδου του ανέμου σε λόφο</b>	
Στον άξονα x	5
Στον άξονα y	5
Στον άξονα z	5
Μέτρο $f(x,y,z)$	6
Γωνία $f(x,y,z)$	5
Μέτρο $f(x,y)$	7
Γωνία $f(x,y)$	6

**Πίνακας 2.7 Εκτίμηση της διάστασης εμπύθισης (FNN) για τις χρονοσειρές προσομοίωσης.**

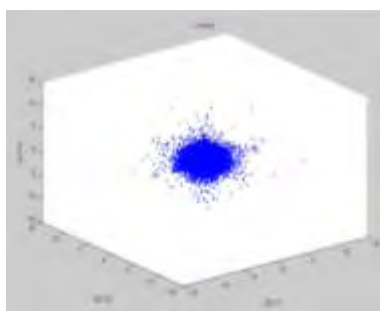
Σύμφωνα με τον πίνακα 2.7 και τα σχ.2.17 και 2.18 προκύπτει διάσταση εμβύθισης για τις χρονοσειρές της ταχύτητας ανόδου του ανέμου 4, 4, 5, 3, 4 και 4. Όσον αφορά τη διάσταση εμβύθισης για την χρονοσειρά καθόδου του ανέμου σύμφωνα με τον πίνακα οι τιμές είναι πιο υψηλές (5, 5, 5, 6, 5, 7 και 6 αντίστοιχα). Όλες οι τιμές που εκτιμήθηκαν τόσο για την διάσταση εμβύθισης στο παρών κεφάλαιο όσο και για την χρονική υστέρηση με την μέθοδο της μέσης αμοιβαίας πληροφορίας σε προηγούμενο κεφάλαιο θα χρησιμοποιηθούν για να γίνει η ανακατασκευή του χώρου των φάσεων που ακολουθεί.

#### **2.4.3 Αποτελέσματα Ανακατασκευής του Χώρου των Φάσεων των Χρονοσειρών Πεδίου και Προσομοίωσης**

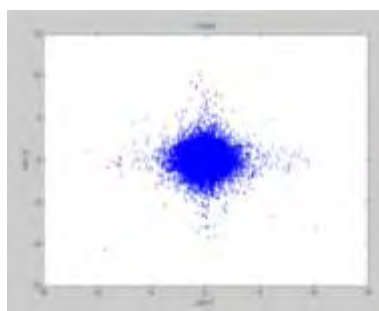
Οι παράμετροι ανακατασκευής του χώρου των φάσεων των χρονοσειρών υπολογίστηκαν στα παραπάνω υποκεφάλαια και επιλέχθηκαν οι κατάλληλες τιμές. Παρουσιάζονται παρακάτω οι ελκυστές που προέκυψαν από τις χρονοσειρές ταχύτητας και γωνίας ανέμου (C1 και A1 αντίστοιχα), για τις οποίες έχει γίνει η αφαίρεση της τάσης.

Για κάθε χρονοσειρά δίνονται τρία διαγράμματα. Το πρώτο διάγραμμα (α) δίνει την ανακατασκευή σε χώρο τριών διαστάσεων και τα υπόλοιπα δύο (β και γ) για κάθε χρονοσειρά δίνει την ανακατασκευή σε χώρο δύο διαστάσεων. Επίσης πρέπει να αναφερθεί ότι θεωρούμε ότι έχουμε διακριτό σύστημα δηλαδή στα διαγράμματα των ελκυστών απεικονίζονται μόνο τα σημεία και δεν ενώνονται οι αποστάσεις των διαδοχικών σημείων.

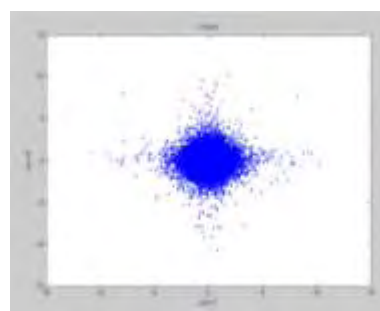




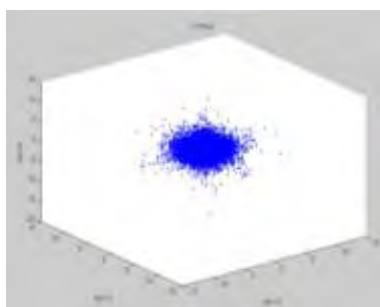
1.(α) C1-min0



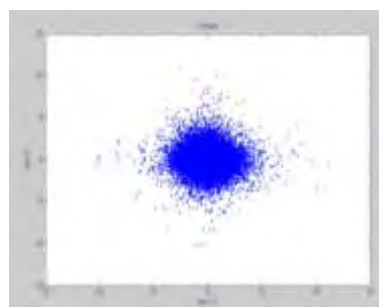
1.(β) C1-min0



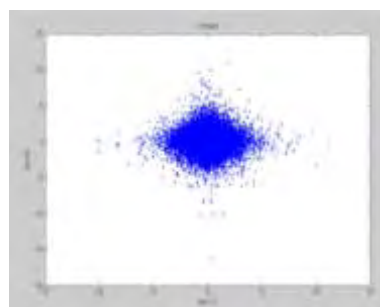
1.(γ) C1-min0



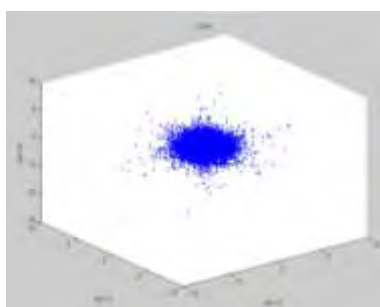
2.(α) C1-max0



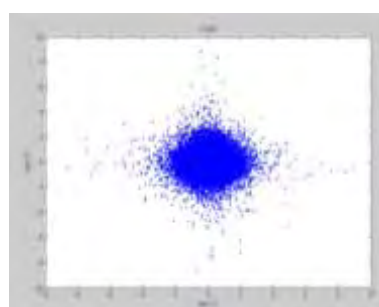
2.(β) C1-max0



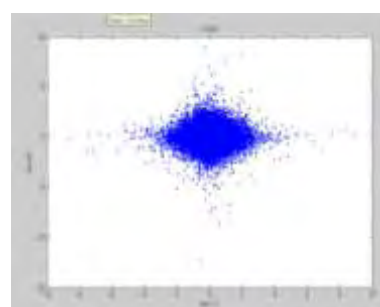
2.(γ) C1-max0



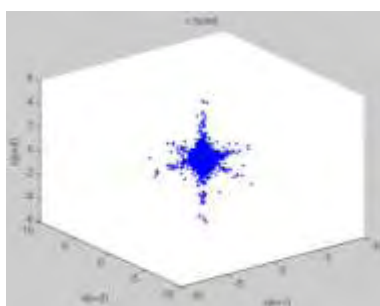
3.(α) C1-av0



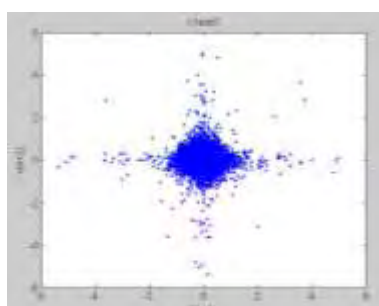
3.(β) C1-av0



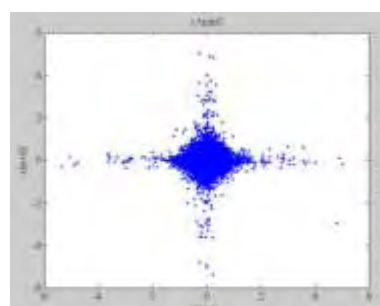
3.(γ) C1-av0



4.(α) C1-sdv0



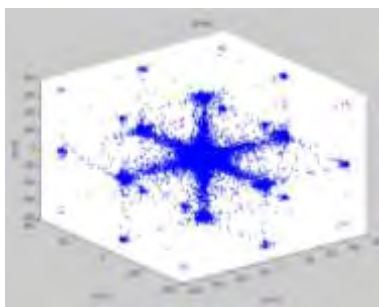
4.(β) C1-sdv0



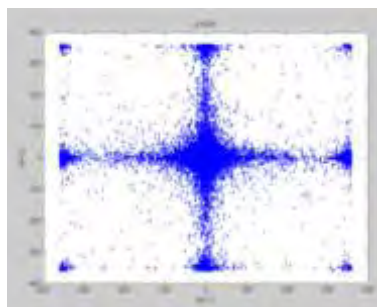
4.(γ) C1-sdv0

**Σχ.2.19 Ανακατασκευή του χώρου των φάσεων της χρονοσειράς ταχύτητας ανέμου C 1: 1,2,3,4 χρονοσειρές ελαχίστου, μεγίστου, μέσου όρου και τυπικών αποκλίσεων αντίστοιχα μετά από αφαίρεση τάσης.**

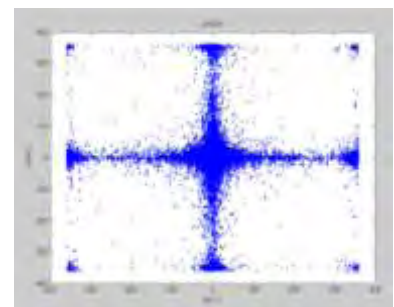
Στις χρονοσειρές ταχύτητας ανέμου ελαχίστων, μεγίστων τιμών και τιμών μέσου όρου στο σχ.2.19.1, 2 και 3 παρατηρείτε ότι σχεδόν όλη η πληροφορία είναι τοποθετημένη στο κέντρο του συστήματος. Στο σχ.2.19.2.(β) και 2.19.3.(β) απεικονίζεται συγκριτικά με τις άλλες χρονοσειρές περισσότερη πληροφορία καθώς μετακινούμαστε προς τα όριά του. Οι δομές των ελκυστών σε αυτές τις τρεις χρονοσειρές που αναφέρθηκαν είναι σχεδόν όμοιες, δεν είναι πολύπλοκες και παρουσιάζουν μία συγκεκριμένη δομή. Παρόμοια δομή παρουσιάζει η χρονοσειρά ταχύτητας ανέμου των τυπικών αποκλίσεων με σχεδόν όλη την πληροφορία να είναι τοποθετημένη στο κέντρο του ελκυστή, καθώς φαίνεται να υπάρχουν κάποιες γραμμικές συσχετίσεις, αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι η φυσική συμπεριφορά ενός δυναμικού συστήματος που περιέχει τις τυπικές αποκλίσεις ενός μεγέθους είναι πιο πολύπλοκη λόγω των πολλών φυσικών παραμέτρων. Σύμφωνα με τα δεδομένα των χρονοσειρών στο σχ.2.19 φαίνεται να υπάρχει συμπεριφορά στοχαστικού ή υψηλοδιάστατου συστήματος.



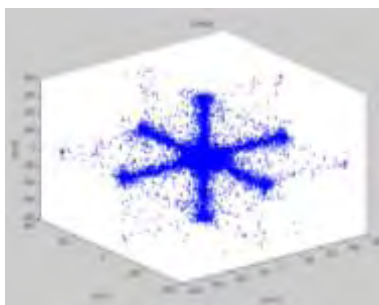
1.(α) A1-min0



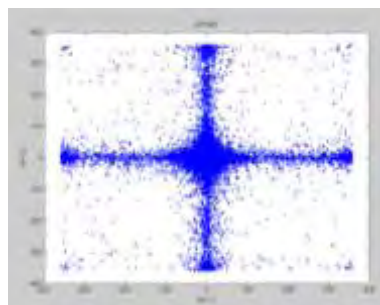
1.(β) A1-min0



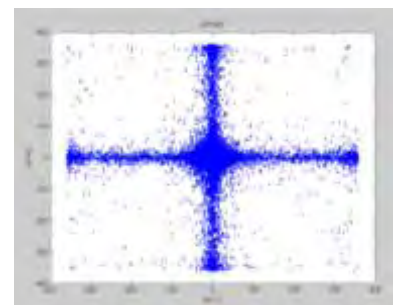
1.(γ) A1-min0



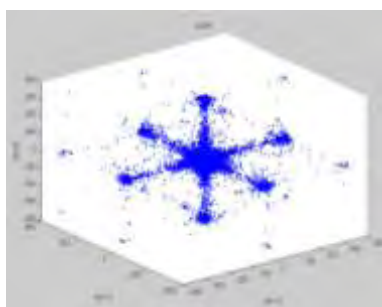
2.(α) A1-max0



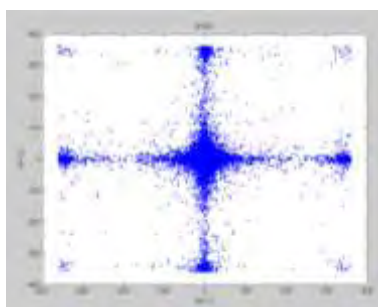
2.(β) A1-max0



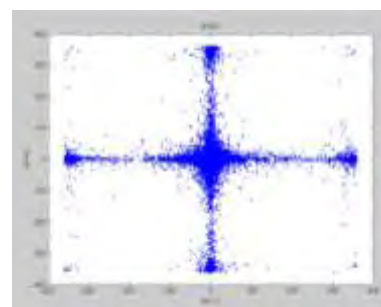
2.(γ) A1-max0



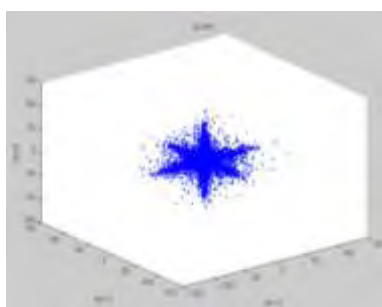
3.(α) A1-av0



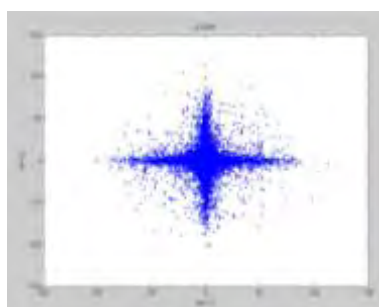
3.(β) A1-av0



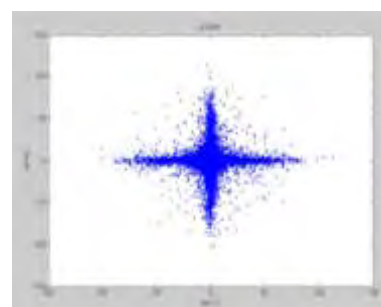
3.(γ) A1-av0



4.(α) A1-sdv0



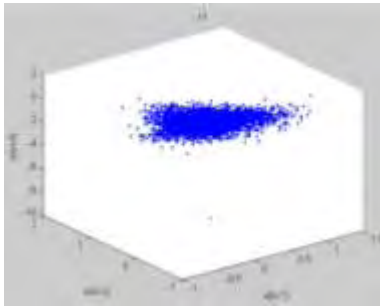
4.(β) A1-sdv0



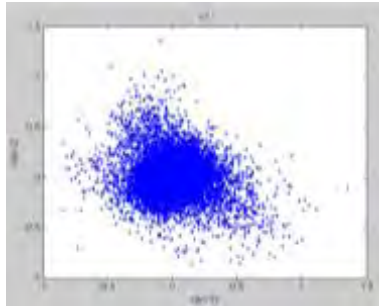
4.(γ) A1-sdv0

**Σχ.2.20 Ανακατασκευή του χώρου των φάσεων της χρονοσειράς γωνίας ανέμου A1: 1,2,3,4 χρονοσειρές ελαχίστου, μεγίστου, μέσου όρου και τυπικών αποκλίσεων αντίστοιχα μετά από αφαίρεση τάσης.**

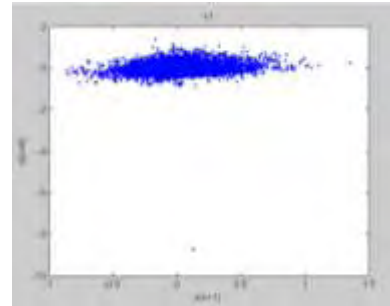
Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει και η χρονοσειρά της γωνίας του ανέμου. Στο σχ.2.20 οι χρονοσειρές 1, 2 και 3 παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά από αυτή του μέτρου και η δομή είναι χαρακτηριστική συσχετίσεων. Στις δύο πρώτες χρονοσειρές παρατηρείτε ότι αρκετή πληροφορία είναι συγκεντρωμένη στο κέντρο του συστήματος κατόπιν δημιουργούνται όπως διακρίνεται από τα διαγράμματα κάποιοι άξονες που υποδηλώνουν την ύπαρξη γραμμικών συσχετίσεων, όπως ήδη αναφέρθηκε. Παρόμοια δομή παρουσιάζει και η χρονοσειρά γωνίας ανέμου των τυπικών αποκλίσεων στο σχ.2.20.4 με την πληροφορία να είναι περισσότερο συγκεντρωμένη στο κέντρο συγκριτικά με τις άλλες χρονοσειρές. Στην συνέχεια ακολουθεί η ανακατασκευή του χώρου των φάσεων για τις χρονοσειρές προσομοίωσης.



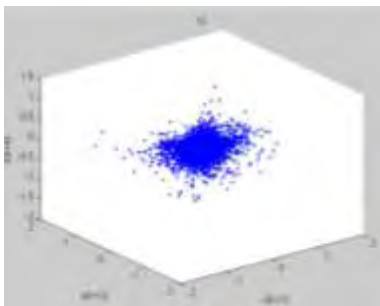
1.( $\alpha$ ) x1



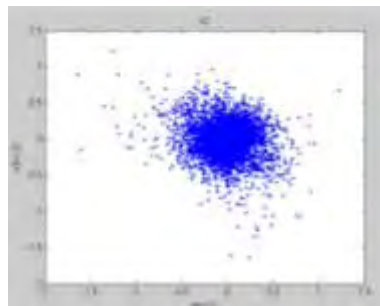
1.( $\beta$ ) x1



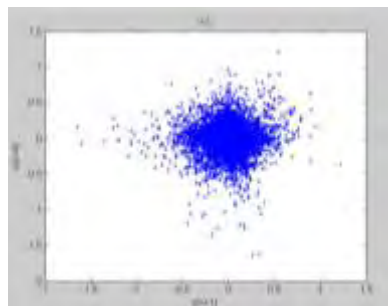
1.( $\gamma$ ) x1



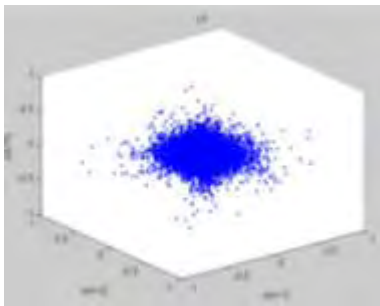
2.( $\alpha$ ) x2



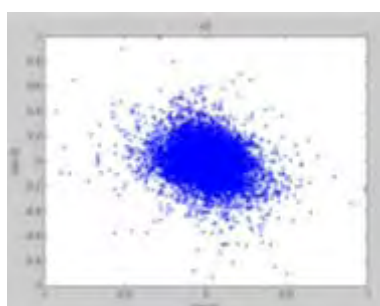
2.( $\beta$ ) x2



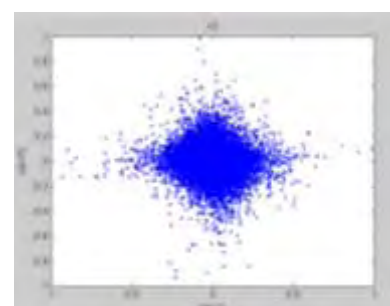
2.( $\gamma$ ) x2



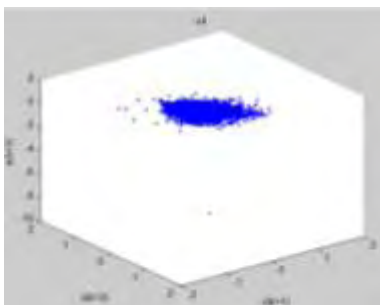
3.( $\alpha$ ) x3



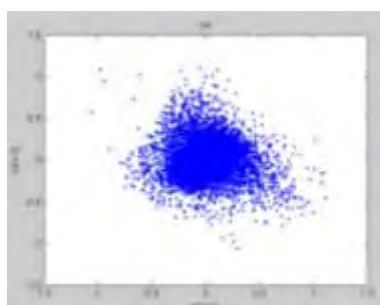
3.( $\beta$ ) x3



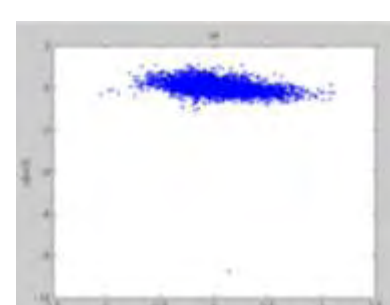
3.( $\gamma$ ) x3



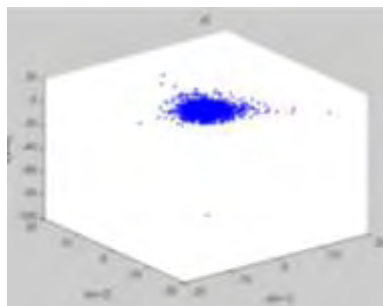
4.( $\alpha$ ) x4



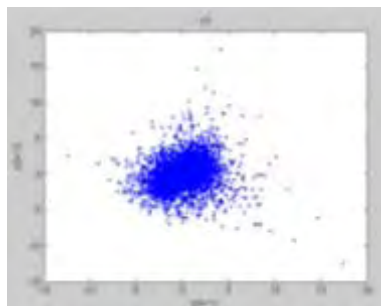
4.( $\beta$ ) x4



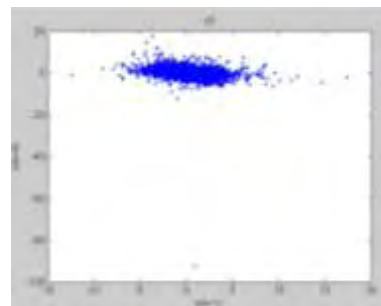
4.( $\gamma$ ) x4



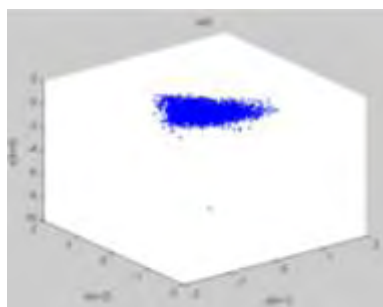
5.(α) x5



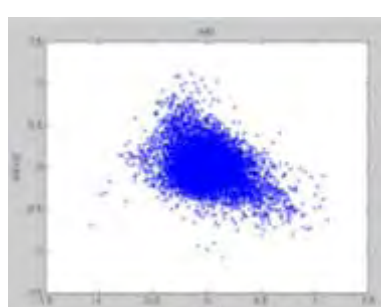
5.(β) x5



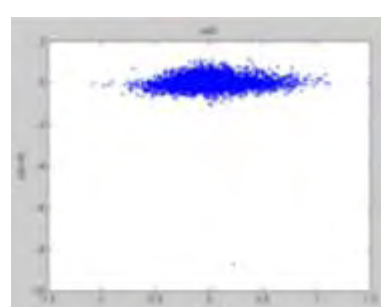
5.(γ) x5



6.(α) x40



6.(β) x40

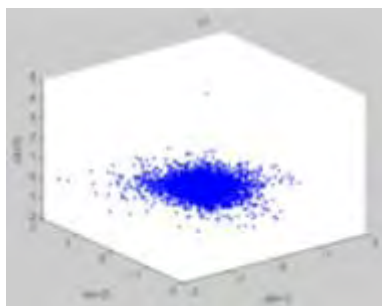


6.(γ) x40

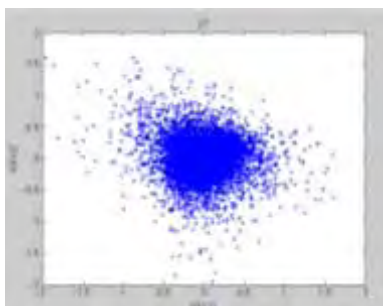
**Σχ.2.21 Ανακατασκευή του χώρου των φάσεων των χρονοσειρών προσομοίωσης της ταχύτητας ανόδου του ανέμου: 1, 2, 3, 4, 5, 6 χρονοσειρές ταχύτητας ανέμου στον άξονα x, ταχύτητας ανέμου στον άξονα y, ταχύτητας ανέμου στον άξονα z, μέτρο ταχύτητας ανέμου  $f(x,y,z)$ , γωνία ταχύτητας ανέμου  $f(x,y,z)$  και μέτρο ταχύτητας ανέμου  $f(x,y)$ .**

Από το σχ.2.21 προκύπτει ότι το σύστημα έχει πολύπλοκη δομή χωρίς συγκεκριμένη συμπεριφορά. Τα διαγράμματα της συνιστώσας της ταχύτητας στον άξονα y και αντίστοιχα στον άξονα z (σχ.2.21.2 και 3) παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά, με το σύνολο της πληροφορίας να είναι συγκεντρωμένο σχεδόν στο κέντρο του συστήματος και χωρίς συγκεκριμένη δομή κάποια πληροφορία βρίσκεται στα όρια του συστήματος. Αντίθετα διαφορετική δομή εμφανίζει η συνιστώσα της ταχύτητας στον άξονα x συγκριτικά με τις άλλες δύο συνιστώσες, όπως επίσης και το μέτρο, το οποίο έχει διαφορετική δομή όταν υπολογίζεται είτε με όλες τις συνιστώσες είτε μόνο με τις δύο. Η γωνία της ταχύτητας στο σχ.2.21.6 παρουσιάζει παρόμοια δομή με την συνιστώσα της ταχύτητας στον άξονα x.

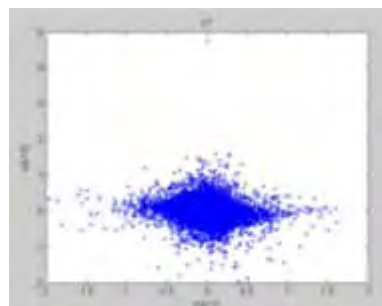




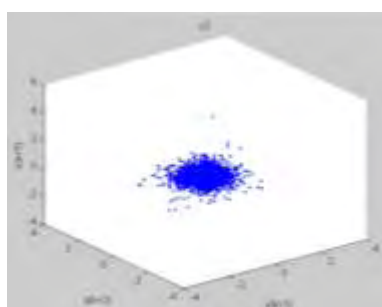
1.( $\alpha$ ) y1



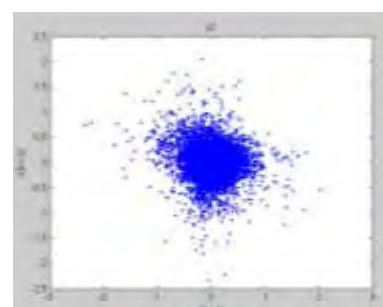
1.( $\beta$ ) y1



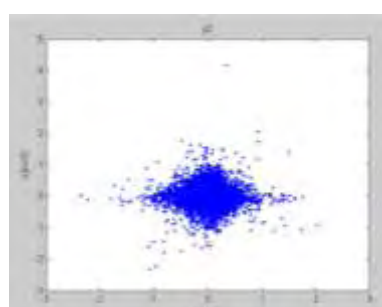
1.( $\gamma$ ) y1



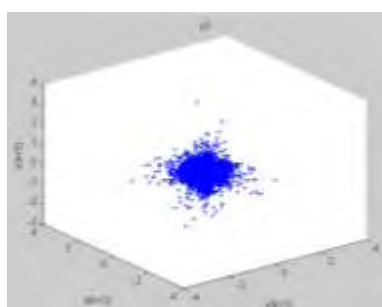
2.( $\alpha$ ) y2



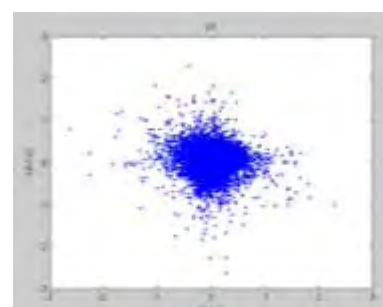
2.( $\beta$ ) y2



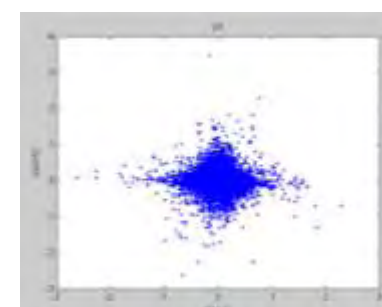
2.( $\gamma$ ) y2



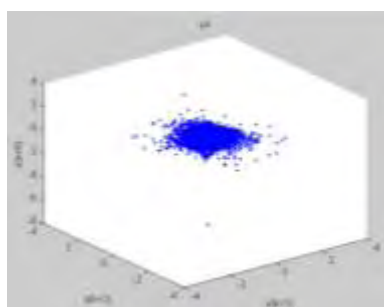
3.( $\alpha$ ) y3



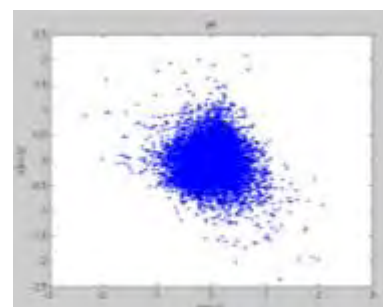
3.( $\beta$ ) y3



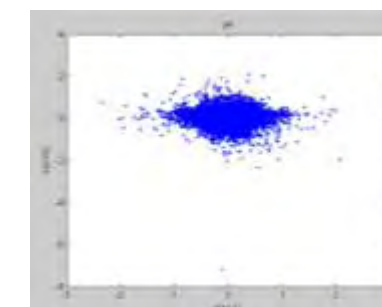
3.( $\gamma$ ) y3



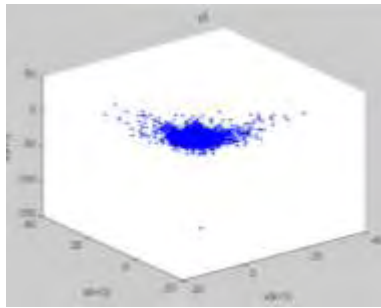
4.( $\alpha$ ) y4



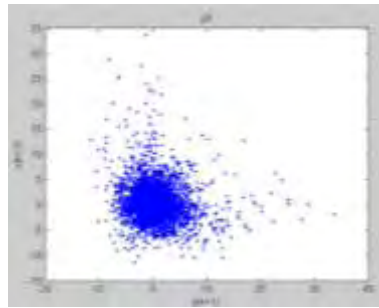
4.( $\beta$ ) y4



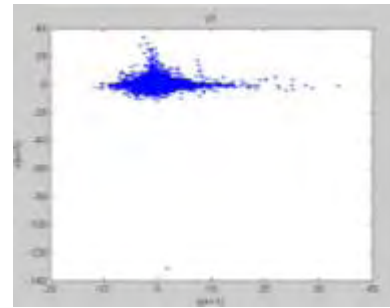
4.( $\gamma$ ) y4



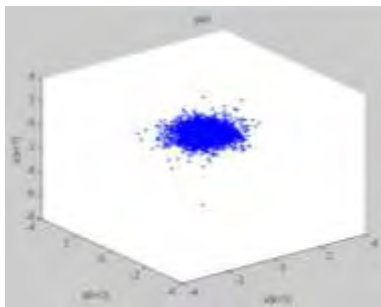
5.(α) y5



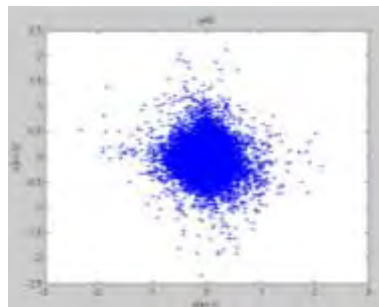
5.(β) y5



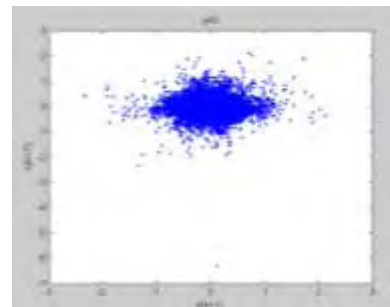
5.(γ) y5



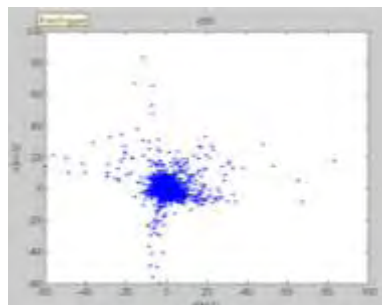
6.(α) y40



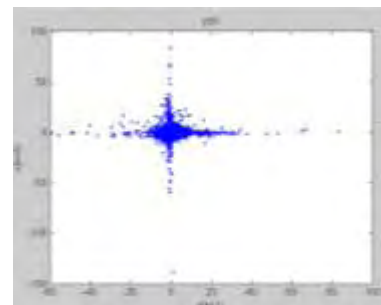
6.(β) y40



6.(γ) y40



7.(a) y50



7.(b) y50

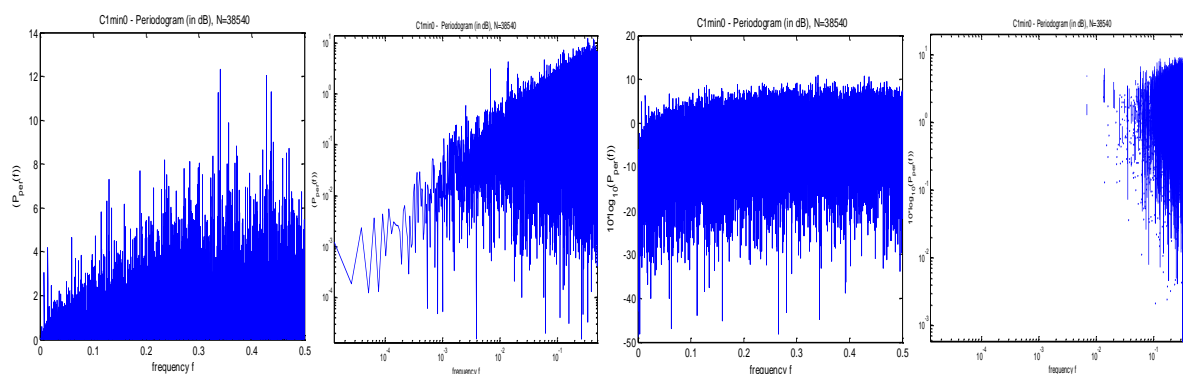
**Σχ.2.22 Ανακατασκευή του χώρου των φάσεων των χρονοσειρών προσομοίωσης της ταχύτητας καθόδου του ανέμου: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 χρονοσειρές ταχύτητας ανέμου στον άξονα x, ταχύτητας ανέμου στον άξονα y, ταχύτητας ανέμου στον άξονα z, μέτρο ταχύτητας ανέμου  $f(x,y,z)$ , γωνία ταχύτητας ανέμου  $f(x,y,z)$ , μέτρο ταχύτητας ανέμου  $f(x,y)$  και γωνία ταχύτητας ανέμου  $f(x,y)$ .**

Στο σχ.2.22 που αφορά στην χρονοσειρά της ταχύτητας καθόδου του ανέμου σε λόφο, επίσης δεν εμφανίζεται κάποια συγκεκριμένη δομή. Εξαιρείται το διάγραμμα 7 που αφορά στην γωνία της ταχύτητας που έχει υπολογιστεί συναρτήσει των δύο

συνιστωσών της  $(f(x,y))$  και παρουσιάζει κάποια γραμμική συσχέτιση, δεδομένου ότι μπορούμε να διακρίνουμε κάποιους άξονες να δημιουργούνται. Επίσης για την ταχύτητα καθόδου η συνιστώσα στον άξονα  $y$  έχει πολλές ομοιότητες με την αντίστοιχη στον άξονα  $z$  ενώ διαφέρουν με την συνιστώσα στον άξονα  $x$ . Το μέτρο εμφανίζει μία πιο πολύπλοκη δομή ενώ η γωνία που υπολογίστηκε συναρτήσει όλων των συνιστωσών επηρεάζεται περισσότερο από την συνιστώσα  $y$  και  $z$ .

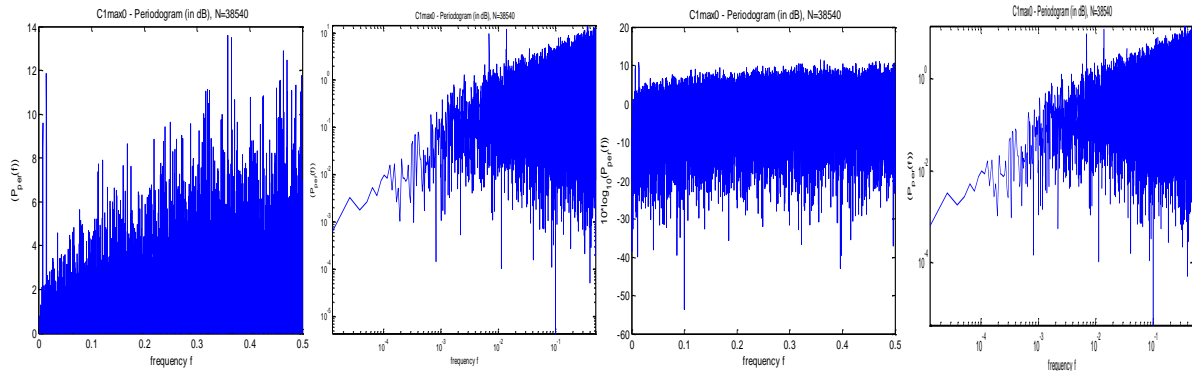
## 2.5 Φάσμα Ισχύος Χρονοσειρών Πεδίου και Προσομοίωσης

Το φάσμα ισχύος είναι μία μέθοδος με την οποία διαπιστώνεται εάν υπάρχει μακροχρόνια μνήμη, περιοδικότητα σε μία χρονοσειρά και κατόπιν μπορεί να διερευνηθεί η δυναμική που δημιουργεί το κάθε φαινόμενο. Στην συνέχεια δίνονται τα φάσματα ισχύος των χρονοσειρών πεδίου και προσομοίωσης που έχουν υποβληθεί σε αφαίρεση τάσης. Τα αντίστοιχα διαγράμματα παρουσιάζονται σε κανονική κλίμακα και σε λογαριθμική. Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι η ύπαρξη νόμων κλίμακας είναι ένδειξη χαοτικής συμπεριφοράς (Mandelbrot).

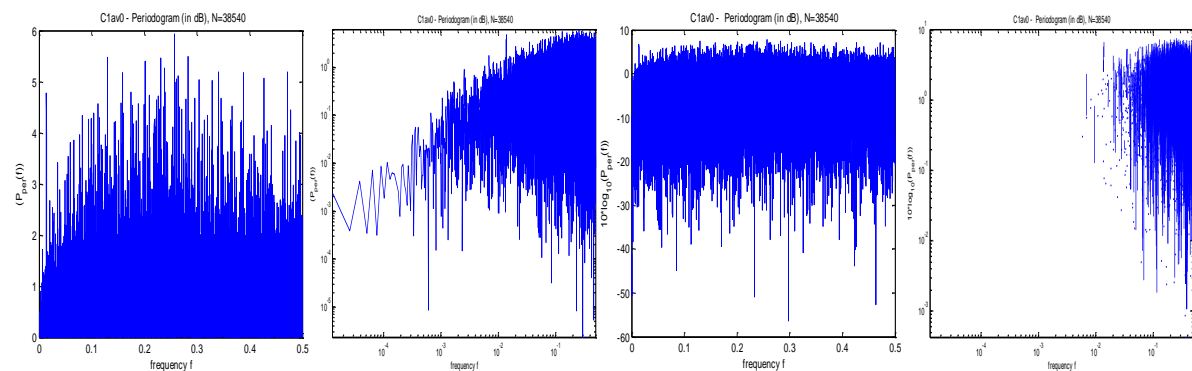


1. C1-min0

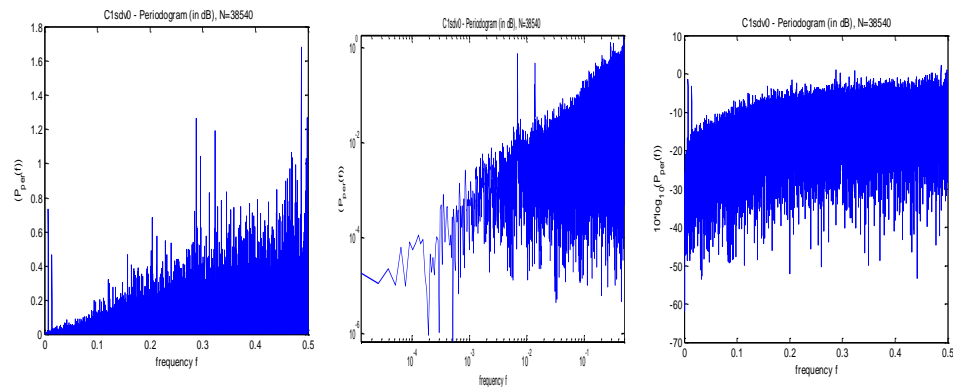




2. C1-max0



3. C1-av0

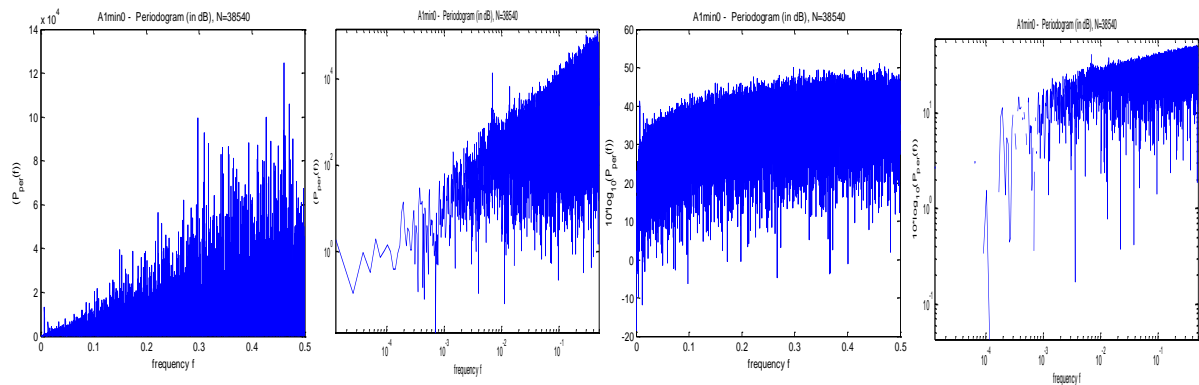


4. C1-sdv

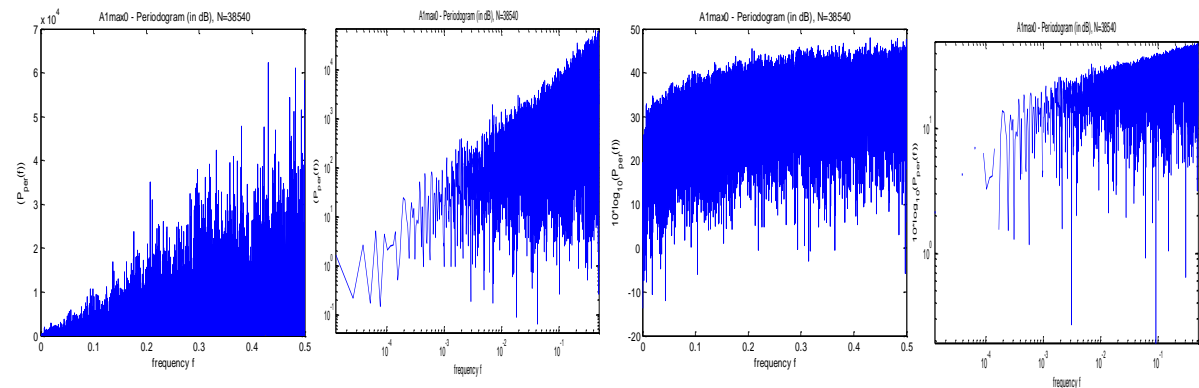
**Σχ.2.23 Φάσματα ισχύος της χρονοσειράς πεδίου ταχύτητας ανέμου C1: 1,2,3,4 χρονοσειρές ελαχίστου, μεγίστου, μέσου όρου και τυπικών αποκλίσεων αντίστοιχα, μετά από αφαίρεση τάσης.**

Στα σχ2.23.1 και 2 που αντιστοιχούν σε χρονοσειρές ταχύτητας ανέμου ελαχίστου και μεγίστου, παρατηρείται ότι τα φάσματα ισχύος της είναι όμοια και έχουν θετική κλίση στις χαμηλές συχνότητες και σχεδόν οριζόντια μετά.

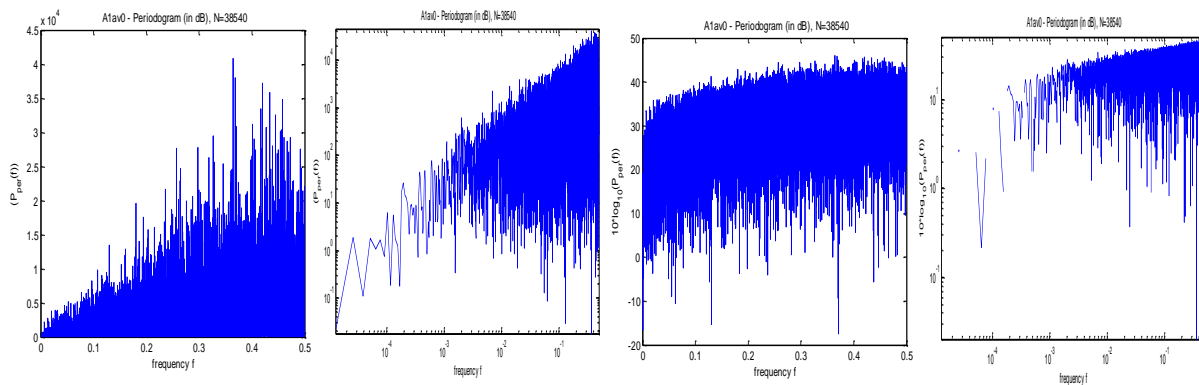
Στη χρονοσειρά μέσου όρου της ταχύτητας ανέμου στο σχ.2.23.3 διακρίνεται σχεδόν οριζόντιο φάσμα ισχύος δηλαδή διαδικασία λευκού θορύβου. Σχετικά με την χρονοσειρά των τυπικών αποκλίσεων (σχ.2.23.4) εμφανίζει φάσμα ισχύος παρόμοιας μορφής με τα προηγούμενα. Επιπλέον παρατηρούνται γενικότερα μεγάλες συχνότητες και θετική κλίση σύμφωνα με τα διαγράμματα των χρονοσειρών.



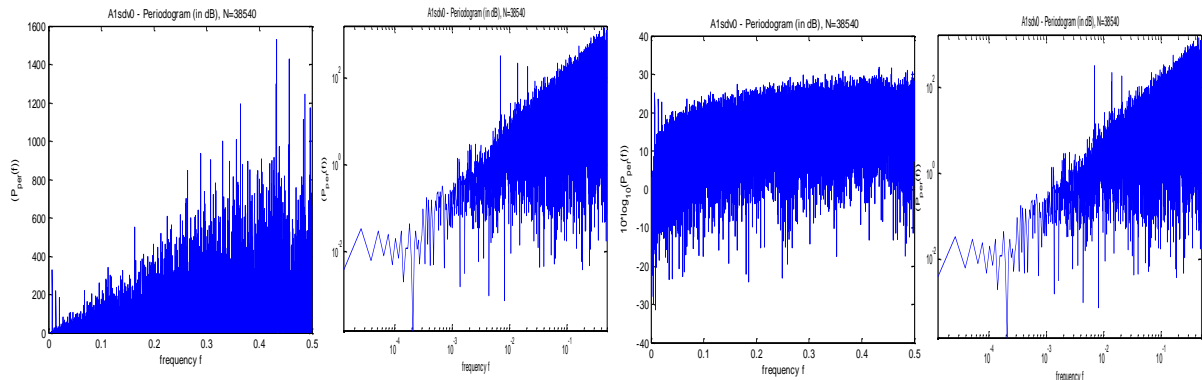
**1. A1-min0**



**2. A1-max0**



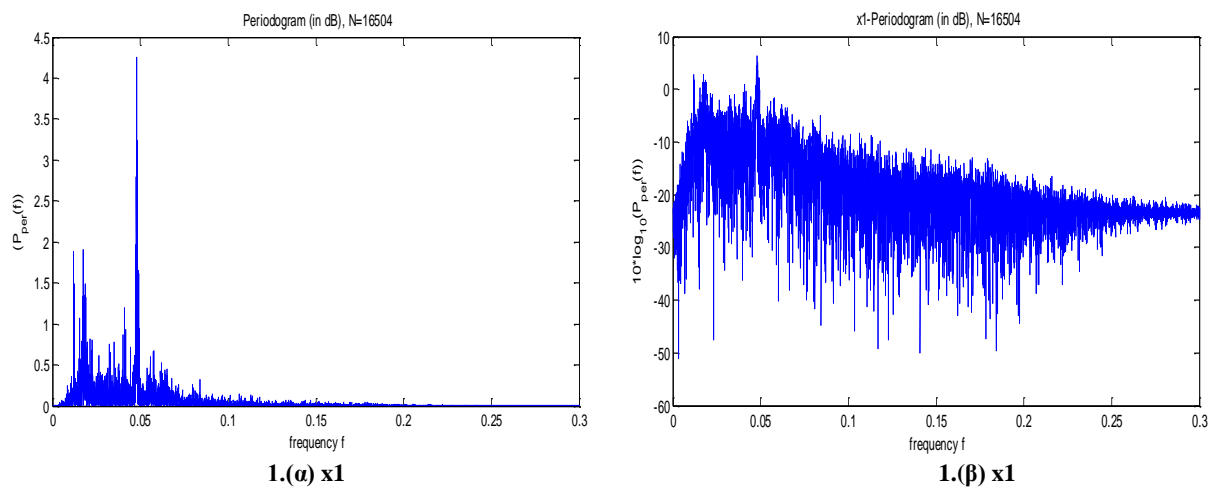
**3. A1-av0**

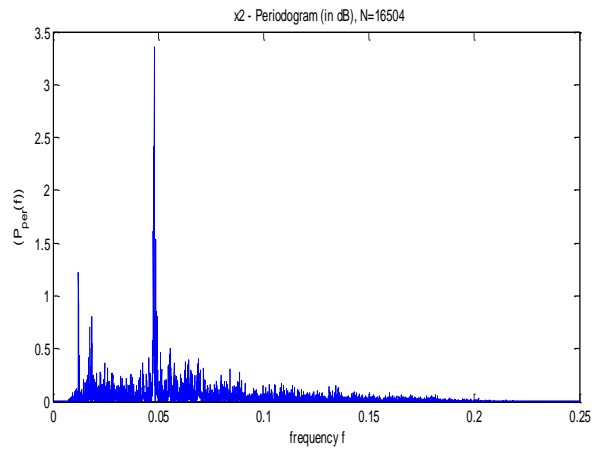


#### 4. A1-sdv0

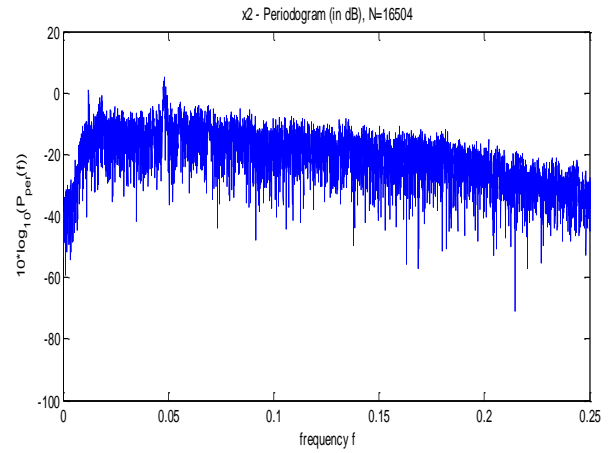
**Σχ.2.24 Φάσματα ισχύος της χρονοσειράς πεδίου γωνίας ανέμου A1: 1,2,3,4 χρονοσειρές ελαχίστου, μεγίστου, μέσου όρου και τυπικών αποκλίσεων αντίστοιχα, μετά από αφαίρεση τάσης.**

Στη χρονοσειρά γωνίας ανέμου στο σχ.2.24 διακρίνονται τέσσερα φάσματα ισχύος όμοιας μορφής με θετική κλίση, και ίσως από κάποια συχνότητα και πάνω μειώνεται η κλίση ή γίνεται μηδενική. Επιπλέον τα φάσματα ισχύος και στις δύο χρονοσειρές ταχύτητας και γωνίας ανέμου δεν παρουσίασαν πολύπλοκη δομή διότι διακρίνονταν από μία κλίση και όχι από περισσότερες, άρα και μία περιοχή συχνοτήτων.

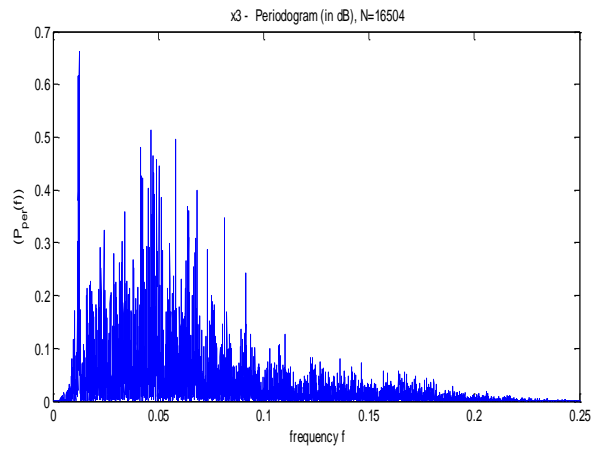




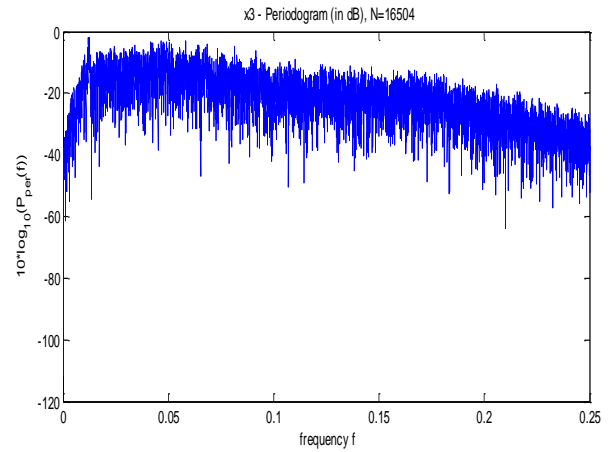
**2.(α) x2**



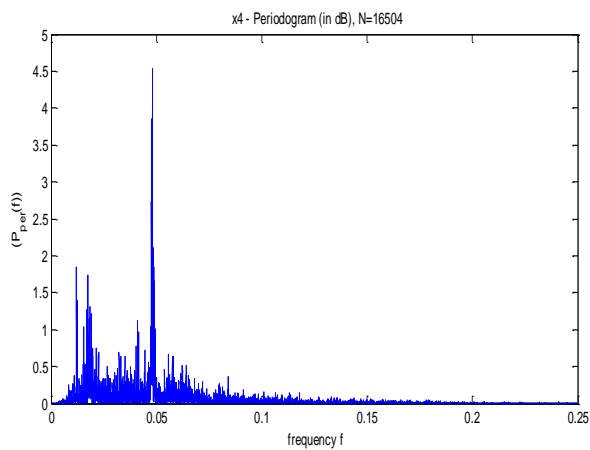
**2.(β) x2**



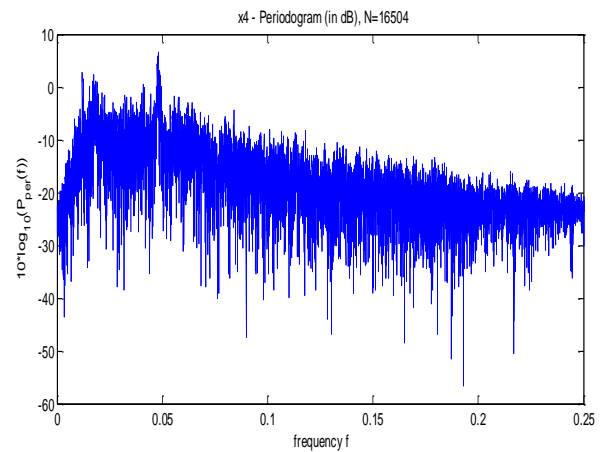
**3.(α) x3**



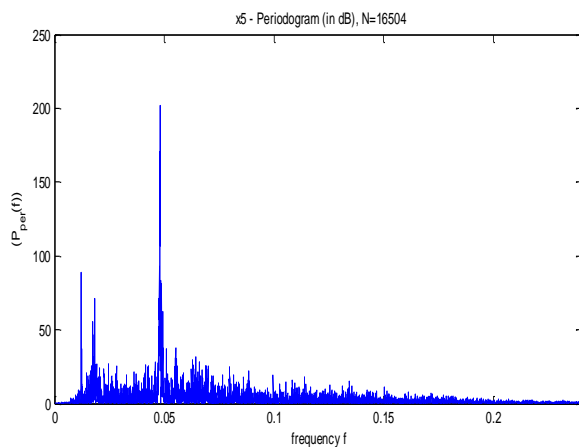
**3.(β) x3**



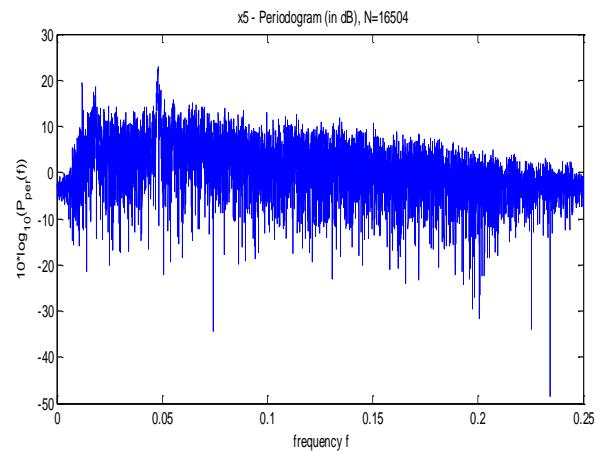
**4.(α) x4**



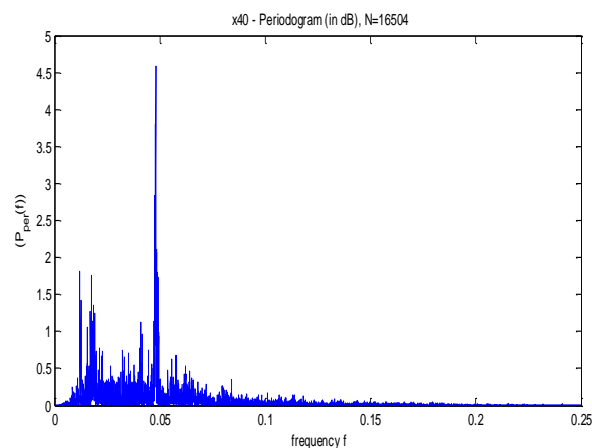
**4.(β) x4**



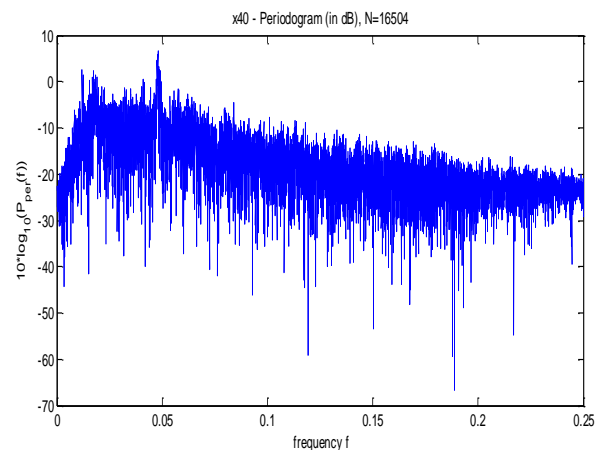
5.(α) x5



5.(β) x5



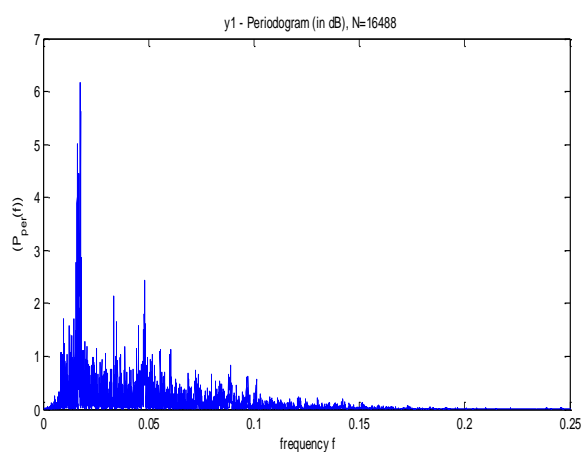
6.(α) x40



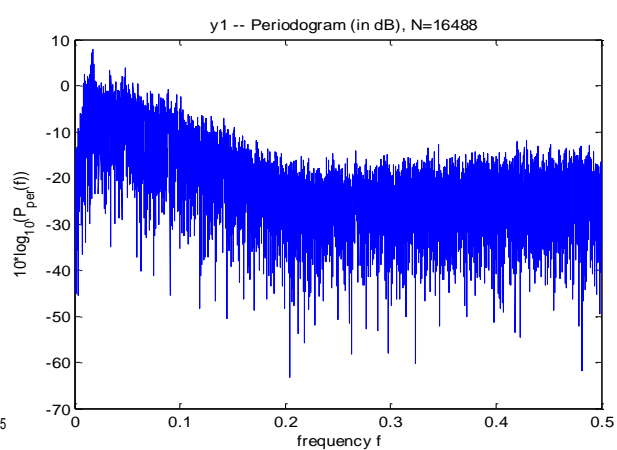
6.(β) x40

**Σχ.2.25 Φάσματα ισχύος της χρονοσειράς προσομοίωσης ταχύτητας ανόδου του ανέμου (μετά από αφαίρεση τάσης): 1, 2, 3, 4, 5, 6 χρονοσειρές ταχύτητας ανέμου στον άξονα x, ταχύτητας ανέμου στον άξονα y, ταχύτητας ανέμου στον άξονα z, μέτρο ταχύτητας ανέμου  $f(x,y,z)$ , γωνία ταχύτητας ανέμου  $f(x,y,z)$  και μέτρο ταχύτητας ανέμου  $f(x,y)$ .**

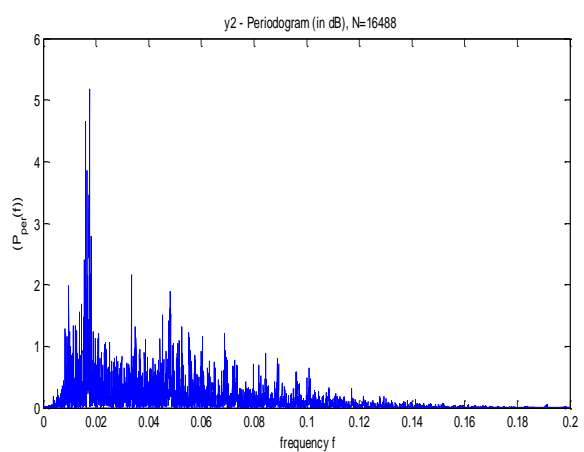
Παρατηρείται στο σχ.2.25 ότι γενικότερα τόσο για τις συνιστώσες όσο για το μέτρο και την γωνία της ταχύτητας οι συχνότητες είναι μικρότερες, ενώ διακρίνεται στα διαγράμματα β για την κάθε χρονοσειρά αρνητική κλίση που είναι πιθανή ένδειξη χαοτικής συμπεριφοράς του συστήματος. Επιπλέον διακρίνεται ότι η συνιστώσα της ταχύτητας στον άξονα y παρουσιάζει παρόμοια δομή με την συνιστώσα της ταχύτητας στον άξονα z. Ενώ η συνιστώσα στον άξονα x πλησιάζει την μορφή του μέτρου, η οποία διαφέρει από την γωνία.



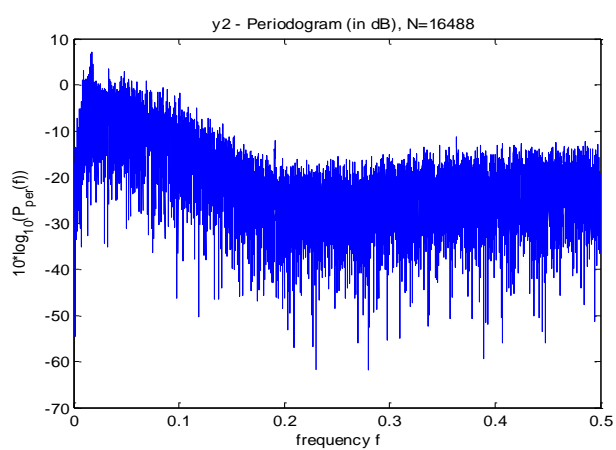
1.(a) y1



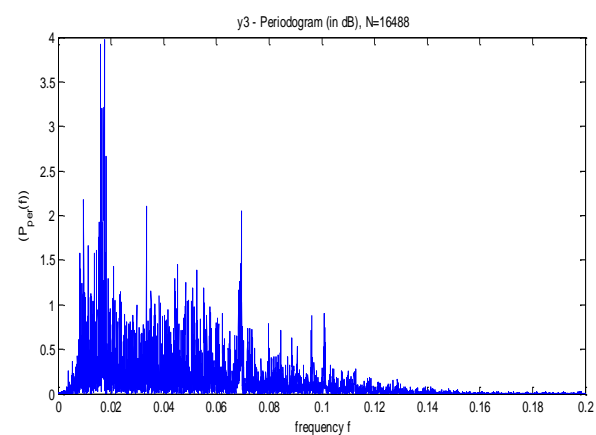
1.(b) y1



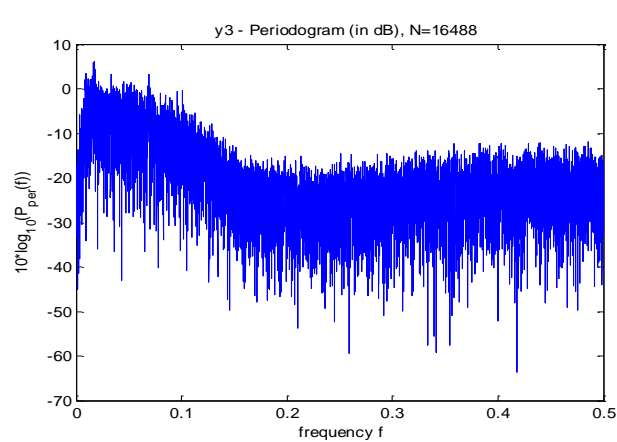
2.(a) y2



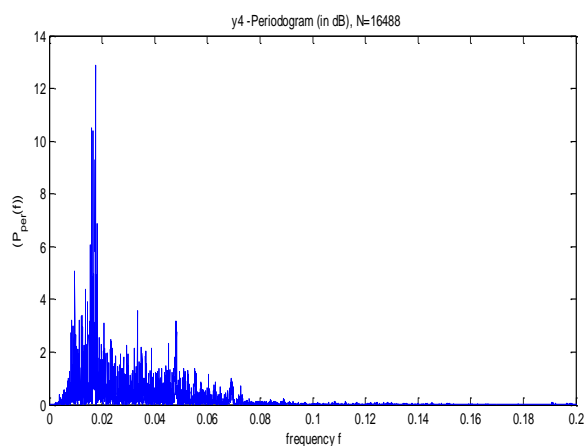
2.(b) y2



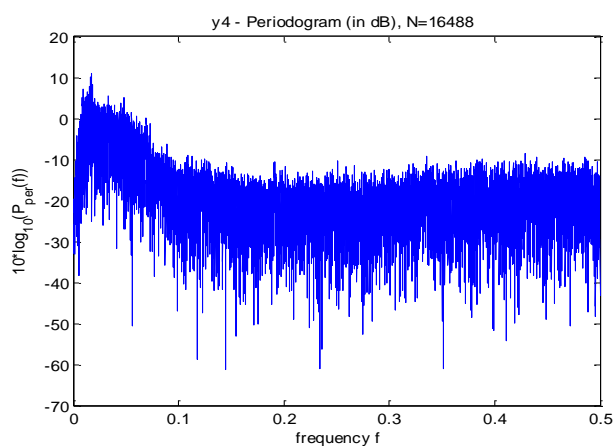
3.(a) y3



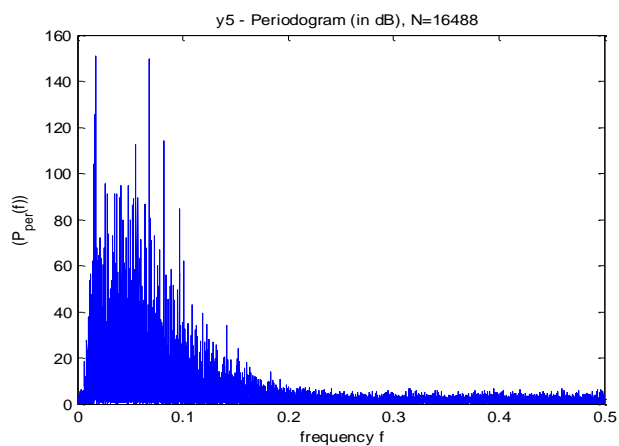
3.(b) y3



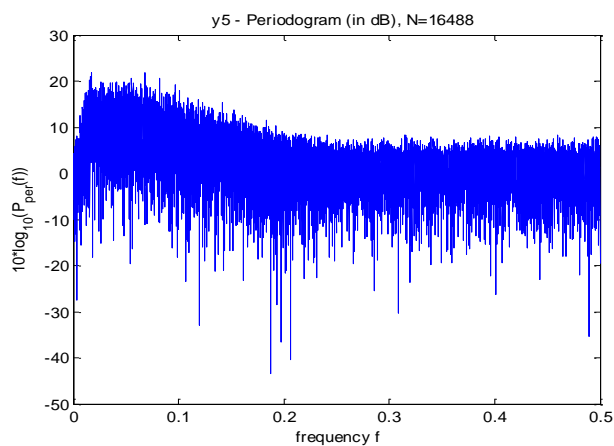
**4.(α) y4**



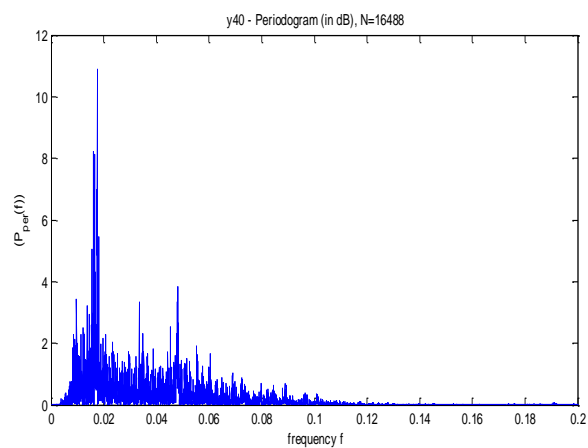
**4.(β) y4**



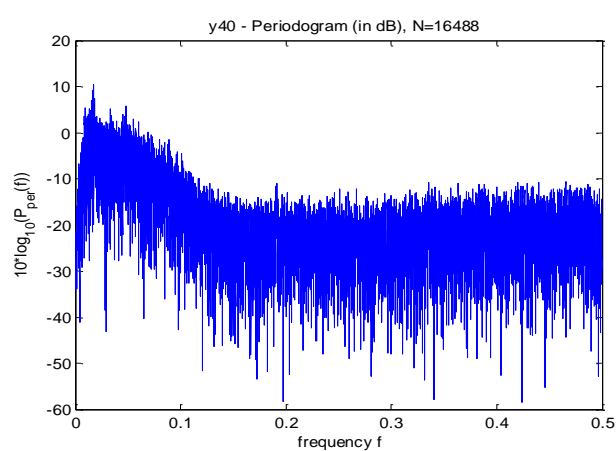
**5.(α) y5**



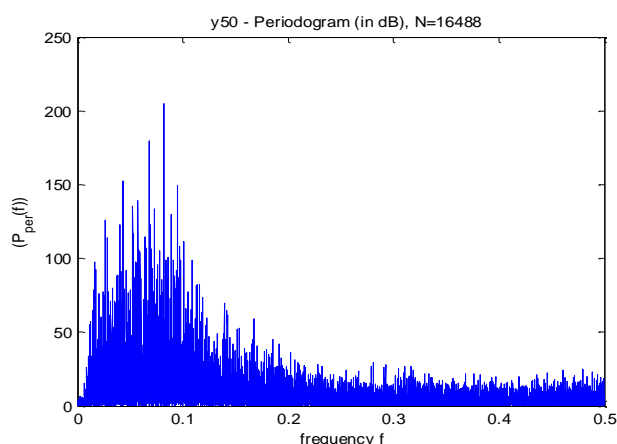
**5.(β) y5**



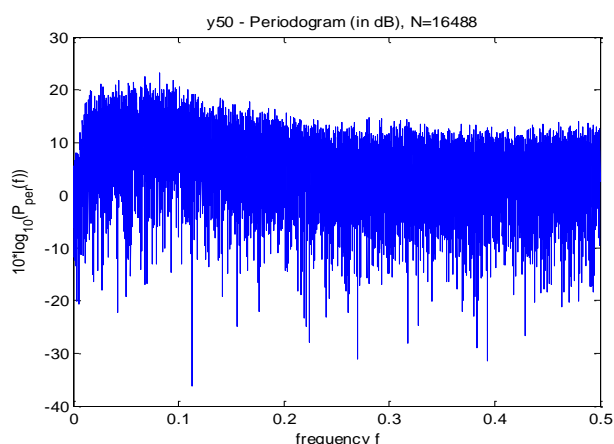
**6.(α) y40**



**6.(β) y40**



7.(α) y50



7.(β) y50

**Σχ.2.26 Φάσματα ισχύος της χρονοσειράς προσομοίωσης ταχύτητας καθόδου του ανέμου (μετά από αφαίρεση τάσης): 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 χρονοσειρές ταχύτητας ανέμου στον άξονα x, ταχύτητας ανέμου στον άξονα y, ταχύτητας ανέμου στον άξονα z, μέτρο ταχύτητας ανέμου  $f(x,y,z)$ , γωνία ταχύτητας ανέμου  $f(x,y,z)$ , μέτρο ταχύτητας ανέμου  $f(x,y)$  και γωνία ταχύτητας ανέμου  $f(x,y)$ .**

Στα φάσματα ισχύος της χρονοσειράς της ταχύτητας καθόδου του ανέμου στο σχ.2.26 διακρίνουμε πολλές ομοιότητες στα διαγράμματα 1, 2 και 3 των συνιστωσών της ταχύτητας και επίσης και εδώ οι συχνότητες όπως και στην ταχύτητα ανόδου είναι μικρές. Επιπλέον ενδιαφέρον παρουσιάζεται στο διαφορετικό φάσμα ισχύος του μέτρου και της γωνίας της ταχύτητας, όπου η γωνία εμφανίζει υψηλότερες συγκριτικά συχνότητες σύμφωνα με το σχ.2.26.5 και 7.

## 2.6 Διάσταση Συσχέτισης Χρονοσειρών Πεδίου και Προσομοίωσης

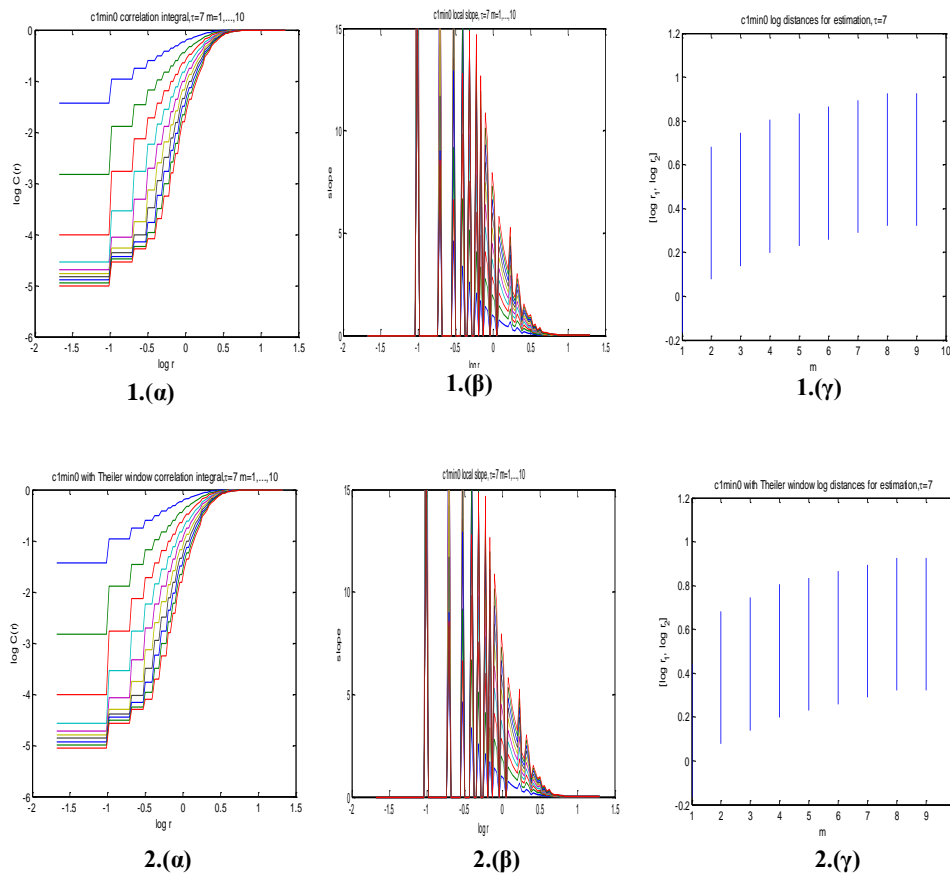
Η διάσταση συσχέτισης ( $\nu$ ) είναι αυτή που χρησιμοποιείται συνήθως για να μας δείξει την διάσταση του συστήματος. Παρακάτω γίνεται εκτίμηση της διάστασης συσχέτισης για τις χρονοσειρές ταχύτητας ανέμου (C1), γωνίας ανέμου (A1) και των χρονοσειρών προσομοίωσης. Για την κάθε χρονοσειρά προκύπτουν τέσσερα διαγράμματα:



- Το πρώτο δίνει το ολοκλήρωμα συσχέτισης και αντιστοιχεί στο γράφημα  $\log C(r)$  vs  $\log r$  για ένα εύρος τιμών της διάστασης εμβύθισης.
- Το δεύτερο την κλίση με το γράφημα  $\frac{d\log C(r)}{d\log r}$  vs  $\log r$  με το ίδιο εύρος τιμών της  $m$ .
- Το τρίτο δίνει την υπολογιζόμενη διάσταση συσχέτισης συναρτήσει της διάστασης εμβύθισης με το αντίστοιχο σφάλμα ( $v(m)$  vs  $m$ ) όπου  $v(m)$  είναι η εκτίμηση της κλίσης (υπολογίζεται από τα δύο προηγούμενα σχήματα). Επιπλέον στο τρίτο διάγραμμα σχηματίζετε το όριο  $\pm SD$  της απόκλισης για την κλίση.
- Τέλος το τέταρτο διάγραμμα δίνει τις περιοχές κλιμάκωσης που έχουν χρησιμοποιηθεί για κάθε διάσταση εμβύθισης.

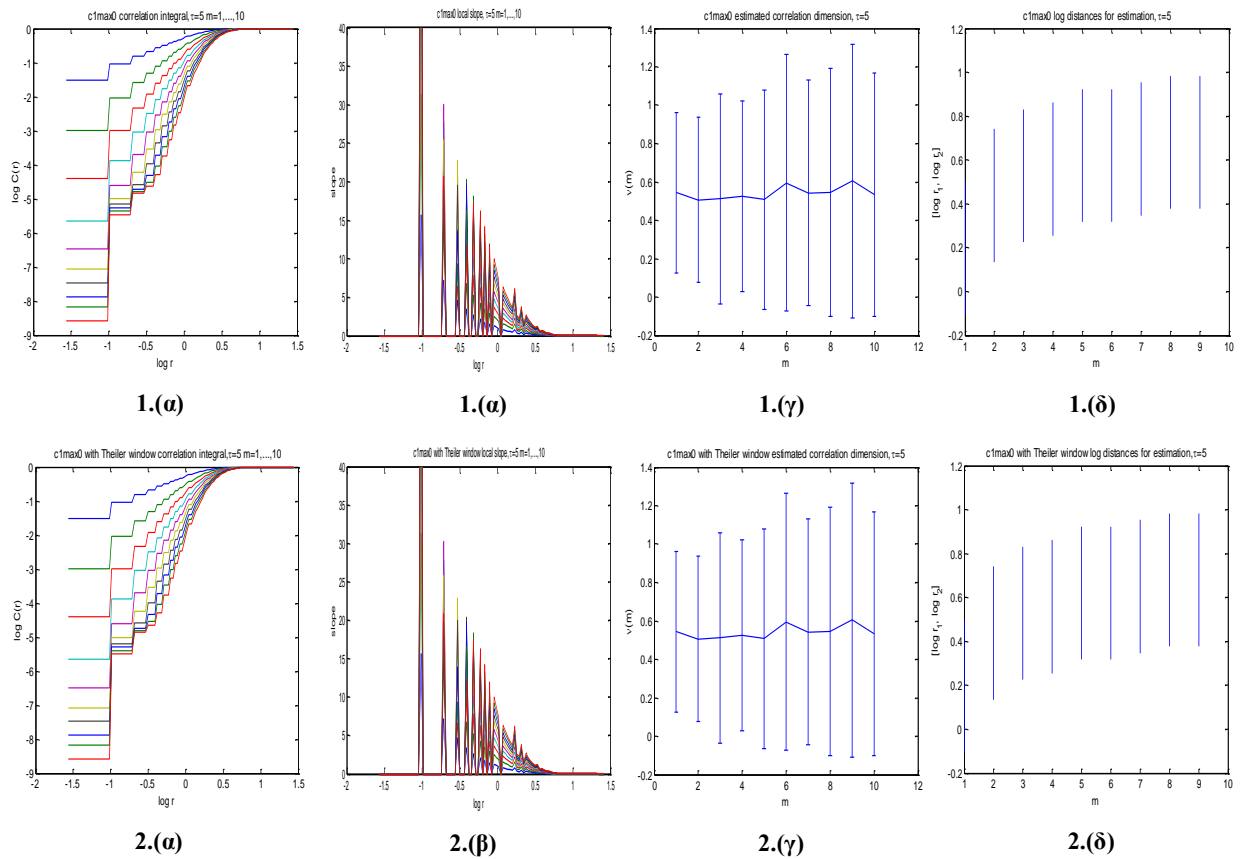
Η διάσταση συσχέτισης είναι το πλέον χρησιμοποιούμενο εργαλείο για την εξερεύνηση του χάους σε πολλούς κλάδους της επιστήμης και εκφράζει την μορφοκλασματική δομή του ελκυστή (αυτό-ομοιότητα). Ισχύει επίσης για  $n$  ακέραιος ο ελκυστής είναι συνήθης γεωμετρικό αντικείμενο και για  $n$  μη-ακέραιος ο ελκυστής είναι μορφοκλασματικό αντικείμενο.

Παρακάτω δίνονται τα διαγράμματα κατά τα οποία θα γίνει η εκτίμηση της διάστασης συσχέτισης αρχικά χωρίς την χρήση παραθύρου Theiler και κατόπιν με την χρήση παραθύρου Theiler, που θεωρείται πιο έμπιστη, δεδομένου ότι τα αποτελέσματα δεν επηρεάζονται από τις χρονικές συσχετίσεις, οι οποίες υποεκτιμούν τη διάσταση συσχέτισης.



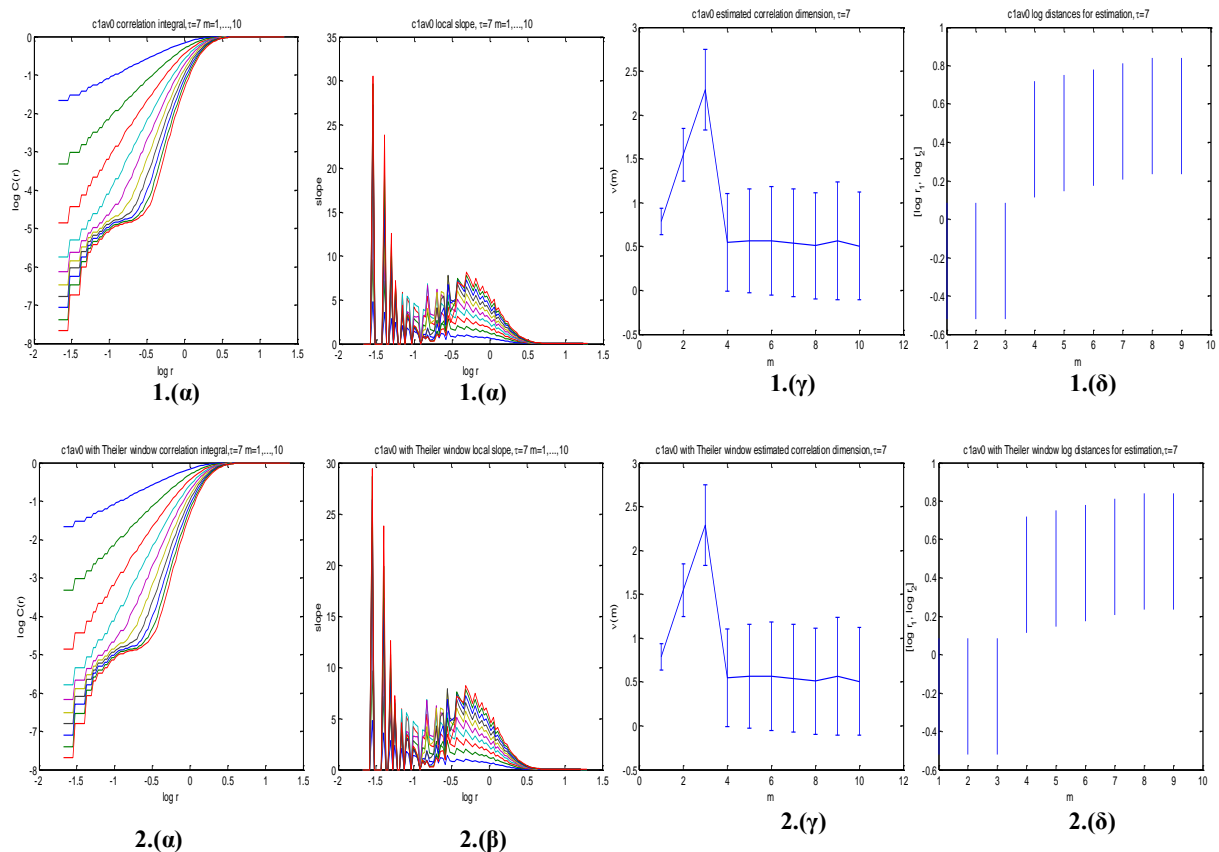
**Σχ.2.27 Εκτίμηση της διάστασης συσχέτισης της χρονοσειράς ταχύτητας ανέμου ελαχίστων τιμών μετά από αφαίρεση της τάσης (C1min0): 1. Διαγράμματα χωρίς την χρήση παραθύρου Theiler και 2. Διαγράμματα με την χρήση παραθύρου Theiler.**

Στο σχ.2.27 παρατηρείται ότι τα διαγράμματα, για την εκτίμηση της διάστασης εμβύθισης, που προέκυψαν με την χρήση και χωρίς την χρήση παραθύρου Theiler είναι όμοια. Στο πρώτο διάγραμμα (1.(α) και 2.(α)) που εμφανίζεται το ολοκλήρωμα συσχέτισης οι καμπύλες παρουσιάζουν μόνο μία κλίση που συνεπάγεται με ανυπαρξία θορύβου. Στο δεύτερο διάγραμμα παρουσιάζεται η κλίση η οποία δεν εμφανίζει ιδιαίτερα πολύπλοκη μορφή. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα διαγράμματα (β) στο σχ.2.27, όπου στην περιοχή γύρω από το μηδέν οι γραμμές ακολουθούν παρόμοια πορεία χωρίς να συγκλίνουν όσο αναβαίνει η διάσταση εμβύθισης. Το σύστημα φαίνεται να είναι υψηλοδιάστατο και μάλλον ντετερμινιστικό.



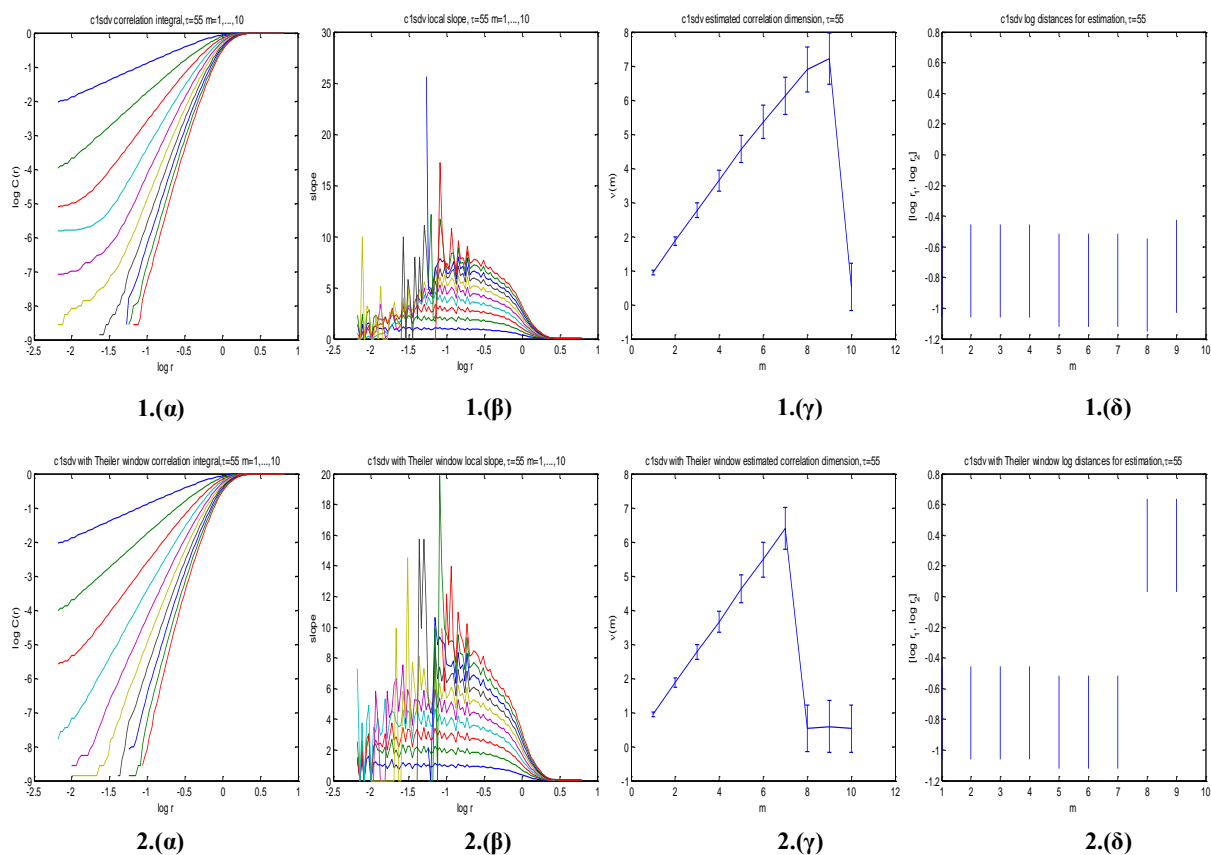
**Σχ.2.28 Εκτίμηση της διάστασης συσχέτισης της χρονοσειράς ταχύτητας ανέμου μεγίστων τιμών μετά από αφαίρεση της τάσης (C1max0): 1. Διαγράμματα χωρίς την χρήση παραθύρου Theiler και 2. Διαγράμματα με την χρήση παραθύρου Theiler.**

Σχεδόν όμοια συμπεριφορά διακρίνεται και στα διαγράμματα του σχήματος 2.28 που αντιστοιχούν στην χρονοσειρά ταχύτητας ανέμου μεγίστων τιμών. Όπως η χρήση του παραθύρου Theiler δεν επηρεάζει τα δεδομένα. Διακρίνεται διάστασης συσχέτισης με τιμή 0,6 αν και το σφάλμα είναι πολύ μεγάλο. Η χρονοσειρά φαίνεται να συγκλίνει.



**Σχ.2.29 Εκτίμηση της διάστασης συσχέτισης της χρονοσειράς ταχύτητας ανέμου τιμών μέσου όρου μετά από αφαίρεση της τάσης C1av0: 1. Διαγράμματα χωρίς την χρήση παραθύρου Theiler και 2. Διαγράμματα με την χρήση παραθύρου Theiler.**

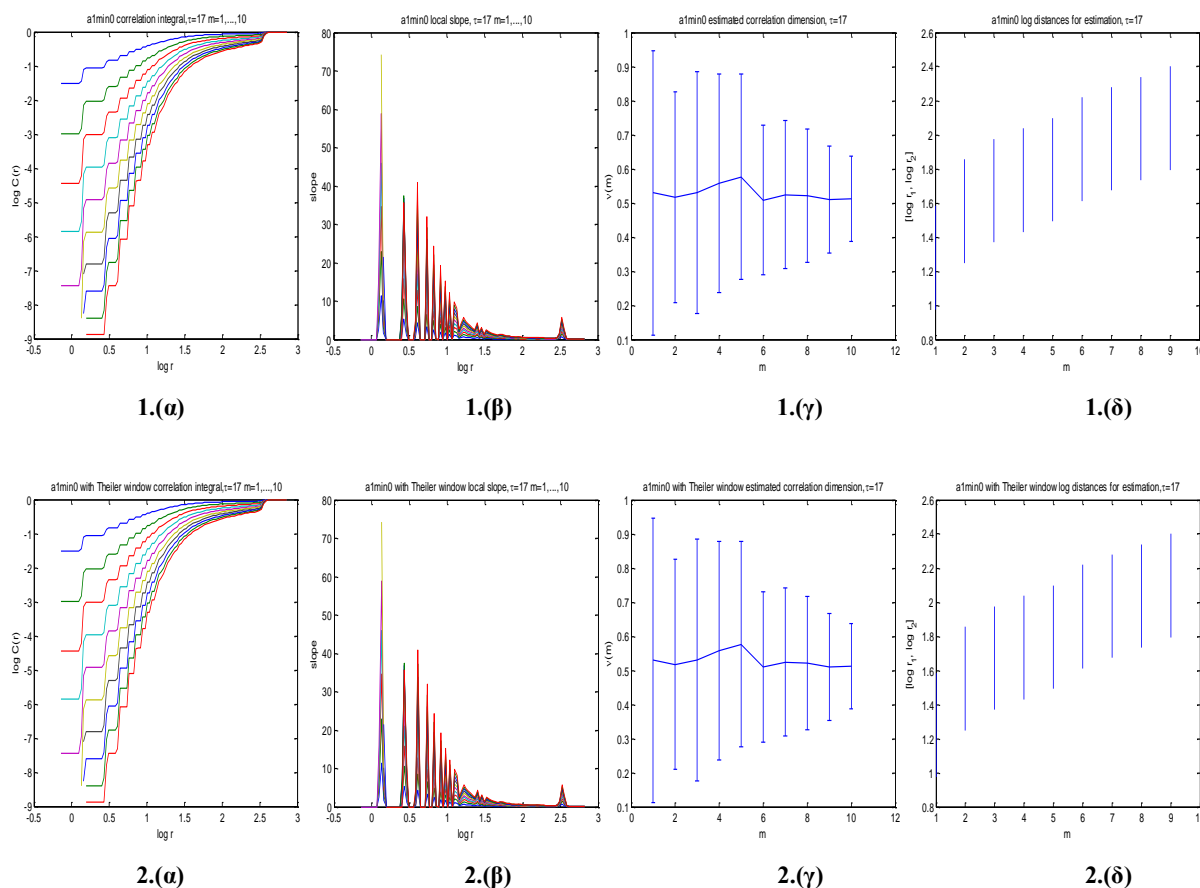
Η χρονοσειρά ταχύτητας ανέμου τιμών μέσου όρου (σχ2.29) παρουσιάζει διαφορετική συμπεριφορά από τις προηγούμενες δύο που μελετήθηκαν. Είναι γεγονός ότι και εδώ δεν αλλάζουν τα αποτελέσματα με την χρήση παραθύρου Theiler. Ωστόσο στα διαγράμματα (α), το ολοκλήρωμα συσχέτισης παρουσιάζει δύο καμπύλες (κλίσεις) γεγονός που συνεπάγεται την ύπαρξη θορύβου. Μία κλίση για μικρές τιμές του  $r$  ίση με την διάσταση εμβύθισης και μία δεύτερη ίση με την διάσταση συσχέτισης χωρίς θόρυβο. Η ύπαρξη θορύβου έχει ως αποτέλεσμα να επηρεάσει την διάσταση συσχέτισης, η οποία θα πάρει την τιμή 2,2.



**Σχ.2.30 Εκτίμηση της διάστασης συσχέτισης της χρονοσειράς ταχύτητας ανέμου τιμών τυπικής απόκλισης μετά από αφαίρεση της τάσης C1sdn0: 1. Διαγράμματα χωρίς την χρήση παραθύρου Theiler και 2. Διαγράμματα με την χρήση παραθύρου Theiler.**

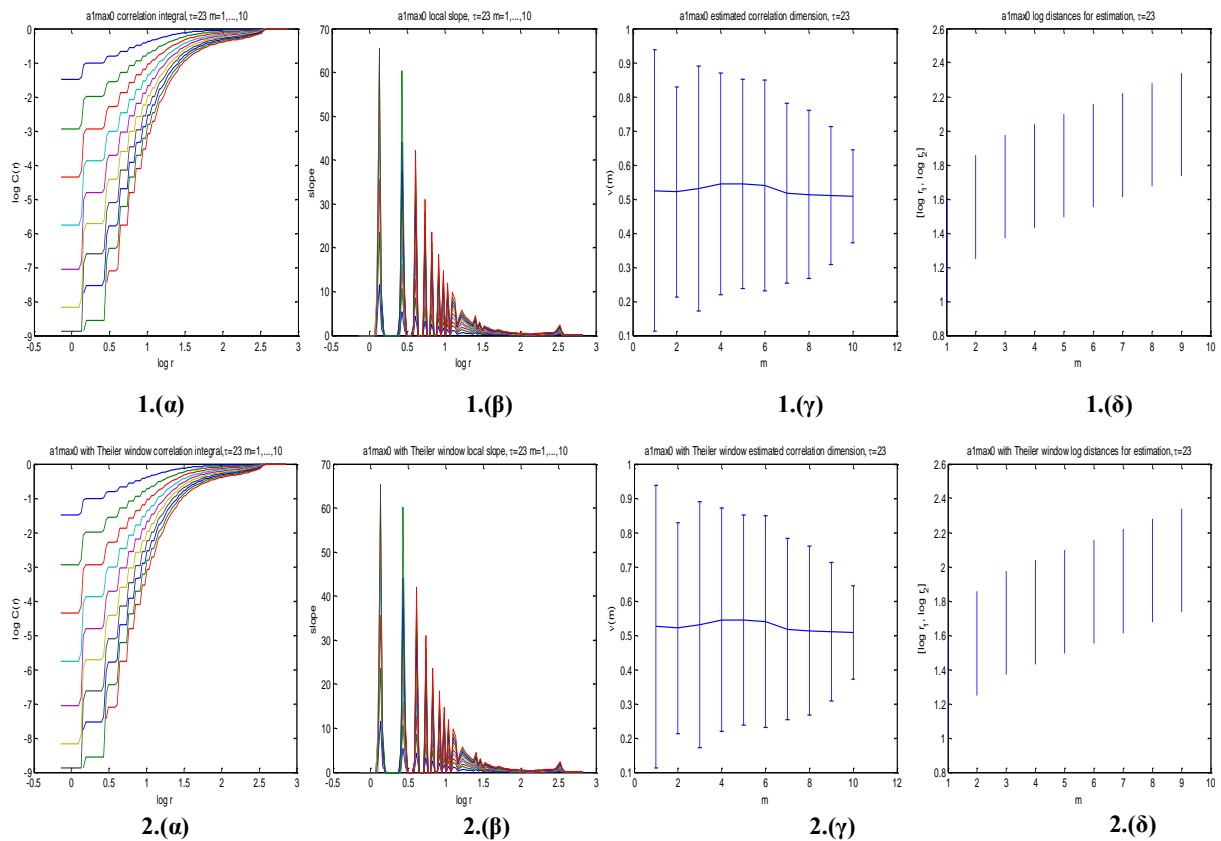
Στο πρώτο διάγραμμα 1.(α) του σχ.2.30 φαίνεται πως τα γραφήματα είναι ευθείες γραμμές για αρκετά μεγάλο διάστημα τιμών της απόστασης  $r$ . Τα αποτελέσματα των γραφημάτων 1 και 2 όπως φαίνεται έχουν αλλάξει, θα μπορούσε κάποιος να εκτιμήσει διάσταση συσχέτισης μετά την χρήση του παραθύρου Theiler ίση με περίπου 6,3. Επιπλέον παρατηρούμε στα διαγράμματα ότι για μικρότερες τιμές της διάστασης εμβύθισης φαίνεται κάποια σύγκλιση η οποία όμως έχει μεγάλες διακυμάνσεις (υπενθυμίζουμε ότι η χρήση Theiler Window μειώνει το πλήθος των σημείων για ανακατασκευή). Στο διαγράμματα (γ) του σχήματος 2.30 παρατηρούμε ότι η διάσταση συσχέτισης είναι περίπου όμοια με την διάσταση εμβύθισης (λόγω της κλίσης που είναι περίπου 45 μοίρες), αυτό είναι ένδειξη στοχαστικού συστήματος, πρέπει ωστόσο να σημειωθεί ότι αυτό δεν συνεπάγεται και αντίστροφα. Δεδομένου

της ύπαρξης μικρού σφάλματος όπως διακρίνεται στο σχ.2.30.2(γ), μπορούμε να εκτιμήσουμε το κάτω φράγμα της διάστασης συσχέτισης το οποίο είναι  $6,3 \pm 0,5$ .



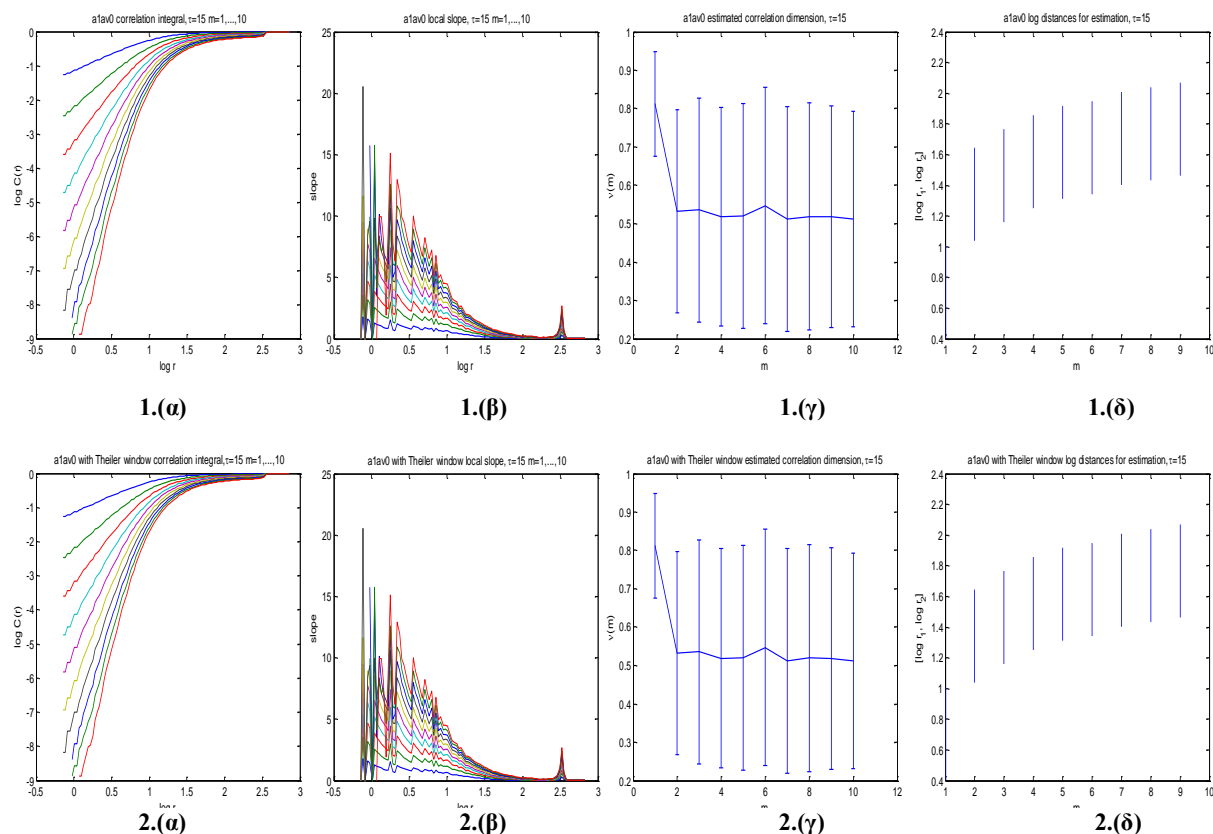
**Σχ.2.31 Εκτίμηση της διάστασης συσχέτισης της χρονοσειράς γωνίας ανέμου ελαχίστων τιμών μετά από αφαίρεση της τάσης A1min0: 1. Διαγράμματα χωρίς την χρήση παραθύρου Theiler και 2. Διαγράμματα με την χρήση παραθύρου Theiler.**

Τα γραφήματα του σχ.2.31 αντιστοιχούν στην χρονοσειρά γωνίας ανέμου ελαχίστων τιμών. Τα αποτελέσματα είναι όμοια με την χρήση και χωρίς την χρήση παραθύρου Theiler. Η περιοχή κλιμάκωσης που διακρίνεται και στο δεύτερο διάγραμμα (1.(β) και 2.(β)) από το οριζόντιο επίπεδο της κλίσης είναι μικρή. Τέλος στο τρίτο γράφημα (1.(γ) και 2.(γ)) φαίνεται η εκτίμηση της διάστασης εμβύθισης για τιμή ίση με 0,6 καθώς και το μεγάλο όριο σφάλματος.



**Σχ.2.32 Εκτίμηση της διάστασης συσχέτισης της χρονοσειράς γωνίας ανέμου μεγίστων τιμών μετά από αφαίρεση της τάσης A1max0: 1. Διαγράμματα χωρίς την χρήση παραθύρου Theiler και 2. Διαγράμματα με την χρήση παραθύρου Theiler.**

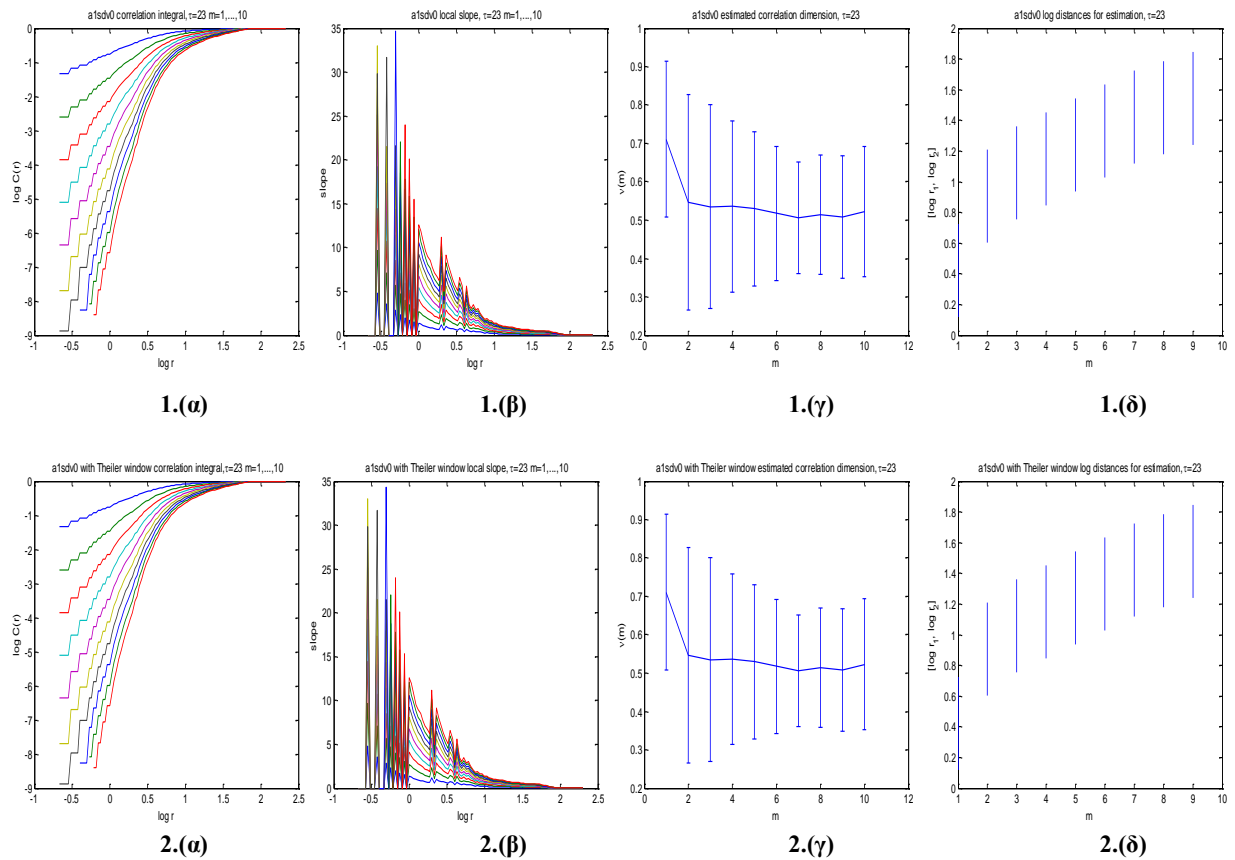
Η συμπεριφορά της χρονοσειράς γωνίας ανέμου μεγίστων τιμών πλησιάζει την συμπεριφορά της αντίστοιχης χρονοσειράς των ελαχίστων τιμών και εδώ τα αποτελέσματα δεν αλλάζουν μετά την χρήση του παραθύρου Theiler. Η διάσταση συσχέτισης που προκύπτει από το γράφημα 2.(γ) του σχ.2.20 είναι 0,54 με την ύπαρξη μεγάλου σφάλματος.



**Σχ.2.33 Εκτίμηση της διάστασης συσχέτισης της χρονοσειράς γωνίας ανέμου τιμών μέσου όρου μετά από αφαίρεση της τάσης A1av0: 1. Διαγράμματα χωρίς την χρήση παραθύρου Theiler και 2. Διαγράμματα με την χρήση παραθύρου Theiler.**

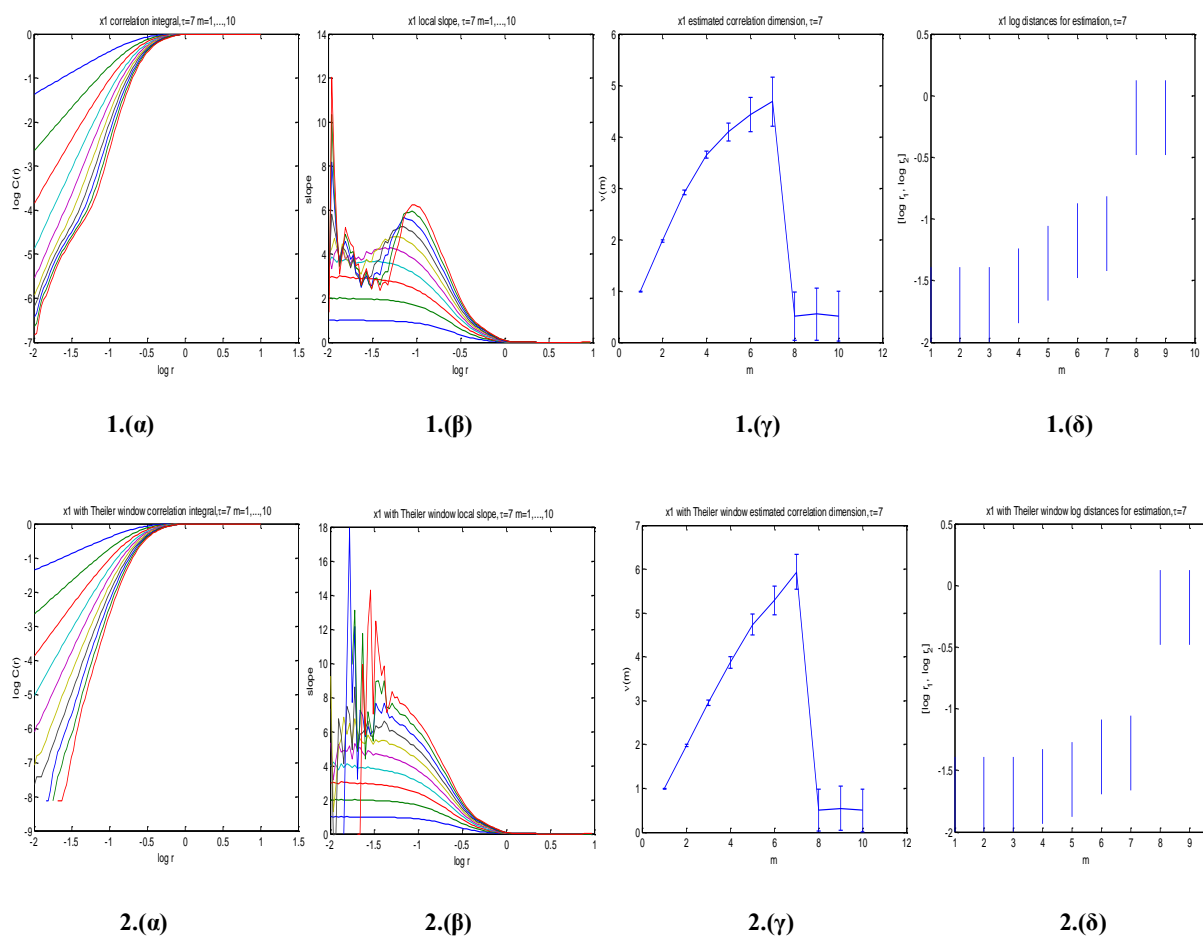
Επίσης στο σχ.2.33 τα αποτελέσματα παραμένουν ίδια και μετά την χρήση του παραθύρου Theiler. Ωστόσο μπορούμε να διακρίνουμε την ύπαρξη δύο κλίσεων στα γραφήματα των ολοκληρωμάτων συσχέτισης που συνεπάγεται με την ύπαρξη θορύβου. Ο θόρυβος θα αυξήσει την διάσταση συσχέτισης μέχρι την τιμή 0,79.





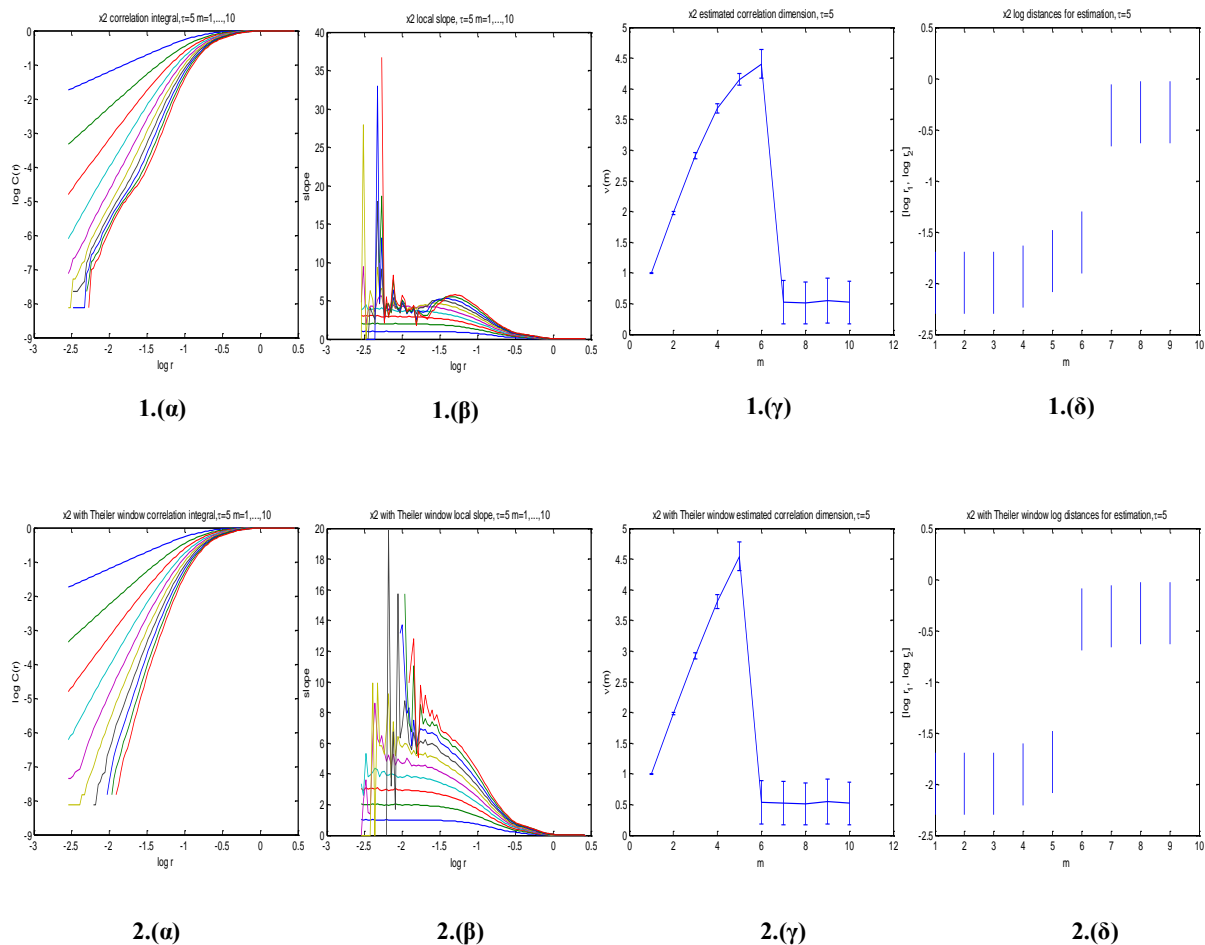
**Σχ.2.34 Εκτίμηση της διάστασης συσχέτισης της χρονοσειράς γωνίας ανέμου τιμών τυπικής αποκλίσης μετά από αφαίρεση της τάσης A1sdv0: 1. Διαγράμματα χωρίς την χρήση παραθύρου Theiler και 2. Διαγράμματα με την χρήση παραθύρου Theiler.**

Την ίδια συμπεριφορά παρουσιάζει και η χρονοσειρά γωνίας ανέμου τυπικών αποκλίσεων με την προηγούμενη του μέσου όρου. Διακρίνεται η ύπαρξη θορύβου και η τιμή όπως διάστασης συσχέτισης επηρεάζεται με αποτέλεσμα να πάρει μεγαλύτερη τιμή 0,69 πιθανόν από την αναμενόμενη. Γενικότερα διαπιστώνεται ότι πολύ μικρές τιμές διάστασης συσχέτισης και η μη ακέραια μορφή αυτών σε συνδυασμό με ένα αιτιοκρατικό σύστημα έχουν ως αποτέλεσμα την ύπαρξη χαμηλής διάστασης καθώς και μορφοκλασματικής (χαστικής) δομής.



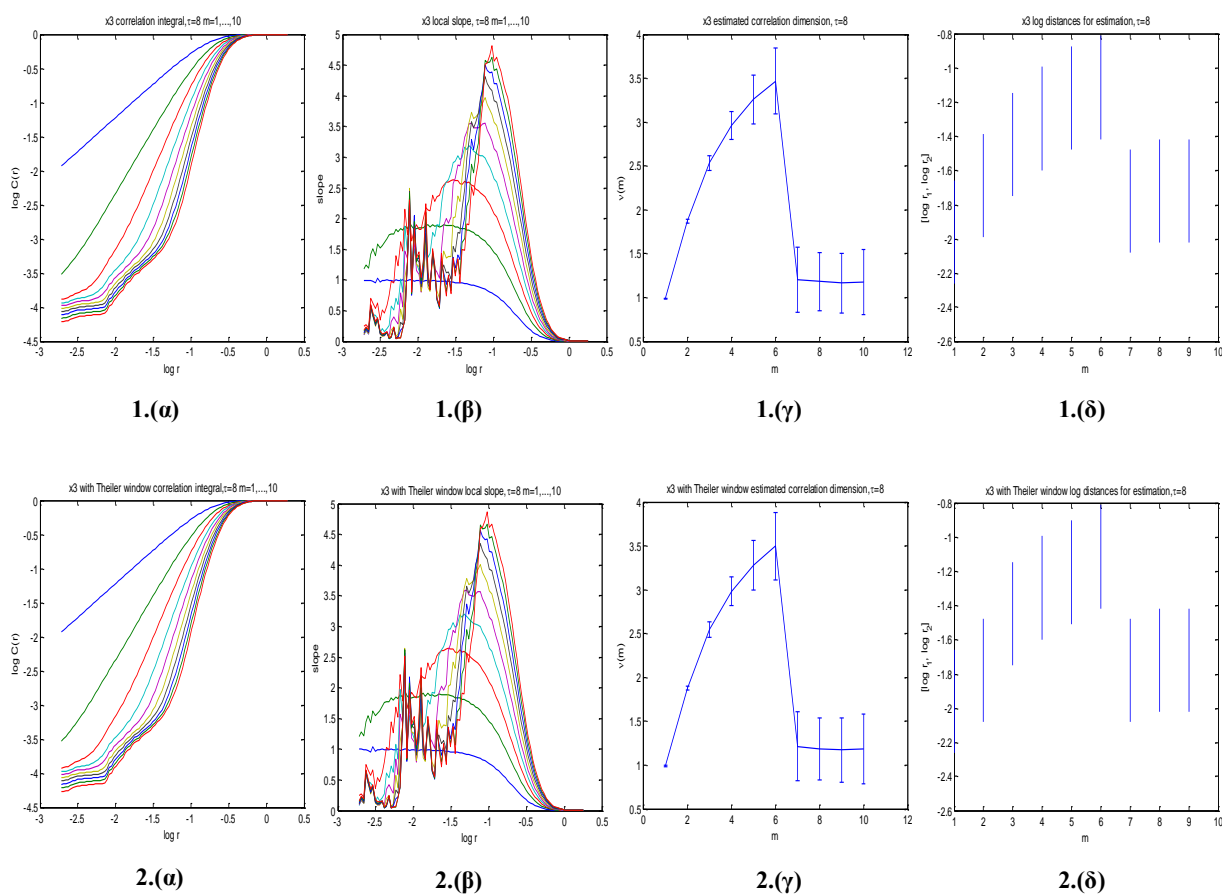
**Σχ.2.35 Εκτίμηση της διάστασης συσχέτισης της συνιστώσας στον άξονα x της ταχύτητας ανόδου ανέμου σε λόφο μετά από αφαίρεση της τάσης (x1): 1. Διαγράμματα χωρίς την χρήση παραθύρου Theiler και 2. Διαγράμματα με την χρήση παραθύρου Theiler.**

Για την χρονοσειρά προσομοίωσης της συνιστώσας της ταχύτητας ανόδου στο σχ.2.35 παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα με την χρήση του παραθύρου Theiler είναι διαφορετικά. Προκύπτει διάσταση συσχέτισης σύμφωνα με τα διάγραμμα 2(γ) περίπου 6 με εκτίμηση του κάτω φράγματος  $6 \pm 0,5$ . Επιπλέον διακρίνεται σύγκλιση των γραμμών (σχ.2.35.2(β)) για μικρές τιμές της διάστασης εμβύθισης.



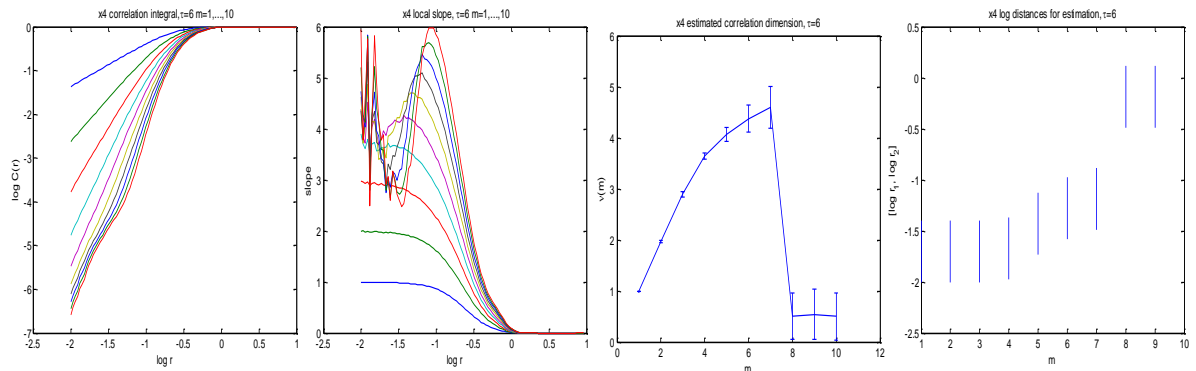
**Σχ.2.36 Εκτίμηση της διάστασης συσχέτισης της συνιστώσας στον άξονα  $y$  της ταχύτητας ανέμου σε λόφο μετά από αφαίρεση της τάσης ( $x_2$ ): 1. Διαγράμματα χωρίς την χρήση παραθύρου Theiler και 2. Διαγράμματα με την χρήση παραθύρου Theiler.**

Ομοίως η συνιστώσα της ταχύτητας στον άξονα  $y$  παρουσιάζει διαφορετικά αποτελέσματα μετά τη χρήση του παραθύρου Theiler. Επίσης εκτιμάται από το διάγραμμα 2.(γ) στο σχ.2.36 ότι η διάσταση συσχέτισης είναι 4,5 και το κάτω φράγμα  $4,5 \pm 0,2$  που συνεπάγεται με πιθανή ύπαρξη στοχαστικού συστήματος



**Σχ.2.37 Εκτίμηση της διάστασης συσχέτισης της συνιστώσας στον άξονα  $z$  της ταχύτητας ανέμου σε λόφο μετά από αφαίρεση της τάσης ( $x_3$ ) : 1. Διαγράμματα χωρίς την χρήση παραθύρου Theiler και 2. Διαγράμματα με την χρήση παραθύρου Theiler.**

Οι συνιστώσες της ταχύτητας και στους τρεις άξονες διαφέρουν μεταξύ τους. Στον άξονα  $z$  είναι εμφανής η ύπαρξη θορύβου, σύμφωνα με το διάγραμμα 2.(α) στο οποίο εμφανίζονται δύο κλίσεις. Επιπλέον η διάσταση συσχέτισης είναι περίπου 3,5 σύμφωνα με το διάγραμμα 2.(γ).

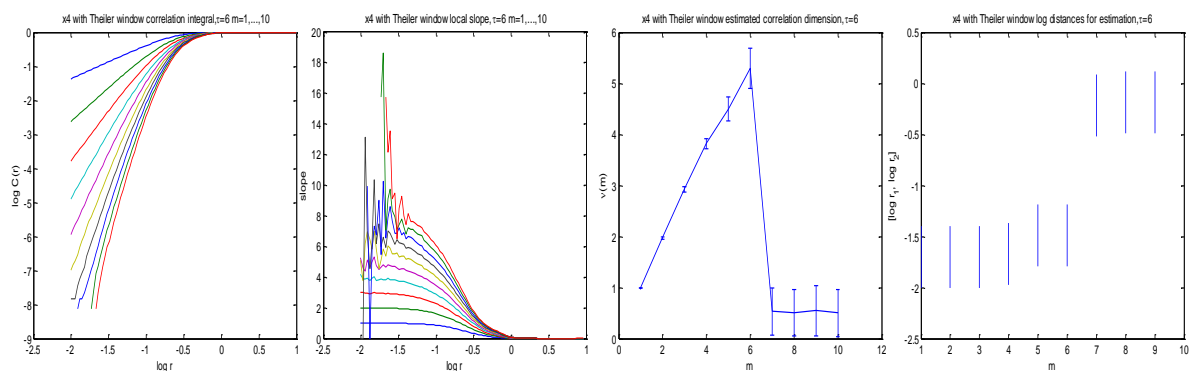


1.(α)

1.(β)

1.(γ)

1.(δ)



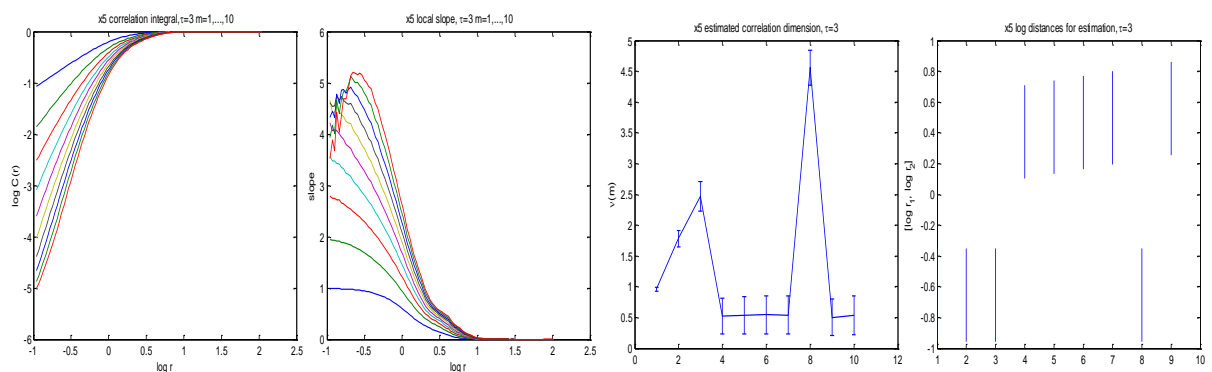
2.(α)

2.(γ)

2.(γ)

2.(δ)

**Σχ.2.38 Εκτίμηση της διάστασης συσχέτισης του μέτρου της ταχύτητας ανέμου  $f(x,y,z)$  μετά από αφαίρεση της τάσης (x4): 1. Διαγράμματα χωρίς την χρήση παραθύρου Theiler και 2. Διαγράμματα με την χρήση παραθύρου Theiler.**

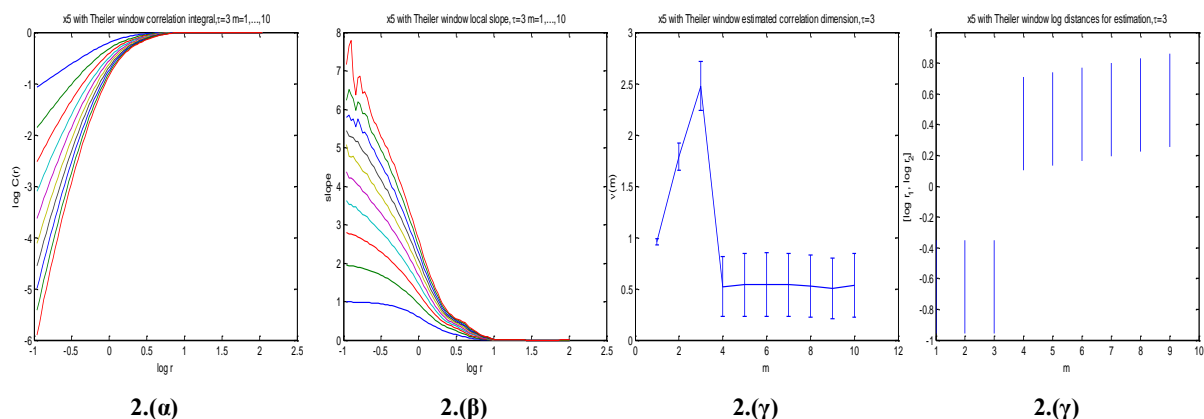


1.(α)

1.(β)

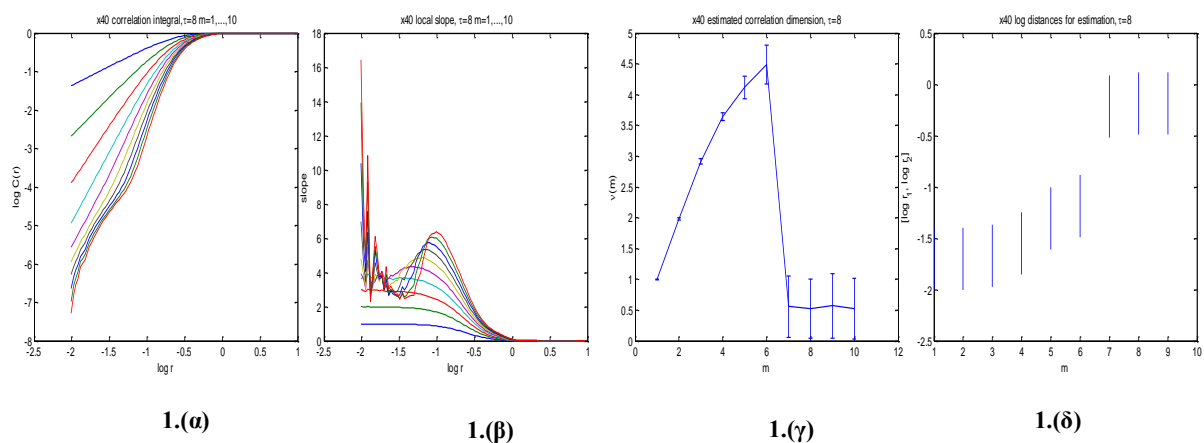
1.(γ)

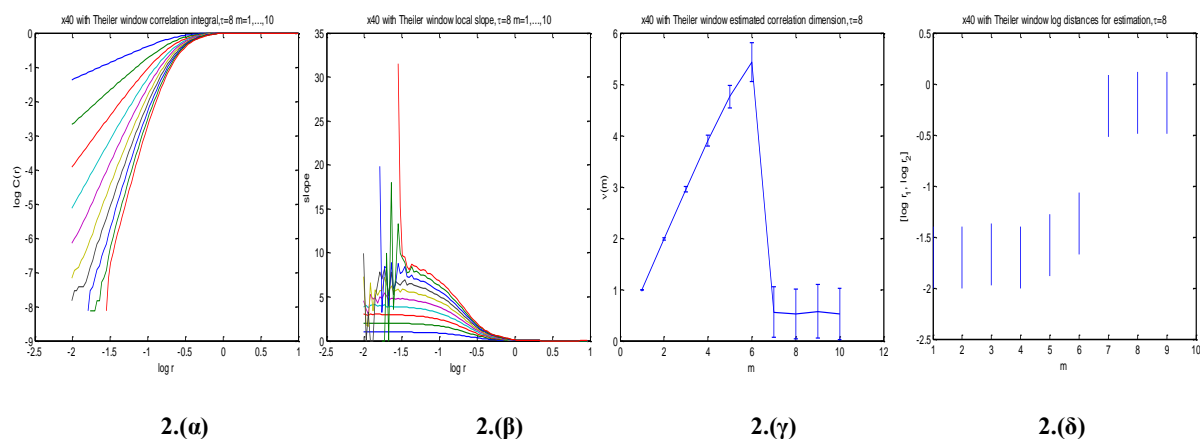
1.(δ)



**Σχ.2.39 Εκτίμηση της διάστασης συσχέτισης της γωνίας της ταχύτητας ανέμου  $f(x,y,z)$  μετά από αφαίρεση της τάσης (x5): 1. Διαγράμματα χωρίς την χρήση παραθύρου Theiler και 2. Διαγράμματα με την χρήση παραθύρου Theiler.**

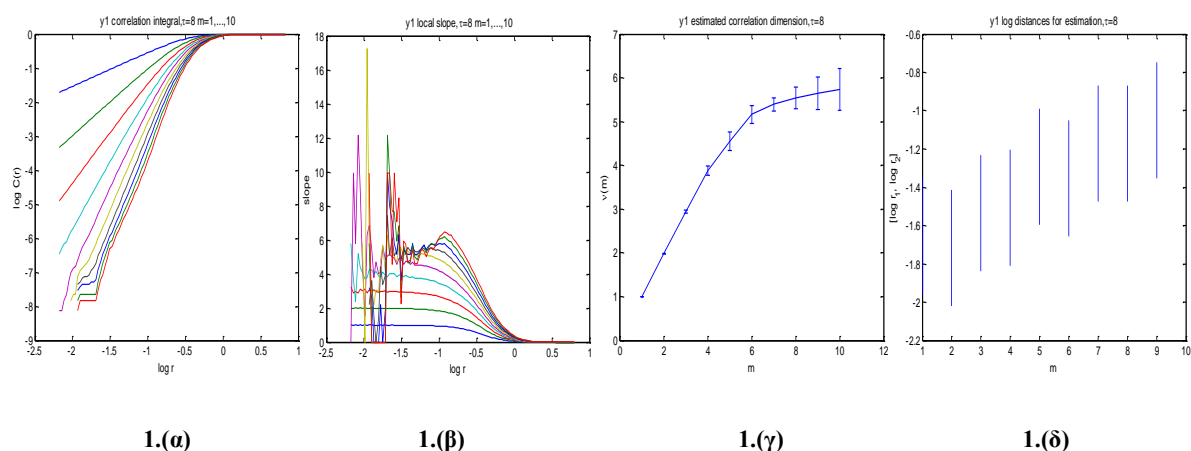
Στο σχ.2.38 γίνεται η εκτίμηση της διάστασης συσχέτισης για το μέτρο της ταχύτητας του ανέμου που έχει υπολογιστεί συναρτήσει των τριών συνιστωσών. Παρατηρείται σύγκλιση των γραμμών για μικρότερες τιμές της διάστασης εμφύθισης σύμφωνα με το σχ.2.38.2(β) καθώς επίσης προκύπτει από το διάγραμμα 2.(γ) διάσταση συσχέτισης περίπου 5,5 και κάτω φράγμα  $5,5 \pm 0,4$ . Παρατηρούμε ότι τα διαγράμματα της γωνίας (σχ.2.39) διαφέρουν από τα αντίστοιχα διαγράμματα του μέτρου στο προηγούμενο σχήμα. Η διάσταση συσχέτισης εκτιμάται ότι είναι 2,5 περίπου

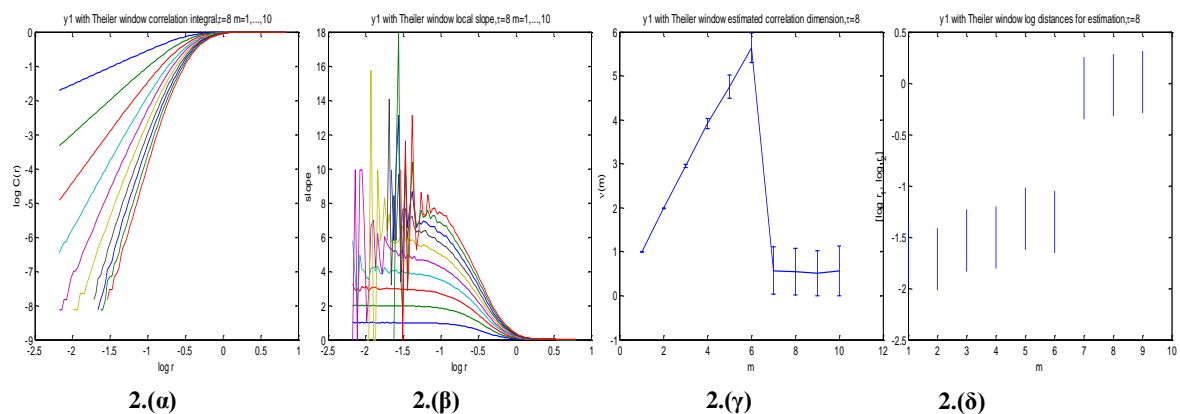




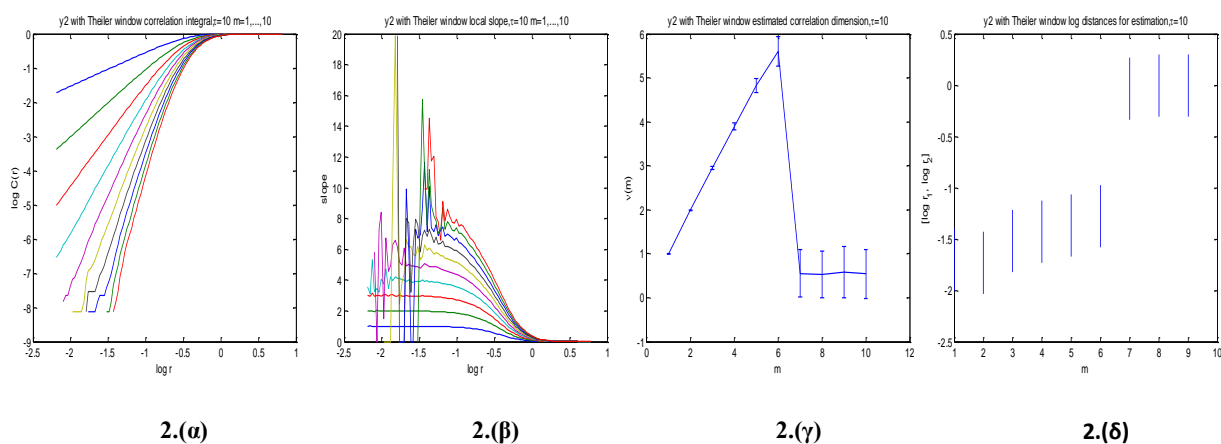
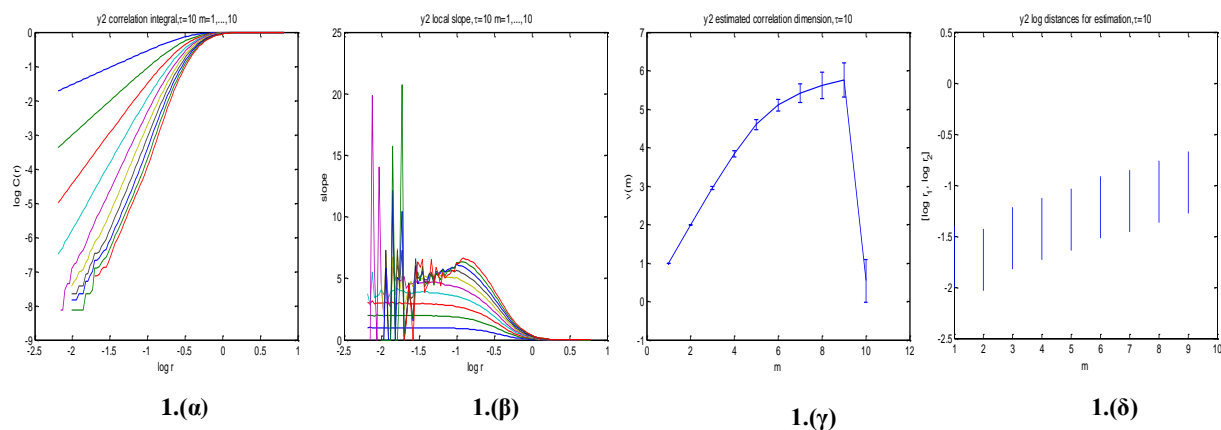
**Σχ.2.40 Εκτίμηση της διάστασης συσχέτισης του μέτρου της ταχύτητας ανέμου  $f(x,y)$  μετά από αφαίρεση της τάσης (x40): 1. Διαγράμματα χωρίς την χρήση παραθύρου Theiler και 2. Διαγράμματα με την χρήση παραθύρου Theiler.**

Η εκτίμηση της διάστασης συσχέτισης του μέτρου της ταχύτητας που έχει υπολογιστεί συναρτήσει των δύο πρώτων συνιστωσών δίνεται στο σχ.2.40. Δεν διακρίνεται ύπαρξη θορύβου από τα αποτελέσματα των διαγραμμάτων ενώ η διάσταση συσχέτισης σύμφωνα με το διάγραμμα 2.(γ) είναι 5,5 και πιθανόν το σύστημα να είναι υψηλοδιάστατο χαοτικό ενώ το κάτω φράγμα της διάστασης συσχέτισης υπολογίζεται περίπου  $5,5 \pm 0,3$ .



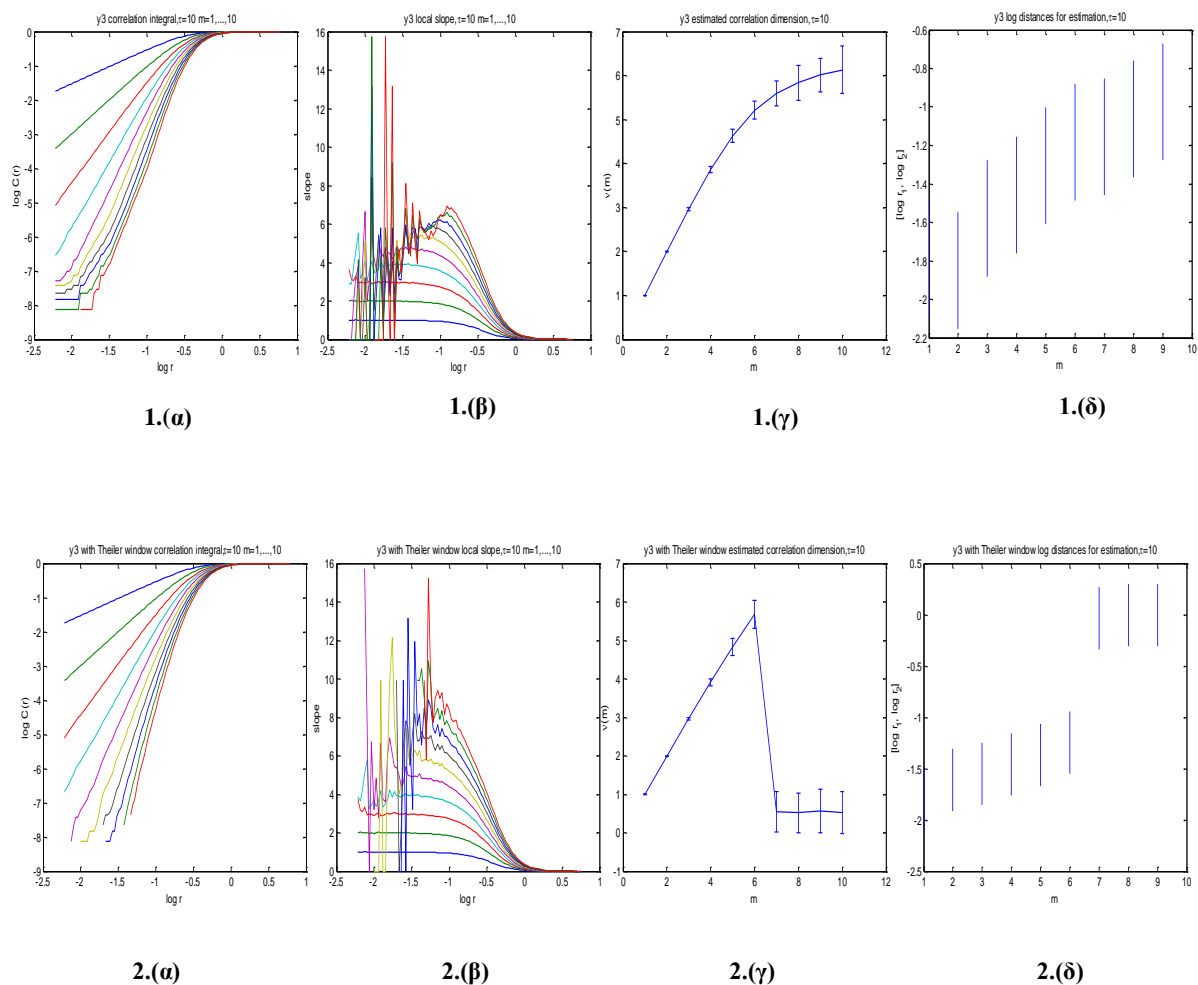


**Σχ.2.41 Εκτίμηση της διάστασης συσχέτισης της συνιστώσας στον άξονα x της ταχύτητας καθόδου ανέμου σε λόφο μετά από αφαίρεση της τάσης (y1): 1. Διαγράμματα χωρίς την χρήση παραθύρου Theiler και 2. Διαγράμματα με την χρήση παραθύρου Theiler.**



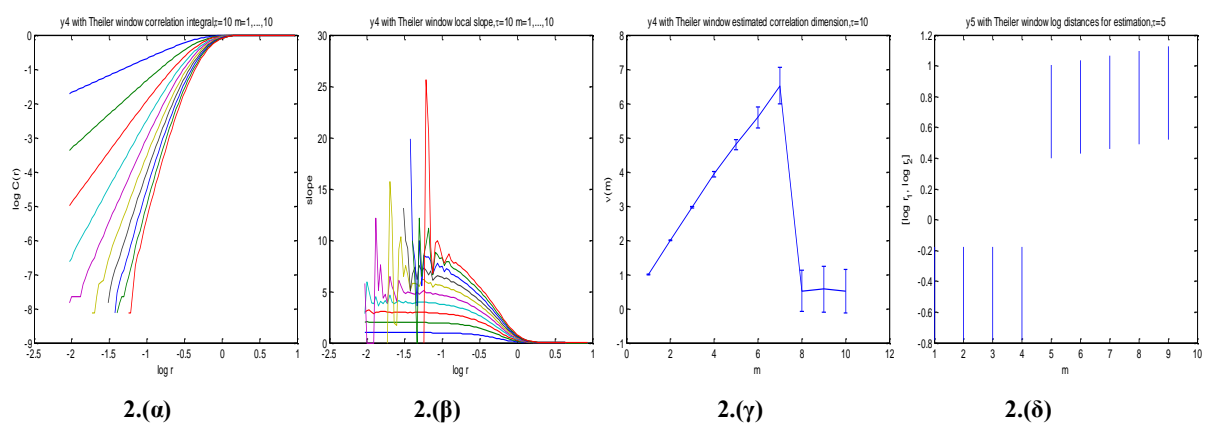
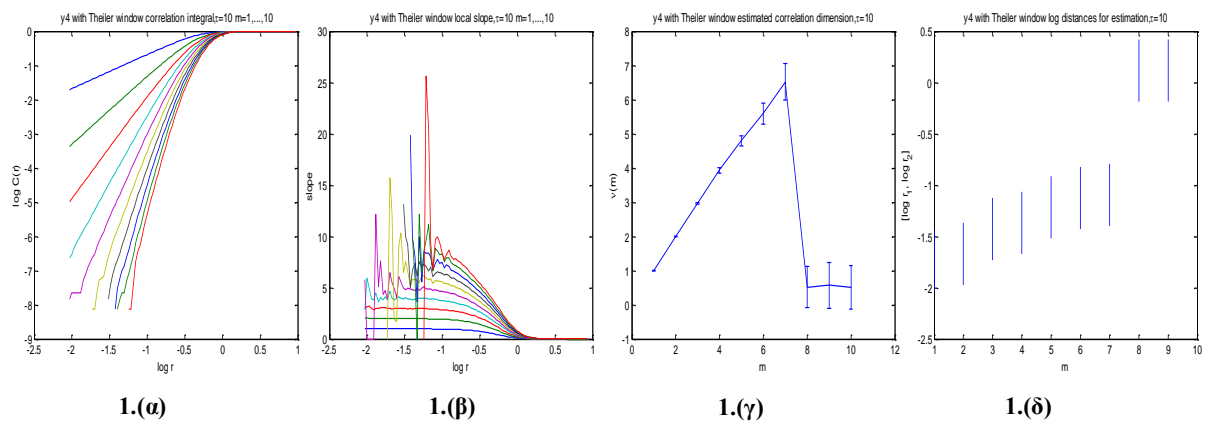
**Σχ.2.42 Εκτίμηση της διάστασης συσχέτισης της συνιστώσας στον άξονα y της ταχύτητας καθόδου ανέμου σε λόφο μετά από αφαίρεση της τάσης (y2): 1. Διαγράμματα χωρίς την χρήση παραθύρου Theiler και 2. Διαγράμματα με την χρήση παραθύρου Theiler.**



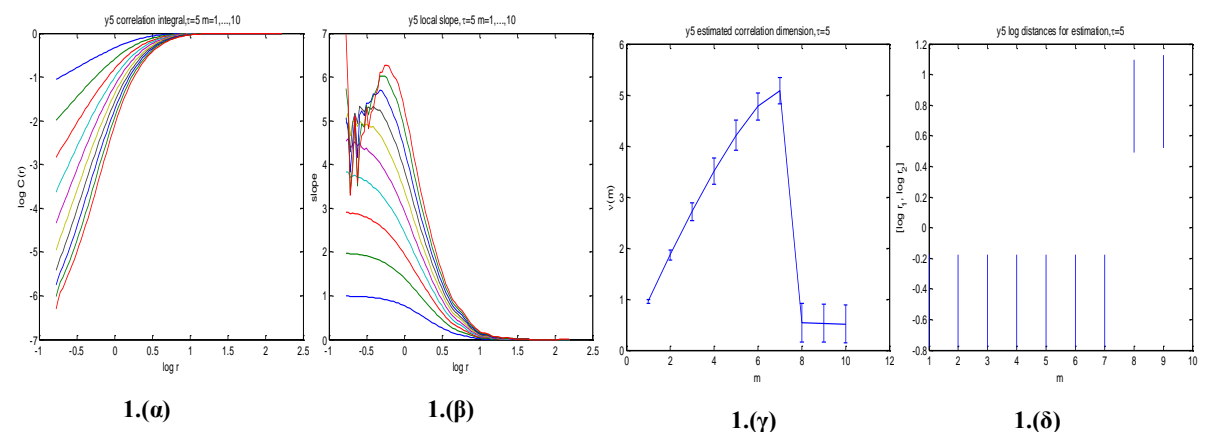


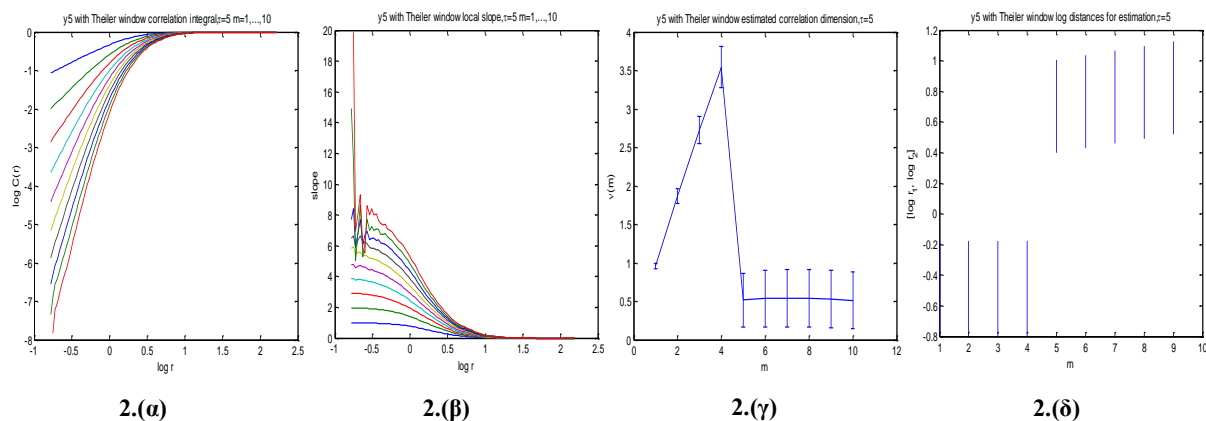
**Σχ.2.43 Εκτίμηση της διάστασης συσχέτισης της συνιστώσας στον άξονα z της ταχύτητας καθόδου ανέμου σε λόφο μετά από αφαίρεση της τάσης (y3): 1. Διαγράμματα χωρίς την χρήση παραθύρου Theiler και 2. Διαγράμματα με την χρήση παραθύρου Theiler.**

Τα σχ.2.41, 42 και 43 αντιστοιχούν στις συνιστώσες της ταχύτητας καθόδου του ανέμου σε λόφο της αντίστοιχης χρονοσειράς προσομοίωσης. Σε αντίθεση με την ταχύτητα ανόδου, οι συνιστώσες της ταχύτητας καθόδου των αξόνων x, y και z έχουν πολλές ομοιότητες μεταξύ τους. Παρατηρείται στα διαγράμματα 2.(α) των σχημάτων ότι δεν υπάρχουν δύο κλίσεις με αποτέλεσμα να μην εμφανίζεται θόρυβος. Επιπλέον διακρίνεται σύγκλιση των γραμμών για μικρότερες τιμές της διάστασης εμβύθισης και τέλος εκτιμάται η ίδια διάσταση συσχέτισης και για τις τρεις συνιστώσες, η οποία παίρνει την τιμή 5,7 ενώ το κάτω φράγμα παίρνει την τιμή  $5,7 \pm 0,3$ .



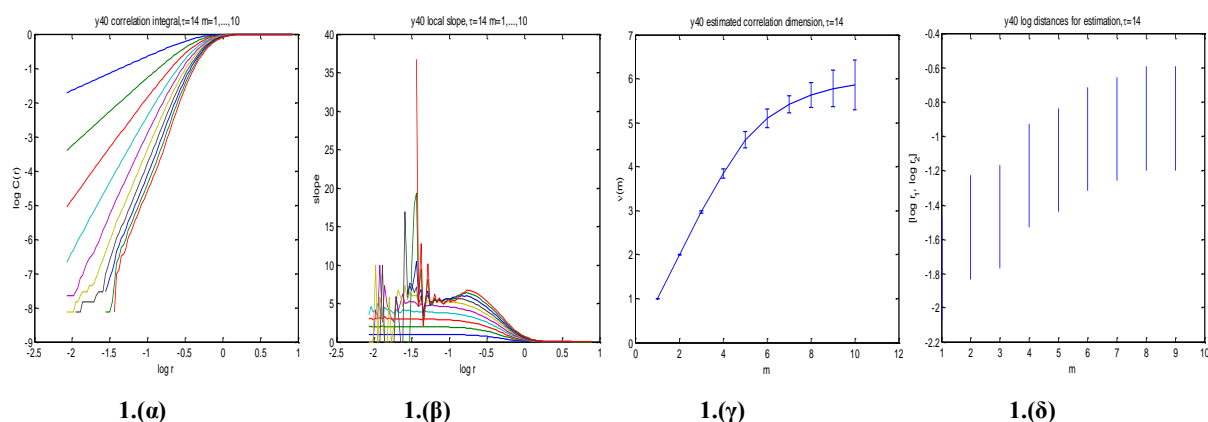
**Σχ.2.44 Εκτίμηση της διάστασης συσχέτισης του μέτρου της ταχύτητας καθόδου του ανέμου  $f(x,y,z)$  μετά από αφαίρεση της τάσης (y4): 1. Διαγράμματα χωρίς την χρήση παραθύρου Theiler και 2. Διαγράμματα με την χρήση παραθύρου Theiler.**

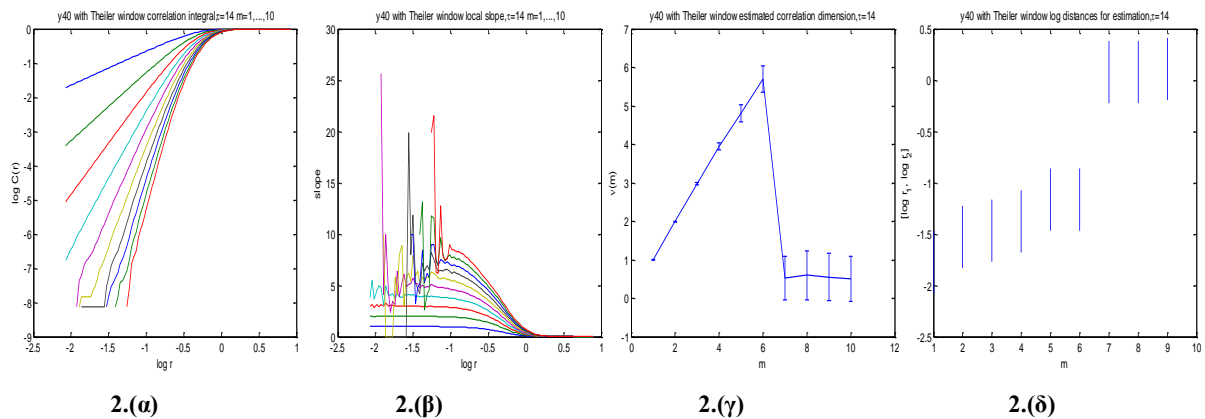




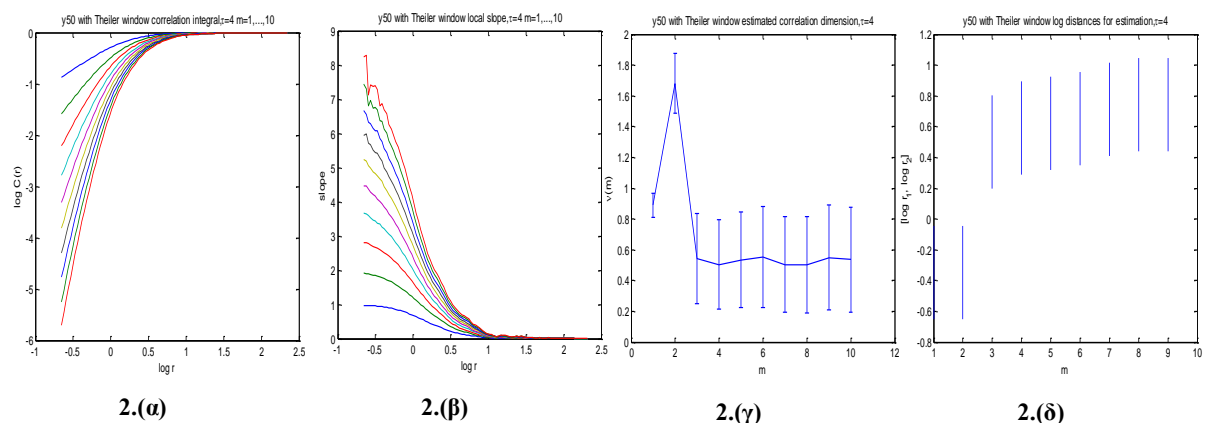
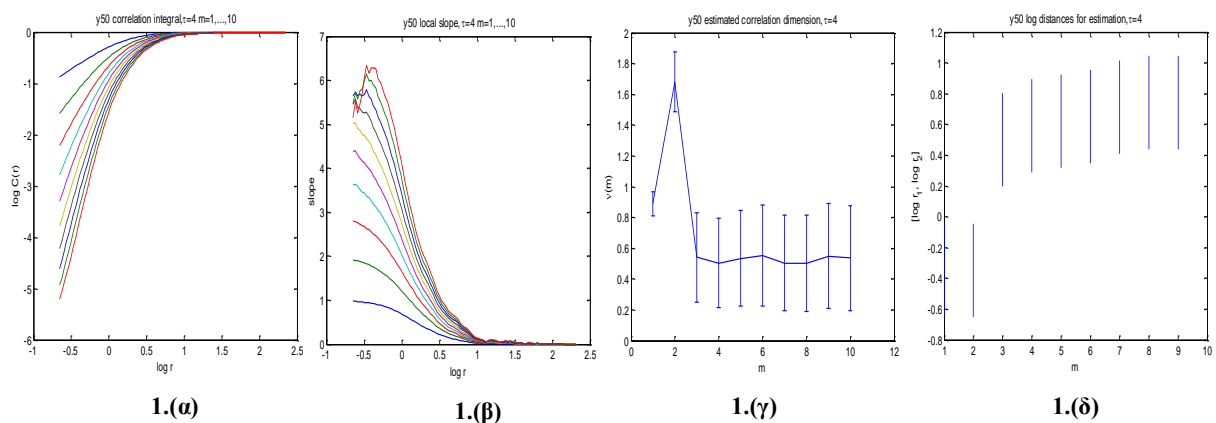
**Σχ.2.45** Εκτίμηση της διάστασης συσχέτισης της γωνίας της ταχύτητας ανέμου  $f(x,y,z)$  μετά από αφαίρεση της τάσης (y5): 1. Διαγράμματα χωρίς την χρήση παραθύρου Theiler και 2. Διαγράμματα με την χρήση παραθύρου Theiler.

Βλέπουμε ότι το μέτρο και η γωνία της ταχύτητας καθόδου διαφέρουν σύμφωνα με τα σχ.2.44 και 45. Όσο αφορά το μέτρο της ταχύτητας που έχει υπολογιστεί συναρτήσει των τριών συνιστωσών, διακρίνεται σύγκλιση των γραμμών (σχ.2.44.2(β)) στις μικρότερες τιμές της διάστασης εμβύθισης. Ωστόσο η διάσταση συσχέτισης είναι περίπου 6,5 για το μέτρο και 3,5 για την γωνία, χωρίς να μπορούμε να πούμε ότι το σύστημα είναι πιθανώς στοχαστικό.





**Σχ.2.46 Εκτίμηση της διάστασης συσχέτισης του μέτρου της ταχύτητας ανέμου  $f(x,y)$  μετά από αφαίρεση της τάσης (y40): 1. Διαγράμματα χωρίς την χρήση παραθύρου Theiler και 2. Διαγράμματα με την χρήση παραθύρου Theiler.**



**Σχ.2.47 Εκτίμηση της διάστασης συσχέτισης της γωνίας της ταχύτητας ανέμου  $f(x,y)$  μετά από αφαίρεση της τάσης (y50): 1. Διαγράμματα χωρίς την χρήση παραθύρου Theiler και 2. Διαγράμματα με την χρήση παραθύρου Theiler.**

Στα σχ.2.46 και 47 γίνεται η εκτίμηση της διάστασης συσχέτισης για το μέτρο και την γωνία της ταχύτητας καθόδου του ανέμου σε λόφο, με τα αντίστοιχα μεγέθη να έχουν υπολογιστεί συναρτήσει μόνο των δύο πρώτων συνιστωσών. Σημαντικές διαφορές υπάρχουν και σε αυτά τα μεγέθη μεταξύ τους, όπου στο μέτρο σε αντίθεση με την γωνία εμφανίζεται σύγκλιση των γραμμών (σχ.2.46.2(β)) και η διάσταση συσχέτισης είναι περίπου 5,5 σε αντίθεση με την γωνία που είναι περίπου 17.

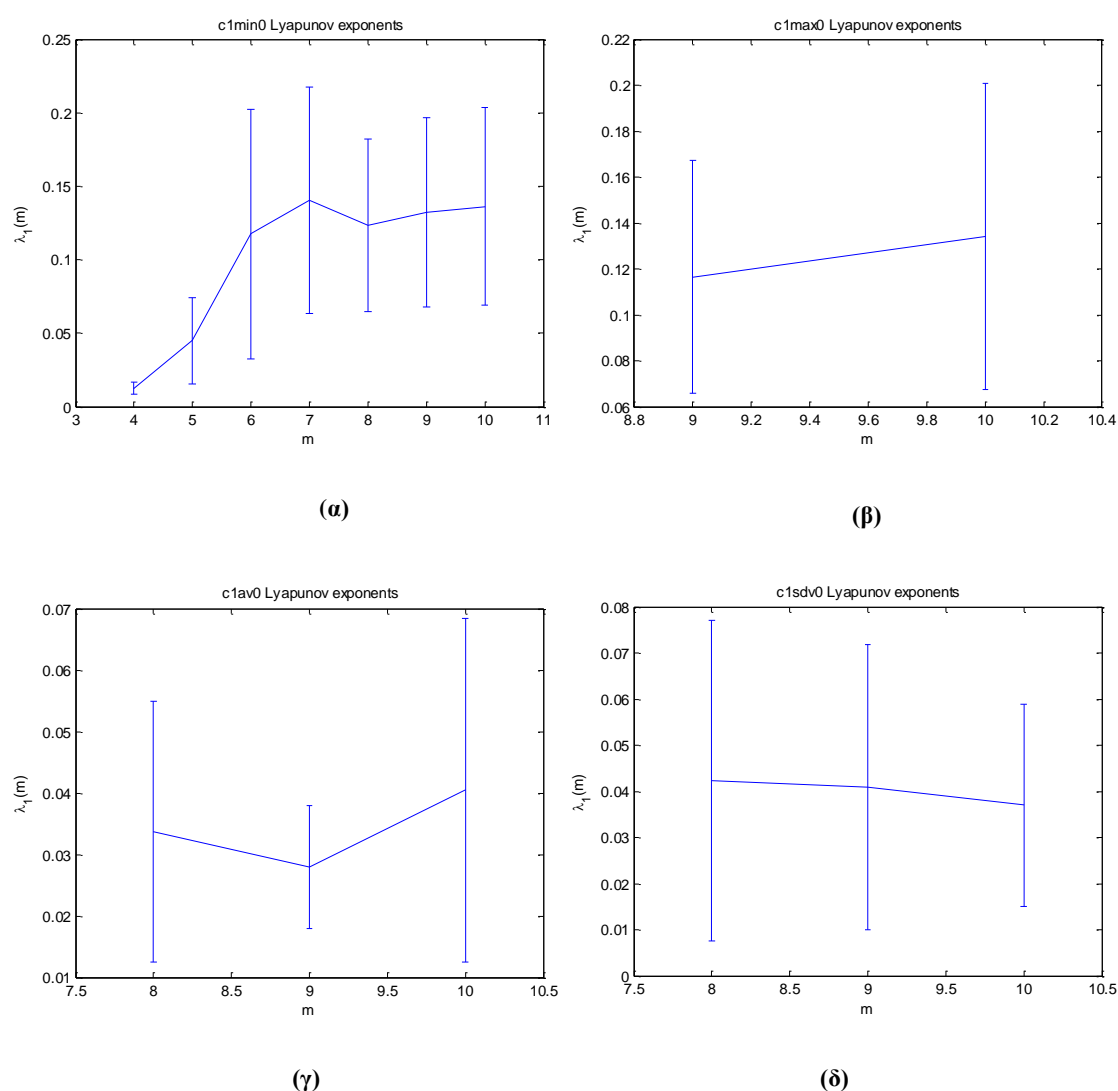
Τελικά από τα συνολικά αποτελέσματα που προέκυψαν για τις χρονοσειρές πεδίου και προσομοίωσης προκύπτουν οι παρακάτω πίνακες στους οποίους δίνεται η εκτίμηση του κάτω φράγματος όλων των χρονοσειρών.

ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΕΣ	ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΑΤΩ ΦΡΑΓΜΑ $v(m)$
<b><u>ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΕΣ ΠΕΔΙΟΥ</u></b>	
<b>Χρονοσειρά ταχύτητας ανέμου (μετά από αφαίρεση της τάσης)</b>	
C1-min0 (ελαχίστου)	-----
C1-max0 (μεγίστου)	0,6 (μεγάλο σφάλμα)
C1-av0 (μέσου όρου)	2,2±0,4
C1-sdv0 (τυπικής απόκλισης)	6,3±0,5
<b>Χρονοσειρά γωνίας ανέμου (μετά από αφαίρεση της τάσης)</b>	
A1-min0 (ελαχίστου)	0,6 (μεγάλο σφάλμα)
A1-max0 (μεγίστου)	0,54 (μεγάλο σφάλμα)
A1-av0 (μέσου όρου)	0,79 (μεγάλο σφάλμα)
A1-sdv0 (τυπικής απόκλισης)	0,7 (μεγάλο σφάλμα)
<b><u>ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ</u></b>	
<b>Ταχύτητα καθόδου του ανέμου σε λόφο</b>	
Στον άξονα x	6±0,5
Στον άξονα y	4,5±0,2
Στον άξονα z	3,5
Μέτρο $f(x,y,z)$	5,5±0,4
Γωνία $f(x,y,z)$	5,5±0,3
Μέτρο $f(x,y)$	2,5±0,5
<b>Ταχύτητα καθόδου του ανέμου σε λόφο</b>	
Στον άξονα x	5,7±0,3
Στον άξονα y	5,7±0,3
Στον άξονα z	5,7±0,3
Μέτρο $f(x,y,z)$	6,5±0,5
Γωνία $f(x,y,z)$	3,5
Μέτρο $f(x,y)$	5,5
Γωνία $f(x,y)$	1,7

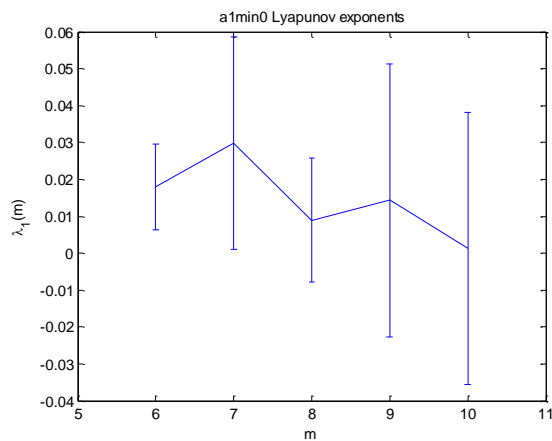
**Πίνακας 2.8 Εκτίμηση κάτω φράγματος  $v(m)$  χρονοσειρών πεδίου και προσομοίωσης.**

## 2.7 Εκθέτες Lyapunov Χρονοσειρών Πεδίου και Προσομοίωσης

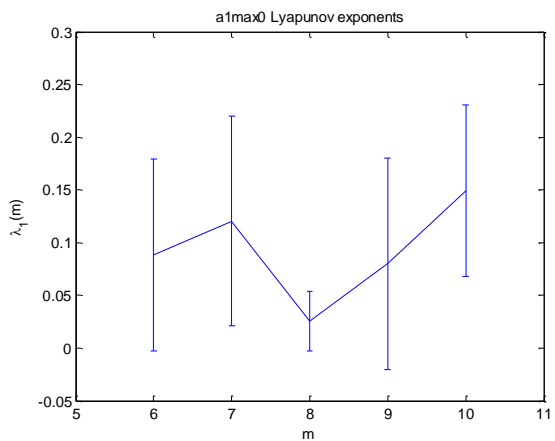
Οι εκθέτες Lyapunov μετράνε το μέσο βαθμό απόκλισης και σύγκλισης των τροχιών στον ελκυστή, στις κατευθύνσεις του τοπικά αναλυμένου χώρου καταστάσεων. Δίνονται παρακάτω τα διαγράμματα για τις χρονοσειρές ταχύτητας και γωνίας ανέμου, το μεγαλύτερο ενδιαφέρον εστιάζεται στο μέγιστο εκθέτη Lyapunov. Όπως έχει ήδη αναφερθεί η ύπαρξη θετικού εκθέτη Lyapunov σε ένα αιτιοκρατικό σύστημα συνεπάγεται με την ύπαρξη χαοτικής συμπεριφοράς.



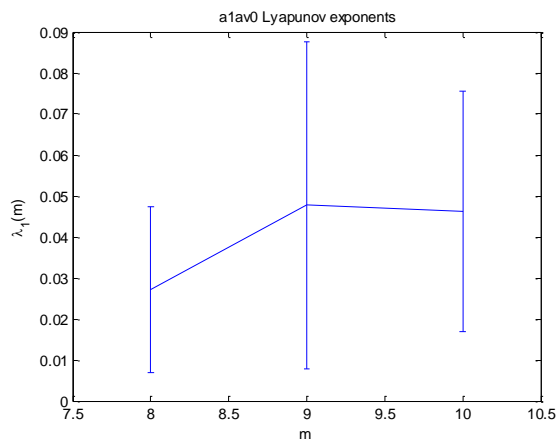
**Σχ.2.48** Εκτίμηση μέγιστου εκθέτη Lyapunov χρονοσειράς ταχύτητας ανέμου C1 μετά από αφαίρεση τάσης: (α) ελάχιστες τιμές, (β) μέγιστες τιμές, (γ) τιμές μέσου όρου και (δ) τυπικές αποκλίσεις.



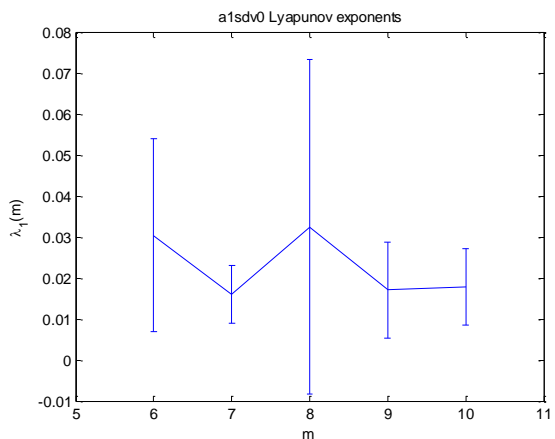
(α)



(β)



(γ)

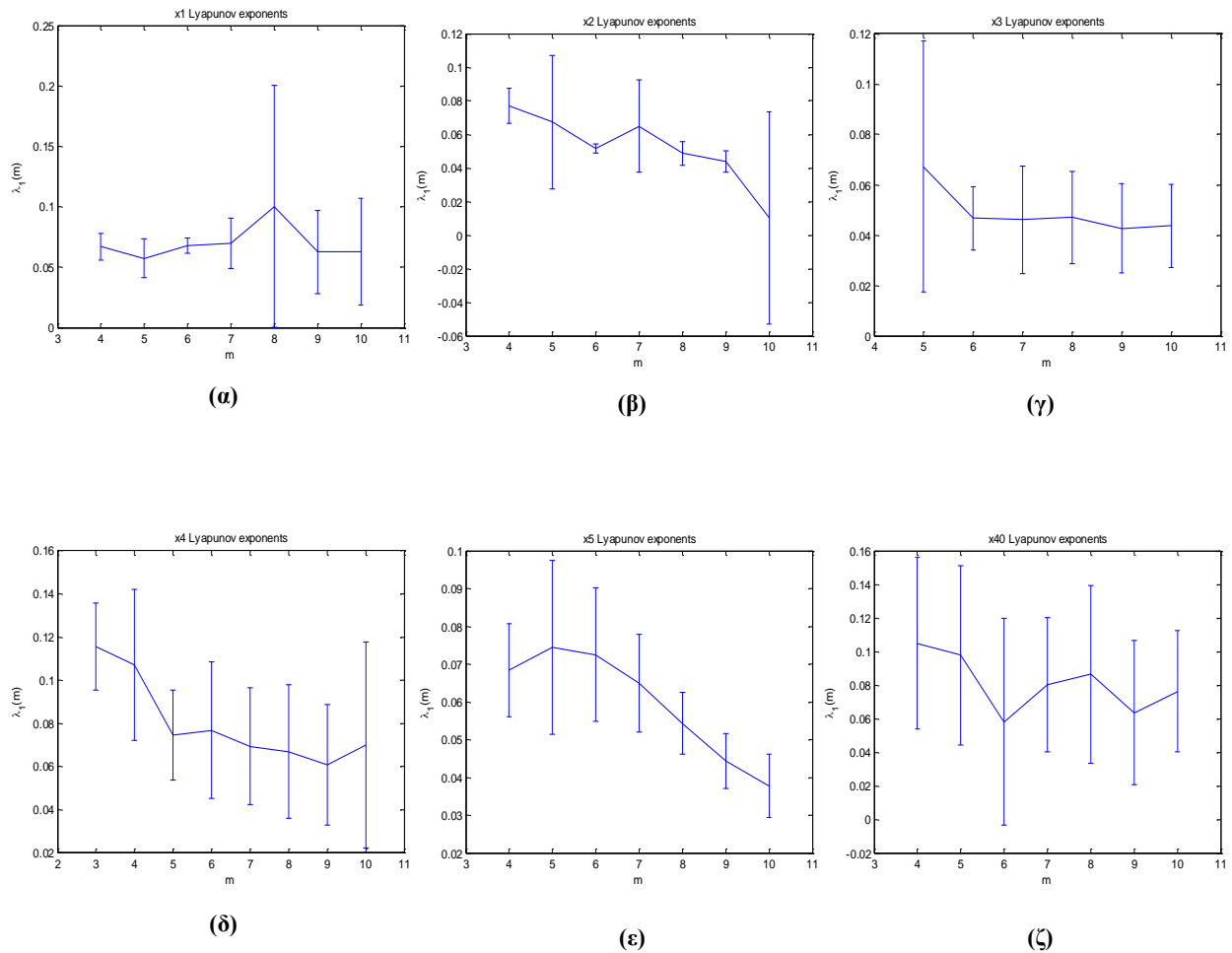


(δ)

**Σχ.2.49 Εκτίμηση μέγιστου εκθέτη Lyapunov χρονοσειράς γωνίας ανέμου Α1 μετά από αφαίρεση τάσης: (α) ελάχιστες τιμές, (β) μέγιστες τιμές, (γ) τιμές μέσου όρου και (δ) τυπικές αποκλίσεις.**

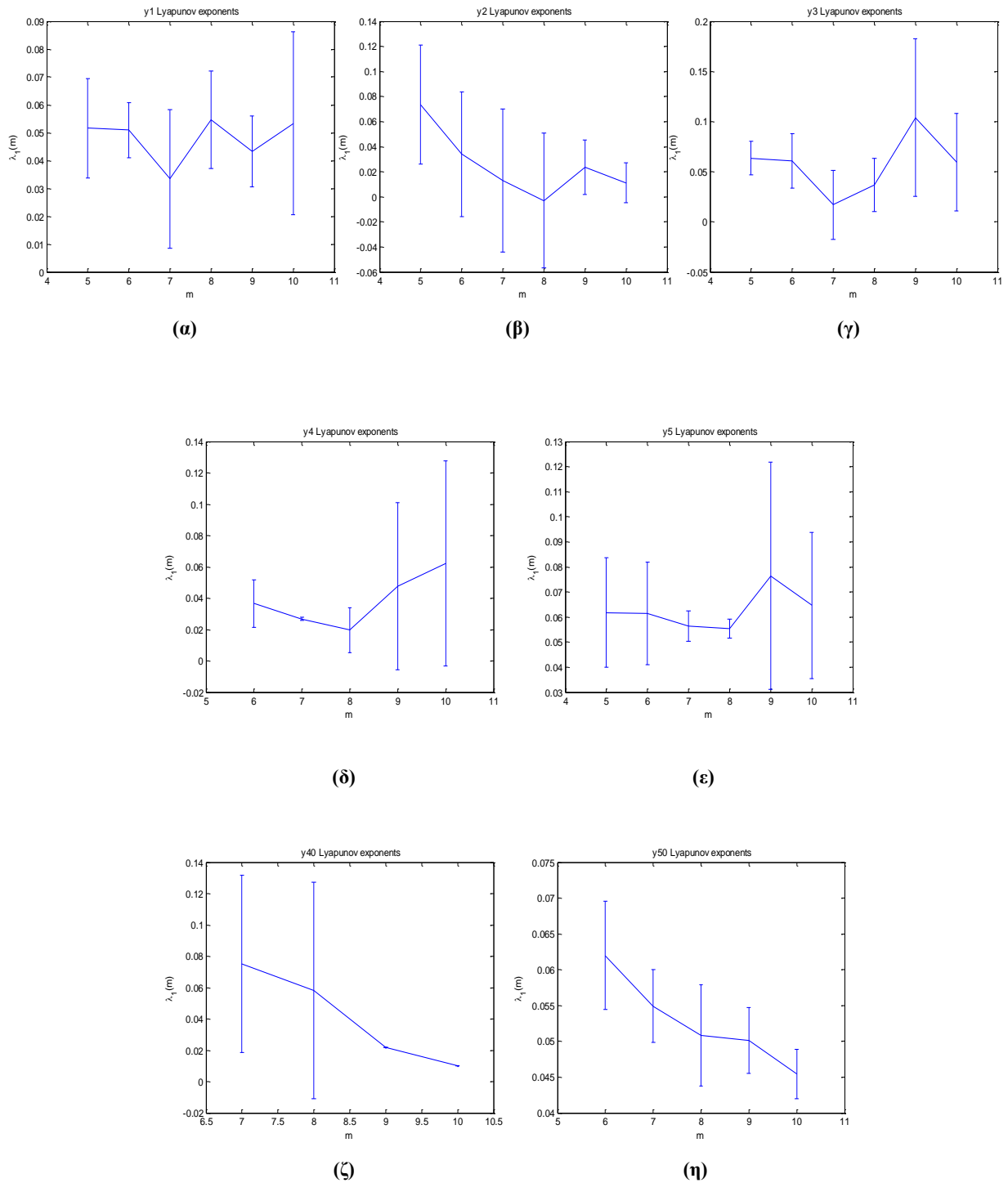
Έχοντας υπολογίσει αρχικά την χρονική υστέρηση, την διάσταση εμβύθισης και την ύπαρξη θορύβου σε κάθε χρονοσειρά γίνεται η εκτίμηση του μέγιστου εκθέτη Lyapunov. Από τα γραφήματα του σχ.2.48 και του σχ.2.49 διακρίνεται ότι ο μέγιστος εκθέτης Lyapunov είναι θετικός, συνεπώς το σύστημα μπορεί να παρουσιάζει χαοτική συμπεριφορά. Επιπλέον λόγω των πολλών σημείων μέτρησης οι τροχιές δεν είναι

ιδιαίτερα πολύπλοκες ενώ αντίθετα είναι ιδιαίτερα εμφανής οι μεγάλες τιμές σφάλματος που προέκυψαν.



**Σχ.2.50 Εκτίμηση μέγιστου εκθέτη Lyapunov χρονοσειράς προσομοίωσης ταχύτητας ανέμου του ανέμου σε λόφο: (α) ταχύτητα ανέμου στον άξονα x, (β) ταχύτητα ανέμου στον άξονα y, (γ) ταχύτητα ανέμου στον άξονα z, (δ) μέτρο ταχύτητας ανέμου  $f(x,y,z)$ , (ε) γωνία ταχύτητας ανέμου  $f(x,y,z)$  και (ζ) μέτρο ταχύτητας ανέμου  $f(x,y)$ .**





**Σχ.2.50** Εκτίμηση μέγιστου εκθέτη Lyapunov χρονοσειράς προσομοίωσης ταχύτητας καθόδου του ανέμου σε λόφο: (α) ταχύτητα ανέμου στον άξονα x, (β) ταχύτητα ανέμου στον άξονα y, (γ) ταχύτητα ανέμου στον άξονα z, (δ) μέτρο ταχύτητας ανέμου  $f(x,y,z)$ , (ε) γωνία ταχύτητας ανέμου  $f(x,y,z)$ , (ζ) μέτρο ταχύτητας ανέμου  $f(x,y)$  και (η) γωνία ταχύτητας ανέμου  $f(x,y)$ .

Τόσο στις χρονοσειρές πεδίου όσο και στις χρονοσειρές προσομοίωσης όπως παρατηρούμε και στα σχ.2.49 και 50 το σύστημα παρουσιάζει χαοτική συμπεριφορά δεδομένου ότι ο μέγιστος εκθέτης Lyapunov, που μας ενδιαφέρει, είναι θετικός.

### 3. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΠΟΣΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΑΝΑΦΟΡΑΣ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί (βλ. κεφ. 1.5.3) η μέθοδος της ποσοτικής ανάλυσης επαναφοράς είναι μία νεότερη μέθοδος ανάλυσης χρονικών σειρών με την οποία γίνεται η οπτικοποίηση της επαναφοράς των τροχιών (γραφήματα επαναφοράς ΓΕ - Recurrence Plots) των δυναμικών συστημάτων στον ανακατασκευασμένο χώρο των φάσεων. Παρακάτω με την βοήθεια της μεθόδου θα γίνει η ανάλυση των χρονοσειρών πεδίων και χρονοσειρών προσομοίωσης.

Για κάθε χρονοσειρά που θα αναλυθεί κατασκευάζεται το γράφημα επαναφοράς, εφόσον αρχικά έχει γίνει η εκτίμηση του κατάλληλου χρόνου υστέρησης. Η εκτίμηση της χρονικής υστέρησης γίνεται με την βοήθεια της μεθόδου της Μέσης Αμοιβαίας Πληροφορίας. Υπενθυμίζεται ότι στο γράφημα επαναφοράς (σύμφωνα με την κλίμακα στα δεξιά του γραφήματος) οι σκούρες (μπλε και μαύρες) κουκίδες απεικονίζουν καταστάσεις του συστήματος που βρίσκονται σε πολύ κοντινές αποστάσεις μεταξύ τους, οι κόκκινες και πορτοκαλί κουκίδες αντιστοιχούν σε ενδιάμεσες αποστάσεις και οι κίτρινες αναπαριστούν καταστάσεις του συστήματος που είναι σε μεγαλύτερες αποστάσεις μεταξύ τους. Πρέπει επίσης να αναφερθεί ότι τα γκρι σημεία δεν είναι σημεία επαναφοράς.

Κατόπιν δίνονται τα διαγράμματα που απεικονίζουν το επιθυμητό ποσοστό επαναφοράς (%REC), το ποσοστό ντετερμινισμού (%DET) το οποίο μας δείχνει κατά πόσο υπάρχουν επαναλαμβανόμενες ή ντετερμινιστικές δομές στην δυναμική του συστήματος που μελετάται. Το ποσοστό LAMINARITY (%LAM) σύμφωνα με το οποίο όσο μικρότερη είναι η τιμή του, τόσο περισσότερα επαναλαμβανόμενα σημεία υπάρχουν στο σύστημα. Το διάγραμμα MAX LINE που αντιστοιχεί στο μήκος της μέγιστης διαγώνιας γραμμής (εξαιρείται η κύρια διαγώνιος) που περιγράφει την δυναμική του συστήματος και είναι αντιστρόφως ανάλογη της τιμής του μέγιστου εκθέτη Lyapunov. Επιπλέον όσο μικρότερη είναι η MAX LINE, τόσο πιο χαοτικό και λιγότερο σταθερό είναι το σύστημα [Webber and Zbilut (1992)]. Το τελευταίο διάγραμμα απεικονίζει το TRAPPING TIME (TT) που υπολογίζει το μέσο χρόνο που το σύστημά μας παραμένει σε μία κατάσταση. Τέλος θα πρέπει να αναφερθεί ότι οι χρονοσειρές που θα αναλυθούν παρακάτω βρίσκονται στην αρχική τους μορφή διότι η μέθοδος δεν απαιτεί να είναι στάσιμες.

### **3.1 Ανάλυση Χρονοσειρών Πεδίου**

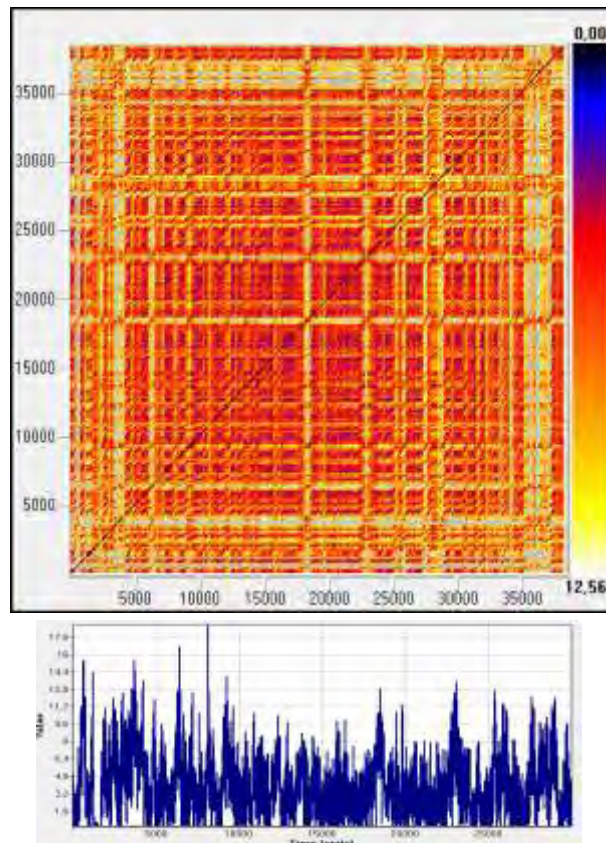
Η ανάλυση των χρονοσειρών πεδίου με την ποσοτική μέθοδο επαναφοράς αφορά στις χρονοσειρές ταχύτητας και γωνίας ανέμου (αποτελούνται από 38540 μετρήσεις), οι οποίες έχουν αναλυθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει η ανάλυσή τους με την βοήθεια της μεθόδου της ποσοτικής ανάλυσης επαναφοράς. Επιπλέον πρέπει να αναφερθεί ότι για την ανάλυση κατά διαστήματα (epoch analysis) επιλέχθηκαν 144 στιγμές που αντιστοιχούν στο διάστημα μίας ημέρας.

#### **3.1.1 Χρονοσειρές Ταχύτητας Ανέμου**

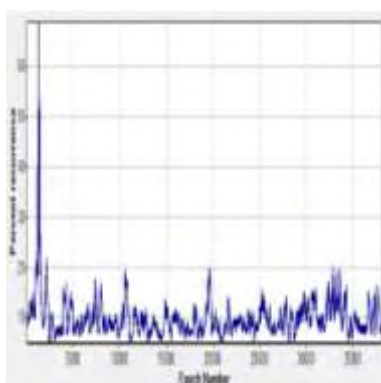
Οι χρονοσειρές ταχύτητας ανέμου χωρίζονται σε τέσσερις επιμέρους χρονοσειρές που αφορούν μετρήσεις του ελαχίστου, μεγίστου, μέσου όρου και τυπικής απόκλισης.

##### **3.1.1.1 Χρονοσειρά Ελαχίστων Τιμών Ταχύτητας Ανέμου**

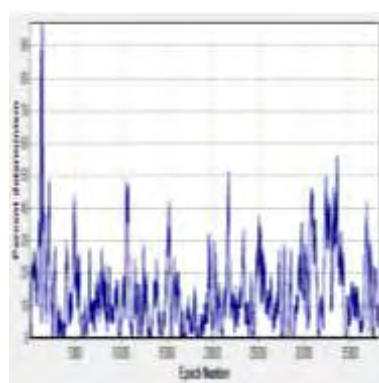
Η χρονοσειρά ταχύτητας ανέμου του ελαχίστου αποτελείται από μεγάλο όγκο δεδομένων, συνολικά 38540 μετρήσεις. Για την ανακατασκευή του χώρου των φάσεων έγινε εκτίμηση της παραμέτρου της χρονικής υστέρησης με την βοήθεια της μεθόδου της Μέσης Αμοιβαίας Πληροφορίας και πήρε την τιμή 58. Κατόπιν επιλέχθηκε ακτίνα αποκοπής ίση με 50 προκειμένου να επιτευχτεί το καλύτερο ποσοστό σημείων επαναφοράς. Έχοντας υπολογίσει τα παραπάνω κατασκευάστηκε το γράφημα επαναφοράς και τα αντίστοιχα διαγράμματα που μας δίνουν πληροφορίες για την δυναμική του συστήματος.



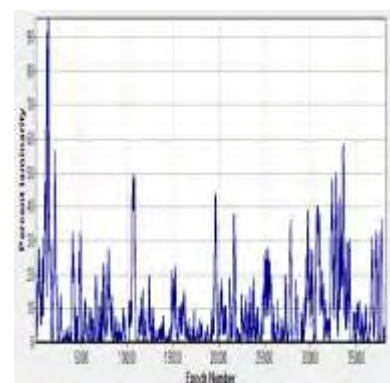
Γράφημα 3.1 Γράφημα επαναφοράς χρονοσειράς ταχύτητας ανέμου των ελαχίστων τιμών (C1min).



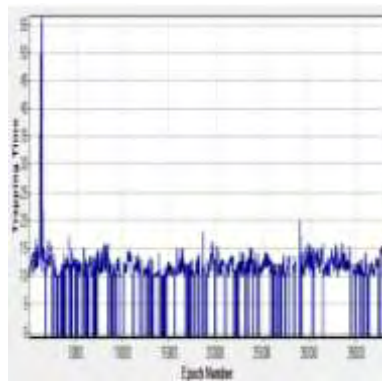
(α) %REC



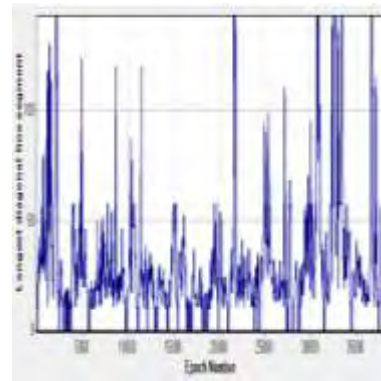
(β) % DET



(γ) %LAM



(δ) Trapping Time



(ε) MaxLine

**Σχ.3.1 Χρονοσειρά ταχύτητας ανέμου του ελαχίστου (C1min). Διαγράμματα μεθόδου ποσοτικής ανάλυσης επαναφοράς: (α) %REC - ποσοστό επαναφοράς, (β) %DET - ποσοστό ντετερμινισμού, (γ) %LAM - ποσοστό Laminarity, (δ) χρόνος παγίδευσης TT – Trapping Time, (ε) μέγιστη διαγώνια γραμμή Max Line.**

Στο γράφημα επαναφοράς 3.1 διακρίνεται η σκούρα κύρια διαγώνιος η οποία ονομάζεται γραμμή ταυτοποίησης. Γύρω από την κύρια διαγώνιο το σύστημα παρουσιάζει διαφορετική συμπεριφορά όσο εξελίσσεται. Παρατηρούνται αρκετές περιοχές μετάβασης με την βοήθεια των οποίων θα αναλυθεί η γενικότερη συμπεριφορά και δυναμική του συστήματος. Στην αρχή υπάρχει μία περιοχή μετάβασης (0-5000) όπου διακρίνονται αρκετές λευκές και κίτρινες κουκίδες, που αντιστοιχούν σε απότομες αλλαγές στην κατάσταση του συστήματος. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον σε αυτή τη περιοχή μετάβασης παρουσιάζει η εμφάνιση του μέγιστου χρόνου παγίδευσης, όπως διακρίνεται στο σχ.3.1(δ), που σημαίνει ότι το σύστημα μας είναι παγιδευμένο για αρκετό χρόνο σε αυτή τη δεδομένη κατάσταση καθώς και υψηλές τιμές για την μέγιστη διαγώνια γραμμή (Maxline) που σχετίζεται με το μέτρο σταθερότητας (σχ.3.1(ε)). Επιπλέον υψηλά είναι το ποσοστό ντετερμινισμού και το ποσοστό Laminarity σύμφωνα με το σχ.3.1(β) και (γ) αντίστοιχα.

Στη συνέχεια για μία μεγάλη περιοχή μετάβασης (5000-17500) του γραφήματος επαναφοράς 3.1 επικρατούν περισσότερες κόκκινες και κίτρινες κουκίδες γεγονός που σημαίνει ότι τα σημεία βρίσκονται σε πιο κοντινές μεταξύ τους αποστάσεις. Στα σχ.3.1(β) και (γ) διακρίνονται λιγότερα επαναλαμβανόμενα σημεία στο σύστημα συγκριτικά με την προηγούμενη περιοχή μετάβασης διότι τα ποσοστά είναι πιο χαμηλά. Όσον αφορά το μέσο χρόνο που μένει το σύστημα σε μία κατάσταση φαίνεται να είναι μικρότερος από την προηγούμενη περιοχή σύμφωνα με το

σχ.3.1.(δ), όπου όπως παρατηρείται μηδενίζεται πολλές φορές. Στο μέσο αυτού του διαστήματος παρουσιάζονται υψηλές τιμές για την μέγιστη διαγώνια γραμμή, δηλαδή το σύστημα μας είναι πιο σταθερό αντίθετα προς το τέλος εμφανίζει πιο χαοτική συμπεριφορά (σχ.3.1(ε)).

Κατά την εξέλιξη του μεγέθους επικρατεί παρόμοια συμπεριφορά του συστήματος, για μικρότερη περιοχή μετάβασης (17500-22500) όπου οι πιο ανοιχτόχρωμες κουκίδες στη αρχή απεικονίζουν την απότομη αλλαγή στην δυναμική του συστήματος και ακολουθούν πιο σκουρόχρωμες ζώνες. Στο σχ.3.1(γ) διακρίνεται το πιο χαμηλό ποσοστό *Laminarity* που έχει εμφανιστεί στη μέχρι τώρα εξέλιξη του συστήματος, συνεπώς περισσότερα επαναλαμβανόμενα σημεία. Επίσης το σύστημα εμφανίζει χαοτική συμπεριφορά γεγονός που προκύπτει από την μικρότερη τιμή που παρουσιάζει η μέγιστη διαγώνιος γραμμή στο σχ.3.1(ε), η οποία είναι η μικρότερη σε όλη την εξέλιξη της χρονοσειράς ταχύτητας ανέμου του ελαχίστου.

Κατόπιν διακρίνεται η περιοχή μετάβασης στα 22500-27500, όπου επικρατούν σημεία που βρίσκονται σε ενδιάμεσες καταστάσεις μεταξύ τους. Επίσης υπάρχουν περιοχές συγκεκριμένα γύρω στο 23000, λίγο μετά το 25000 και πριν το 27500 όπου εμφανίζονται λευκές ζώνες δηλαδή έχουμε απότομη αλλαγή στην δυναμική του συστήματος, αυτό είναι ορατό και στο σχ.3.1(ε).

Διακρίνεται στην συνέχεια στο διάστημα 27500-29000 μία λευκή ζώνη γύρω από την διαγώνια γραμμή, που συνεπάγεται με μεγάλες αποστάσεις μεταξύ των σημείων. Το ποσοστό ντετερμινισμού όπως είναι εμφανές και από το σχ.3.1(β) είναι χαμηλότερο από την προηγούμενη περιοχή μετάβασης. Επίσης χαμηλό είναι και το ποσοστό *Laminarity*, σύμφωνα με το σχ.3.1(γ), συνεπώς υπάρχουν πολλά επαναλαμβανόμενα σημεία σε αυτή την περιοχή του συστήματος

Ακολουθεί μία περιοχή μετάβασης στο (29000-35000), όπου σύμφωνα με το γράφημα επαναφοράς 3.1 υπερτερούν οι ενδιάμεσες αποστάσεις μεταξύ των σημείων του συστήματος. Στο σχ.3.1(β) και (γ) βλέπουμε ότι το ποσοστό ντετερμινισμού και το ποσοστό *Laminarity* αυξάνουν σε σχέση με τις προηγούμενες περιοχές μετάβασης, άρα υπάρχουν λίγα επαναλαμβανόμενα σημεία στο σύστημα. Επιπλέον είναι εμφανές στο σχ.3.1(δ) ότι ο μέσος χρόνος που μένει το σύστημα σε αυτή την κατάσταση είναι

σταθερός συγκριτικά με τις άλλες περιοχές. Επίσης η αύξηση της μέγιστης διαγώνιας γραμμής (σχ.3.1(ε)) υποδηλώνει την σταθερότητα του συστήματος.

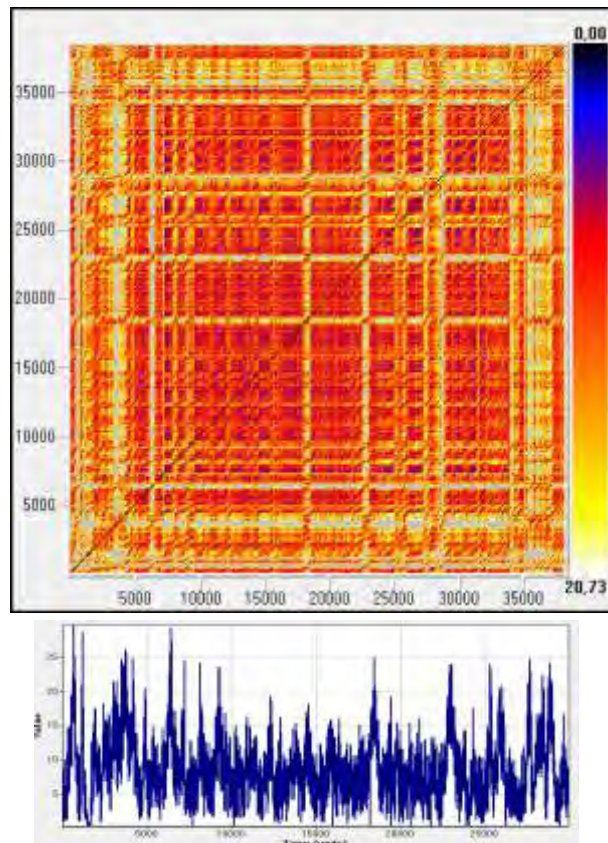
Τέλος είναι εμφανής ακόμη μία περιοχή μετάβασης στο 35000-38000 όπου οι ενδιάμεσες αποστάσεις των σημείων επικρατούν σύμφωνα με το γράφημα επαναφοράς. Επιπλέον τα ποσοστά ντετερμινισμού και Laminarity αυξήθηκαν από την προηγούμενη περιοχή μετάβασης.

Επίσης πρέπει να αναφερθεί ότι στο γράφημα επαναφοράς διακρίνονται και παράλληλες γραμμές στην κύρια διαγώνιο, ιδιαίτερα κατά το μέσο της χρονοσειράς.

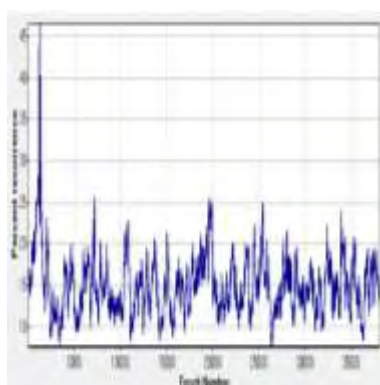
#### **3.1.1.2 Χρονοσειρά Μεγίστων Τιμών Ταχύτητας Ανέμου**

Για την χρονοσειρά των μεγίστων τιμών της ταχύτητας του ανέμου επιλέχθηκε χρονική υστέρηση ίση με 69 και ακτίνα αποκοπής 55. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την μέθοδο της ποσοτικής ανάλυσης επαναφοράς δίνονται παρακάτω.

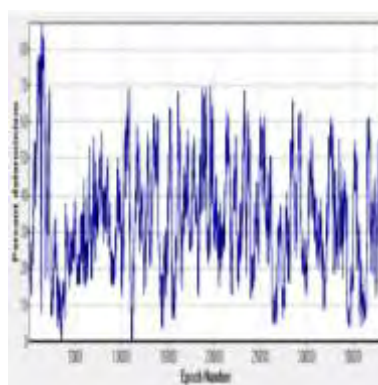




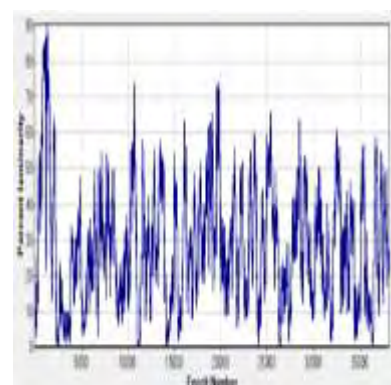
Γράφημα 3.2 Γράφημα επαναφοράς χρονοσειράς ταχύτητας ανέμου των μεγίστων τιμών (C1max).



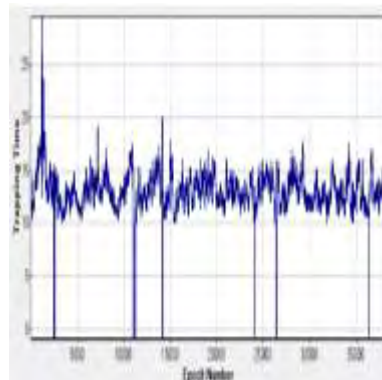
(α) %REC



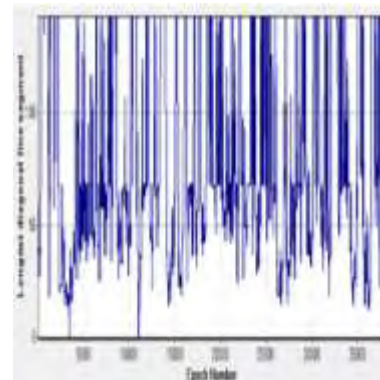
(β) %DET



(γ) %LAM



(δ) TT



(ε) MaxLine

**Σχ.3.2 Χρονοσειρά ταχύτητας ανέμου του μεγίστου (C1max). Διαγράμματα μεθόδου ποσοτικής ανάλυσης επαναφοράς: (α) %REC - ποσοστό επαναφοράς, (β) %DET - ποσοστό ντετερμινισμού, (γ) %LAM - ποσοστό Laminarity, (δ) χρόνο παγίδευσης TT – Trapping Time, (ε) μέγιστη διαγώνια γραμμή Max Line.**

Το γράφημα επαναφοράς 3.2 που αντιστοιχεί στην χρονοσειρά ταχύτητας ανέμου του μεγίστου δεν φαίνεται να διαφέρει από εκείνο της χρονοσειράς του ελαχίστου. Παρατηρείται ότι οι περιοχές μετάβασης που διακρίνονται είναι ίδιες με της προηγούμενης χρονοσειράς με κάποιες μικρές διαφορές. Στην πρώτη περιοχή μετάβασης 0-5000 επικρατούν οι λευκές και κίτρινες ζώνες, με τις λευκές να είναι πιο έντονες, που συνεπάγεται με απότομη αλλαγή στην δυναμική του συστήματος. Από το διάγραμμα (β) του σχ.3.2 διαπιστώνεται ότι στην αρχή αυτή της περιοχής παίρνουμε το μέγιστο ποσοστό ντετερμινισμού που αντιστοιχεί σε ολόκληρη την εξέλιξη της χρονοσειράς και στο τέλος παίρνουμε αντίστοιχα το χαμηλότερο. Συνεπώς υπάρχει εναλλαγή στην ύπαρξη των ντετερμινιστικών δομών του συστήματος. Ανάλογα ποσοστά εμφανίζονται και στο σχ.3.2(γ) όπου όσο μικροτερη είναι η τιμή Laminarity τόσο περισσότερα επαναλαμβανόμενα σημεία υπάρχουν στο σύστημα. Επίσης από το σχ.3.2(δ) συμπεραίνουμε ότι η υπό μελέτη χρονοσειρά για αυτή την περιοχή μετάβασης παίρνει την μέγιστη τιμή για το χρόνο παγίδευσης, δηλαδή το μέσο χρόνο που μένει το σύστημα σε μία δεδομένη κατάσταση. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός, όπως φαίνεται και από το διάγραμμα της μέγιστης διαγώνιας γραμμής σχ.3.2(ε), ότι το σύστημα προς το τέλος της περιοχής παρουσιάζει χαοτική συμπεριφορά.

Η επόμενη περιοχή μετάβασης διακρίνεται στο διάστημα 5000-17500. Στο γράφημα 3.2 εμφανίζονται σημεία που βρίσκονται σε ενδιάμεσες αποστάσεις, παρόμοια με την αντίστοιχη περιοχή της χρονοσειράς του ελαχίστου. Από το διάγραμμα που δίνεται το προφίλ του ντετερμινισμού (σχ.3.2(β)) φαίνεται πως υπάρχουν ντετερμινιστικές δομές, χωρίς ωστόσο να φτάνουμε σε τόσο υψηλά ποσοστά όπως στο προηγούμενο διάστημα. Επίσης ο μέσος χρόνος που μένει το σύστημα σε μία κατάσταση μηδενίζεται κοντά στο 11000 και στο 14000, ενώ η μέγιστη διαγώνιος γραμμή, αποτελέσματα για την οποία δίνονται στο σχ.3.2(ε), παρουσιάζει υψηλές τιμές.

Στην συνέχεια διακρίνουμε την περιοχή 17500-22500 όπου οι άσπρες κουκίδες γύρω από την διαγώνιο στην αρχή του διαστήματος υποδηλώνουν απότομη αλλαγή στην δυναμική του συστήματος και όσο εξελίσσεται η χρονοσειρά μέσα σε αυτή την περιοχή το σύστημα σταθεροποιείται ελαφρώς (ενδιάμεσες αποστάσεις μεταξύ των σημείων). Παρατηρούμε υψηλό ποσοστό ντετερμινισμού και Laminarity (σχ.3.2(β) και (γ)) που σημαίνει ότι έχουμε λιγότερα επαναλαμβανόμενα σημεία. Επιπλέον πρέπει να αναφερθεί ότι η υψηλή τιμή της μέγιστης διαγώνιας γραμμής, η οποία όπως φαίνεται στο σχ.3.2(ε) είναι η υψηλότερη σε όλη την εξέλιξη της χρονοσειράς, υποδηλώνει την σταθερότητα του συστήματος.

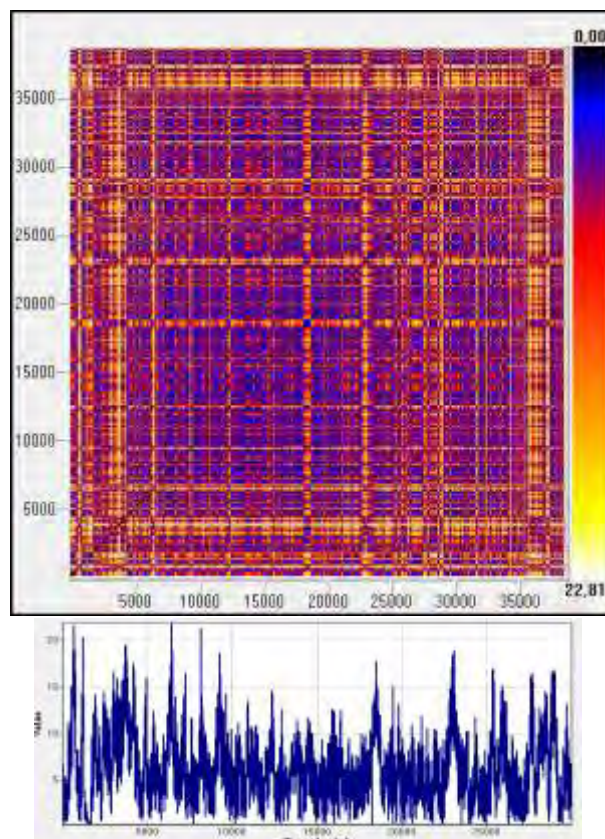
Η επόμενη περιοχή μετάβασης που διακρίνεται είναι στο 22500-27500, όπου επικρατούν εναλλαγές στην συμπεριφορά του συστήματος. Αρχικά εμφανίζονται, όπως και στην χρονοσειρά ταχύτητας ανέμου του ελαχίστου, λευκές κουκίδες που αντικατοπτρίζουν τις μεγάλες αποστάσεις μεταξύ των σημείων και στην συνέχεια παρουσιάζονται σημεία που βρίσκονται σε ενδιάμεσες αποστάσεις. Κατόπιν παρατηρούμε ότι το ποσοστό Laminarity (σχ.3.2(γ)) είναι πιο χαμηλό από το προηγούμενο διάστημα όπως και η Maxline παρουσιάζει χαμηλότερη τιμή. Τέλος ενδιαφέρον είναι και ότι μηδενίζεται και ο χρόνος παγίδευσης σε αυτή την περιοχή κάτι που δεν συνέβαινε στην προηγούμενη. Ωστόσο πρέπει να αναφερθεί ότι η χρονοσειρά μεγίστου παρουσιάζει μεγαλύτερη σταθερότητα από την χρονοσειρά του ελαχίστου.

Ακολουθούν τρεις κύριες περιοχές μετάβασης που διακρίνουμε στο γράφημα 3.2, όμοιες με τις προηγούμενες χρονοσειράς (27500-29000, 29000-35000 και 35000-38000), όπου ενδιαφέρον είναι ότι η Maxline εμφανίζει σχεδόν όμοια συμπεριφορά και στα τρία διαστήματα, υψηλές τιμές, συνεπώς σταθερό σύστημα. Το ποσοστό

Laminarity μειώνεται ελαφρώς προς το τέλος γεγονός που σημαίνει ότι εμφανίζονται πολλά επαναλαμβανόμενα σημεία. Τέλος σταθερός είναι και ο μέσος χρόνος που μένει το σύστημα σε μία δεδομένη κατάσταση με την μοναδική αλλαγή γύρω στο 36000 που ο χρόνος παγίδευσης μηδενίζεται. Επίσης οι παράλληλες διαγώνιες γραμμές που εμφανίζονται περιοχή υποδηλώνουν ντετερμινισμό, όσο πιο μικρές γραμμές έχουμε τόσο λιγότερο προβλέψιμο είναι το σύστημά μας.

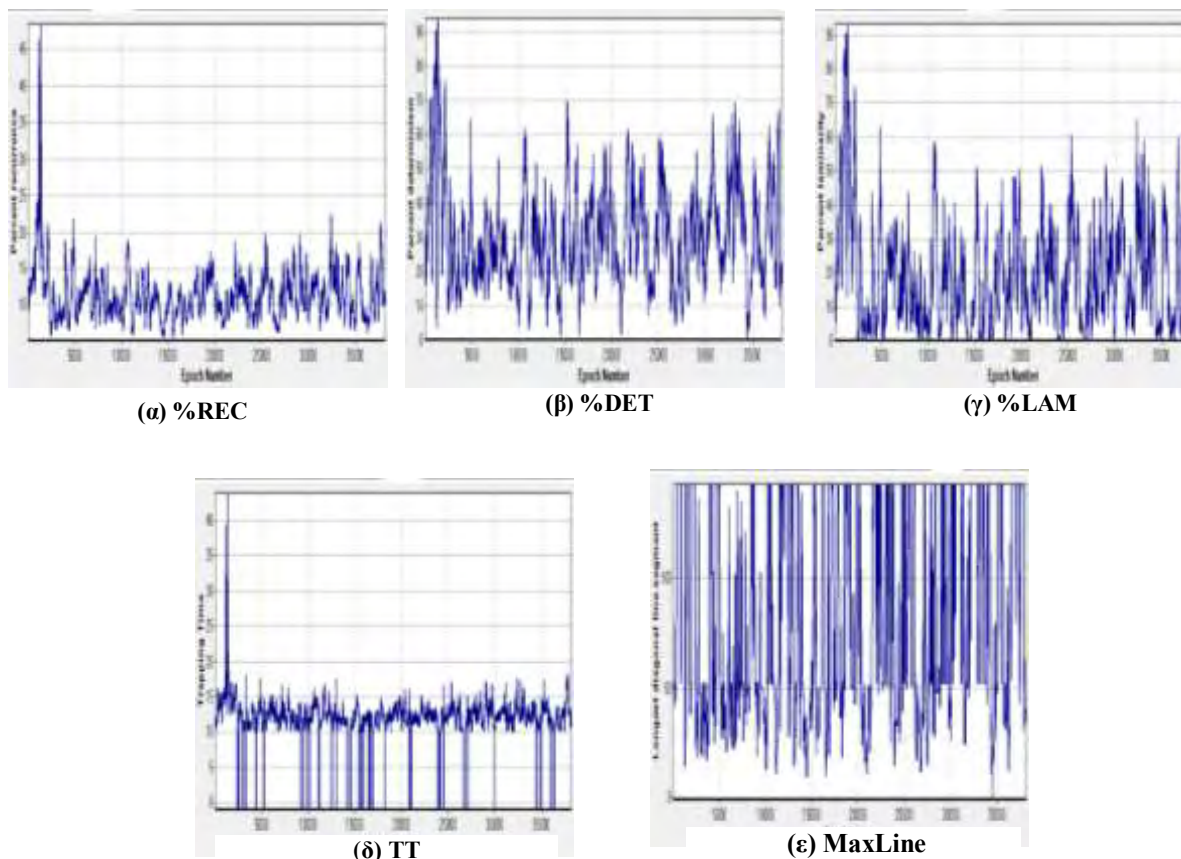
### 3.1.1.3 Χρονοσειρά Τιμών Μέσου Όρου Ταχύτητας Ανέμου

Η επόμενη χρονοσειρά πεδίου που αναλύθηκε με την μέθοδο της ποσοτικής ανάλυσης επαναφοράς είναι η χρονοσειρά ταχύτητας ανέμου για μετρήσεις τιμών μέσου όρου. Για την χρονοσειρά αυτή επιλέχθηκε τιμή υστέρησης 53 και ακτίνα αποκοπής 55. Τα αποτελέσματα δίνονται παρακάτω.



Γράφημα 3.3 Γράφημα επαναφοράς χρονοσειράς ταχύτητας ανέμου τιμών μέσου όρου (C1av).





**Σχ.3.3 Χρονοσειρά ταχύτητας ανέμου του μέσου όρου (C1av). Διαγράμματα μεθόδου ποσοτικής ανάλυσης επαναφοράς: (α) %REC - ποσοστό επαναφοράς, (β) %DET - ποσοστό ντετερμινισμού, (γ) %LAM - ποσοστό Laminarity, (δ) χρόνο παγίδευσης TT – Trapping Time, (ε) μέγιστη διαγώνια γραμμή Max Line.**

Στο γράφημα 3.3 της χρονοσειράς του μέσου όρου της ταχύτητας ανέμου, παρατηρούμε ότι τα σημεία βρίσκονται γενικότερα σε πιο κοντινές αποστάσεις μεταξύ τους, συγκριτικά με τις δύο προηγούμενες χρονοσειρές, δεδομένου ότι υπάρχουν περισσότερες σκουρόχρωμες ζώνες. Οι περιοχές μετάβασης που σημειώνονται είναι όμοιες με αυτές που έχουν ήδη αναφερθεί για το μέγεθος της ταχύτητας ανέμου. Στην αρχή και στο τέλος της περιοχή μετάβασης 0-5000 εμφανίζονται πορτοκαλί και κίτρινες κουκίδες που δηλώνουν ότι τα σημεία βρίσκονται σε ενδιάμεσες καταστάσεις, ενώ στο κέντρο οι αποστάσεις των σημείων μικραίνουν. Σύμφωνα με τα διαγράμματα (β), (γ) και (δ) στο σχ.3.3 το ποσοστό ντετερμινισμού, το ποσοστό Laminarity και ο χρόνος παγίδευσης αντίστοιχα εμφανίζουν υψηλές τιμές στην αρχή της περιοχής μετάβασης. Το ποσοστό Laminarity

μηδενίζεται όσο εξελίσσεται η χρονοσειρά σε αυτή τη περιοχή μετάβασης, με αποτέλεσμα να έχουμε περισσότερα επαναλαμβανόμενα σημεία. Επίσης χαοτική συμπεριφορά φαίνεται να παρουσιάζει το σύστημα πριν το 5000 όπου μειώνεται η μέγιστης διαγώνιος γραμμή, όπως διακρίνεται από το σχ.3.3(ε).

Στο γράφημα επαναφοράς 3.3 για το διάστημα 5000-17500, εκτός από τα σημεία που βρίσκονται γύρω στο 6500 και 12500 που εμφανίζονται ανοιχτόχρωμες ζώνες, όλη η υπόλοιπη περιοχή αποτελείται από σημεία που βρίσκονται σε κοντινές αποστάσεις μεταξύ τους. Διακρίνουμε μικρότερα ποσοστά ντετερμινισμού στο σχ.3.3(β), από την προηγούμενη περιοχή, συνεπώς δεν είναι τόσο έντονη η ντετερμινιστική συμπεριφορά του συστήματος, με αποτέλεσμα να υπάρχει λιγότερη προβλεψιμότητα. Πολλά είναι και τα επαναλαμβανόμενα σύμφωνα με το σχ.3.3(γ), όπου εμφανίζει το ποσοστό Laminarity να μηδενίζεται αρκετές φορές (γύρω στο 10000, 11000, 12500, 16000 και 17500) μέσα στην συγκεκριμένη περιοχή μετάβασης και αντίστοιχα μηδενίζεται και ο μέσος χρόνος που μένει το σύστημα σε μία δεδομένη κατάσταση σε αυτά τα σημεία (σχ.3.3(δ)).

Στην συνέχεια διακρίνεται η περιοχή μετάβασης 17500-22500, όπου επικρατούν τα σημεία που βρίσκονται σε κοντινές αποστάσεις με εξαίρεση μετά το 17500 όπου υπάρχουν και κίτρινες κουκίδες. Στα διαγράμματα στο σχ.3.3 για αυτή τη περιοχή ενδιαφέρον παρουσιάζει η μέγιστη διαγώνιος (διάγραμμα (ε)) η οποία είναι ιδιαίτερα μικρή πριν το 22500, που σημαίνει ότι το σύστημά μας σε εκείνη την περιοχή δεν είναι σταθερό. Επίσης ο χρόνος παγίδευσης είναι χαμηλός γύρω από το 22500 καθώς και το ποσοστό Laminarity που συνεπάγεται με περισσότερα επαναλαμβανόμενα σημεία συγκριτικά με τα προηγούμενα της περιοχής.

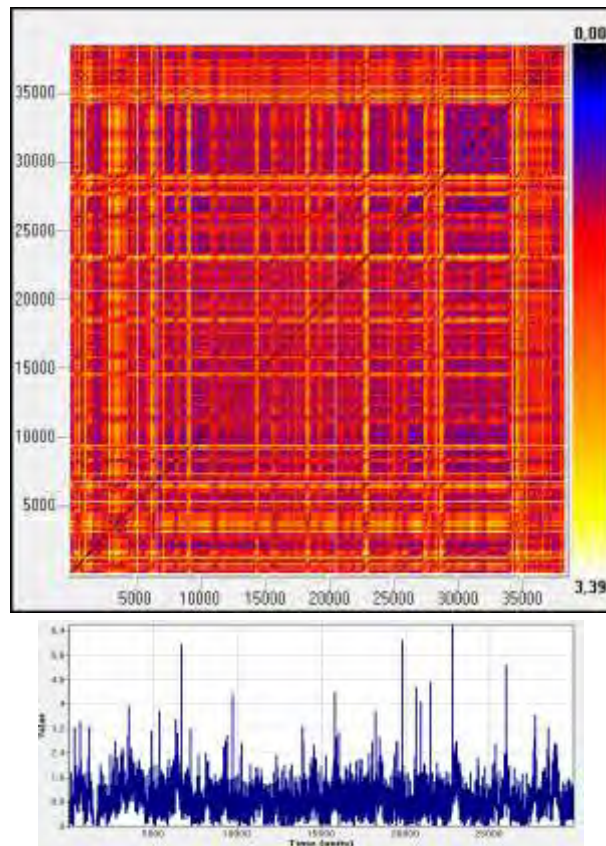
Στο διάστημα 22500-27500 παρατηρούμε τόσο στην αρχή όσο και στο τέλος ότι επικρατούν οι ενδιάμεσες αποστάσεις μεταξύ των σημείων, ενώ στο κέντρο υπάρχουν περισσότερα σημεία που βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους. Λίγο μετά το 22500 και πριν το 27500 όπως διακρίνεται στα διαγράμματα (β) και (γ) στο σχ.3.3, τα αντίστοιχα ποσοστά παίρνουν χαμηλές τιμές. Συνεπώς στην περιοχή αυτών των σημείων υπάρχουν λιγότερες επαναλαμβανόμενες δομές στην δυναμική του συστήματος σύμφωνα με το ποσοστό ντετερμινισμού που προκύπτει από το σχ.3.3(β). Επιπλέον στην αρχή του διαστήματος το σύστημα εμφανίζεται περισσότερο σταθερό διότι όπως διακρίνουμε και από την Maxline στο σχ.3.3(ε) είναι

μεγαλύτερη ενώ προς το τέλος της περιοχής μετάβασης παρουσιάζει μικρότερες τιμές.

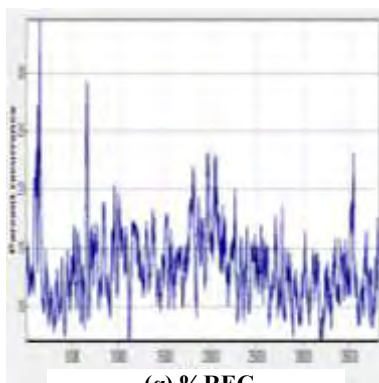
Οι τρεις τελευταίες περιοχές μετάβασης που προκύπτουν σύμφωνα με το γράφημα 3.3 της χρονοσειράς του μέσου όρου, είναι ομοίως με τις προηγούμενες (27500-29000, 29000-35000 και 35000-38000). Για τις περιοχές αυτές το ποσοστό ντετερμινισμού παρουσιάζει μέγιστο γύρω στο 33500 και ελάχιστο λίγο πριν το 35000. Πολλά επαναλαμβανόμενα σημεία υπάρχουν στο σύστημα κοντά στο 35000 και 36000, όπου όπως παρατηρούμε και από το σχ.3.3(δ) για τα διαστήματα αυτά ο χρόνος παγίδευσης μηδενίζεται ενώ η συμπεριφορά του συστήματος είναι χαοτική. Γενικότερα η απουσία παραλλήλων διαγωνίων γραμμών στο γράφημα επαναφοράς οι μέγιστες διαγώνιες γραμμές που διακρίνονται στο σχ.3.3(δ) αντικατοπτρίζουν τη 'Laminar' συμπεριφορά του συστήματος.

#### **3.1.1.4 Χρονοσειρά Τιμών Τυπικής Απόκλισης Ταχύτητας Ανέμου**

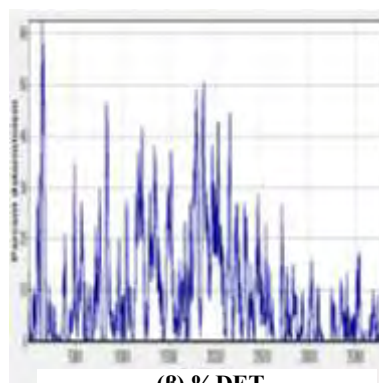
Η τελευταία χρονοσειρά που θα αναλυθεί για το μέγεθος της ταχύτητας ανέμου είναι η χρονοσειρά της τυπικής απόκλισης. Τα αποτελέσματα που ακολουθούν παρακάτω και από τα οποία διεξάγονται γενικότερα συμπεράσματα για την συμπεριφορά του συστήματος, προκύπτουν με την μέθοδο της ποσοτικής επαναφοράς, στην οποία εισήχθησαν η τιμή υστέρησης 55 και η ακτίνα αποκοπής επίσης 55.



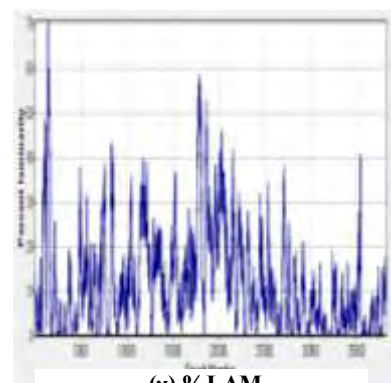
Γράφημα 3.4 Γράφημα επαναφοράς χρονοσειράς ταχύτητας ανέμου της τυπικής απόκλισης (C1sdv).



(α) %REC

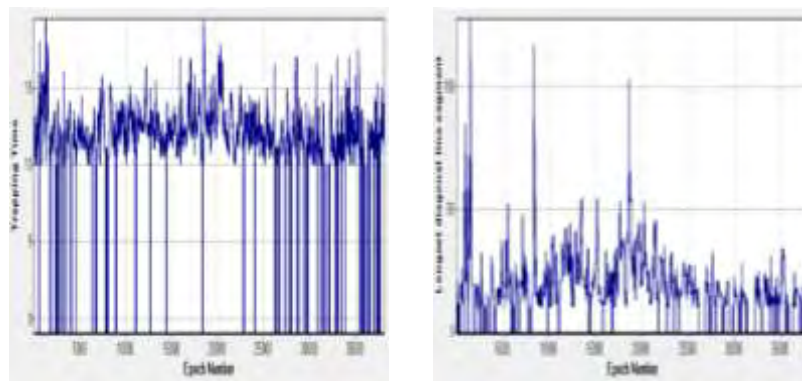


(β) %DET



(γ) %LAM





(δ) TT

(ε) MaxLine

**Σχ.3.4 Χρονοσειρά ταχύτητας ανέμου της τυπικής απόκλισης (C1sdv). Διαγράμματα μεθόδου ποσοτικής ανάλυσης επαναφοράς: (α) %REC - ποσοστό επαναφοράς, (β) %DET - ποσοστό ντετερμινισμού, (γ) %LAM - ποσοστό Laminarity, (δ) χρόνο παγίδευσης TT – Trapping Time, (ε) μέγιστη διαγώνια γραμμή Max Line.**

Στο γράφημα επαναφοράς 3.4 της χρονοσειράς της τυπικής απόκλισης της ταχύτητας ανέμου είναι ιδιαίτερα έντονες οι ενδιάμεσες αποστάσεις μεταξύ των σημείων του συστήματος δεδομένου ότι διακρίνονται κυρίως πορτοκαλί κουκίδες. Επίσης για αυτή την χρονοσειρά μπορούμε να διακρίνουμε τις περιοχές μετάβασης (0-5000, 5000-17500, 17500-22500, 22500-27500, 27500-29000, 29000-35000 και 35000 έως τέλος), οι οποίες είναι όμοιες με τις περιοχές μετάβασης που εμφανίστηκαν σε όλες τις χρονοσειρές που αφορούν το μέγεθος της ταχύτητας ανέμου.

Στο σχ.3.4.(β) που δίνεται το ποσοστό ντετερμινισμού, διεξάγονται συμπεράσματα που αφορούν την ντετερμινιστική συμπεριφορά του συστήματος. Προκύπτει μέγιστο ποσοστό ντετερμινισμού, συνεπώς καλύτερη προβλεψιμότητα, στην αρχή της πρώτης περιοχής μετάβασης καθώς επίσης και στο διάστημα 17500-22500, όπου συμπεραίνουμε ότι υπάρχει ντετερμινιστική συμπεριφορά στο σύστημα, συμπεριφορά η οποία μειώνεται αισθητά, όπως διακρίνουμε από το διάγραμμα όσο εξελίσσεται η χρονοσειρά, προς τις τελευταίες περιοχές μετάβασης, ιδιαίτερα στο 35000-38000.

Παρόμοιο είναι και το ποσοστό Laminarity που εμφανίζεται στο σχ.3.4(γ) και από το οποίο προκύπτει ότι περισσότερα επαναλαμβανόμενα σημεία υπάρχουν στο σύστημα εκεί όπου το ποσοστό είναι μικρότερο. Οι περιοχές μετάβασης που εμφανίζουν

μικρότερο ποσοστό Laminarity είναι στο τέλος της περιοχής 0-5000, 29000-35000 και 35000 έως 38000 κυρίως.

Ο χρόνος παγίδευσης που αφορά το μέσο χρόνο που μένει το σύστημα σε μία δεδομένη κατάσταση δίνεται από το διάγραμμα (δ) στο σχ.3.4. Παρατηρείται ότι γενικότερα ο χρόνος παγίδευσης μηδενίζεται αρκετές φορές, άρα το σύστημα δεν μένει σταθερά σε μία κατάσταση. Αυτό είναι ιδιαίτερα εμφανές στην αρχή και στο τέλος της χρονοσειράς δηλαδή για τα διαστήματα (0-5000, 27500-29000, 29000-35000 και 35000-38000). Για τις ενδιάμεσες περιοχές μετάβασης ο χρόνος παγίδευσης μηδενίζεται λιγότερες φορές.

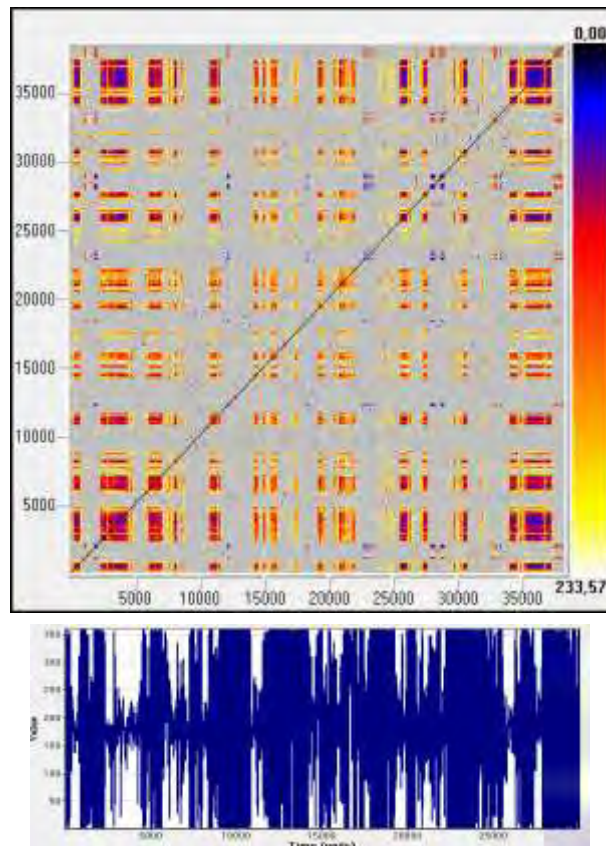
Η μέγιστη διαγώνιος γραμμή όσο μικρότερη είναι τόσο πιο χαοτικό και λιγότερο σταθερό είναι το σύστημα. Προκύπτει από το σχ.3.4(ε) ότι το σύστημα εμφανίζει στις περισσότερες περιοχές μετάβασης χαμηλή 'Maxline' και ιδιαίτερα στις περιοχές που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο για τον χρόνο παγίδευσης, Συνεπώς μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η χρονοσειρά παρουσιάζει κυρίως χαοτική συμπεριφορά.

### **3.1.2 Χρονοσειρές Γωνίας Ανέμου**

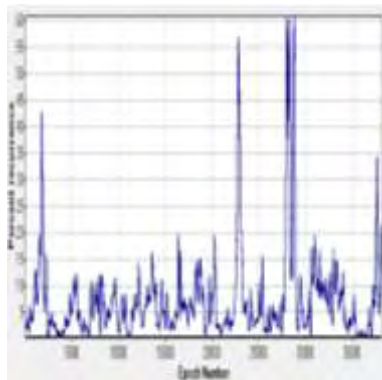
Οι χρονοσειρές γωνίας ανέμου χωρίζονται επίσης σε τέσσερις επιμέρους χρονοσειρές που αφορούν μετρήσεις του ελαχίστου, μεγίστου, μέσου όρου και τυπικής απόκλισης.

#### **3.1.2.1 Χρονοσειρά Ελαχίστων Τιμών Γωνίας Ανέμου**

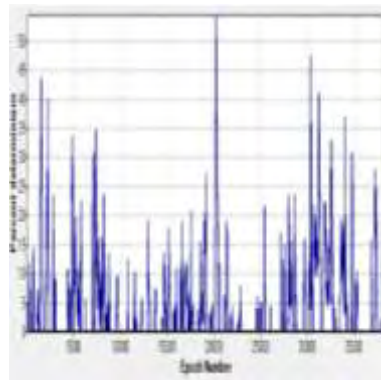
Η χρονοσειρά που θα αναλυθεί σε αυτή την παράγραφο με την μέθοδο της ποσοτικής ανάλυσης επαναφοράς αφορά την χρονοσειρά γωνίας ανέμου του ελαχίστου. Αποτελείται επίσης από 38540 μετρήσεις όπως και η χρονοσειρά ταχύτητας ανέμου. Με την βοήθεια της μεθόδου της Μέσης Αμοιβαίας Πληροφορίας, εκτιμήθηκε η χρονική υστέρηση και πήρε την τιμή 54 και επιλέχθηκε ακτίνα αποκοπής ίση με 27. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν και αφορούν το γράφημα επαναφοράς και τα αντίστοιχα διαγράμματα δίνονται παρακάτω και θα μας βοηθήσουν να διεξάγουμε συμπεράσματα για την συμπεριφορά του συστήματος.



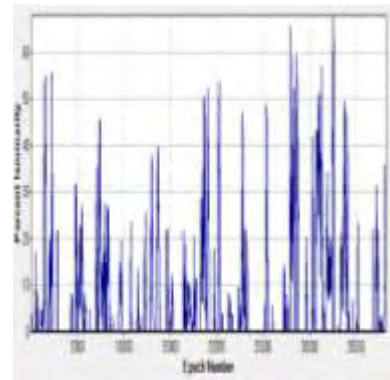
Γράφημα 3.5 Γράφημα επαναφοράς χρονοσειράς γωνίας ανέμου των ελαχίστων τιμών (A1min).



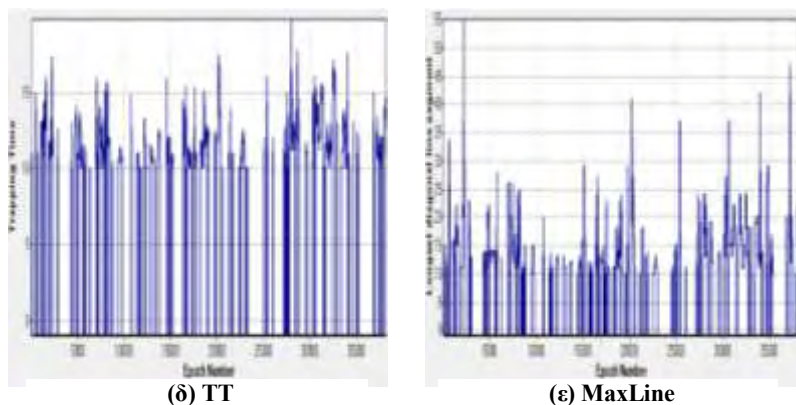
(α) %REC



(β) %DET



(γ) %LAM



**Σχ.3.5 Χρονοσειρά γωνίας ανέμου του ελαχίστου (A1min). Διαγράμματα μεθόδου ποσοτικής ανάλυσης επαναφοράς: (α) %REC - ποσοστό επαναφοράς, (β) %DET - ποσοστό ντετερμινισμού, (γ) %LAM - ποσοστό Laminarity, (δ) χρόνος παγίδευσης TT – Trapping Time, (ε) μέγιστη διαγώνια γραμμή Max Line.**

Από το γράφημα επαναφοράς 3.5 της χρονοσειράς γωνίας ανέμου του ελαχίστου διαπιστώνεται ότι στην αρχή και στο τέλος της χρονοσειράς εμφανίζονται αρκετά σκούρα σημεία που δείχνουν ότι τα αντίστοιχα σημεία του ανακατασκευασμένου χώρου φάσεων βρίσκονται σε πιο κοντινές αποστάσεις συγκριτικά με το κέντρο όπου επικρατούν οι ενδιάμεσες αποστάσεις μεταξύ των σημείων ενώ υπάρχουν πολλές γκρι ζώνες. Στην χρονοσειρά λοιπόν που μελετάται παρατηρούμε διαφορετική δυναμική από εκείνη της ταχύτητας ανέμου και οι περιοχές μετάβασης που διακρίνονται είναι οι 0-1000, 2500-5000, 6000-8000, 11000-12000, 13000-17000, 18000-22000, 23000-27000, γύρω από το 30000 και 33000-37000, πρέπει να αναφερθεί ωστόσο ότι οι γκρι ζώνες που εμφανίζονται στο γράφημα επαναφοράς δεν είναι περιοχές μετάβασης.

Στο σχ.3.5 δίνονται τα διαγράμματα που προέκυψαν από την μέθοδο της ποσοτικής ανάλυσης επαναφοράς το (α) αντιστοιχεί στο ποσοστό επαναφοράς, το (β) στο ποσοστό ντετερμινισμού, το (γ) στο ποσοστό Laminarity, το (δ) είναι η μέγιστη διαγώνιος γραμμή Maxline και το (ε) χρόνος παγίδευσης 'Trapping Time'. Στη περιοχή μετάβασης 0-1000 παρουσιάζεται χαμηλό ποσοστό ντετερμινισμού και ποσοστό Laminarity σύμφωνα με τα διαγράμματα (β) και (γ) στο σχ.3.4. Αυτό συνεπάγεται με την ύπαρξη πολλών επαναλαμβανόμενων σημείων σε αυτή τη περιοχή τους συστήματος. Επιπλέον στο σχ.3.5(ε) η μέγιστη διαγώνιος γραμμή

εμφανίζεται υψηλότερη στο κέντρο αυτού του διαστήματος, συνεπώς το σύστημα είναι πιο σταθερό.

Η επόμενη περιοχή μετάβασης όπως αναφέρθηκε και παραπάνω είναι στο διάστημα 2500-5000. Σύμφωνα με το γράφημα 3.5 πριν το 5000 είναι έντονες οι πορτοκαλί κουκίδες που σημαίνει ότι το σύστημα έχει σημεία που βρίσκονται σε ενδιάμεσες αποστάσεις μεταξύ τους, ενώ στο κέντρο του διαστήματος επικρατούν περισσότερες σκούρες ζώνες. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει στο σχ.3.5(β) το ποσοστό ντετερμινισμού όπου διακρίνεται η ντετερμινιστική συμπεριφορά του συστήματος στην αρχή αυτής της περιοχής. Επιπλέον από το διάγραμμα της Maxline βλέπουμε ότι πριν το 5000 μειώνεται συγκριτικά για αυτή την περιοχή.

Στην συνέχεια στο όρια του διαστήματος 6000-8000 παρουσιάζονται απότομες αλλαγές στην δυναμική του συστήματος ενώ στο κέντρο σύμφωνα με το αντίστοιχο γράφημα επαναφοράς τα σημεία βρίσκονται σχετικά πιο κοντά. Διακρίνεται η ύπαρξη ντετερμινιστικών δομών ιδιαίτερα γύρω στο 7000 σύμφωνα με το σχ.3.5(β) και επίσης ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι ο χρόνος παγίδευσης μηδενίζεται σε αρκετά σημεία της περιοχής (σχ.3.5(δ)). Για το διάστημα 11000-12000 βλέπουμε ότι υπάρχουν κυρίως πορτοκαλί κουκίδες συνεπώς ενδιάμεσες αποστάσεις μεταξύ των σημείων. Για αυτή την μικρή περιοχή μετάβασης είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι παρουσιάζει μικρό ποσοστό ντετερμινισμού.

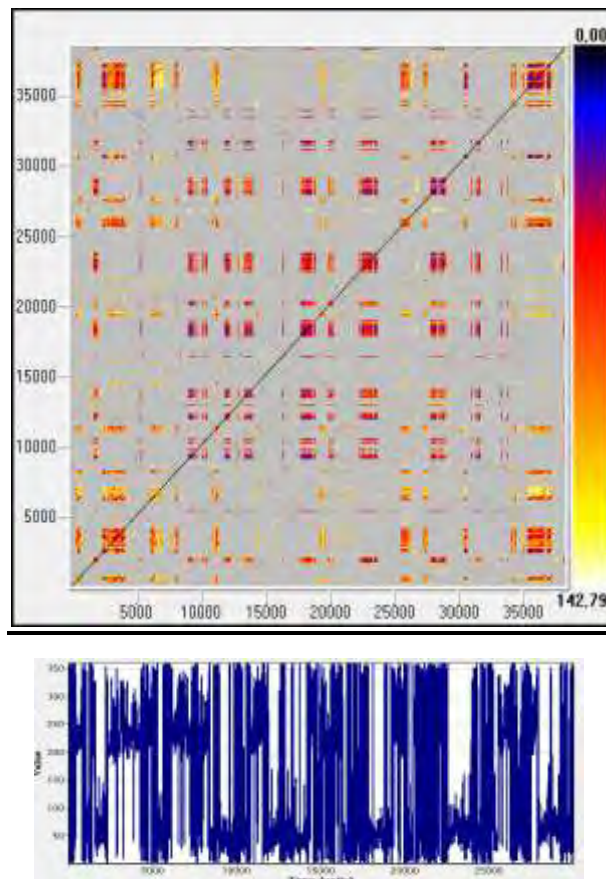
Η περιοχή μετάβασης 13000-17000 εμφανίζει σχετικά από τα υψηλά ποσοστά Laminarity συγκριτικά με όλη την εξέλιξη της χρονοσειράς. Ενώ το σύστημα φαίνεται να είναι πιο σταθερό γύρω στο 15000 και στο 17000 όπως διαπιστώνεται από το διάγραμμα της Maxline όπου για αυτό το διάστημα είναι μέγιστη σε αυτά τα σημεία. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν επίσης και οι περιοχές μετάβασης 18000-22000 και 23000-27000. Γύρω στο 20000 η ντετερμινιστική συμπεριφορά είναι εμφανής από το σχ.3.5(β) και το υψηλό ποσοστό ντετερμινισμού και το σύστημα είναι πιο σταθερό διότι από το σχ.3.5(ε) διότι διαγώνιος γραμμή είναι μέγιστη για αυτή την περιοχή. Επίσης παρόμοια συμπεριφορά έχουμε μετά το 25000. Επιπλέον γύρω από το 30000 σύμφωνα με τα διαγράμματα (β) και (γ) στο σχ.3.5 έχουμε υψηλό ποσοστό ντετερμινισμού και υψηλό ποσοστό Laminarity. Τέλος στα όρια της περιοχής μετάβασης 33000-37000 το σύστημα είναι λιγότερο σταθερό (σχ.3.5(ε)) ενώ

παρουσιάζονται περισσότερα επαναλαμβανόμενα σημεία όπως μπορούμε να διαπιστώσουμε από το σχ.3.5(γ) και τα χαμηλά ποσοστά Laminaity.

Επίσης δεδομένου ότι δεν είναι ορατές στο γράφημα επαναφοράς διαγώνιες, κάθετες ή οριζόντιες γραμμές από τις οποίες θα μπορούσαμε να πάρουμε κάποια αποτελέσματα όσον αφορά την συμπεριφορά του συστήματος.

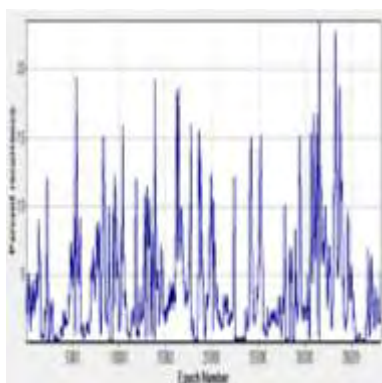
### 3.1.2.2 Χρονοσειρά Μεγίστων Τιμών Γωνίας Ανέμου

Για την μελέτη της χρονοσειράς των μεγίστων τιμών της γωνίας του ανέμου επιλέχθηκε χρονική υστέρηση ίση με 53 και ακτίνα αποκοπής 20.

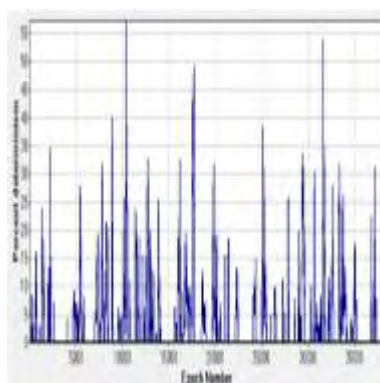


Γράφημα 3.6 Γράφημα επαναφοράς χρονοσειράς γωνίας ανέμου των μεγίστων τιμών (A1max).

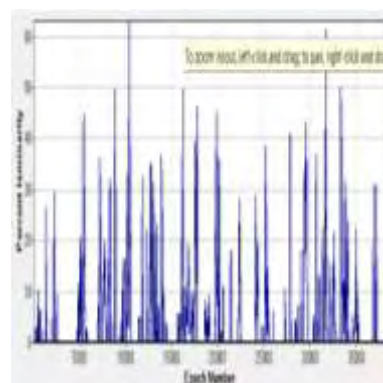




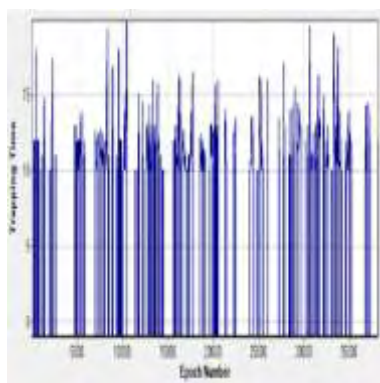
(α) %REC



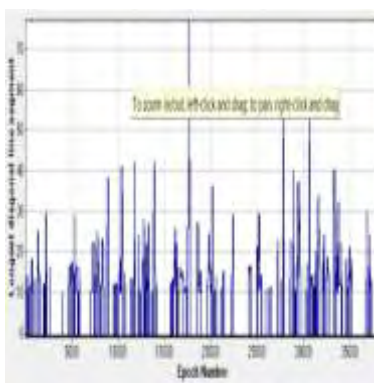
(β) %DET



(γ) %LAM



(δ) TT



(ε) MaxLine

**Σχ.3.6 Χρονοσειρά γωνίας ανέμου του μεγίστου ( $A1_{max}$ ). Διαγράμματα μεθόδου ποσοτικής ανάλυσης επαναφοράς: (α) %REC - ποσοστό επαναφοράς, (β) %DET - ποσοστό ντετερμινισμού, (γ) %LAM - ποσοστό Laminarity, (δ) χρόνο παγίδευσης TT – Trapping Time, (ε) μέγιστη διαγώνια γραμμή Max Line.**

Το γράφημα επαναφοράς 3.6 της χρονοσειράς του μεγίστου της γωνίας ανέμου παρατηρούμε ότι δεν διαφέρει πολύ από αυτό της προηγούμενης χρονοσειράς του μεγέθους και οι περιοχές μετάβασης που παρατηρούνται και θα μελετηθούν είναι ίδιες. Στο διάγραμμα (β) στο σχ.3.5 δίνεται το ποσοστό ντετερμινισμού που συνεπάγεται όπως έχει αναφερθεί, με το κατά πόσο υπάρχουν επαναλαμβανόμενες ή ντετερμινιστικές δομές στην δυναμική του συστήματος. Παρατηρείται λοιπόν η ύπαρξη υψηλού ποσοστού στα 11000, 18000, 33000 που ανήκουν αντίστοιχα στις περιοχές μετάβασης 11000-12000, 18000-22000 και 33000-37000. Γενικότερα όμως μπορούμε να πούμε ότι τα ποσοστά είναι υψηλά.

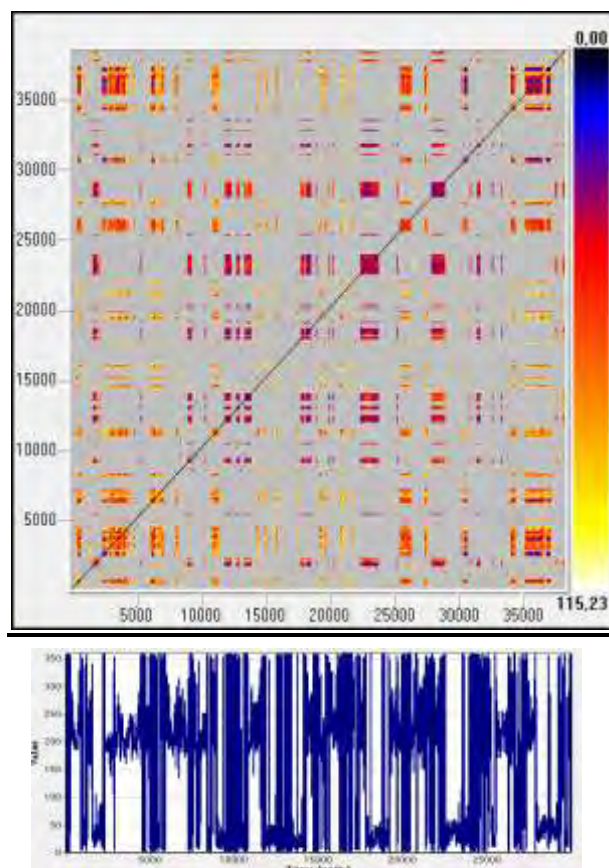


Όσο μικρότερη είναι η τιμή του ποσοστού Laminarity τόσο περισσότερα επαναλαμβανόμενα σημεία υπάρχουν στο σύστημα. Στο σχ.3.6(γ) που δίνει ακριβώς αυτό το ποσοστό διακρίνονται μερικές περιοχές που εμφανίζουν χαμηλό ποσοστό, γενικότερα όμως επικρατούν μεγαλύτερες τιμές. Όπως διαπιστώνεται και από το γράφημα επαναφοράς κυρίως στις περιοχές μετάβασης που βρίσκονται στο κέντρο της εξέλιξης της χρονοσειράς τα σημεία βρίσκονται σε πιο κοντινές αποστάσεις μεταξύ τους, διότι όπως φαίνεται επικρατούν κυρίως πιο σκουρόχρωμες ζώνες.

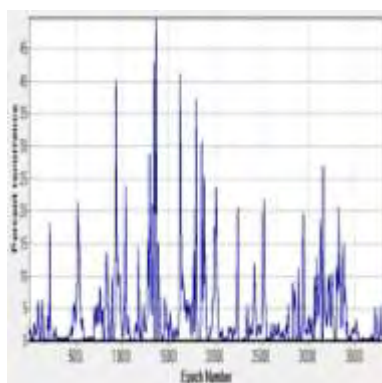
Στο σχ.3.(δ) βλέπουμε ότι ο μέσος χρόνος που μένει το σύστημα σε μία δεδομένη κατάσταση παίρνει υψηλές τιμές ενώ συγχρόνως μηδενίζεται πολλές φορές. Τέλος το σύστημα εμφανίζεται περισσότερο σταθερό κυρίως στην αρχή της περιοχής μετάβασης 18000-22000 σε πολλά σημεία όπως διακρίνουμε από το σχ.3.6(ε) η Maxline είναι σχετικά υψηλή ενώ υπάρχουν και περιοχές γύρω στο 27000 όπου η μέγιστη διαγώνιος παίρνει μικρότερη τιμή. Γενικότερα στην αρχή της χρονοσειρά και στο τέλος η συμπεριφορά είναι ελαφρώς χαοτική.

### **3.1.2.3 Χρονοσειρά Τιμών Μέσου Όρου Γωνίας Ανέμου**

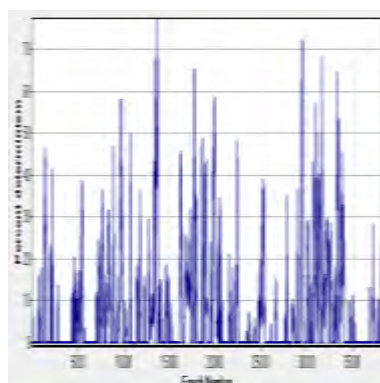
Η επόμενη χρονοσειρά γωνίας ανέμου που αναλύθηκε με την μέθοδο της ποσοτικής ανάλυσης επαναφοράς είναι η χρονοσειρά των τιμών του μέσου όρου, για την οποία επιλέχθηκε τιμή υστέρησης 41 και ακτίνα αποκοπής 15. Τα αποτελέσματα δίνονται παρακάτω.



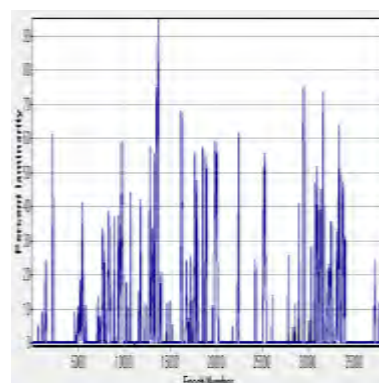
Γράφημα 3.7 Γράφημα επαναφοράς χρονοσειράς γωνίας ανέμου τιμών μέσου όρου (Α1αν).



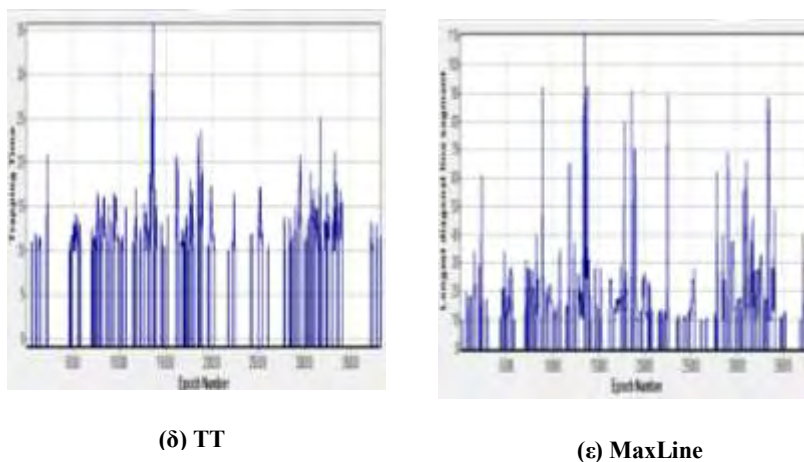
(α) %REC



(β) %DET



(γ) %LAM



**Σχ.3.7 Χρονοσειρά γωνίας ανέμου του μέσου όρου (A1av). Διαγράμματα μεθόδου ποσοτικής ανάλυσης επαναφοράς: (α) %REC - ποσοστό επαναφοράς, (β) %DET - ποσοστό ντετερμινισμού, (γ) %LAM - ποσοστό Laminarity, (δ) χρόνο παγίδευσης TT – Trapping Time, (ε) μέγιστη διαγώνια γραμμή Max Line.**

Το γράφημα 3.7 δεν διαφέρει πολύ από τα προηγούμενα γραφήματα, του μεγέθους της γωνίας ανέμου, που αναλύθηκαν. Οι περιοχές μετάβασης που διακρίνονται είναι επίσης οι 0-1000, 2500-5000, 6000-8000, 11000-12000, 13000-17000, 18000-22000, 23000-27000, γύρω από το 30000 και 33000-37000. Ειδικότερα για τις περιοχές 0-1000, 2500-5000, 6000-8000 και 11000-12000 βλέπουμε από το γράφημα επαναφοράς ότι υπάρχουν κουκίδες με κίτρινο και πορτοκαλί χρώμα (μεγάλες και ενδιάμεσες αποστάσεις αντίστοιχα), δηλαδή επικρατεί εναλλαγή στην δυναμική του συστήματος.

Το σύστημα παρουσιάζει ιδιαίτερα έντονη ντετερμινιστική συμπεριφορά σε περιοχές γύρω από το 13000, 18000 και πριν το 30000 όπως είναι εμφανές στο διάγραμμα (β) του σχ.3.7, που δίνει το ποσοστό ντετερμινισμού. Επίσης γενικότερα παρατηρούνται υψηλά ποσοστά (αυτά που αναφέρθηκαν προηγουμένως είναι τα υψηλότερα), ωστόσο η συνολική εικόνα δηλώνει ότι υπάρχει καλή προβλεψιμότητα για το σύνολο της χρονοσειράς του μέσου όρου της γωνίας ανέμου.

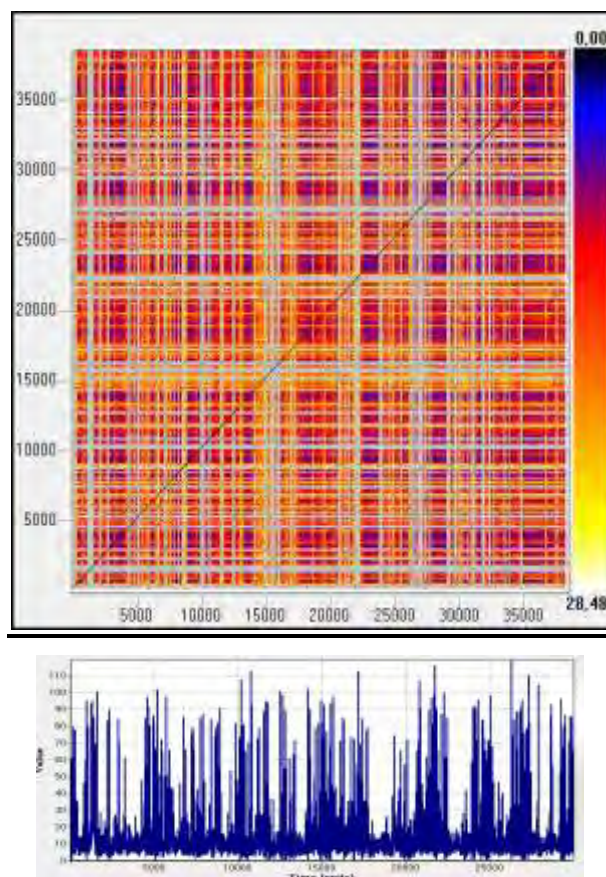
Πολλά είναι επίσης τα επαναλαμβανόμενα σημεία, τα οποία εμφανίζονται στην αρχή της πρώτης περιοχής μετάβασης 0-1000 καθώς και γύρω στο 16000 στην αντίστοιχη περιοχή στην οποία ανήκει (13000-17000), όπου το ποσοστό Laminarity είναι χαμηλότερο (σχ.3.7(γ)). Συνολικά υψηλότερα ποσοστά εμφανίζουν οι περιοχές μετάβασης 6000-8000, 13000-17000, γύρω στο 30000 και 33000-37000.

Ο χρόνος παγίδευσης δίνεται στο διάγραμμα (δ), όπου ενδιαφέρον παρουσιάζεται στο διάστημα 13000-17000 όπου το σύστημα μένει σε μία δεδομένη κατάσταση για περισσότερο χρόνο. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω παρουσιάζει πολλά επαναλαμβανόμενα σημεία σε αυτή την περιοχή ιδιαίτερα γύρω στο 13500. Επιπλέον εκτός του ότι γενικότερα ο μέγιστη τιμή του μέσου χρόνου που μένει το σύστημα στην δεδομένη κατάσταση κάθε στιγμή είναι σχεδόν σταθερή σε όλες τις περιοχές μετάβασης, με μικρές διακυμάνσεις, πολλές φορές ωστόσο ο χρόνος παγίδευσης μηδενίζεται.

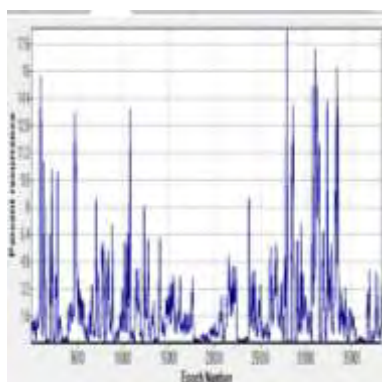
Τέλος πολλά είναι και τα συμπεράσματα που μπορούν να προκύψουν από τη μέγιστη γραμμή που δίνεται στο σχ.3.7(ε). Το μέγεθος της δείχνει κατά πόσο το σύστημα που μελετάται παρουσιάζει χαοτική συμπεριφορά και συνεπώς είναι λιγότερο σταθερό. Προκύπτει λοιπόν ότι οι περιοχές 0-1000, 2500-5000, 6000-8000, γύρω από το 17000, γύρω από το 2000, γύρω από το 25000 και 35000 εμφανίζουν μικρότερη τιμή για την Maxline, σε όλο το σύνολο της χρονοσειράς, που σημαίνει ότι γύρω από αυτές τις περιοχές το σύστημα είναι λιγότερο σταθερό.

#### **3.1.2.4 Χρονοσειρά Τιμών Τυπικής Απόκλισης Γωνίας Ανέμου**

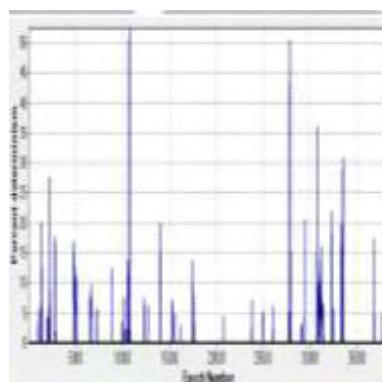
Η τελευταία χρονοσειρά που ανήκει στο μέγεθος της γωνίας ανέμου είναι η χρονοσειρά της τυπικής απόκλισης. Με την βοήθεια της μεθόδου της ποσοτικής ανάλυσης προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα, για τα οποία έγινε αρχικά η εκτίμηση της χρονικής τιμής και της ακτίνας αποκοπής και επιλέχθηκαν οι τιμές 39 και 20 αντίστοιχα.



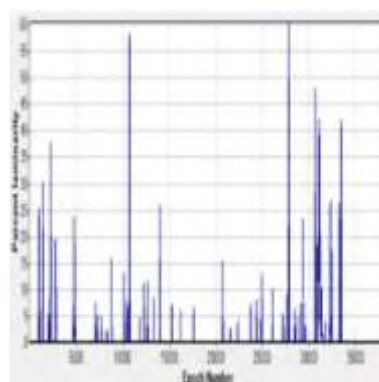
Γράφημα 3.8 Γράφημα επαναφοράς χρονοσειράς γωνίας ανέμου της τυπικής απόκλισης (A1sdv).



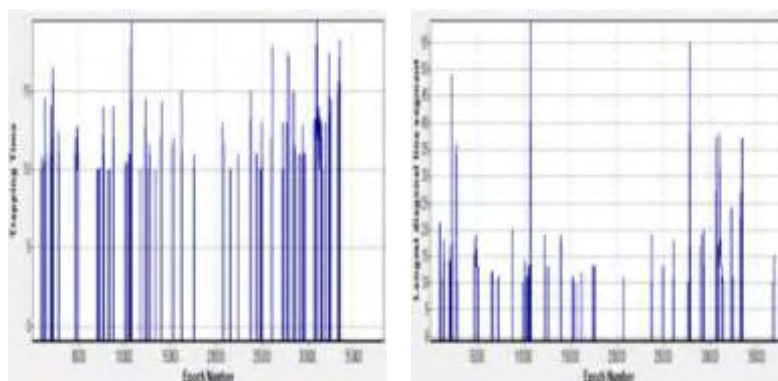
(α) %REC



(β) %DET



(γ) %LAM



(δ) TT

(ε) MaxLine

**Σχ.3.8 Χρονοσειρά γωνίας ανέμου της τυπικής απόκλισης (A1sdv). Διαγράμματα μεθόδου ποσοτικής ανάλυσης επαναφοράς: (α) %REC - ποσοστό επαναφοράς, (β) %DET - ποσοστό ντετερμινισμού, (γ) %LAM - ποσοστό Laminarity, (δ) χρόνο παγίδευσης TT – Trapping Time, (ε) μέγιστη διαγώνια γραμμή Max Line.**

Το γράφημα 3.8 που ανήκει στην χρονοσειρά γωνίας ανέμου της τυπικής απόκλισης είναι διαφορετικό από τα προηγούμενα γραφήματα επαναφοράς του μεγέθους. Επικρατούν έντονες εναλλαγές στην δυναμική του συστήματος. Το γράφημα στο σύνολό του αποτελείται τόσο από ενδιάμεσες και μεγάλες αποστάσεις μεταξύ των σημείων όσο και από σημεία που βρίσκονται πιο κοντά μεταξύ τους, δεδομένου ότι υπάρχουν αρκετές κίτρινες, πορτοκαλί και μπλε κουκίδες που εναλλάσσονται κατά την εξέλιξη του συστήματος. Ωστόσο είναι εμφανής και οι γκρι ζώνες που υπενθυμίζεται ότι δεν ανήκουν σε περιοχές μετάβασης του συστήματος. Λαμβάνοντας υπόψη τη συμπεριφορά του συστήματος γύρω από την κύρια διαγώνιο από το γράφημα επαναφορά, μπορούμε να διακρίνουμε επίσης και σε αυτή τη χρονοσειρά τις ίδιες περιοχές μετάβασης με τις προηγούμενες χρονοσειρές του μεγέθους.

Ο συνδυασμός λοιπόν του γραφήματος και των διαγραμμάτων που προέκυψαν από την ανάλυση της χρονοσειράς με την προαναφερθείσα μέθοδο, μας δίνουν τα ακόλουθα συμπεράσματα, που αφορούν στην δυναμική συμπεριφορά του συστήματος. Προκύπτει λοιπόν από το σχ.3.8(β), που αναφέρεται στην ντετερμινιστική συμπεριφορά του συστήματος, ότι παρουσιάζονται χαμηλά ποσοστά ντετερμινισμού σχεδόν σε όλες τις περιοχές μετάβασης. Ιδιαίτερα για τις περιοχές 11000-12000, 13000-17000 και 18000-22000 τα ποσοστά συγκριτικά με τις άλλες

περιοχές είναι χαμηλά και φθάνει στο 5%. Σχεδόν παρόμοια είναι και η μορφή του διαγράμματος που δίνει το ποσοστό Laminarity, όπου για τις περιοχές που αναφέρθηκαν παραπάνω τα υψηλά ποσοστά στο σχ.3.8(γ) έχουν ως αποτέλεσμα να έχουμε λιγότερα επαναλαμβανόμενα σημεία.

Στο διάγραμμα (δ) που δίνεται ο χρόνος παγίδευσης παρατηρούμε ότι τα μέγιστα παρουσιάζονται επίσης στις ίδιες περιοχές που προκάλεσαν το ενδιαφέρον παραπάνω. Ωστόσο διακρίνεται ότι δεν απέχουν πολύ οι μέγιστες τιμές μεταξύ τους για κάθε περιοχή μετάβασης ενώ πρέπει να αναφερθεί ότι μηδενίζεται πολλές φορές κατά την εξέλιξη της χρονοσειράς. Τέλος η μέγιστη διαγώνιος γραμμή που δίνεται από το διάγραμμα (ε) στο σχ.3.8 παρουσιάζει γενικότερα χαμηλές τιμές, που συνεπάγεται με χαοτική συμπεριφορά στο σύστημα. Οι μοναδικές περιοχές στις οποίες το σύστημα φαίνεται να είναι πιο σταθερό είναι γύρω από το 2500, το 11000, 26000 και γύρω από το 33000. Δεδομένου ότι οι περιοχές στις οποίες το σύστημα είναι πιο σταθερό είναι λίγες μπορούμε να πούμε ότι η χρονοσειρά στο μεγαλύτερο μέρος κατά την εξέλιξη της παρουσιάζει χαοτική συμπεριφορά.



## 3.2 Ανάλυση Χρονοσειρών Προσομοίωσης

Οι χρονοσειρές που θα αναλυθούν σε αυτό το κεφάλαιο με την βοήθεια της μεθόδου της ποσοτικής ανάλυσης επαναφοράς αφορούν σε χρονοσειρές προσομοίωσης ταχύτητας ανέμου σε λόφο. Η πρώτη ομάδα των χρονοσειρών σχετίζεται με την ταχύτητα ανόδου του ανέμου σε λόφο και η δεύτερη με την ταχύτητα καθόδου αντίστοιχα. Σε αυτές τις χρονοσειρές γνωρίζουμε τις αντίστοιχες συνιστώσες της ταχύτητας του ανέμου στον χώρο, οι οποίες μελετώνται και είναι η συνιστώσα στον άξονα  $x$ , η συνιστώσα στον άξονα  $y$  και η συνιστώσα στον άξονα  $z$ . Από τις συνιστώσες προέκυψε το μέτρο της ταχύτητας λαμβάνοντας υπόψη αρχικά όλες τις συνιστώσες και κατόπιν μόνο τις δύο πρώτες. Στην συνέχεια μελετήθηκε η γωνία της ταχύτητας αντίστοιχα με το μέτρο. Συνεπώς για την ταχύτητα ανόδου και καθόδου του ανέμου προέκυψε η ανάλυση εφτά χρονοσειρών για κάθε περίπτωση.

Συνοψίζοντας οι χρονοσειρές προσομοίωσης ταχύτητας ανέμου σε λόφο που θα αναλυθούν παρακάτω είναι η χρονοσειρά για την συνιστώσα της ταχύτητας στον άξονα  $x$ , για τη συνιστώσα στον άξονα  $y$ , για τη συνιστώσα στον άξονα  $z$ , το μέτρο της ταχύτητας λαμβάνοντας υπόψη όλες τις συνιστώσες και αντίστοιχα την γωνία της ταχύτητας τους ανέμου και τέλος το μέτρο της ταχύτητας λαμβάνοντας υπόψη μόνο τις δύο πρώτες συνιστώσες και αντίστοιχα την γωνία της. Αυτές οι χρονοσειρές χωριστά για την ταχύτητα ανόδου και καθόδου. Επιπλέον σε αυτές τις χρονοσειρές για την ανάλυση κατά διαστήματα (epoch analysis) επιλέχθηκαν 50 στιγμές

### 3.2.1 Χρονοσειρές Ταχύτητας Ανέμου Ανόδου σε Λόφο

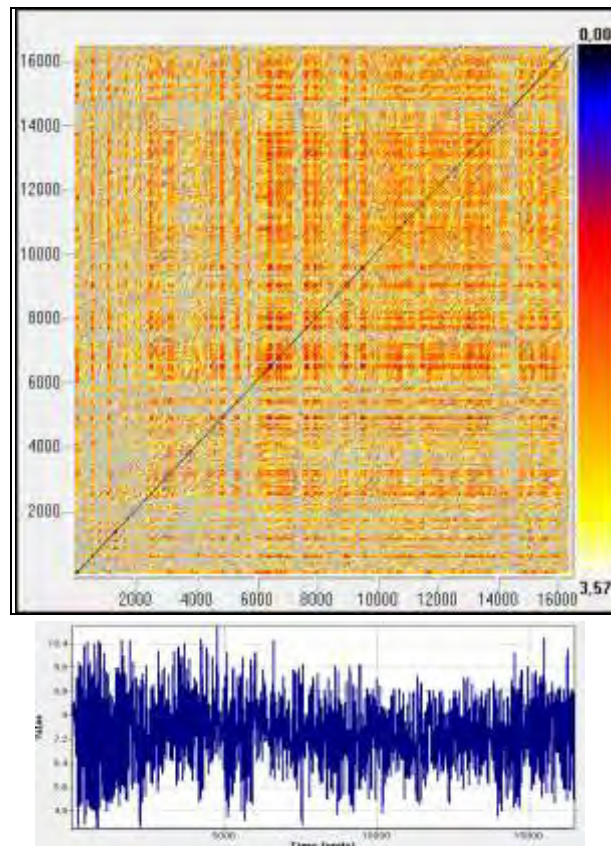
Οι χρονοσειρές ταχύτητας ανόδου σε λόφο που θα μελετηθούν παρακάτω όπως έχει ήδη αναφερθεί είναι η χρονοσειρά για την συνιστώσα της ταχύτητας στον άξονα  $x$ , για τη συνιστώσα στον άξονα  $y$ , για τη συνιστώσα στον άξονα  $z$ , το μέτρο της ταχύτητας λαμβάνοντας υπόψη όλες τις συνιστώσες και αντίστοιχα την γωνία της ταχύτητας και τέλος το μέτρο της ταχύτητας λαμβάνοντας υπόψη μόνο τις δύο



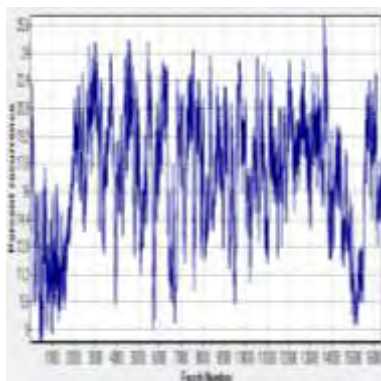
πρώτες συνιστώσες και αντίστοιχα την γωνία της. Τέλος πρέπει να αναφερθεί ότι οι χρονοσειρές ανόδου αποτελούνται από 16504 μετρήσεις.

### **3.2.1.1 Ταχύτητα Ανέμου στον Άξονα x**

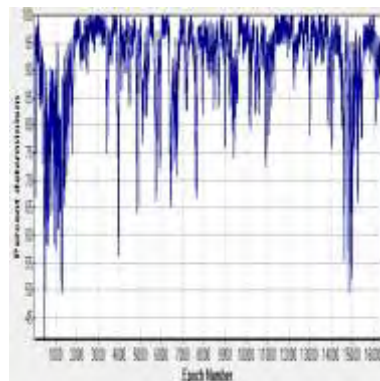
Προκειμένου να διεξαχθούν συμπεράσματα για την δυναμική συμπεριφορά των χρονοσειρών προσομοίωσης ακολουθήθηκε επίσης η ίδια διαδικασία με αυτή των χρονοσειρών πεδίου. Αρχικά για την ανακατασκευή του χώρου των φάσεων έγινε εκτίμηση της παραμέτρου της χρονικής υστέρησης με την βοήθεια της μεθόδου της Μέσης Αμοιβαίας Πληροφορίας και πήρε την τιμή 20 στην συνέχεια επιλέχθηκε ακτίνα αποκοπής ίση με 45 προκειμένου να επιτευχθεί το καλύτερο ποσοστό σημείων επαναφοράς. Παρακάτω δίνονται το γράφημα επαναφοράς καθώς και τα διαγράμματα για την συνιστώσα της ταχύτητας του ανέμου στον άξονα x όπως αυτά προέκυψαν από την μέθοδο ποσοτικής ανάλυσης επαναφοράς



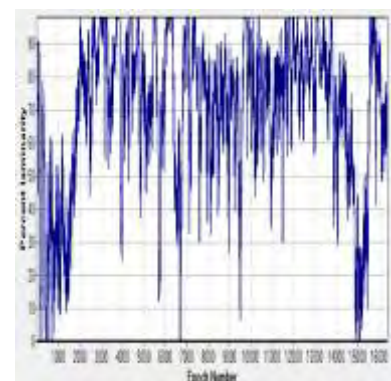
**Γράφημα 3.9 Γράφημα επαναφοράς χρονοσειράς προσομοίωσης ταχύτητας ανέμου σε λόφο. Χρονοσειρά συνιστώσας ταχύτητας ανέμου στον άξονα x.**



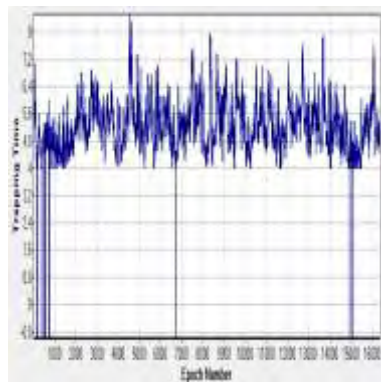
**(α) %REC**



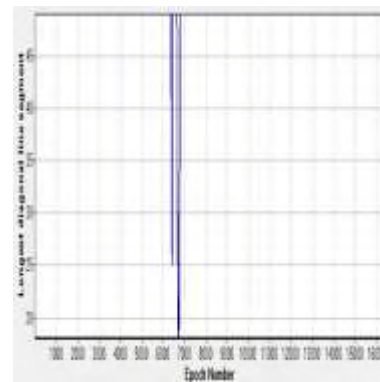
**(β) %DET**



**(γ) %LAM**



(δ) TT



(ε) MaxLine

**Σχ.3.9 Χρονοσειρά συνιστώσας ταχύτητας ανέμου στον άξονα x. Διαγράμματα μεθόδου ποσοτικής ανάλυσης επαναφοράς: (α) %REC - ποσοστό επαναφοράς, (β) %DET - ποσοστό ντετερμινισμού, (γ) %LAM - ποσοστό Laminarity, (δ) χρόνο παγίδευσης TT – Trapping Time, (ε) μέγιστη διαγώνια γραμμή Max Line.**

Με την βοήθεια του γραφήματος επαναφοράς και των διαγραμμάτων προκύπτουν οι περιοχές μετάβασης 0-2000, 2000-6000, 6000-8000, 8000-14000 και 14000 έως τέλος. Γενικότερα στο γράφημα 3.9 διακρίνονται περισσότερες ανοιχτόχρωμες ζώνες από τις οποίες συμπεραίνουμε την ύπαρξη απότομης αλλαγής στην δυναμική του συστήματος (ιδιαίτερα στο διάστημα 0-6000). Κατόπιν υπάρχουν λιγότερες πορτοκαλί κουκίδες από τις οποίες προκύπτει ότι υπάρχουν σημεία σε ενδιάμεσες αποστάσεις μεταξύ τους. Στην περιοχή μετάβασης 0-2000 κυριαρχεί η απότομη αλλαγή στην δυναμική του συστήματος. Σύμφωνα με το αντίστοιχο διάγραμμα (β) στο σχ.3.9 στην αρχή και στο τέλος αυτής της περιοχής το ποσοστό ντετερμινισμού είναι ιδιαίτερα υψηλό ενώ στο κέντρο μειώνεται. Το ποσοστό Laminarity στο σχ.3.9(γ) είναι υψηλό και όσο εξελίσσεται η χρονοσειρά σε αυτή την περιοχή μειώνεται και μηδενίζεται όπως είναι εμφανές γύρω από το 500. Ο μέσος χρόνος που μένει στη δεδομένη κατάσταση στο σύστημα αρχικά είναι μικρός ώσπου μηδενίζεται ενώ προς το τέλος της χρονοσειράς σταθεροποιείται σε μία τιμή (σχ.3.9(δ)). Επιπλέον είναι σημαντική η απουσία της Maxline.

Η επόμενη περιοχή μετάβασης 2000-6000 παρουσιάζει έντονη ντετερμινιστική συμπεριφορά όπως φαίνεται και στο σχ.3.9(β), ιδιαίτερα στην αρχή. Ενδιαφέρον είναι το γεγονός ότι το ποσοστό ντετερμινισμού μπορεί να μειώνεται μέσα στην περιοχή

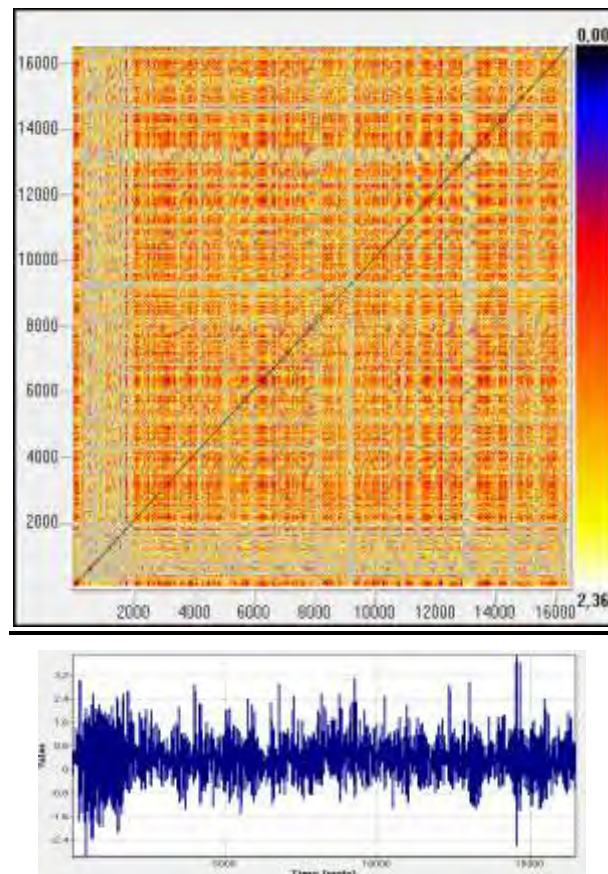
μετάβασης αλλά δεν μηδενίζεται. Επίσης υπάρχουν λίγα επαναλαμβανόμενα σημεία στο σύστημα σύμφωνα με το υψηλό ποσοστό Laminarity του αντίστοιχου διαγράμματος (γ) τα οποία στην συνέχεια αυξάνονται καθώς μειώνεται το ποσοστό. Στο σχ.3.9(δ) ο χρόνος παγίδευσης είναι σταθερός.

Ακολουθεί η περιοχή 6000-8000 στο κέντρο της οποίας υπάρχουν λίγα από τα σημεία, που εμφανίζονται γενικότερα κατά την εξέλιξη της χρονοσειράς, που βρίσκονται σε ενδιάμεσες αποστάσεις μεταξύ του. Επίσης εδώ είναι έντονη η ντετερμινιστική συμπεριφορά του συστήματος (υψηλά ποσοστά ντετερμινισμού) όπως διακρίνουμε στο διάγραμμα (β). Ενδιαφέρον είναι το γεγονός ότι στο διάγραμμα όπου παρουσιάζεται το ποσοστό Laminarity εμφανίζονται ελάχιστα γύρω από το 5800 και γύρω από το 6800 εκεί έχουμε τα περισσότερα επαναλαμβανόμενα σημεία. Σε αυτή τη περιοχή μετάβασης έχουμε την εμφάνιση της μέγιστης διαγωνίου γραμμής γύρω από το 6800 όπου μηδενίζεται, γεγονός που αποδεικνύει την ύπαρξη χαοτικής συμπεριφοράς, κάτι που δεν εμφανίζεται καθόλου σε όλη την διάρκεια που η χρονοσειρά εκτελείται.

Στις δύο τελευταίες περιοχές μετάβασης που επιλέχθηκαν παρατηρούνται υψηλά ποσοστά ντετερμινισμού στο σχ.3.9(β) με εξαίρεση λίγο πριν από το 15000 που σημειώνεται μείωση του ποσοστού. Επίσης όπως διακρίνουμε από το διάγραμμα (γ) στο σχ.3.9 εμφανίζονται περισσότερα επαναλαμβανόμενα σημεία στην περιοχή γύρω από το 15000. Τέλος το σύστημα παραμένει παγιδευμένο σε μία περιοχή δεδομένου ότι ο χρόνος παγίδευσης είναι σχεδόν σταθερός σε μία τιμή και μηδενίζεται μόνο γύρω από το 1500. Επιπλέον η ύπαρξη παράλληλων διαγώνιων γραμμών, ιδιαίτερα κατά το δεύτερο μισό της χρονοσειράς, με μεγάλο μήκος υποδηλώνουν την ύπαρξη περιοδικού σήματος. Συνεπώς εν κατακλείδι μπορούμε να πούμε ότι η χρονοσειρά στο σύνολό της παρουσιάζει περισσότερο συμπεριφορά 'Laminar' και περιοδικό σήμα.

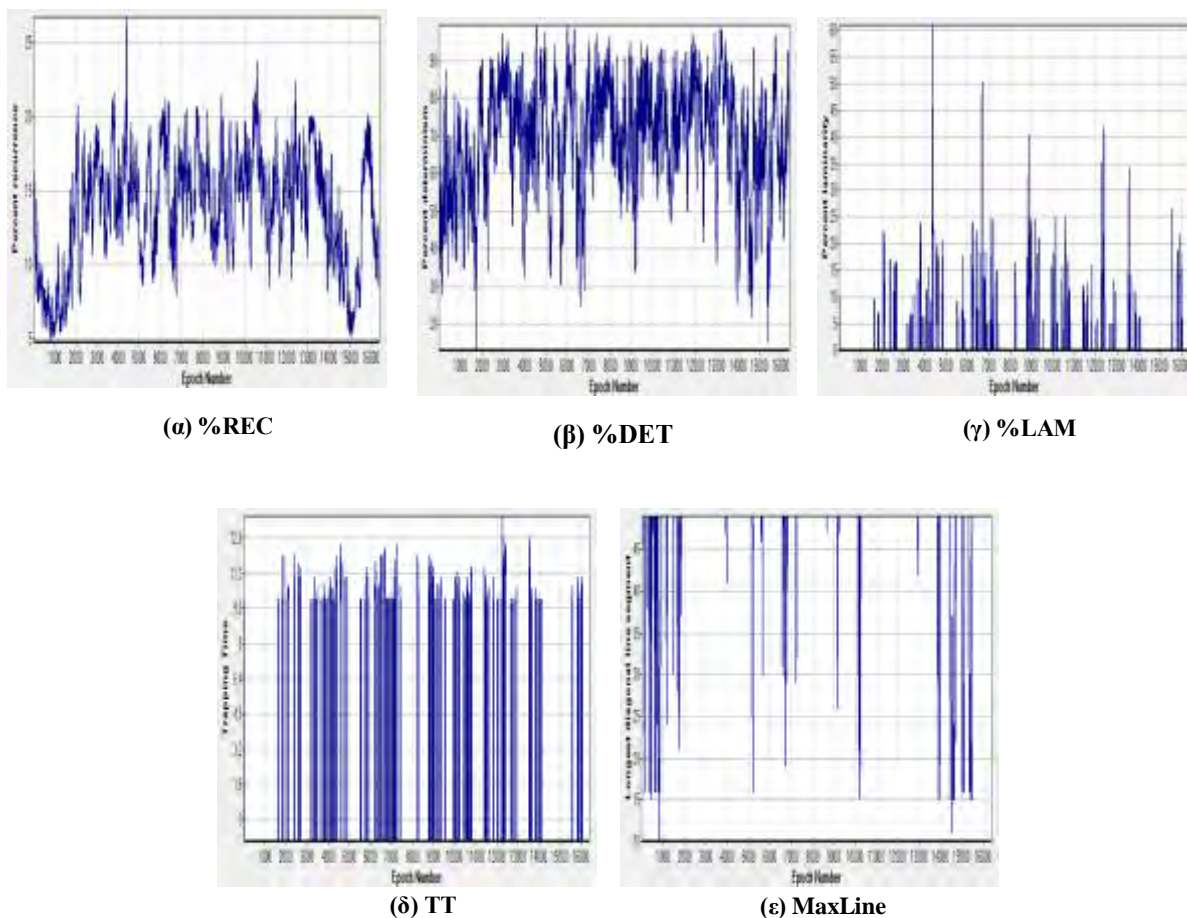
### 3.2.1.2 Ταχύτητα Ανέμου στον Άξονα y

Για την χρονοσειρά της συνιστώσας της ταχύτητας ανέμου στον άξονα y επιλέχθηκε τιμή υστέρησης 17 και ακτίνα αποκοπής 40. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την μέθοδο της ποσοτικής ανάλυσης επαναφοράς δίνονται παρακάτω.



**Γράφημα 3.10 Γράφημα επαναφοράς χρονοσειράς προσομοίωσης ταχύτητας ανόδου του ανέμου σε λόφο. Χρονοσειρά συνιστώσας ταχύτητας ανέμου στον άξονα y.**





**Σχ.3.10 Χρονοσειρά συνιστώσας ταχύτητας ανόδου του ανέμου στον άξονα y. Διαγράμματα μεθόδου ποσοτικής ανάλυσης επαναφοράς: (α) %REC - ποσοστό επαναφοράς, (β) %DET - ποσοστό ντετερμινισμού, (γ) %LAM - ποσοστό Laminarity, (δ) χρόνο παγίδευσης TT – Trapping Time, (ε) μέγιστη διαγώνια γραμμή Max Line.**

Για την χρονοσειρά της συνιστώσας της ταχύτητας ανέμου στον άξονα y επιλέχθηκαν μεγαλύτερες περιοχές μετάβασης διότι δεν υπάρχουν ουσιαστικά μεγάλες αλλαγές στην συμπεριφορά του συστήματος. Οι περιοχές μετάβασης είναι 0-2000, 2000-9000, 9000-13000 και 13000 έως τέλος. Έντονες είναι οι λευκές ζώνες που υποδηλώνουν απότομες αλλαγές στην δυναμική του συστήματος, εμφανίζονται κυρίως κατά την πρώτη περιοχή μετάβασης κατόπιν μετά το 4000 και το 8000, γύρω από το 9000, το 13000 και το 14500.

Από το σχ.3.10(β) στο οποίο δίνεται το ποσοστό ντετερμινισμού παρατηρούμε ότι γενικότερα επικρατούν υψηλά ποσοστά. Ειδικότερα Για την χρονοσειρά της συνιστώσας της ταχύτητας ανέμου στον άξονα y επιλέχθηκε τιμή υστέρησης 17 και

ακτίνα αποκοπής 40. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την μέθοδο της ποσοτικής ανάλυσης επαναφοράς δίνονται παρακάτω.

Για την χρονοσειρά της συνιστώσας της ταχύτητας ανέμου στον άξονα y επιλέχθηκαν μεγαλύτερες περιοχές μετάβασης διότι δεν υπάρχουν ουσιαστικά μεγάλες αλλαγές στην συμπεριφορά του συστήματος. Οι περιοχές μετάβασης είναι 0-2000, 2000-9000, 9000-13000 και 13000 έως τέλος. Έντονες είναι οι λευκές ζώνες που υποδηλώνουν απότομες αλλαγές στην δυναμική του συστήματος, εμφανίζονται κυρίως κατά την πρώτη περιοχή μετάβασης κατόπιν μετά το 4000 και το 8000, γύρω από το 9000, το 13000 και το 14500.

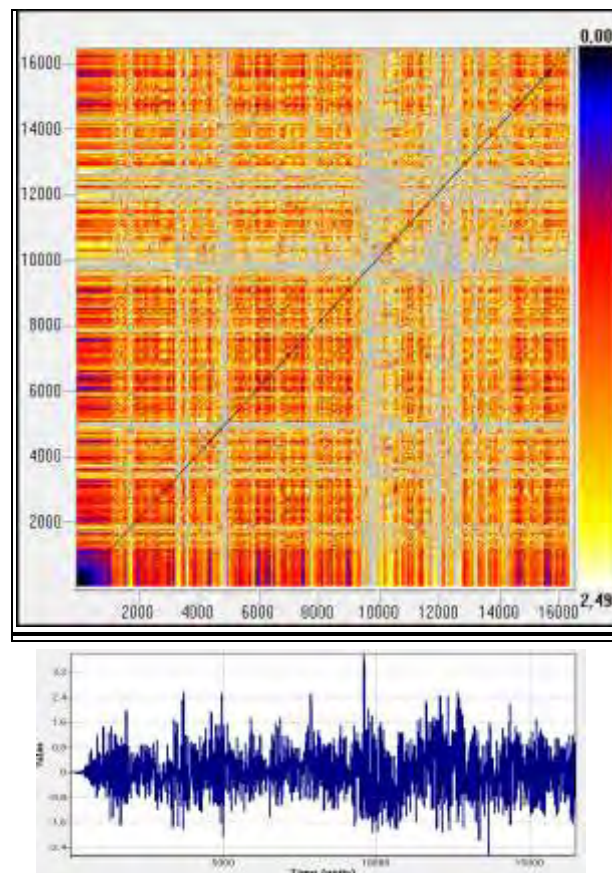
Από το σχ.3.10(β) στο οποίο δίνεται το ποσοστό ντετερμινισμού παρατηρούμε ότι γενικότερα επικρατούν υψηλά ποσοστά. Ειδικότερα παρουσιάζονται ελάχιστα κατά την πρώτη περιοχή μετάβασης γύρω από το 1900, στην τελευταία περιοχή που επιλέχθηκε ως περιοχή μετάβασης γύρω από το 14000, 14500 και 15500, όπου συνεπάγεται ότι γύρω από αυτές τις περιοχές έχουμε μικρότερη προβλεψιμότητα. Ενώ αντίθετα υψηλότερη προβλεψιμότητα παρουσιάζεται στις περιοχές μετάβασης 2000-9000 και 9000-13000.

Επιπλέον λίγα επαναλαμβανόμενα σημεία εμφανίζονται εκεί όπου το ποσοστό Laminarity παίρνει υψηλή τιμή. Αυτό σύμφωνα με το αντίστοιχο διάγραμμα (γ) στο σχ.3.10 συμβαίνει γύρω από τα 4500, 6800, 9000, 12500, 13500, 15500 ενώ αντίθετα σε όλη την υπόλοιπη χρονοσειρά (στο μεγαλύτερο μέρος της) οι τιμές του ποσοστού είναι χαμηλότερες. Η Maxline παίρνει μέγιστες τιμές κυρίως κατά τις περιοχές 0-2000 και 13000 έως τέλος, συνεπώς σε αυτές τις περιοχές το σύστημα είναι περισσότερο σταθερό.

Επιπλέον στο γράφημα επαναφοράς είναι εμφανής οι παράλληλες γραμμές στην κύρια διαγώνιο, το μήκος των οποίων υποδηλώνει την προβλεψιμότητα του συστήματος (περιοδικές καταστάσεις). Εκτός από μία έντονα γκρι ζώνη που εμφανίζεται στην αρχή της χρονοσειράς όλο το υπόλοιπο διάστημα εμφανίζει ένα περιοδικό δυναμικό σύστημα όπως προκύπτει και από την δομή 'σκακιέρας' του γραφήματος.

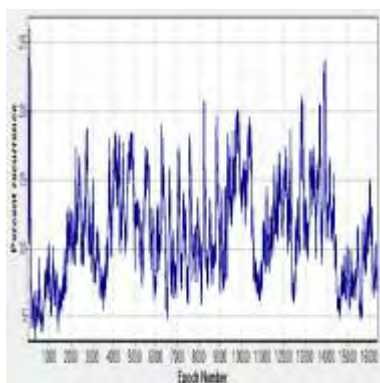
### 3.2.1.3 Ταχύτητα Ανέμου στον Άξονα z

Η επόμενη χρονοσειρά προσομοίωσης που αναλύθηκε είναι η χρονοσειρά της συνιστώσας της ταχύτητας του ανέμου στον άξονα z. Για την χρονοσειρά αυτή επιλέχθηκε τιμή υστέρησης 21 και ακτίνα αποκοπής 38 συγκριτικά χαμηλότερη από τις άλλες δύο συνιστώσες.

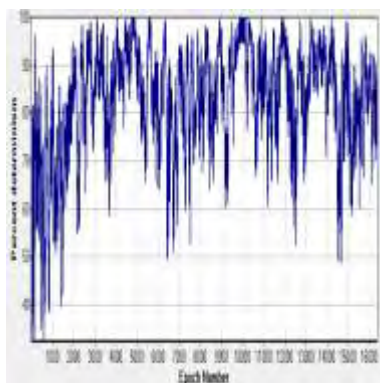


**Γράφημα 3.11 Γράφημα επαναφοράς χρονοσειράς προσομοίωσης ταχύτητας ανέμου στον άξονα z σε λόφο. Χρονοσειρά συνιστώσας ταχύτητας ανέμου στον άξονα z.**

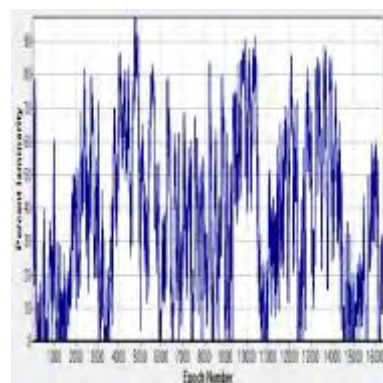




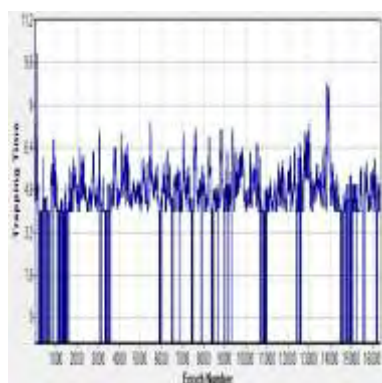
(α) %REC



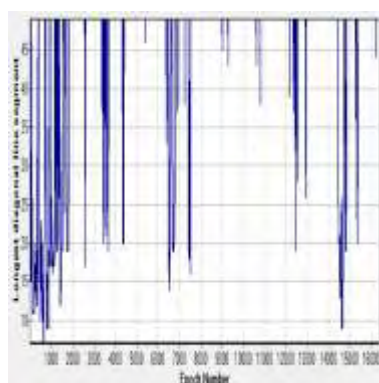
(β) %DET



(γ) %LAM



(δ) TT



(ε) MaxLine

**Σχ.3.11 Χρονοσειρά συνιστώσας ταχύτητας ανέμου στον άξονα z. Διαγράμματα μεθόδου ποσοτικής ανάλυσης επαναφοράς: (α) %REC - ποσοστό επαναφοράς, (β) %DET - ποσοστό ντετερμινισμού, (γ) %LAM - ποσοστό Laminarity, (δ) χρόνο παγίδευσης TT – Trapping Time, (ε) μέγιστη διαγώνια γραμμή Max Line.**

Στο γράφημα 3.11 διακρίνεται διαφορετική συμπεριφορά του συστήματος συγκριτικά με τις προηγούμενες δύο συνιστώσες της ταχύτητας. Υπάρχουν περισσότερες εναλλαγές στην δυναμική του συστήματος και οι περιοχές μετάβασης που διακρίνονται είναι 0-2000, 2000-5000, 5000-9500, 9500-13000 και 13000 έως τέλος. Για την περιοχή μετάβασης 0-2000 παρατηρούμε ότι στην αρχή της τα σημεία, σύμφωνα με το γράφημα, βρίσκονται σε ιδιαίτερα κοντινές αποστάσεις δεδομένου ότι εμφανίζονται σκουρόχρωμες κουκίδες. Το ποσοστό ντετερμινισμού παίρνει χαμηλές τιμές στην αρχή αυτής της περιοχής και στην συνέχεια αυξάνεται συνεπώς

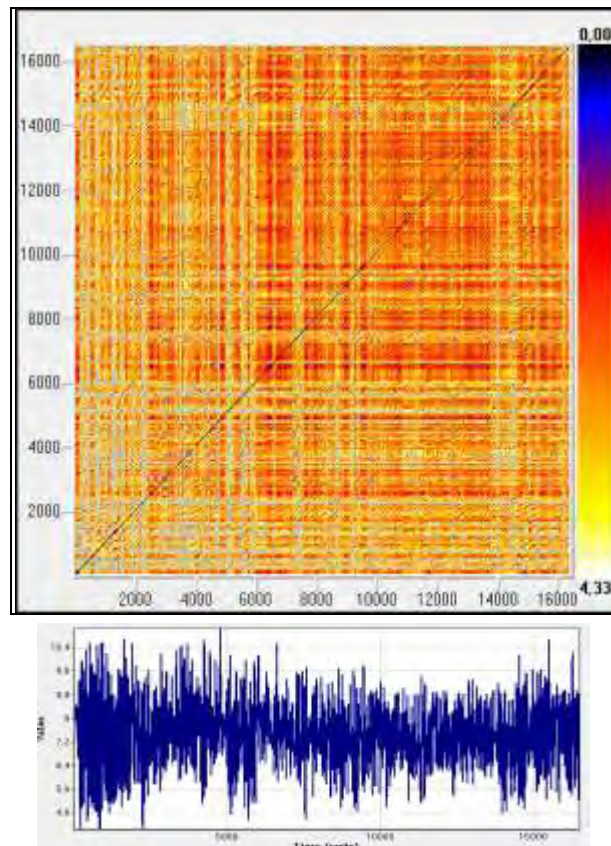
υπάρχουν ντετερμινιστικές δομές στην δυναμική του συστήματος, όπως βλέπουμε και στο σχ.3.11(β). Πολλά είναι τα επαναλαμβανόμενα σημεία που εμφανίζονται επίσης στα όρια αυτού του διαστήματος σύμφωνα με το διάγραμμα (γ) στο σχ.3.11 όπου το αντίστοιχο ποσοστό είναι χαμηλό. Γενικότερα ο χρόνος παγίδευσης μηδενίζεται αρκετές φορές μέσα σε αυτή την περιοχή και η μέγιστη διαγώνιος γραμμή είναι μικτότερη στην αρχή γεγονός που συνεπάγεται με την χαοτική συμπεριφορά του συστήματος.

Η επόμενη περιοχή μετάβασης 2000-5000 εμφανίζει υψηλό ποσοστό ντετερμινισμού και υψηλό ποσοστό Laminarity διαγράμματα (β) και (γ) αντίστοιχα. Ωστόσο στο σχ.3.11(γ) γύρω από το 3500 εμφανίζονται περισσότερα επαναλαμβανόμενα σημεία. Ο μέσος χρόνος που το σύστημα μένει σε μία δεδομένη κατάσταση ειδικά για το διάστημα 3000-3500 για αυτή την περιοχή μηδενίζεται όπως είναι εμφανές στο σχ.3.11(δ).

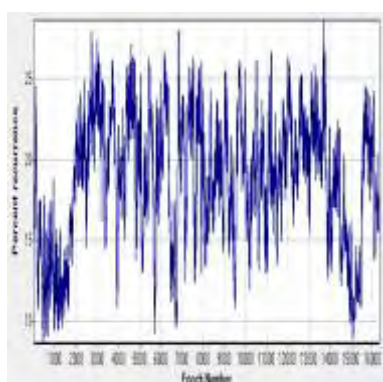
Στην συνέχεια στο διάγραμμα του ντετερμινισμού στο σχ.3.11 παρατηρούμε ότι για το διάστημα 5000-95000 η ντετερμινιστική συμπεριφορά τους συστήματος είναι ιδιαίτερα έντονη, επίσης χαμηλό είναι και το ποσοστό ντετερμινισμού ιδιαίτερα προς το κέντρο της περιοχής μετάβασης και τέλος πολλές φορές μηδενίζεται και ο χρόνος παγίδευσης κάτι που είναι ιδιαίτερα έντονο και στην τελευταία περιοχή μετάβασης, στην οποία ενδιαφέρον παρουσιάζει η ύπαρξη των μέγιστων γραμμών σύμφωνα με το σχ.3.11(ε) Επίσης πρέπει να αναφερθεί ότι παρατηρείται και η απουσία των διαγωνίων γραμμών.

#### **3.2.1.4 Χρονοσειρά Μέτρου Ταχύτητας Ανέμου Συναρτήσεως Όλων των Συνιστωσών $f(x,y,z)$**

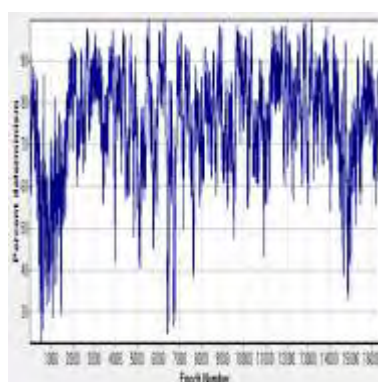
Η χρονοσειρά που μελετάται παρακάτω αποτελεί το μέτρο της ταχύτητας ανόδου σε λόφο, που προέκυψε και από τις τρεις συνιστώσες της ταχύτητας που αναλύθηκαν παραπάνω. Για την ανάλυση της μεθόδου και την εύρεση των αποτελεσμάτων από τα οποία θα διεξαχθούν συμπεράσματα για την χρονοσειρά, επιλέχθηκε τιμή υστέρησης 19 και ακτίνα αποκοπής 50.



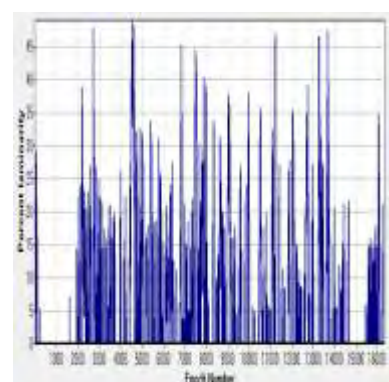
**Γράφημα 3.12 Γράφημα επαναφοράς χρονοσειράς προσομοίωσης ταχύτητας ανέμου σε λόφο. Χρονοσειρά μέτρου ταχύτητας ανέμου συναρτήσει όλων των συνιστωσών.**



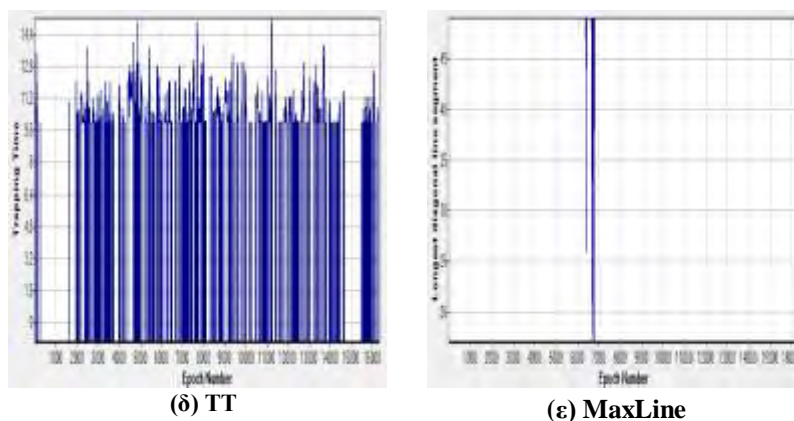
**(α) %REC**



**(β) %DET**



**(γ) %LAM**



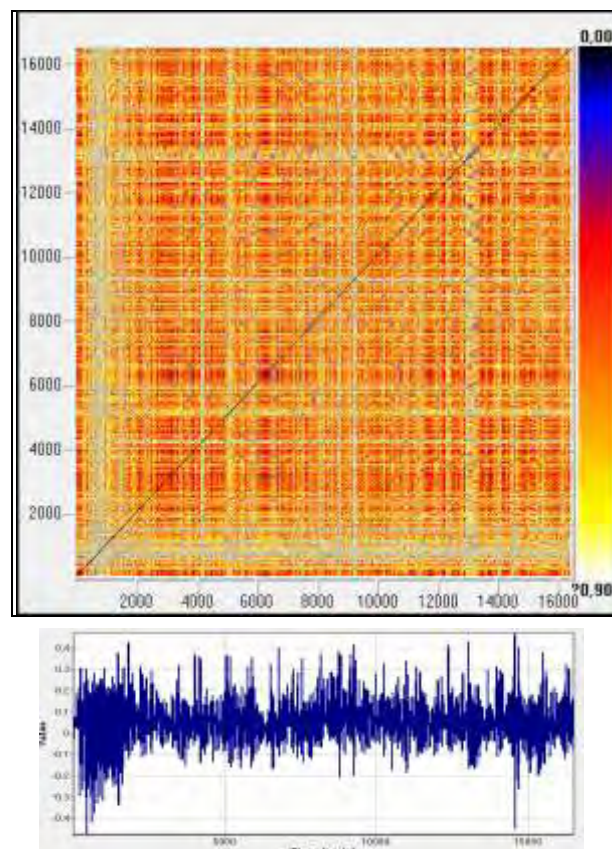
**Σχ.3.12 Χρονοσειρά μέτρου ταχύτητας ανέμου συναρτήσει όλων των συνιστωσών. Διαγράμματα μεθόδου ποσοτικής ανάλυσης επαναφοράς: (α) %REC - ποσοστό επαναφοράς, (β) %DET - ποσοστό ντετερμινισμού, (γ) %LAM - ποσοστό Laminarity, (δ) χρόνο παγίδευσης TT – Trapping Time, (ε) μέγιστη διαγώνια γραμμή Max Line.**

Το γράφημα επαναφοράς 3.12 που αντιστοιχεί στην χρονοσειρά του μέτρου της ταχύτητας του ανέμου συναρτήσει όλων των συνιστωσών είναι σχεδόν όμοιο με αυτό της χρονοσειράς της συνιστώσας της ταχύτητας του ανέμου στον άξονα x, αυτό δηλώνει ότι αυτή η συνιστώσα επηρεάζει ιδιαίτερα το μέτρο της ταχύτητας. Μπορούμε επίσης να διακρίνουμε τις ίδιες περιοχές μετάβασης, στις οποίες ωστόσο όπως θα διαπιστωθεί και από τα διαγράμματα η συμπεριφορά του συστήματος αλλάζει κατά περίπτωση. Συνεπώς προκύπτουν οι περιοχές μετάβασης 0-2000, 2000-6000, 6000-8000, 8000-14000 και 14000 έως τέλος.

Στο διάγραμμα (β) στο σχ.3.12 δίνεται το ποσοστό ντετερμινισμού κατά την εξέλιξη όλης της χρονοσειράς. Παρατηρείται χαμηλό ποσοστό για τις περιοχές μετάβασης 0-2000, 6000-8000 και στην τελευταία περιοχή ενώ αντίθετα περισσότερο έντονη ντετερμινιστική συμπεριφορά παρουσιάζει το σύστημα στα διαστήματα 2000-6000 και 8000-14000. Ενδιαφέρον προκαλεί το γεγονός ότι το ποσοστό Laminarity εμφανίζει υψηλά ποσοστά στο σχ.3.12(γ). Επιπλέον έντονο είναι και το προφίλ του διαγράμματος του χρόνου παγίδευσης όπου εμφανίζει υψηλές τιμές. Τέλος εμφανής είναι και η απουσία των διαγωνίων γραμμών, γύρω από το 7000 εμφανίζεται η μοναδική μέγιστη γραμμή.

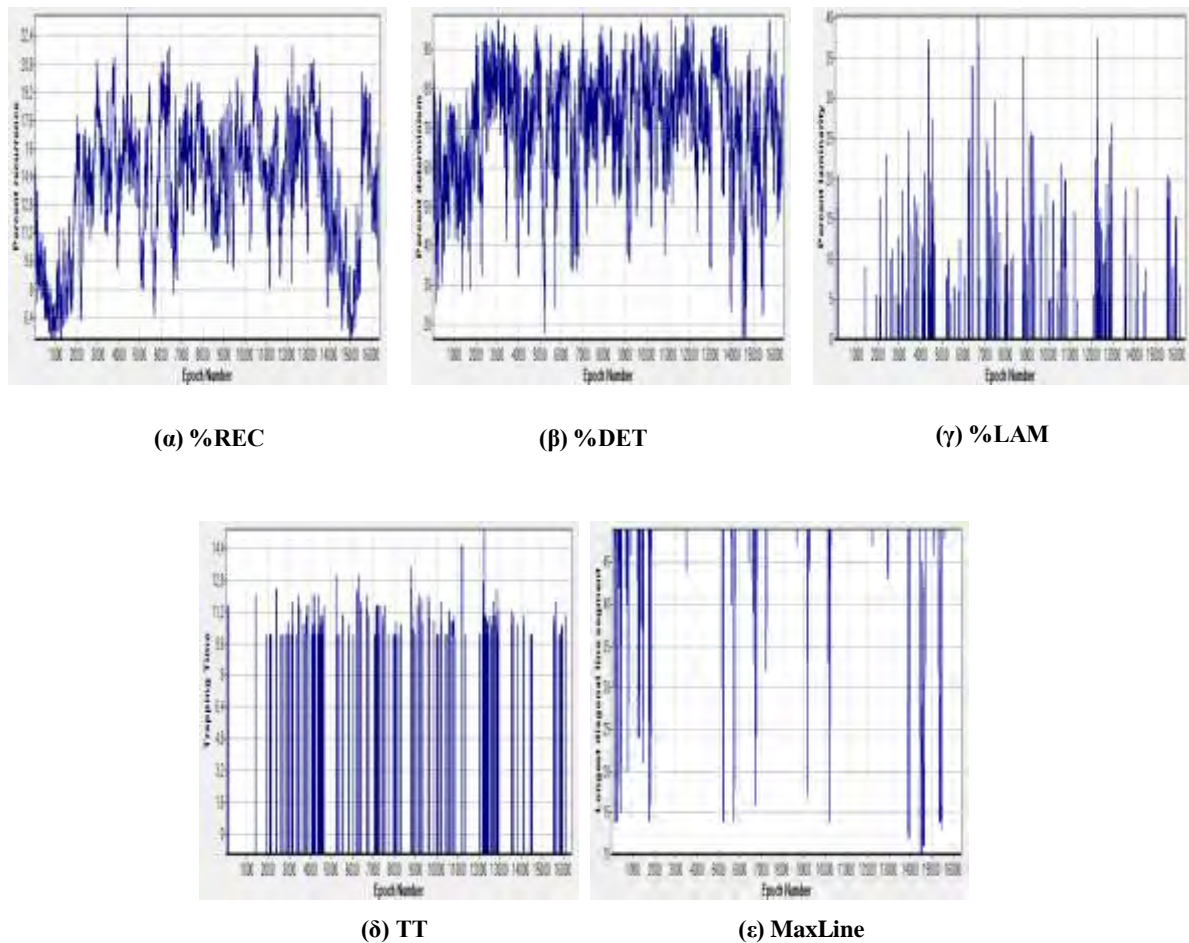
### 3.2.1.5 Χρονοσειρά Γωνίας Ταχύτητας Ανέμου Συναρτήσεως Όλων των Συνιστωσών $f(x,y,z)$

Η χρονοσειρά γωνίας ταχύτητας ανέμου λαμβάνοντας υπόψη όλες τις συνιστώσες της χρονοσειράς αποτελεί την μεγαλύτερη γωνία που σχηματίζει το διάνυσμα της ταχύτητας στο επίπεδο (xy). Συγκεκριμένα μεγαλύτερη γωνία στο επίπεδο xy σχηματίζει η ταχύτητα με τον άξονα y. Για την διεξαγωγή των αποτελεσμάτων με την βοήθεια της μεθόδου επιλέχθηκε τιμή υστέρησης 15 και ακτίνα αποκοπής 40. Τα αποτελέσματα δίνονται παρακάτω.



**Γράφημα 3.13 Γράφημα επαναφοράς χρονοσειράς προσομοίωσης ταχύτητας ανέμου σε λόφο. Χρονοσειρά γωνίας ταχύτητας ανέμου συναρτήσεως όλων των συνιστωσών.**





**Σχ.3.13 Χρονοσειρά γωνίας ταχύτητας ανέμου συναρτήσει όλων των συνιστωσών. Διαγράμματα μεθόδου ποσοτικής ανάλυσης επαναφοράς: (α) %REC - ποσοστό επαναφοράς, (β) %DET - ποσοστό ντετερμινισμού, (γ) %LAM - ποσοστό Laminarity, (δ) χρόνο παγίδευσης TT – Trapping Time, (ε) μέγιστη διαγώνια γραμμή Max Line.**

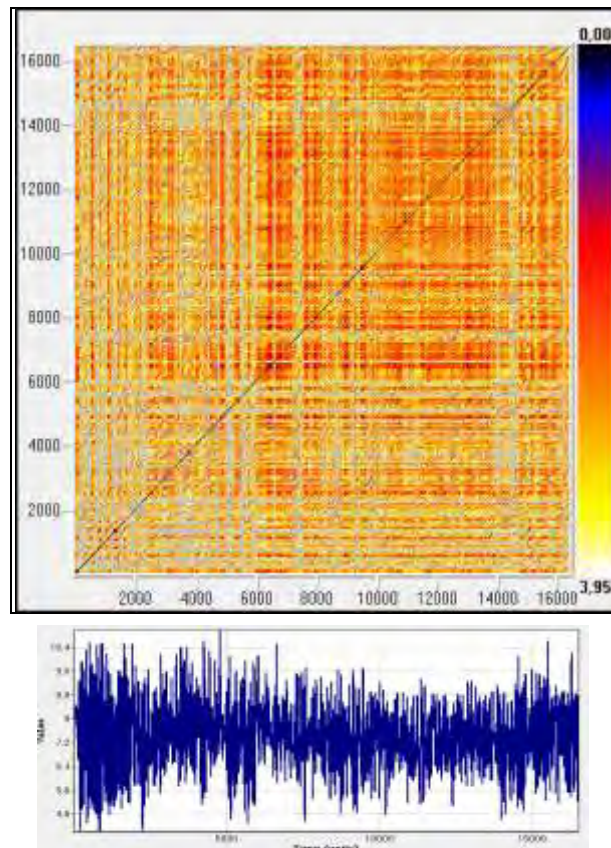
Παρατηρώντας το γράφημα επαναφοράς 3.13 διαπιστώνεται ότι είναι σχεδόν όμοιο με το αντίστοιχο γράφημα της χρονοσειράς της συνιστώσας της ταχύτητας του ανέμου στον άξονα y. Συνεπώς διακρίνουμε και τις ίδιες περιοχές μετάβασης, στις οποίες μπορεί το σύστημα ωστόσο να έχει ελαφρώς διαφορετική συμπεριφορά. Οι περιοχές μετάβασης είναι 0-2000, 2000-9000, 9000-13000 και 13000 έως τέλος. Απότομη αλλαγή στην δυναμική του συστήματος διαπιστώνεται στις περιοχές 0-2000, μετά το 4000 και το 8000, γύρω από το 9000, το 13000 και το 14500, όπου σύμφωνα με το γράφημα βλέπουμε τις πιο έντονες λευκές κουκίδες.

Στο διάγραμμα (β) επίσης όπως και στην αντίστοιχη χρονοσειρά για την συνιστώσα στον άξονα  $y$  επικρατούν γενικά υψηλές τιμές για τα ποσοστά ντετερμινισμού, άρα έντονη ντετερμινιστική συμπεριφορά, η οποία ελαττώνεται κυρίως γύρω από το 1900, μετά από το 5000 στην τελευταία περιοχή που επιλέχθηκε ως περιοχή μετάβασης γύρω από το 14000, 14500 και 15500. Το ποσοστό Laminarity επίσης εμφανίζει υψηλές τιμές σύμφωνα με το σχ.3.13(γ). Υψηλότερες παρουσιάζονται γύρω από τα 4500, 6800, 9000, 12500, 13500 15500 που συνεπάγεται με λιγότερα επαναλαμβανόμενα σημεία. Επιπλέον η παρουσία των μέγιστων γραμμών σε ορισμένα σημεία όπως μπορούμε να δούμε στο αντίστοιχα διάγραμμα (ε) στο σχ.3.13 υποδηλώνει τη σταθερότητα του συστήματος, δεδομένου ότι οι γραμμές αυτές παίρνουν υψηλές τιμές.

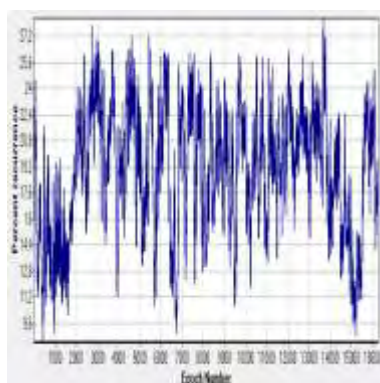
Επιπλέον εμφανής είναι στο γράφημα 3.13 οι παράλληλες γραμμές στην γραμμή ταυτοποίησης, το μήκος των οποίων υποδηλώνει την προβλεψιμότητα του συστήματος. Εκτός από μία έντονα λευκή ζώνη που υπάρχει στην αρχή της χρονοσειράς, το υπόλοιπο διάστημα μπορούμε να πούμε ότι παρουσιάζει σχεδόν περιοδικό σήμα όπως προκύπτει και από την δομή ‘σκακιέρας’ του γραφήματος.

#### **3.2.1.6 Χρονοσειρά Μέτρου Ταχύτητας Ανέμου Συναρτήσεως των Δύο Συνιστωσών $f(x,y)$**

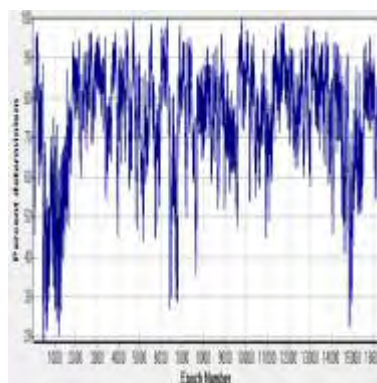
Κατόπιν προκειμένου να γίνει όσο το δυνατόν καλύτερος έλεγχος όσον αφορά την δυναμική συμπεριφορά της χρονοσειράς προσομοίωσης της ταχύτητας ανόδου του ανέμου σε λόφο επιλέχθηκε να αναλυθεί επιπλέον η χρονοσειρά για το μέτρο της ταχύτητας λαμβάνοντας όμως τώρα υπόψη μόνο τις δύο πρώτες συνιστώσες της ταχύτητας, τις συνιστώσες στον άξονα  $x$  και  $y$ . Για την ανάλυση της μεθόδου και την εύρεση των παρακάτω αποτελεσμάτων επιλέχθηκε τιμή υστέρησης 20 και ακτίνα αποκοπής 50.



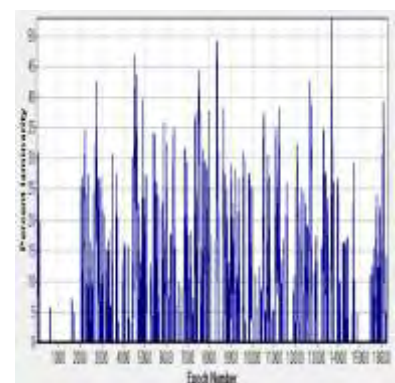
**Γράφημα 3.14 Γράφημα επαναφοράς χρονοσειράς προσομοίωσης ταχύτητας ανέμου σε λόφο. Χρονοσειρά μέτρου ταχύτητας ανέμου συναρτήσει των δύο συνιστωσών.**



**(α) %REC**

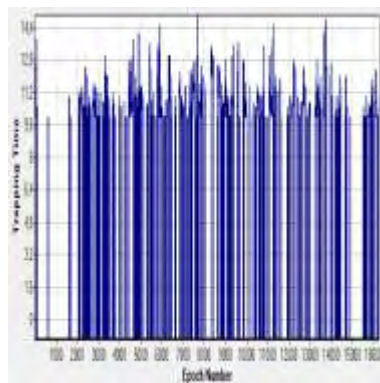


**(β) %DET**

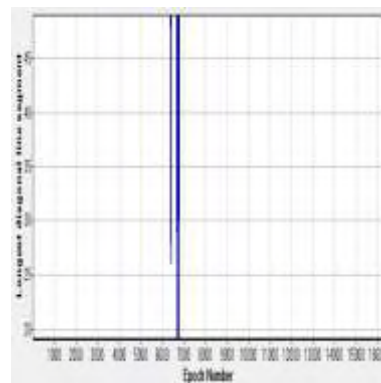


**(γ) %LAM**





(δ) TT



(ε) MaxLine

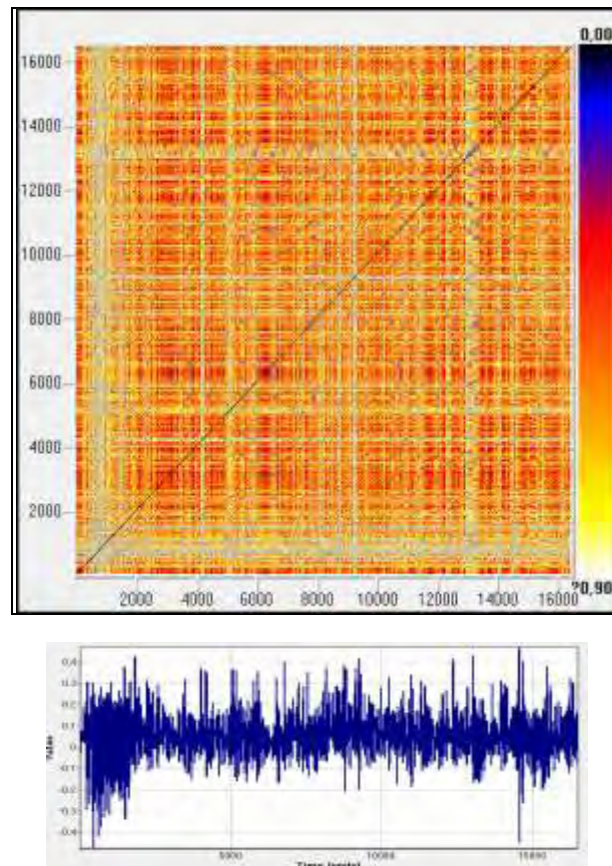
**Σχ.3.14 Χρονοσειρά μέτρου ταχύτητας ανέμου συναρτήσει των δύο συνιστωσών. Διαγράμματα μεθόδου ποσοτικής ανάλυσης επαναφοράς: (α) %REC - ποσοστό επαναφοράς, (β) %DET - ποσοστό ντετερμινισμού, (γ) %LAM - ποσοστό Laminarity, (δ) χρόνο παγίδευσης TT – Trapping Time, (ε) μέγιστη διαγώνια γραμμή Max Line.**

Παρατηρώντας λοιπόν το γράφημα επαναφοράς και τα αντίστοιχα διαγράμματα που προκύπτουν από την μέθοδο της ποσοτικής ανάλυσης επαναφοράς για το μέτρο της ταχύτητας και με τις δύο περιπτώσεις (βλ. κεφ. 3.2.1.4), η συμπεριφορά του συστήματος δεν αλλάζει, είναι όμοια. Συνεπώς καταλήγουμε ότι ισχύουν όσο αναφέρθηκαν στο υποκεφάλαιο 3.2.1.4. Αυτή η ομοιότητα μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι η συνιστώσα της ταχύτητας του ανέμου στον άξονα  $z$  είναι πάρα πολύ μικρή και δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα όσον αφορά την δυναμική του συστήματος.

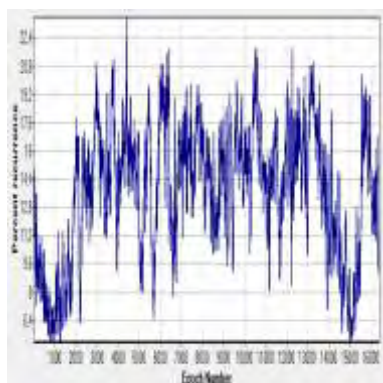
### 3.2.1.7 Χρονοσειρά Γωνίας Ταχύτητας Ανέμου Συναρτήσει των Δύο Συνιστωσών $f(x,y)$

Η χρονοσειρά της γωνίας της ταχύτητας του ανέμου αποτελεί την μεγαλύτερη γωνία που σχηματίζει το διάνυσμα της ταχύτητας στο επίπεδο  $(xy)$  και προέκυψε με την βοήθεια της αντίστοιχης χρονοσειράς του μέτρου από το προηγούμενο υποκεφάλαιο.

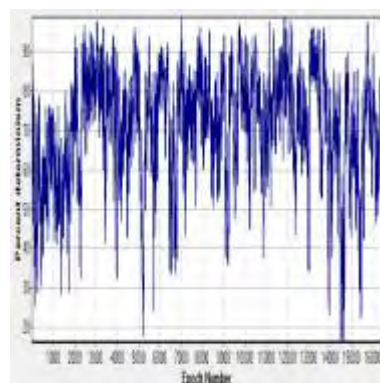
Για την διεξαγωγή των αποτελεσμάτων επιλέχθηκε τιμή υστέρησης 15 και ακτίνα αποκοπής 45. Τα αποτελέσματα δίνονται παρακάτω



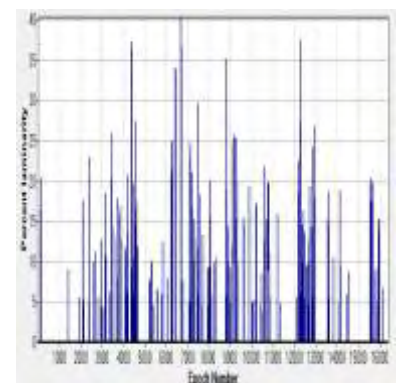
**Γράφημα 3.15** Γράφημα επαναφοράς χρονοσειράς προσομοίωσης ταχύτητας ανέμου σε λόφο. Χρονοσειρά γωνίας ταχύτητας ανέμου συναρτήσει των δύο συνιστωσών.



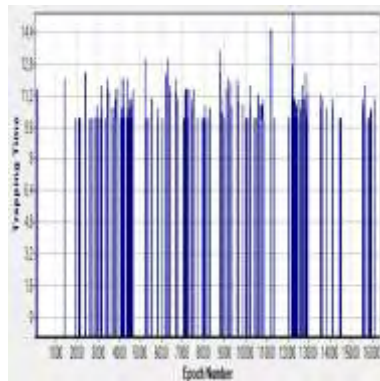
**(α) %REC**



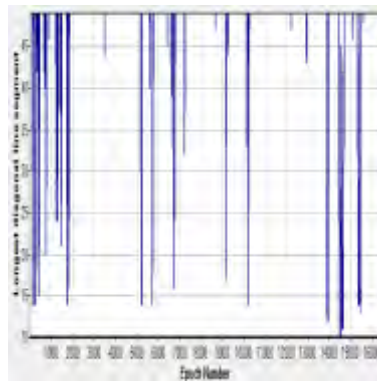
**(β) %DET**



**(γ) %LAM**



(δ) TT



(ε) MaxLine

**Σχ.3.15 Χρονοσειρά γωνίας ταχύτητας ανέμου συναρτήσει των δύο συνιστωσών. Διαγράμματα μεθόδου ποσοτικής ανάλυσης επαναφοράς: (α) %REC - ποσοστό επαναφοράς, (β) %DET - ποσοστό ντετερμινισμού, (γ) %LAM - ποσοστό Laminarity, (δ) χρόνο παγίδευσης TT – Trapping Time, (ε) μέγιστη διαγώνια γραμμή Max Line.**

Ομοίως παρατηρούμε για την χρονοσειρά της γωνίας της ταχύτητας ανέμου συναρτήσει των δύο συνιστωσών ότι είναι όμοια με την αντίστοιχη χρονοσειρά στην οποία συμπεριλάβαμε όλες τις συνιστώσες, διότι ουσιαστικά η συνιστώσα  $z$  είναι πάρα πολύ μικρή και δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα. Συνεπώς τα συμπεράσματα σχετικά με την συμπεριφορά του συστήματος για αυτή την χρονοσειρά είναι όμοια με αυτά στο υποκεφάλαιο 3.2.1.5.

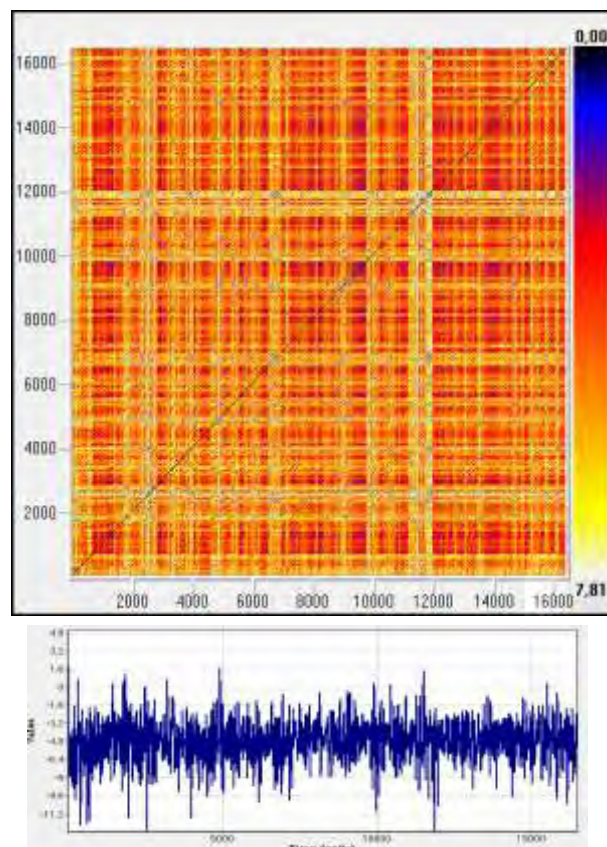
### 3.2.2 Χρονοσειρές Ταχύτητας Ανέμου Καθόδου σε Λόφο

Οι χρονοσειρές ταχύτητας καθόδου σε λόφο που μελετώνται παρακάτω είναι εφτά και είναι συγκεκριμένα η χρονοσειρά για την συνιστώσα της ταχύτητας στον άξονα  $x$ , για τη συνιστώσα στον άξονα  $y$ , για τη συνιστώσα στον άξονα  $z$ , το μέτρο της ταχύτητας λαμβάνοντας υπόψη όλες τις συνιστώσες και αντίστοιχα την γωνία της ταχύτητας και τέλος το μέτρο της ταχύτητας λαμβάνοντας υπόψη μόνο τις δύο

πρώτες συνιστώσες και αντίστοιχα την γωνία της. Επιπλέον και οι χρονοσειρές καθόδου αποτελούνται από 16504 μετρήσεις.

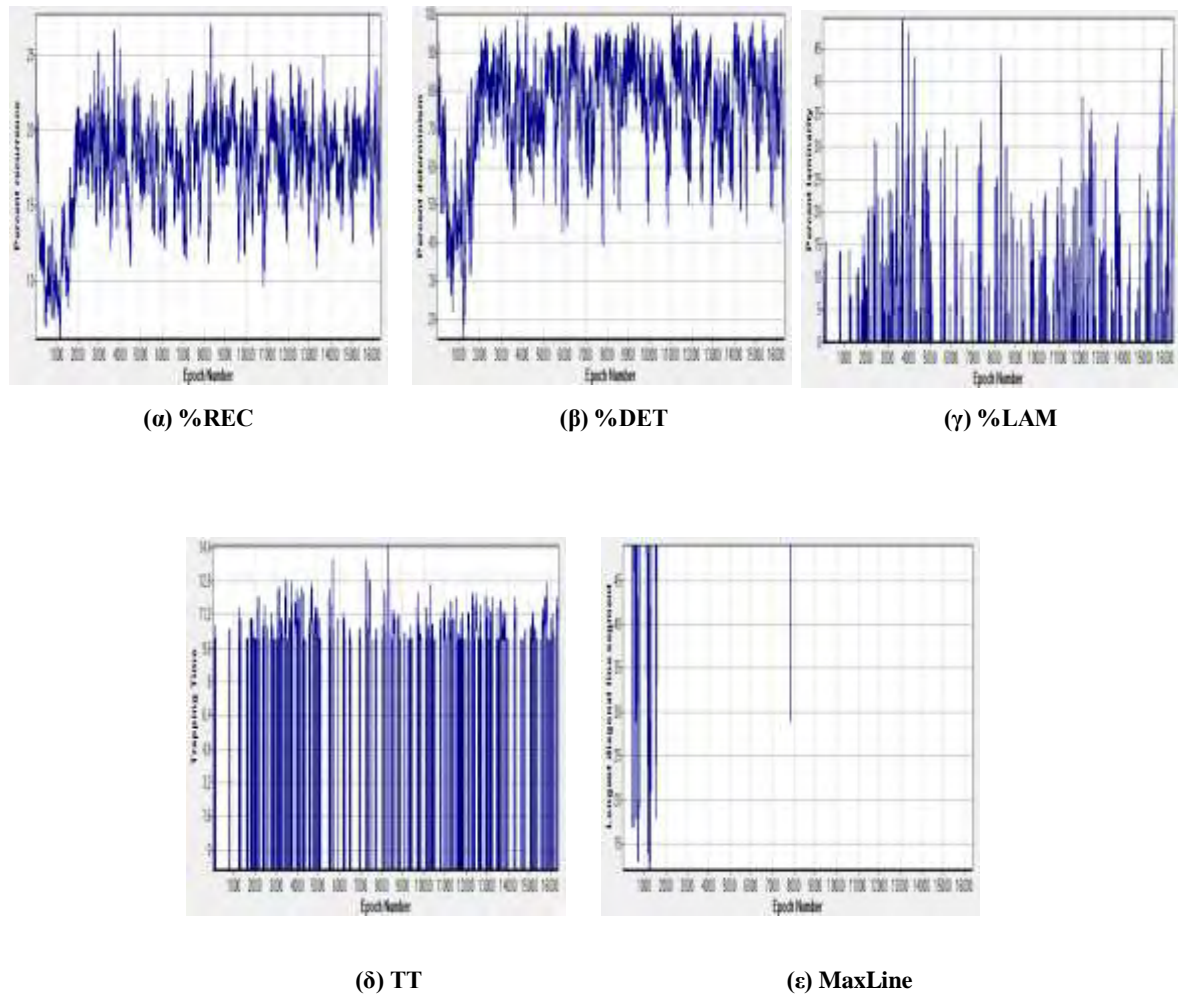
### 3.2.2.1 Ταχύτητα Ανέμου στον Άξονα x

Αντίστοιχα μελετάται παρακάτω η χρονοσειρά της συνιστώσας της ταχύτητας καθόδου του ανέμου στον άξονα x. Αρχικά με την μέθοδο της Μέσης Αμοιβαίας Πληροφορίας επιλέχθηκε η τιμή υστέρησης ίση με 19 και στην συνέχεια η ακτίνα αποκοπής ίση με 45 προκειμένου να επιτευχτεί το καλύτερο ποσοστό σημείων επαναφοράς. Παρακάτω δίνονται το γράφημα επαναφοράς καθώς και τα διαγράμματα της χρονοσειράς όπως αυτά προέκυψαν από την μέθοδο της ποσοτικής ανάλυσης επαναφοράς.



**Γράφημα 3.16** Γράφημα επαναφοράς χρονοσειράς προσομοίωσης ταχύτητας καθόδου του ανέμου σε λόφο. Χρονοσειρά συνιστώσας ταχύτητας ανέμου στον άξονα x.





**Σχ.3.16 Χρονοσειρά συνιστώσας ταχύτητας καθόδου του ανέμου στον άξονα x. Διαγράμματα μεθόδου ποσοτικής ανάλυσης επαναφοράς: (α) %REC - ποσοστό επαναφοράς, (β) %DET - ποσοστό ντετερμινισμού, (γ) %LAM - ποσοστό Laminarity, (δ) χρόνο παγίδευσης TT – Trapping Time, (ε) μέγιστη διαγώνια γραμμή Max Line.**

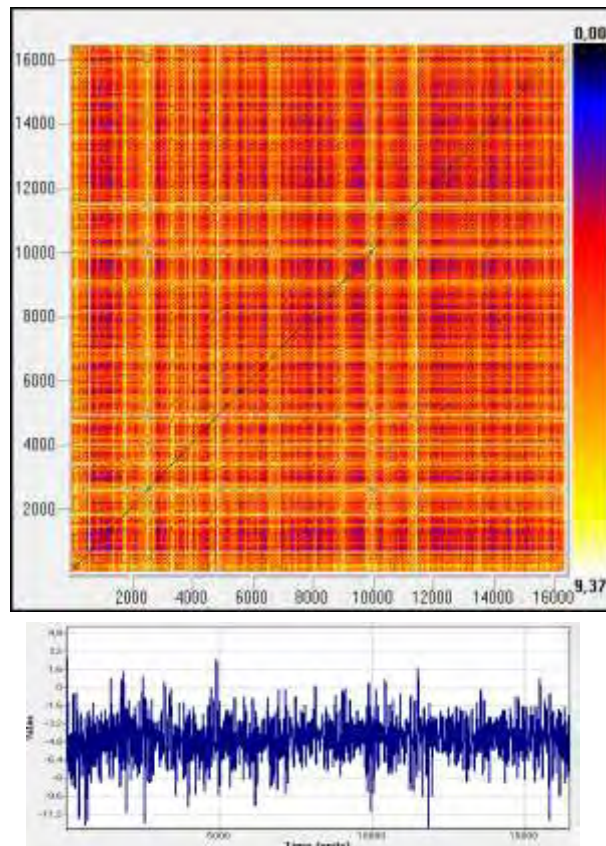
Παρατηρώντας το γράφημα 3.16 της χρονοσειράς καθώς και τα διαγράμματα στο σχ.3.16 μπορούμε να επιλέξουμε περιοχές μετάβασης. Οι περιοχές μετάβασης που προκύπτουν λοιπόν είναι 0-2000, 2000-7000, 7000-11000, 11000-12000 και 12000 έως τέλος. Το γράφημα επαναφοράς στο σύνολό του διακρίνεται κυρίως από σημεία που βρίσκονται σε ενδιάμεσες αποστάσεις μεταξύ τους, δεδομένου ότι υπερτερούν οι πορτοκαλί και κίτρινες κουκίδες. Ωστόσο υπάρχουν και κάποιες ζώνες οι οποίες διακρίνονται από την απότομη αλλαγή του συστήματος, αυτές είναι κυρίως γύρω από το 2000 στο τέλος της πρώτης περιοχής μετάβασης και στην αρχή της δεύτερης,

4000, 5000, 6500, 8500, πριν το 10000 και 11000-12000. Σε αυτές τις περιοχές κυρίως παρατηρούμε στο σχ.3.16(γ) ότι το ποσοστό Laminarity παίρνει υψηλές τιμές

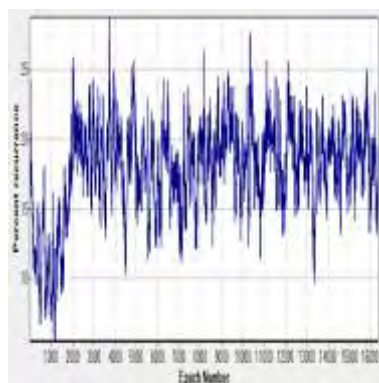
Από το διάγραμμα (β) στο σχ.3.16 συμπεραίνουμε ότι γενικότερα επικρατεί στο σύστημα ντετερμινιστική συμπεριφορά, αυτό προκύπτει από τα υψηλά ποσοστά ντετερμινισμού. Εξαιρείται η πρώτη περιοχή μετάβασης όπου στο κέντρο της το ποσοστό μειώνεται αισθητά σχετικά με την εικόνα που δείχνει σε όλη την πορεία της χρονοσειράς. Επιπλέον ο χρόνος παγίδευσης που αντιστοιχεί στον μέσο χρόνο που μένει σε μία δεδομένη κατάσταση το σύστημα δεν είναι σταθερός αντίθετα χαρακτηρίζεται από πολλές εναλλαγές. Τέλος ενδιαφέρον παρουσιάζει στο σχ.3.16 (ε) η Maxline η οποία εμφανίζεται κυρίως κατά την πρώτη περιοχή μετάβασης, για την οποία φαίνεται να έχουμε ελαφρώς χαοτική συμπεριφορά. Πρέπει ωστόσο να αναφερθεί ότι η πρώτη περιοχή μετάβασης είναι αυτή στην οποία δημιουργούνται περισσότερο έντονες αλλαγές. Επιπλέον η ύπαρξη παράλληλων διαγώνιων γραμμών, που είναι περισσότερο έντονη στο δεύτερο μισό της χρονοσειράς, υποδηλώνει την ύπαρξη περιοδικού σήματος.

### **3.2.2.2 Ταχύτητα Ανέμου στον Άξονα y**

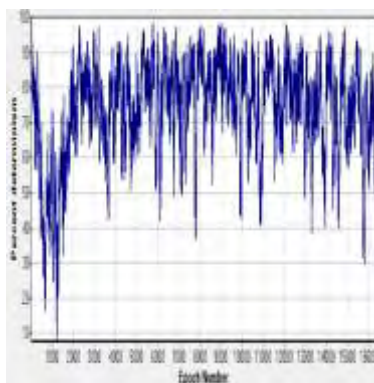
Η επόμενη χρονοσειρά προσομοίωσης ταχύτητας καθόδου που αναλύθηκε με την μέθοδο της ποσοτικής ανάλυσης επαναφοράς είναι η χρονοσειρά ταχύτητας καθόδου ανέμου στον άξονα y. Για την χρονοσειρά αυτή επιλέχθηκε τιμή υστέρησης 21 και ακτίνα αποκοπής 45. Τα αποτελέσματα δίνονται παρακάτω.



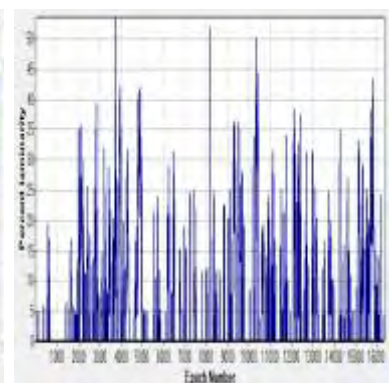
Γράφημα 3.17 Γράφημα επαναφοράς χρονοσειράς προσομοίωσης ταχύτητας καθόδου του ανέμου σε λόφο. Χρονοσειρά συνιστώσας ταχύτητας ανέμου στον άξονα γ.



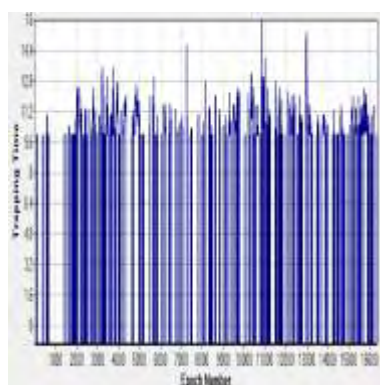
(α) %REC



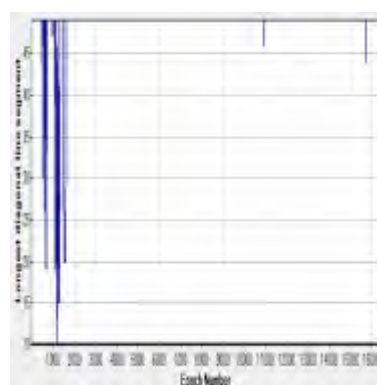
(β) %DET



(γ) %LAM



(δ) TT



(ε) MaxLine

**Σχ.3.17 Χρονοσειρά συνιστώσας ταχύτητας καθόδου του ανέμου στον άξονα y. Διαγράμματα μεθόδου ποσοτικής ανάλυσης επαναφοράς: (α) %REC - ποσοστό επαναφοράς, (β) %DET - ποσοστό ντετερμινισμού, (γ) %LAM - ποσοστό Laminarity, (δ) χρόνο παγίδευσης TT – Trapping Time, (ε) μέγιστη διαγώνια γραμμή Max Line.**

Για την χρονοσειρά της συνιστώσας της ταχύτητας καθόδου του ανέμου στον άξονα y επιλέχθηκαν περιοχές μετάβασης όμοιες με τις προηγούμενης συνιστώσας (0-2000, 2000-7000, 7000-11000, 11000-12000 και 12000 έως τέλος). Επιπλέον στο γράφημα 3.17 είναι ελαφρώς πιο έντονα κάποια σημεία που βρίσκονται σε κοντινές αποστάσεις μεταξύ τους, αυτά είναι στο κέντρο της πρώτης περιοχής μετάβασης, γύρω από το 10000 και στην τελευταία περιοχή. Σε αυτές τις ζώνες ακριβώς υπήρχαν σημεία σε κοντινές αποστάσεις και στο προηγούμενο γράφημα εδώ ωστόσο είναι απλά περισσότερο εμφανή.

Τα διαγράμματα στο σχ.3.17 που προέκυψαν από την μέθοδο είναι σχεδόν όμοια με της προηγούμενης χρονοσειράς. Ιδιαίτερα έντονη ντετερμινιστική συμπεριφορά παρουσιάζεται και εδώ σχεδόν σε όλη την διάρκεια της εξέλιξης της χρονοσειράς, εξαίρεση αποτελεί η πρώτη περιοχή μετάβασης που σύμφωνα με το σχ.3.17(β) έχει χαμηλότερο ποσοστό. Από το διάγραμμα (γ) στις περιοχές που το ποσοστό Laminarity είναι μικρότερο τα περισσότερα επαναλαμβανόμενα σημεία έχουμε. Πιο χαμηλά ποσοστά Laminarity συναντάμε κυρίως στην πρώτη περιοχή μετάβασης.

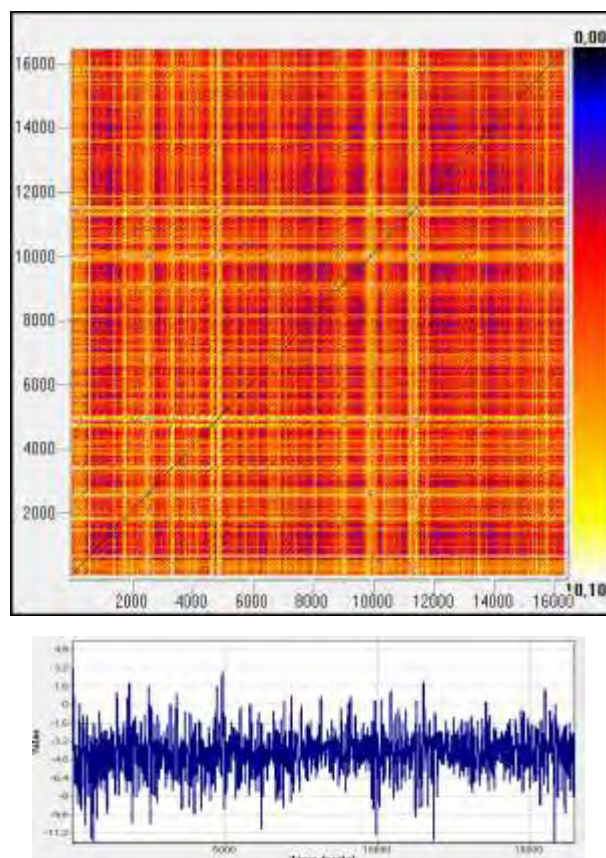
Στη συνέχεια ο χρόνος παγίδευσης στο σχ.3.17(δ) επίσης δεν παρουσιάζει σταθερή τιμή ενώ η ύπαρξη της μέγιστης διαγώνιας γραμμής σύμφωνα με το σχ.3.17(ε) υποδηλώνει την ύπαρξη χασοτικής συμπεριφοράς ιδιαίτερα κατά την πρώτη περιοχή



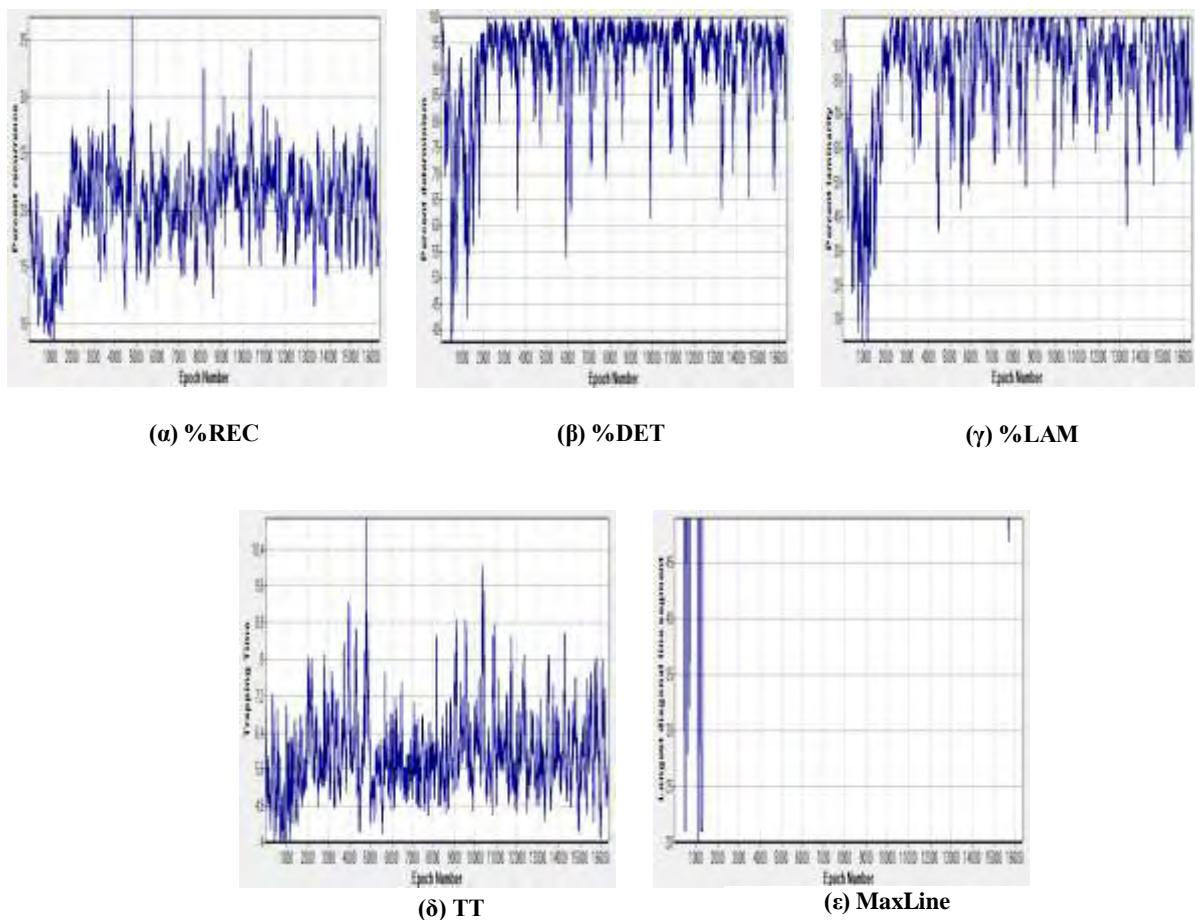
μετάβασης. Επιπλέον στο γράφημα επαναφοράς είναι έντονα εμφανής οι παράλληλες γραμμές στην κύρια διαγώνιο, το μήκος των οποίων υποδηλώνει την προβλεψιμότητα του συστήματος.

### 3.2.2.3 Ταχύτητα Ανέμου στον Άξονα z

Η τελευταία συνιστώσα που θα αναλυθεί για το μέγεθος της ταχύτητας καθόδου του ανέμου είναι η χρονοσειρά της συνιστώσας στον άξονα z. Τα αποτελέσματα που ακολουθούν παρακάτω και από τα οποία διεξάγονται γενικότερα συμπεράσματα για την συμπεριφορά του συστήματος, προκύπτουν με την προαναφερθείσα μέθοδο, στην οποία εισήχθησαν η τιμή υστέρησης 22 και η ακτίνα αποκοπής επίσης 50.



**Γράφημα 3.18 Γράφημα επαναφοράς χρονοσειράς προσομοίωσης ταχύτητας καθόδου του ανέμου σε λόφο. Χρονοσειρά συνιστώσας ταχύτητας ανέμου στον άξονα z.**



**Σχ.3.18 Χρονοσειρά συνιστώσας ταχύτητας καθόδου του ανέμου στον άξονα z. Διαγράμματα μεθόδου ποσοτικής ανάλυσης επαναφοράς: (α) %REC - ποσοστό επαναφοράς, (β) %DET - ποσοστό ντετερμινισμού, (γ) %LAM - ποσοστό Laminarity, (δ) χρόνο παγίδευσης TT – Trapping Time, (ε) μέγιστη διαγώνια γραμμή Max Line.**

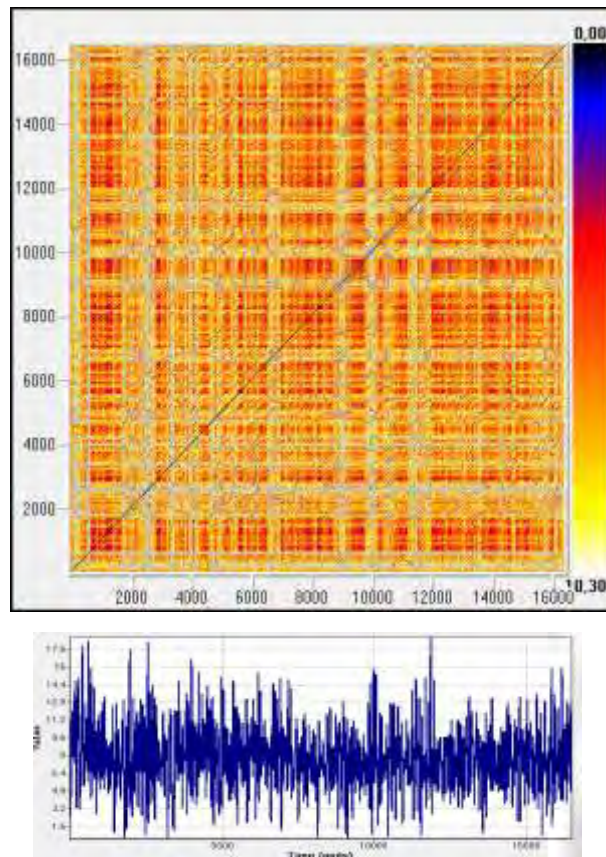
Στο γράφημα επαναφοράς 3.18 είναι ιδιαίτερα έντονες οι ζώνες με κίτρινο και πορτοκαλί χρώμα που αντιστοιχούν σε ενδιάμεσες αποστάσεις μεταξύ των σημείων. Επίσης σε αυτή τη χρονοσειρά οι περιοχές μετάβασης που διακρίνονται είναι 0-2000, 2000-7000, 7000-11000, 11000-12000 και 12000 έως τέλος. Στο διάγραμμα (β) στο οποίο απεικονίζεται το ποσοστό ντετερμινισμού βλέπουμε ότι στην πρώτη περιοχή μετάβασης (0-2000) μειώνεται αισθητά με αποτέλεσμα να μην έχουμε καλή προβλεψιμότητα. Αντίθετα στην υπόλοιπες περιοχές μετάβασης τα ποσοστά χαρακτηρίζεται κυρίως από υψηλές τιμές.

Προχωρώντας στο διάγραμμα (γ) στο σχ.3.18 διαπιστώνεται ότι μόνο στην περιοχή 0-2000 έχουμε πολλά επαναλαμβανόμενα σημεία. Η υπόλοιπη πορεία της χρονοσειράς

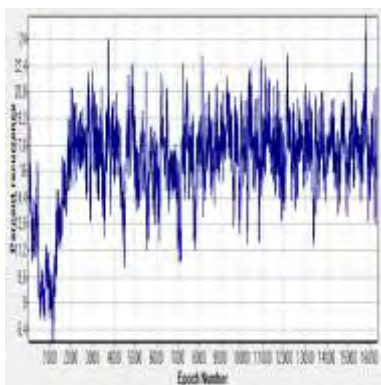
ακολουθεί κυρίως τη δομή που ακολουθείται και στο αντίστοιχο διάγραμμα του ντετερμινισμού, δηλαδή και εδώ επικρατεί το υψηλό ποσοστό Laminarity. Στην συνέχεια το γεγονός ότι ο χρόνος παγίδευσης (σχ.3.18(δ)) εμφανίζει σχεδόν σταθερή μέση τιμή υποδηλώνει ότι το σύστημα μένει για ένα μέσο χρόνο σταθερό σε μία κατάσταση. Ωστόσο διακρίνεται ότι μηδενίζεται κατά την πρώτη περιοχή μετάβασης ενώ παρουσιάζεται μέγιστο στην δεύτερη περιοχή μετάβασης γύρω από το 4500 και κατόπιν γύρω από το 10500. Τέλος υπάρχει σύμφωνα με το διάγραμμα διαγώνια γραμμή, η οποία μηδενίζεται γύρω από το 1000 συνεπώς το σύστημα εμφανίζει χαοτική συμπεριφορά. Επιπλέον και σε αυτό το γράφημα 3.18, δεδομένου ότι για τις συνιστώσες της ταχύτητας καθόδου δεν αλλάζουν πολύ τα αποτελέσματα που έχουμε πάρει από την μέθοδο της ποσοτικής ανάλυσης επαναφοράς, υπάρχουν διαγώνιες γραμμές.

#### **3.2.2.4 Χρονοσειρά Μέτρου Ταχύτητας Ανέμου Συναρτήσει Όλων των Συνιστωσών $f(x,y,z)$**

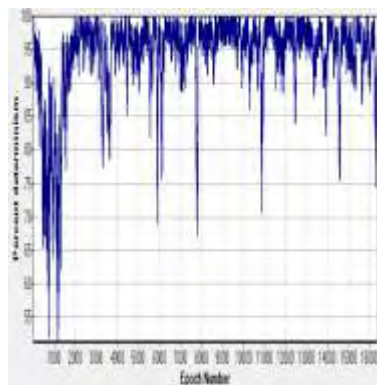
Σε αυτό το υποκεφάλαιο μελετάται η χρονοσειρά του μέτρου της ταχύτητας του ανέμου συναρτήσει όλων των συνιστωσών. Επιλέχθηκε χρονική υστέρηση ίση με 20 και ακτίνα αποκοπής 40.



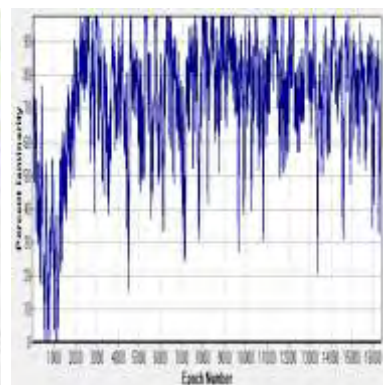
**Γράφημα 3.19** Γράφημα επαναφοράς χρονοσειράς προσομοίωσης ταχύτητας καθόδου του ανέμου σε λόφο. Χρονοσειρά μέτρου ταχύτητας ανέμου συναρτήσει όλων των συνιστωσών.



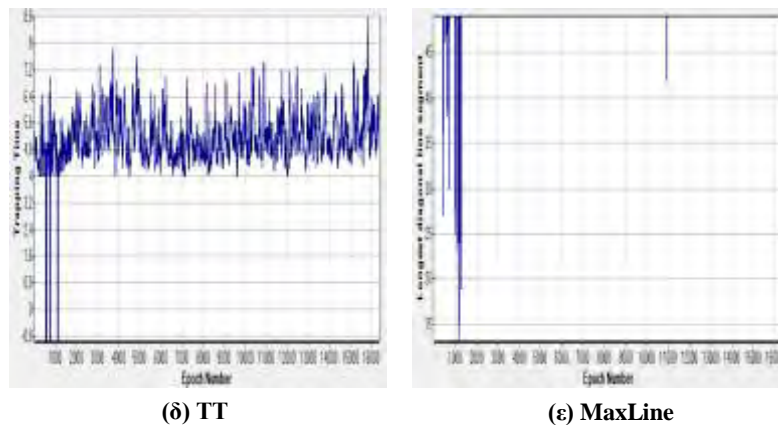
**(α) %REC**



**(β) %DET**



**(γ) %LAM**



**Σχ.3.19 Χρονοσειρά μέτρου ταχύτητας ανέμου συναρτήσει όλων των συνιστωσών. Διαγράμματα μεθόδου ποσοτικής ανάλυσης επαναφοράς: (α) %REC - ποσοστό επαναφοράς, (β) %DET - ποσοστό ντετερμινισμού, (γ) %LAM - ποσοστό Laminarity, (δ) χρόνο παγίδευσης TT – Trapping Time, (ε) μέγιστη διαγώνια γραμμή Max Line.**

Γενικότερα είναι αναμενόμενο εφόσον οι χρονοσειρές των συνιστωσών δεν είχαν μεγάλες διαφορές ως προς την συμπεριφορά του συστήματος και εδώ τόσο το γράφημα επαναφοράς όσο και τα διαγράμματα να ακολουθούν σχεδόν την ίδια δομή με τα προηγούμενα. Με την βοήθεια λοιπόν των παραπάνω προκύπτουν οι περιοχές μετάβασης 0-1800, 1800-3000, 3000-6500, 6500-7000, 7000-8500, 8500-12000 και 1200 έως τέλος. Πρέπει να σημειωθεί ότι σε αυτό το γράφημα η συμπεριφορά του συστήματος ανά περιοχή που επιλέχθηκε φαίνεται να είναι πιο έντονη και καθαρή.

Προκύπτουν λοιπόν ζώνες στις περιοχές μετάβασης που τα σημεία τους βρίσκονται σε ενδιάμεσες αποστάσεις, παρουσιάζουν δηλαδή κουκίδες που έχουν πορτοκαλί και κίτρινο χρώμα και ιδιαίτερα αυτό παρουσιάζεται στη πρώτη περιοχή μετάβασης, στο διάστημα 7000-8500 και στο 12000 έως τέλος. Ενώ ενδιάμεσα υπάρχουν πιο λευκές περιοχές, δηλαδή παρουσιάζεται απότομη αλλαγή στην δυναμική του συστήματος, συγκεκριμένα αυτές οι περιοχές είναι στην αρχή της περιοχής μετάβασης 0-1800, στο 1800-3000, γύρω στο 4000, 6500-7000 και στην περιοχή 8500-12000 που είναι πολύ συχνές.

Το ποσοστό ντετερμινισμού όπως έχει δείξει και η πορεία της χρονοσειράς είναι υψηλό. Μπορούμε δηλαδή γενικότερα για την χρονοσειρά να πούμε ότι παρουσιάζει

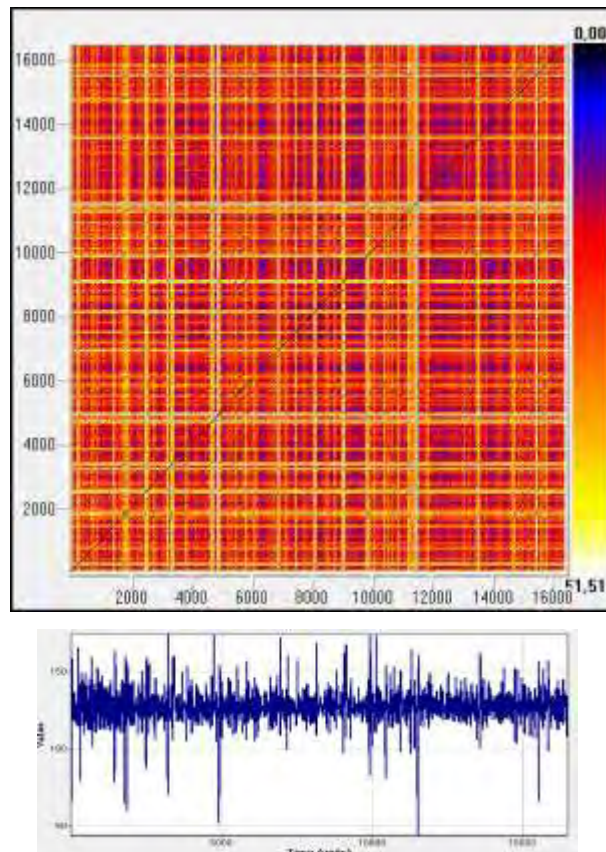


ντετερμινιστική συμπεριφορά εφόσον σύμφωνα με το σχ.3.19(β) μόνο στην περιοχή 0-1800 παίρνει χαμηλή τιμή το ποσοστό. Ομοίως συμπεριφέρεται και το ποσοστό Laminarity όπου για τις αντίστοιχες περιοχές που είναι υψηλότερο, τα επαναλαμβανόμενα σημεία στο σύστημα είναι λιγότερα.

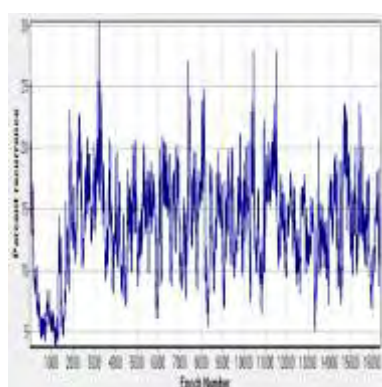
Ενδιαφέρον παρουσιάζει στο διάγραμμα (δ) στο σχ.3.19 ο χρόνος παγίδευσης ο οποίος φαίνεται να παίρνει την πιο σταθερή του μορφή, εξαιρείται φυσικά πάλι η πρώτη περιοχή μετάβασης. Συνεπώς σύμφωνα και με το σχ.3.19(ε) στην αρχή (0-1800) εμφανίζει το σύστημα ελαφρώς χαοτική συμπεριφορά (μικρή Maxline) ενώ στην συνέχεια παραμένει σχεδόν σταθερά σε μία δεδομένη κατάσταση, που όπως δείξαμε και παραπάνω είναι η ντετερμινιστική συμπεριφορά που διακρίνει το σύστημα, η οποία μαρτυρείται και από την ύπαρξη των παράλληλων διαγωνίων γραμμών.

### **3.2.2.5 Χρονοσειρά Γωνίας Ταχύτητας Ανέμου Συναρτήσεως Όλων των Συνιστωσών $f(x,y,z)$**

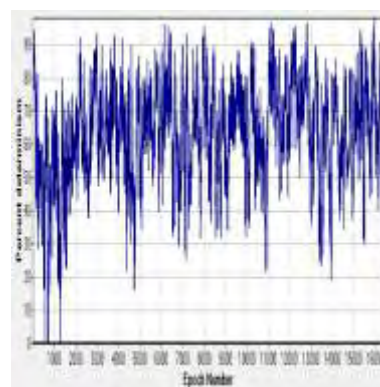
Όπως και στην χρονοσειρά της ταχύτητας ανόδου του ανέμου σε λόφο έτσι και στην αντίστοιχη της καθόδου υπολογίστηκε η μέγιστη γωνία που σχηματίζει το διάνυσμα της ταχύτητας στο επίπεδο (xy). Αποδείχθηκε ότι μεγαλύτερη γωνία στο επίπεδο xy σχηματίζει η ταχύτητα με τον άξονα x. Συνεπώς για την διεξαγωγή των αποτελεσμάτων με την βοήθεια της μεθόδου επιλέχθηκε τιμή υστέρησης 18 και ακτίνα αποκοπής 40. Τα αποτελέσματα όπως αυτά προέκυψαν από την μέθοδο δίνονται παρακάτω.



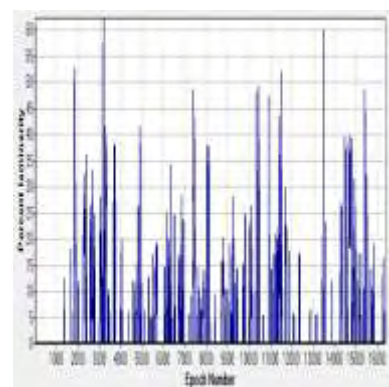
**Γράφημα 3.20 Γράφημα επαναφοράς χρονοσειράς προσομοίωσης ταχύτητας καθόδου του ανέμου σε λόφο. Χρονοσειρά γωνίας ταχύτητας ανέμου συναρτήσει όλων των συνιστωσών.**



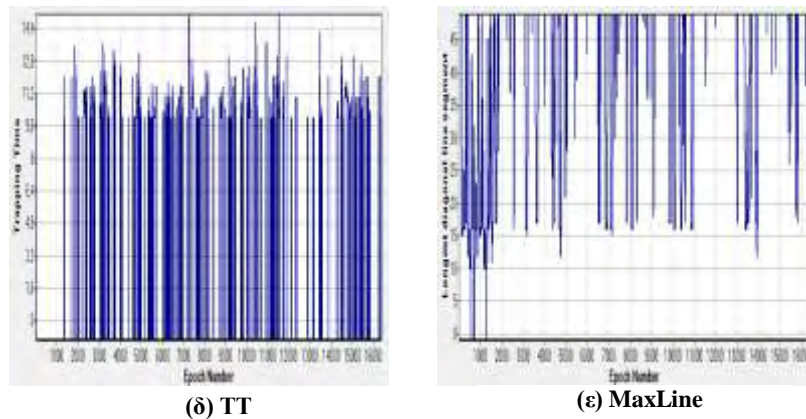
**(α) %REC**



**(β) %DET**



**(γ) %LAM**



**Σχ.3.20 Χρονοσειρά γωνίας ταχύτητας ανέμου συναρτήσει όλων των συνιστωσών. Διαγράμματα μεθόδου ποσοτικής ανάλυσης επαναφοράς: (α) %REC - ποσοστό επαναφοράς, (β) %DET - ποσοστό ντετερμινισμού, (γ) %LAM - ποσοστό Laminarity, (δ) χρόνο παγίδευσης TT – Trapping Time, (ε) μέγιστη διαγώνια γραμμή Max Line.**

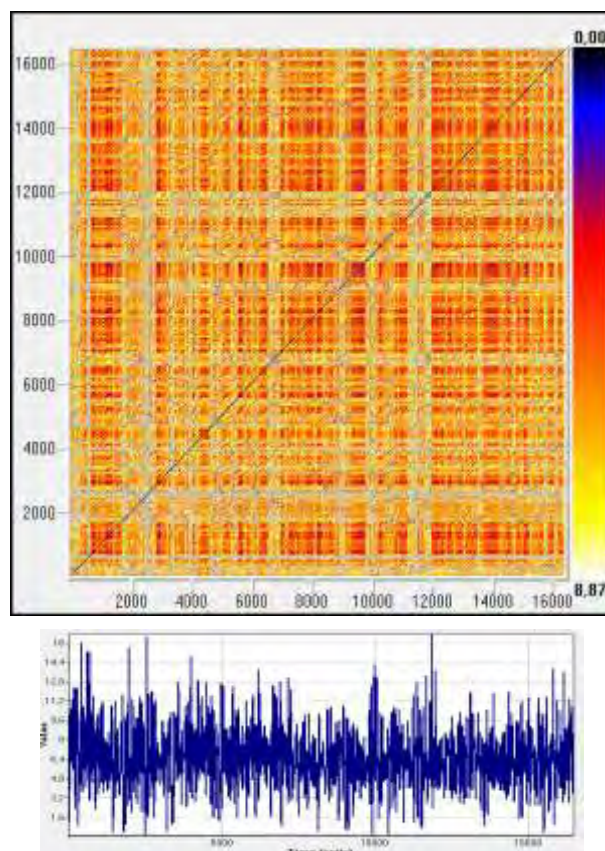
Σύμφωνα με το γράφημα επαναφοράς 3.20 που αντιστοιχεί στην γωνία της ταχύτητας καθόδου του ανέμου σε λόφο προκύπτουν περιοχές μετάβασης 0-5000, 5000-10000, 10000-11500 και 11500 έως τέλος. Ωστόσο κυριαρχούν οι ενδιάμεσες αποστάσεις των σημείων εφόσον στο γράφημα το πορτοκαλί και κίτρινο χρώμα είναι αυτό που επικρατεί. Επιπλέον στις περιοχές γύρω από το 5000 και το 11500 είναι εμφανής η απότομη αλλαγή στην δυναμική του συστήματος.

Στο διάγραμμα (β) στο σχ.3.20 η προβλεψιμότητα του συστήματος μειώνεται αισθητά στην περιοχή μετάβασης 0-1500, διάστημα που ανήκει στην πρώτη περιοχή μετάβασης. Επιπλέον γύρω από το 5000, το 11000 και το 14000 παρουσιάζεται παρόμοια συμπεριφορά στην προβλεψιμότητα του συστήματος. Για όλες τις άλλες περιοχές μπορούμε να πούμε ότι εφόσον έχουμε υψηλότερο ποσοστό ντετερμινισμού ότι έχουμε καλύτερη προβλεψιμότητα. Ενδιαφέρον φαίνεται να υπάρχει και στο διάγραμμα (γ) όπου το ποσοστό Laminarity είναι γενικότερα δεν εμφανίζει πολύ υψηλές τιμές. Τέλος έντονη είναι η ύπαρξη των μέγιστων διαγωνίων γραμμών όπως διακρίνουμε στο διάγραμμα (ε) στο σχ.3.20 που υποδηλώνουν ότι το σύστημα είναι χαοτικό. Ενώ ο χρόνος παγίδευσης στο διάγραμμα (δ) δεν παραμένει σταθερός.

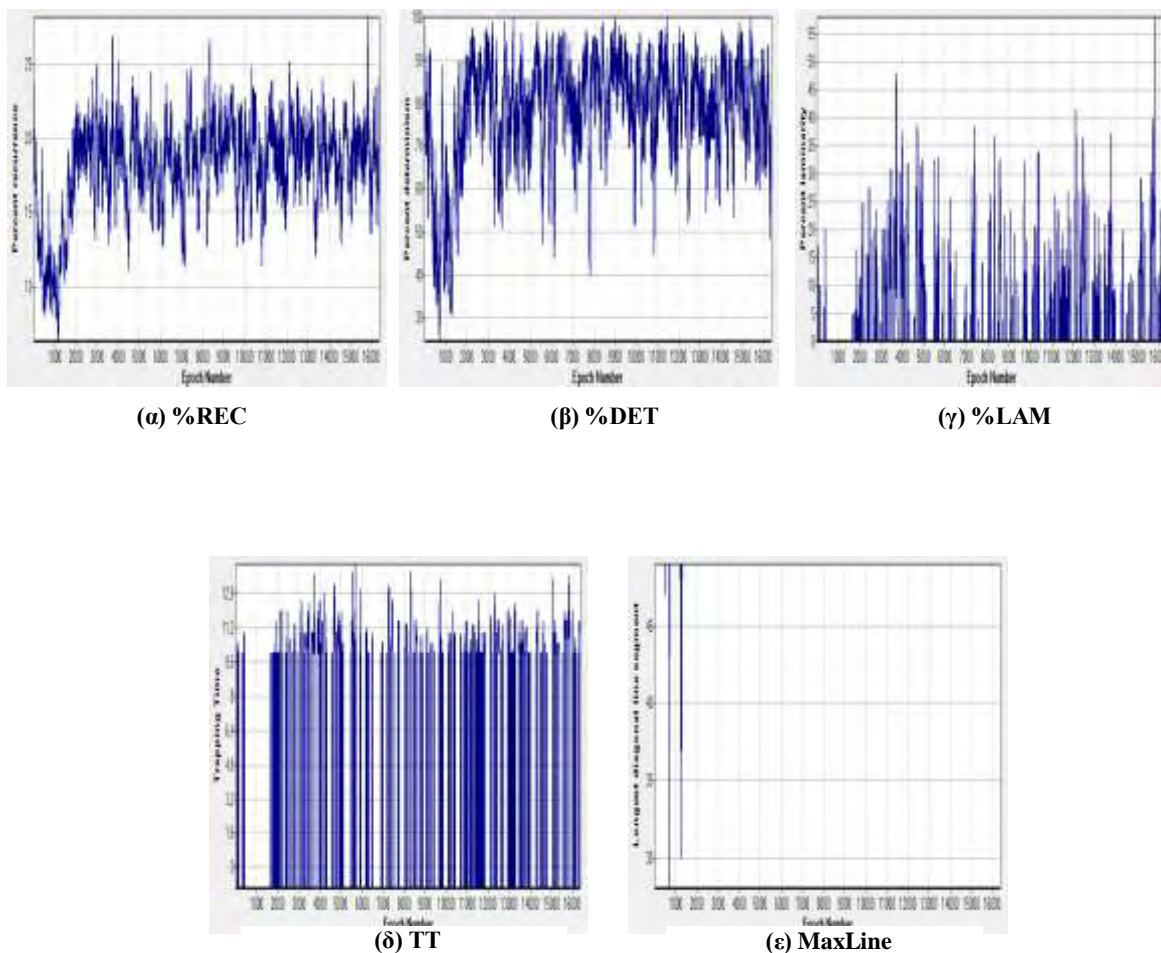


### 3.2.2.6 Χρονοσειρά Μέτρου Ταχύτητας Ανέμου Συναρτήσκει των Δύο Συνιστωσών $f(x,y)$

Σε αυτό το υποκεφάλαιο μελετάται η χρονοσειρά του μέτρου της ταχύτητας του ανέμου συναρτήσκει των δύο συνιστωσών ( $x$  και  $y$ ). Επιλέχθηκε χρονική υστέρηση ίση με 19 και ακτίνα αποκοπής 45.



**Γράφημα 3.21 Γράφημα επαναφοράς χρονοσειράς προσομοίωσης ταχύτητας καθόδου του ανέμου σε λόφο. Χρονοσειρά μέτρου ταχύτητας ανέμου συναρτήσκει των δύο συνιστωσών.**



**Σχ.3.21 Χρονοσειρά μέτρου ταχύτητας ανέμου συναρτήσει των δύο συνιστωσών. Διαγράμματα μεθόδου ποσοτικής ανάλυσης επαναφοράς: (α) %REC - ποσοστό επαναφοράς, (β) %DET - ποσοστό ντετερμινισμού, (γ) %LAM - ποσοστό Laminarity, (δ) χρόνο παγίδευσης TT – Trapping Time, (ε) μέγιστη διαγώνια γραμμή Max Line.**

Το γράφημα επαναφοράς που προκύπτει για την χρονοσειράς μέτρου ταχύτητας συναρτήσει των δύο συνιστωσών είναι παρόμοιο με αυτό της χρονοσειράς του μέτρου στην οποία συμπεριλήφθηκαν και οι τρεις συνιστώσες. Συνεπώς οι περιοχές μετάβασης που διακρίνονται είναι 0-1800, 1800-3000, 3000-6500, 6500-7000, 7000-8500, 8500-12000 και 1200 έως τέλος.

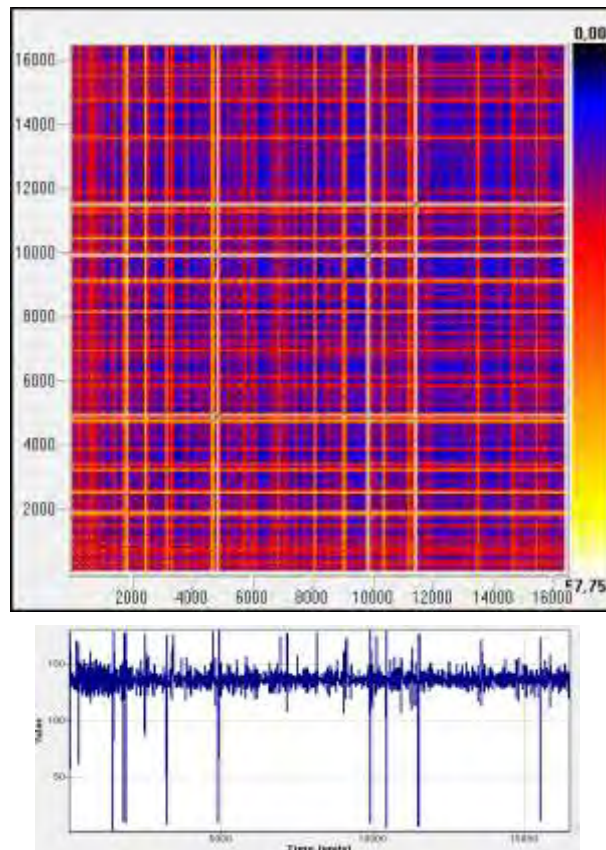
Ωστόσο τα διαγράμματα μας βοηθούν ώστε να μελετηθεί η συμπεριφορά του συστήματος και μικροσκοπικά. Παρατηρείται λοιπόν ότι το διάγραμμα (β) στο σχ.3.21 ακολουθεί την μορφή του διαγράμματος (β) στο σχ.3.19 με την διαφορά ότι στην χρονοσειρά για την οποία χρησιμοποιήθηκαν οι δύο μόνο συνιστώσες η ντετερμινιστική συμπεριφορά δεν είναι τόσο έντονη. Σύμφωνα με το σχ.3.21(β) τόσο

στην πρώτη περιοχή μετάβασης όσο και στην πορεία της χρονοσειρές το ποσοστό ντετερμινισμού είναι χαμηλότερο από αυτό στο σχ.3.19(β). όσον αφορά το ποσοστό Laminarity σύμφωνα με το διάγραμμα (γ) έχουμε πολλά επαναλαμβανόμενα σημεία στο σύστημα.

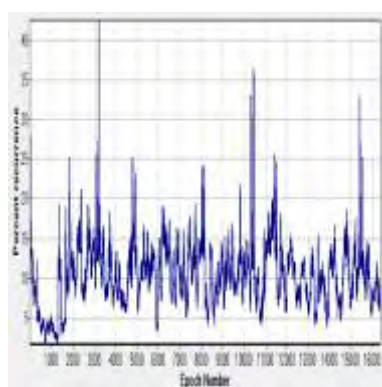
Επιπλέον σε αντίθεση με την χρονοσειρά του μέτρου της ταχύτητας του ανέμου συναρτήσει όλων των συνιστωσών η παρούσα χρονοσειρά δεν παρουσιάζει σταθερό χρόνο παγίδευσης, αντίθετα μειώνεται αρκετές φορές όπως φαίνεται και στο σχ.3.21(δ). Αντίθετα το διάγραμμα που αφορά την μέγιστη γραμμή είναι σχεδόν όμοιο και στις δύο χρονοσειρές του μέτρου της ταχύτητας. Συνεπώς μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η συνιστώσα  $z$  της ταχύτητας ίσως οφείλεται για την καλύτερη και πιο σταθερή συμπεριφορά του συστήματος.

### **3.2.2.7 Χρονοσειρά Γωνίας Ταχύτητας Ανέμου Συναρτήσει των Δύο Συνιστωσών $f(x,y)$**

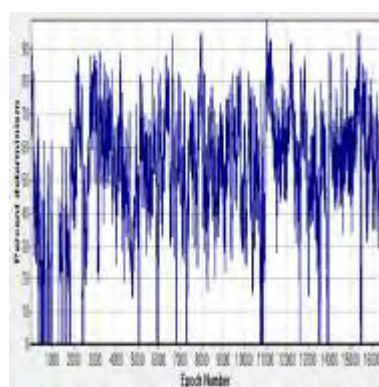
Παρακάτω υπολογίζεται η μέγιστη γωνία που σχηματίζει το διάνυσμα της ταχύτητας καθόδου του ανέμου στο επίπεδο  $(xy)$ , λαμβάνοντας υπόψη μόνο τις δύο συνιστώσες  $(x$  και  $y)$ . Αποδείχθηκε ότι μεγαλύτερη γωνία στο επίπεδο  $xy$  σχηματίζει η ταχύτητα με τον άξονα  $y$ . Συνεπώς, επιλέγοντας τιμή υστέρησης 19 και ακτίνα αποκοπής 35 προκύπτουν το γράφημα επαναφοράς και τα αντίστοιχα διαγράμματα της χρονοσειράς.



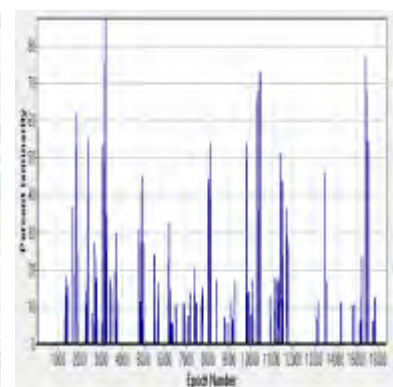
**Γράφημα 3.22 Γράφημα επαναφοράς χρονοσειράς προσομοίωσης ταχύτητας καθόδου του ανέμου σε λόφο. Χρονοσειρά γωνίας ταχύτητας ανέμου συναρτήσει των δύο συνιστωσών.**



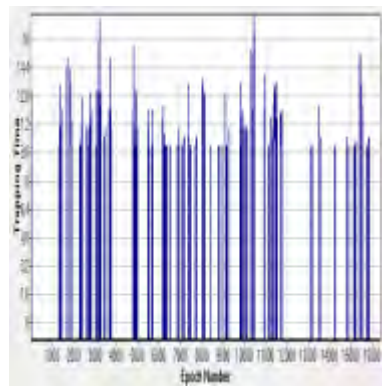
**(α) %REC**



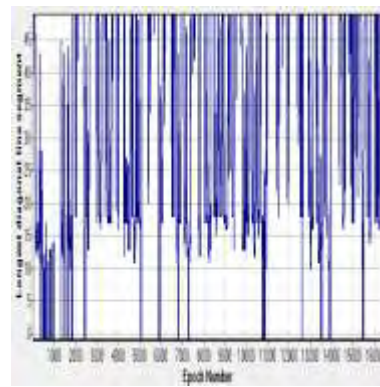
**(β) %DET**



**(γ) %LAM**



(δ) TT



(ε) MaxLine

**Σχ.3.22 Χρονοσειρά γωνίας ταχύτητας ανέμου συναρτήσει των δύο συνιστωσών. Διαγράμματα μεθόδου ποσοτικής ανάλυσης επαναφοράς: (α) %REC - ποσοστό επαναφοράς, (β) %DET - ποσοστό ντετερμινισμού, (γ) %LAM - ποσοστό Laminarity, (δ) χρόνο παγίδευσης TT – Trapping Time, (ε) μέγιστη διαγώνια γραμμή Max Line.**

Το γράφημα επαναφοράς 3.22 αντιστοιχεί στην γωνία της ταχύτητας καθόδου του ανέμου σε λόφο, που προέκυψε λαμβάνοντας υπόψη τις δύο μόνο συνιστώσες της ταχύτητας στον άξονα x και y. Οι περιοχές μετάβασης που διακρίνονται είναι όμοιες με τις περιοχές της αντίστοιχης χρονοσειράς της γωνίας της ταχύτητας που προήλθε από όλες τις συνιστώσες (κεφ. 3.2.2.5), αυτές είναι 0-5000, 5000-10000, 10000-11500 και 11500 έως τέλος. Γενικότερα στο γράφημα 3.22 παρουσιάζονται πολλές κουκίδες με έντονο μπλε χρώμα που σημαίνει ότι σε αυτές τις περιοχές υπάρχουν σημεία που βρίσκονται σε πολύ κοντινές αποστάσεις μεταξύ τους, κάτι που γίνεται περισσότερο έντονο όσο εξελίσσεται η χρονοσειρά. Ωστόσο ανάμεσα σε αυτά τα σημεία εμφανίζονται και περιοχές (ιδιαίτερα στην αρχή της πρώτης περιοχής μετάβασης) όπου τα σημεία βρίσκονται σε ενδιάμεσες αποστάσεις μεταξύ τους.

Καλή προβλεψιμότητα για το σύστημα διαπιστώνεται ότι υπάρχει στα διαστήματα 3000-5000, 7500-10000 και γύρω από το 14500 όπου το ποσοστό ντετερμινισμού είναι υψηλό. Ενώ στις υπόλοιπες περιοχές όπως διακρίνουμε και από το σχ.3.22(β) το ποσοστό ντετερμινισμού μειώνεται και μηδενίζεται. Το ποσοστό Laminarity είναι επίσης χαμηλό συγκριτικά για όλη την χρονοσειρά. Τέλος ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει στο διάγραμμα (ε) ύπαρξη των μέγιστων διαγωνίων γραμμών, όπου γενικότερα, εκτός από κάποιες εξαιρέσεις που μηδενίζεται η τιμή για την Maxline, δεν παρουσιάζει χαοτική συμπεριφορά το σύστημα.



## 4. ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Σε αυτό το κεφάλαιο ο στόχος είναι να συγκριθούν αρχικά όλες οι χρονοσειρές πεδίου που αφορούν την ταχύτητα ανέμου και όλες οι χρονοσειρές πεδίου που αφορούν την γωνία του ανέμου. Στη συνέχεια γίνεται σύγκριση των χρονοσειρών προσομοίωσης που προέκυψαν από την ταχύτητα ανόδου του ανέμου σε λόφο και την ταχύτητα καθόδου αντίστοιχα και τέλος τα αντίστοιχα μεγέθη των χρονοσειρών πεδίου και προσομοίωσης, προκειμένου να διεξαχθούν γενικότερα συμπεράσματα.

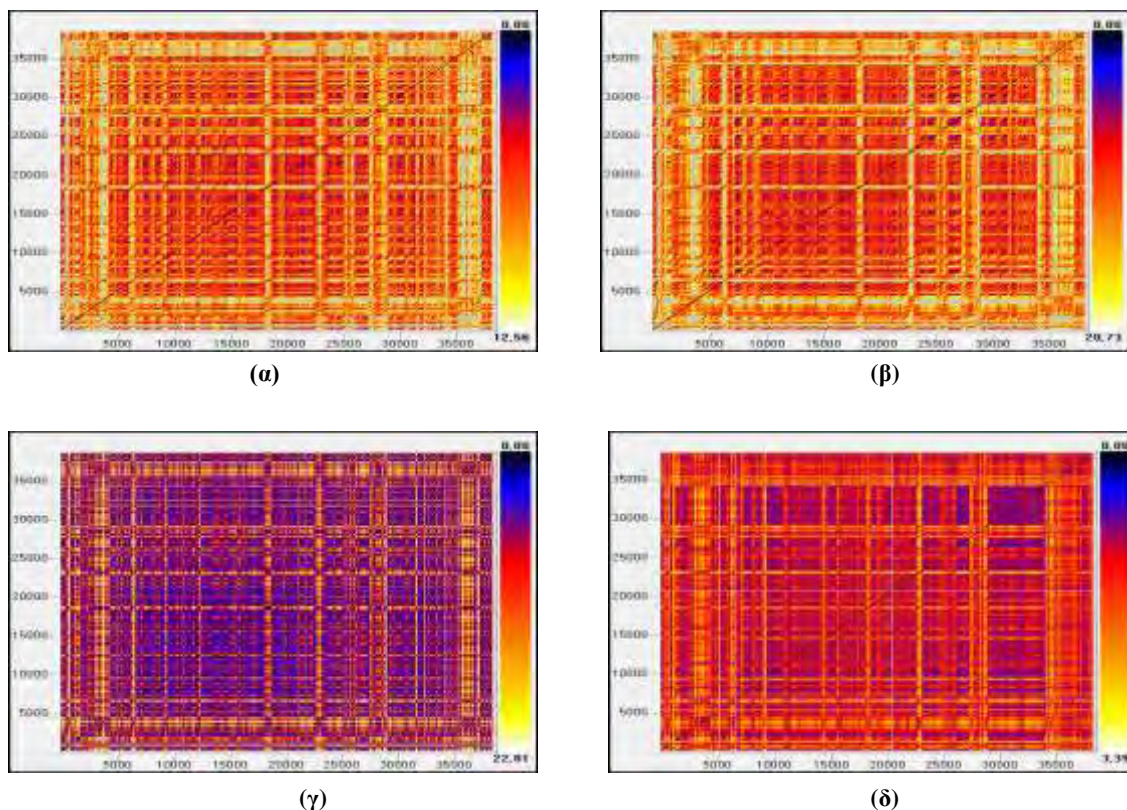
### 4.1 Σύγκριση Χρονοσειρών Πεδίου Ταχύτητας Ανέμου

Η χρονοσειρά πεδίου ταχύτητας ανέμου έχει αναφερθεί ότι χωρίζεται σε τέσσερις επιμέρους χρονοσειρές που αφορούν μετρήσεις του ελαχίστου, του μεγίστου, του μέσου όρου και της τυπικής απόκλισης. Αποτελείται συνολικά από 38540 μετρήσεις, οι οποίες έλαβαν μέρος στην περιοχή του Αιγίου για διάστημα περίπου ενός έτους (23/03/2005 – 16/12/2005) και με χρονικό βήμα δέκα λεπτών.

Με την βοήθεια των γραφημάτων επαναφοράς, τα οποία προέκυψαν από την μέθοδο της ποσοτικής ανάλυσης επαναφοράς μπορούν να διεξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με την συμπεριφορά του συστήματος. Υπενθυμίζεται ότι οι σκούρες μαύρες και μπλε κουκίδες απεικονίζουν σημεία που βρίσκονται σε κοντινές αποστάσεις, οι κόκκινες και πορτοκαλί κουκίδες αναφέρονται σε ενδιάμεσες καταστάσεις (σε ενδιάμεσες αποστάσεις), τα πιο ανοιχτόχρωμα σημεία (κίτρινες και άσπρες κουκίδες) αναπαριστούν τις απότομες αλλαγές στην κατάσταση του συστήματος και τέλος τα γκρι σημεία δεν είναι σημεία επαναφοράς.

Ωστόσο πρέπει να αναφερθεί ότι απαιτήθηκαν, σύμφωνα με τις πληροφορίες που έχουμε για την χρονοσειρά, περίπου 4538 μετρήσεις μηνιαίως και το πείραμα διήρκεσε εννέα μήνες περίπου. Με αυτά τα δεδομένα μπορούμε να υπολογίσουμε σε ποια χρονική στιγμή έγινε η μέτρηση, προκειμένου να καταλάβουμε και να εξηγήσουμε τη συμπεριφορά της κάθε χρονοσειράς, διότι η συμπεριφορά της

χρονοσειράς της ταχύτητας ανέμου εξαρτάται από την περιοχή μελέτης, από τα μορφολογικά χαρακτηριστικά του εδάφους και της ευρύτερης περιοχής της μελέτης, από τις συνθήκες του περιβάλλοντος (καλοκαίρι ή χειμώνας κ.τ.λ.) και γενικότερα υπάρχει ένα σύνολο παραγόντων που όσο καλύτερα προσδιοριστεί τόσο καλύτερα μπορούν τα αποτελέσματα να αξιολογηθούν και να χρησιμοποιηθούν προς όφελος του ανθρώπου.



**Σχ.4.1 Γραφήματος επαναφοράς χρονοσειράς πεδίου ταχύτητας ανέμου: (α) χρονοσειρά του ελαχίστου, (β) χρονοσειρά του μεγίστου, (γ) χρονοσειρά του μέσου όρου και (δ) χρονοσειρά της τυπικής απόκλισης.**

Στο σχ.4.1 παρουσιάζονται τα διαγράμματα επαναφοράς των χρονοσειρών της ταχύτητας του ανέμου. Διακρίνεται ότι όλες οι χρονοσειρές της ταχύτητας ανέμου έχουν σχεδόν την ίδια δυναμική. Ιδιαίτερα η χρονοσειρά του ελαχίστου και του μεγίστου εμφανίζουν σχεδόν το ίδιο γράφημα επαναφοράς, όπου υπερτερούν οι ενδιάμεσες αποστάσεις μεταξύ των σημείων ενώ συγχρόνως σε κάποια διαστήματα είναι έντονη η απότομη αλλαγή στην δυναμική του συστήματος, η οποία εμφανίζεται

με λευκές και γενικότερα ανοιχτόχρωμες κουκίδες. Στο γράφημα (γ) που αφορά την χρονοσειρά του μέσου όρου στο σχ.4.1, είναι ιδιαίτερα έντονες οι σκουρόχρωμες περιοχές που υποδηλώνουν ότι υπάρχουν σημεία σε πολύ κοντινές αποστάσεις. Ενώ στο διάγραμμα (δ) της τυπικής απόκλισης παρουσιάζεται έντονη εναλλαγή μεταξύ των σημείων που βρίσκονται τόσο σε κοντινές όσο και σε ενδιάμεσες αποστάσεις μεταξύ τους.

Οι περιοχές μετάβασης που προκαλούν ενδιαφέρον, είναι η περιοχή 0-5000 όπου οι λευκές ζώνες είναι ιδιαίτερα έντονες γύρω από την διαγώνιο, ιδιαίτερα στην χρονοσειρά του ελαχίστου και του μεγίστου, συνεπώς παρουσιάζονται απότομες αλλαγές στην δυναμική κατάσταση του συστήματος. Αυτό μπορεί να οφείλεται επίσης στο γεγονός ότι οι μετρήσεις του συγκεκριμένου διαστήματος έγιναν κυρίως τον μήνα Απρίλιο, για τον οποίο μπορεί να θεωρηθεί ότι ευνοούνται οι αλλαγές στα χαρακτηριστικά του ανέμου διότι γίνεται μετάβαση από μία πιο κρύα περίοδο σε μία πιο ζεστή του μήνα Μαΐου.

Στην συνέχεια στην περιοχή 5000-17500, δεδομένου ότι είναι εμφανής οι πιο σκούρες ζώνες, υπάρχουν σημεία στις χρονοσειρές του ελαχίστου και του μεγίστου που βρίσκονται σε ενδιάμεσες αποστάσεις μεταξύ τους ενώ σε πιο κοντινές αποστάσεις βρίσκονται αντίστοιχα τα σημεία για τις χρονοσειρές του μέσου όρου και της τυπικής απόκλισης. Στη χρονοσειρά του μέσου όρου που αντικατοπτρίζεται γενικότερα η συμπεριφορά της ταχύτητας του ανέμου φαίνεται ότι για τους μήνες που έγιναν οι μετρήσεις (Μάιο- αρχές Ιουλίου) σε αυτή τη περιοχή μετάβασης δεν εμφανίζονται ιδιαίτερες αλλαγές.

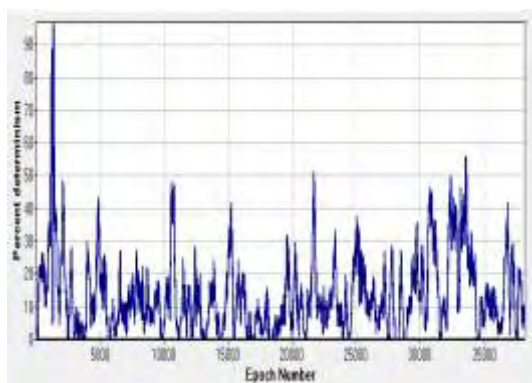
Ακολουθεί μία μικρότερη περιοχή μετάβασης 17500-22500, στην οποία δεν επικρατεί ομοιόμορφη συμπεριφορά στο σύστημα. Στα όρια της περιοχή αυτής και για τις τέσσερις χρονοσειρές παρατηρείται ότι τα σημεία βρίσκονται σε μεγάλες αποστάσεις μεταξύ τους, ενώ στο κέντρο βρίσκονται πιο κοντά. Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι οι μετρήσεις αυτής της περιοχής μετάβασης έγιναν κυρίως τον Ιούλιο, επηρεάζοντας τα αποτελέσματα. Στη συνέχεια διακρίνεται η περιοχή μετάβασης 22500-27500, όπου τόσο στην αρχή όσο και στο τέλος επικρατούν οι ενδιάμεσες αποστάσεις μεταξύ των σημείων, ιδιαίτερα στα γραφήματα (γ) και (δ). Ενώ στις χρονοσειρές του ελαχίστου και του μεγίστου υπάρχουν περιοχές συγκεκριμένα γύρω στο 23000, λίγο μετά το 25000 και πριν το 27500 όπου εμφανίζονται λευκές ζώνες (απότομη αλλαγή στην



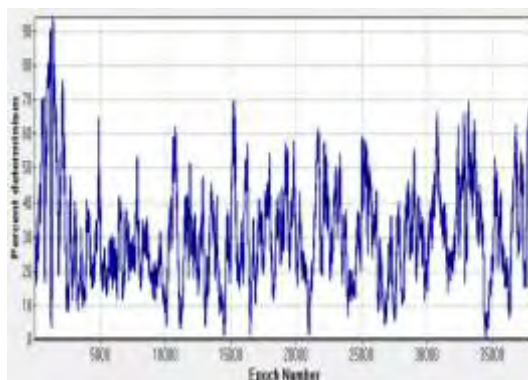
δυναμική του συστήματος). Αντίθετα στο κέντρο και των τεσσάρων χρονοσειρών επικρατούν πιο σταθερές καταστάσεις.

Η επόμενη περιοχή μετάβασης είναι μία ζώνη γύρω από την διαγώνια γραμμή περίπου στο διάστημα 27500-29000, όπου τα σημεία εναλλάσσονται σε ενδιάμεσες και πολύ μεγάλες αποστάσεις. Ισχύει η ίδια συμπεριφορά για τις χρονοσειρές του ελαχίστου και του μεγίστου, δεδομένου ότι οι μετρήσεις αφορούν κυρίως τον μήνα Σεπτέμβριο όπου τα κλιματολογικά χαρακτηριστικά αλλάζουν. Όσον αφορά τις χρονοσειρές του μέσου όρου και της τυπικής απόκλισης τα σημεία είναι πιο σταθερά σύμφωνα με τα αντίστοιχα γραφήματα επαναφοράς στο σχ.4.1. Ακολουθεί ένα σύνολο σημείων (29000-35000) που ανήκουν σε πιο σκούρες περιοχές κυρίως στις χρονοσειρές των γραφημάτων (γ) και (δ) και τέλος η περιοχή μετάβασης 35000-38000 που επικρατούν οι λευκές κουκίδες ειδικά στις χρονοσειρές όπου οι μετρήσεις είναι ακραίες δηλαδή αφορούν ελάχιστες ή μέγιστες τιμές ((α) και (β)). Επιπλέον εμφανής είναι επίσης και οι παράλληλες γραμμές στην κύρια διαγώνιο για τις χρονοσειρές του ελαχίστου και του μεγίστου κάτι που δεν συμβαίνει στις άλλες δυο.

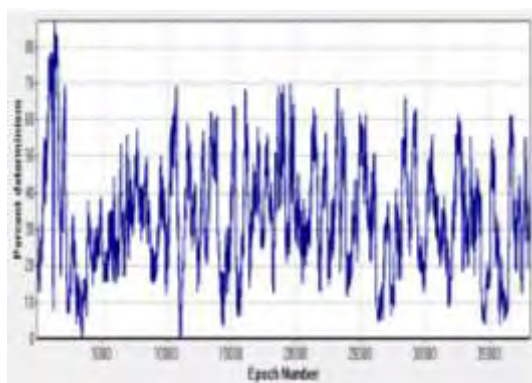
Παρακάτω δίνονται τα διαγράμματα, για όλες τις χρονοσειρές της ταχύτητας ανέμου, για το ποσοστό ντετερμινισμού (σχ.4.2) και για την μέγιστη διαγώνιο γραμμή – Maxline (σχ.4.3) προκειμένου να γίνει η σύγκριση τους και να καταλήξουμε σε μία πιο ολοκληρωμένη εικόνα σχετικά με τη συμπεριφορά του μεγέθους της ταχύτητας.



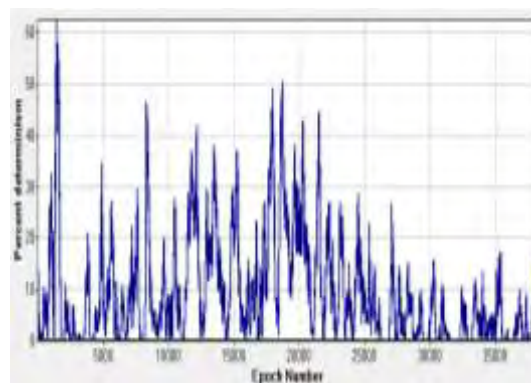
(α) Ελάχιστου



(β) Μεγίστου



(γ) Μέσου Όρου

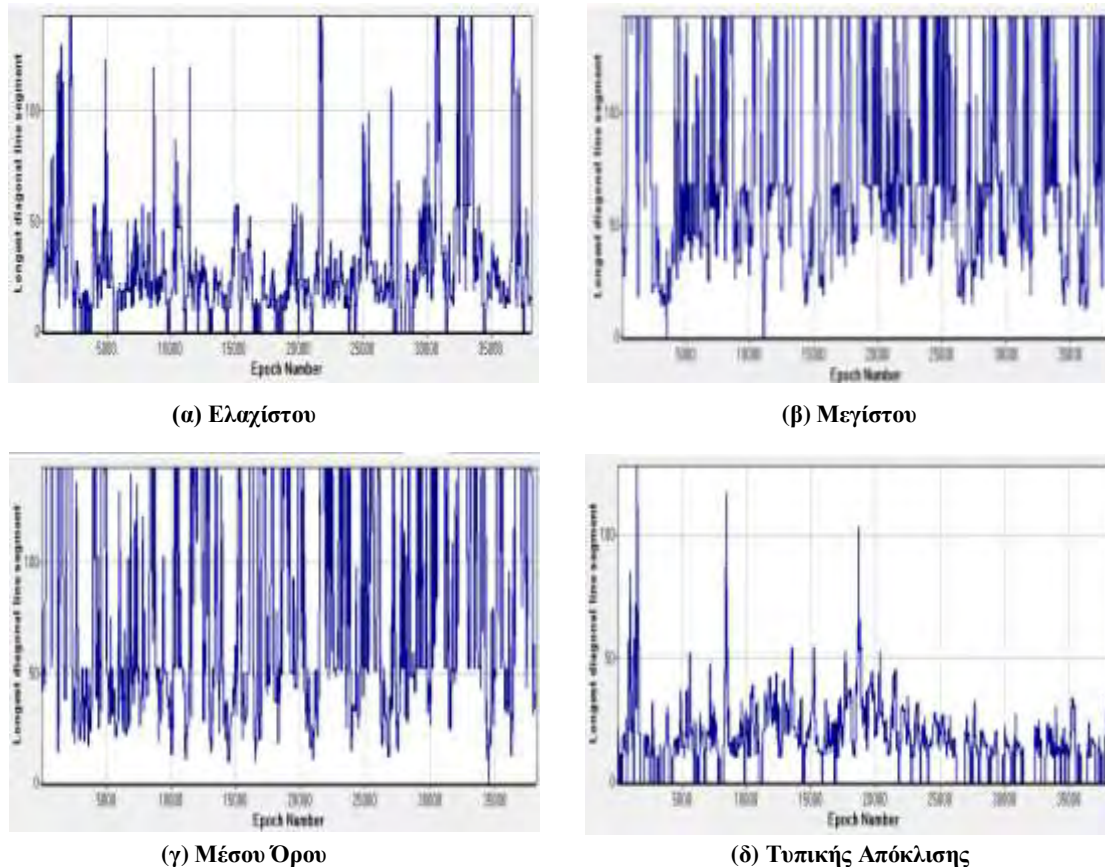


(δ) Τυπικής Απόκλισης

**Σχ.4.2 Διαγράμματα ποσοστού ντετερμινισμού για την χρονοσειρά πεδίου ταχύτητας ανέμου: (α) χρονοσειρά του ελαχίστου, (β) χρονοσειρά του μεγίστου, (γ) χρονοσειρά του μέσου όρου και (δ) χρονοσειρά της τυπικής απόκλισης.**

Για το ποσοστό ντετερμινισμού ισχύει ότι όσο υψηλό είναι το ποσοστό ντετερμινισμού τόσο πιο έντονη είναι ύπαρξη της ντετερμινιστική συμπεριφοράς του συστήματος και συνεπώς διακρίνεται από μεγαλύτερη προβλεψιμότητα. Στο σχ.4.2 παρατηρούμε ότι η χρονοσειρά του ελαχίστου παρουσιάζει γενικότερα μικρότερα ποσοστά, αυτό μπορεί να οφείλεται στο ότι οι ελάχιστες τιμές που παίρνει το μέγεθος της ταχύτητας είναι δύσκολο να προβλεφθούν. Στην συνέχεια λίγο μεγαλύτερα ποσοστά εμφανίζει η χρονοσειρά του μεγίστου στο σχ.4.2(β), η οποία επηρεάζει και την χρονοσειρά του μέσου όρου. Τέλος στο σχ.4.2(δ) που αφορά στη χρονοσειρά της τυπικής απόκλισης φαίνεται πως υπάρχουν αρκετές εναλλαγές στο ποσοστό του

ντετερμινισμού με αυτό να παίρνει υψηλές τιμές κυρίως τους καλοκαιρινούς μήνες που οι αποκλίσεις μπορούν καλύτερα να προβλεφθούν.

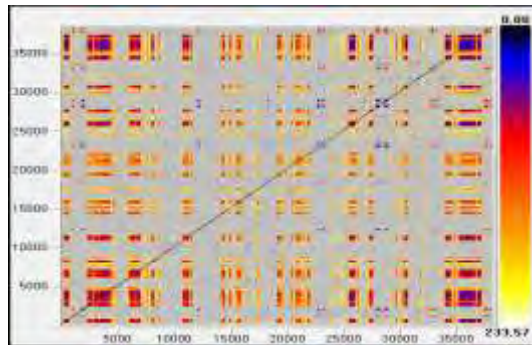


**Σχ.4.3 Διαγράμματα μέγιστης διαγώνιας γραμμής Max Line για την χρονοσειρά πεδίου ταχύτητας ανέμου: (α) χρονοσειρά του ελάχιστου, (β) χρονοσειρά του μεγίστου, (γ) χρονοσειρά του μέσου όρου και (δ) χρονοσειρά της τυπικής απόκλισης.**

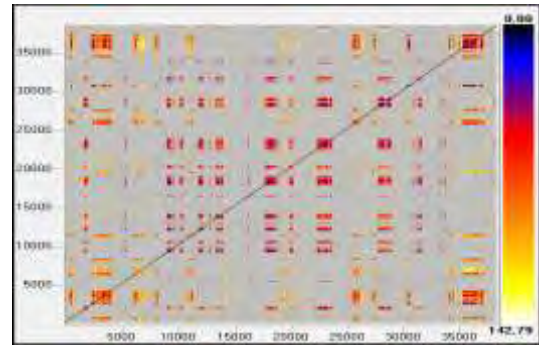
Το διάγραμμα MAX LINE που αντιστοιχεί στο μήκος της μέγιστης διαγώνιας γραμμής όπως έχει ήδη αναφερθεί περιγράφει την δυναμική του συστήματος και είναι αντιστρόφως ανάλογο της τιμής του μεγίστου εκθέτη Lyapunov. Επιπλέον όσο μικρότερη είναι η MAX LINE, τόσο πιο χαοτικό και λιγότερο σταθερό είναι το σύστημα. Στο σχ.4.3 μεγαλύτερη χαοτική συμπεριφορά εμφανίζεται στην χρονοσειρά του ελάχιστου και της τυπικής απόκλισης ενώ αντίθετα η χρονοσειρά του μεγίστου και του μέσου όρου εμφανίζουν μεγαλύτερη σταθερότητα.

## 4.2 Σύγκριση Χρονοσειρών Πεδίου Γωνίας Ανέμου

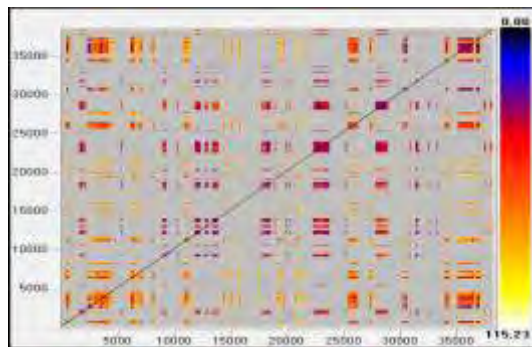
Παρακάτω δίνονται τα γραφήματα επαναφοράς που αφορούν την χρονοσειρά πεδίου γωνίας ανέμου, όπως αυτά προέκυψαν από την μέθοδο Visual Recurrence Analysis.



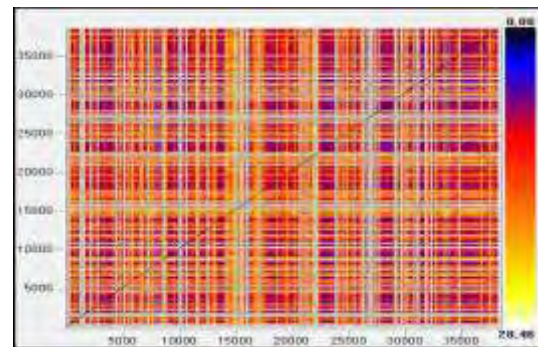
(α)



(β)



(γ)



(δ)

**Σχ.4.4** Γραφήματος επαναφοράς χρονοσειράς πεδίου γωνίας ανέμου: (α) χρονοσειρά του ελαχίστου, (β) χρονοσειρά του μεγίστου, (γ) χρονοσειρά του μέσου όρου και (δ) χρονοσειρά της τυπικής απόκλισης.

Όσον αφορά τις χρονοσειρές πεδίου γωνίας ανέμου φαίνεται πως η δυναμική του συστήματος διαφέρει για την κάθε χρονοσειρά. Παρατηρείται στην αρχή κάθε χρονοσειράς μία περιοχή (0-1000) όπου τα σημεία είναι σε κοντινές αποστάσεις, αυτή η περιοχή είναι εμφανής και στις τέσσερις χρονοσειρές σε κάποιες το διάστημα είναι μεγαλύτερο και σε κάποιες μικρότερο. Στη συνέχεια η περιοχή μετάβασης (2500-5000) διακρίνεται από πιο σκούρες περιοχές.

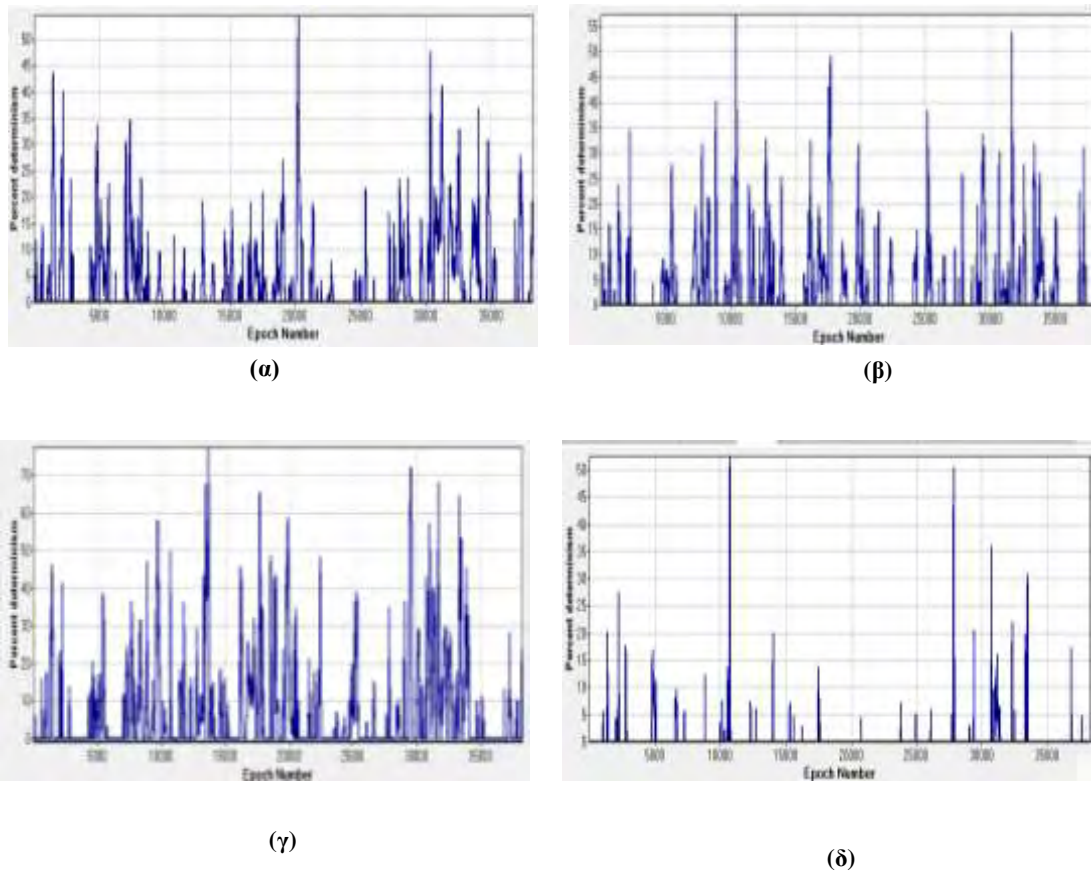
Οι περιοχές μετάβασης που ακολουθούν είναι διαφορετικές για τις τέσσερις χρονοσειρές. Ενδιαφέρον παρουσιάζεται στο διάστημα 6000-8000 όπου στην χρονοσειρά του ελαχίστου το σύστημα φαίνεται να έχει περισσότερα σημεία σε κοντινές αποστάσεις συγκριτικά με τις άλλες χρονοσειρές. Παραλείποντας τις γκρι ζώνες, η περιοχή μετάβασης 11000-12000 εμφανίζει πορτοκαλί και κίτρινες ζώνες (ενδιάμεσες καταστάσεις), όπου το διάστημα διαφέρει σε κάθε χρονοσειρά και η χρονοσειρά της τυπικής απόκλισης εμφανίζει πιο πολύπλοκη μορφή.

Στη συνέχεια η περιοχή 13000-17000 παρουσιάζει δομή σκακίρας, η οποία είναι πιο έντονη στις χρονοσειρές του μέσου όρου και της τυπικής απόκλισης. Επίσης η περιοχή 18000-22000 εμφανίζει δομή σκακίρας η οποία όμως στο συγκεκριμένο διάστημα είναι πιο έντονη και ευδιάκριτη στις χρονοσειρές του ελαχίστου και της τυπικής απόκλισης. Το διάστημα 23000-27000 παρουσιάζονται εναλλαγές στην συμπεριφορά του συστήματος, υπάρχουν απότομες αλλαγές στην συμπεριφορά του συστήματος καθώς και πιο σκούρες ζώνες.

Η περιοχή γύρω από το 30000 εμφανίζει αρκετές γκρι ζώνες και πορτοκαλί περιοχές. Τέλος στην αρχή του διαστήματος 33000-37000 εμφανίζονται αρκετές απότομες αλλαγές και στην συνέχεια πιο σκούρες περιοχές. Επίσης πρέπει να σημειωθεί ότι απουσιάζουν από τα γραφήματα επαναφοράς της γωνίας του ανέμου οι διαγώνιες γραμμές, που αυτό συνεπάγεται με ένα στοχαστικό σήμα.

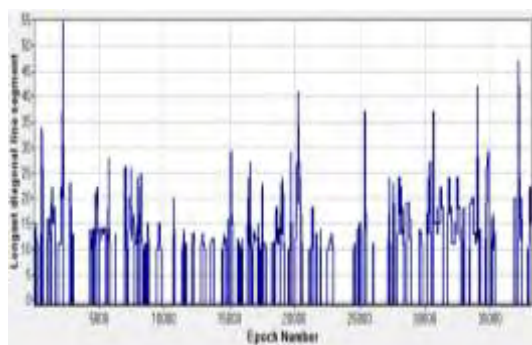
Στη συνέχεια δίνονται τα διαγράμματα για το ποσοστό ντετερμινισμού (σχ.4.5) και για την μέγιστη διαγώνιο γραμμή (σχ.4.5), για την χρονοσειρά της γωνίας του ανέμου.



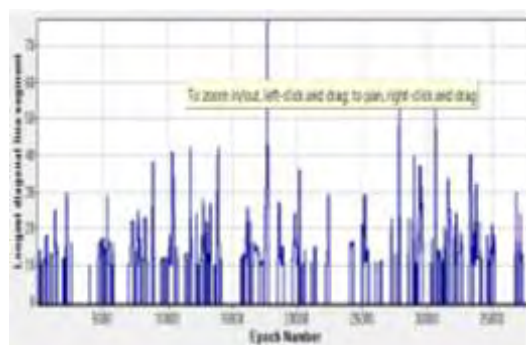


**Σχ.4.5 Διαγράμματα ποσοστού ντετερμινισμού για την χρονοσειρά πεδίου ταχύτητας ανέμου: (α) χρονοσειρά του ελαχίστου, (β) χρονοσειρά του μεγίστου, (γ) χρονοσειρά του μέσου όρου και (δ) χρονοσειρά της τυπικής απόκλισης.**

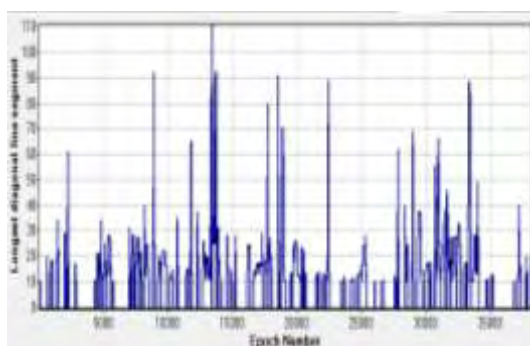
Η ντετερμινιστική συμπεριφορά είναι σχεδόν όμοια για τις χρονοσειρές της γωνίας του ανέμου εξαιρείται η χρονοσειρά της τυπικής απόκλισης η οποία παρουσιάζει χαμηλά ποσοστά συνεπώς μικρότερη προβλεψιμότητα. Ωστόσο όπως παρατηρείται δεν υπάρχει ομοιομορφία κατά την εξέλιξη των χρονοσειρών, κατά την πορεία των οποίων επικρατούν εναλλαγές στα ποσοστά.



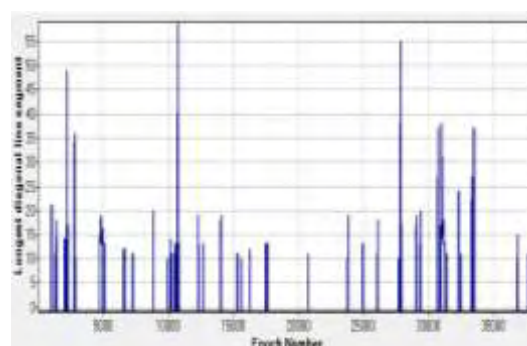
(α)



(β)



(γ)



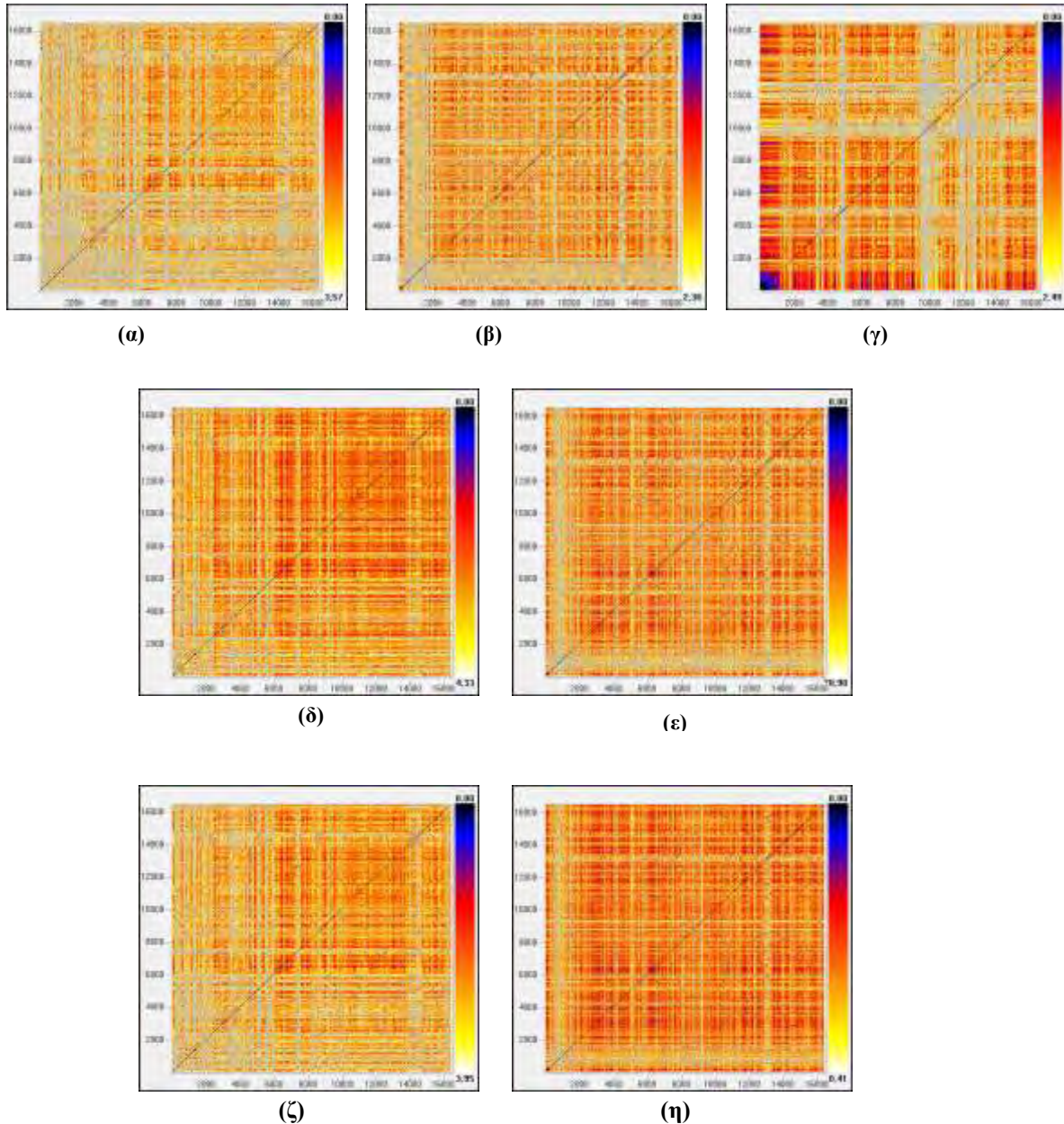
(δ)

**Σχ.4.6 Διαγράμματα μέγιστης διαγώνιας γραμμής Max Line για την χρονοσειρά πεδίου ταχύτητας ανέμου: (α) χρονοσειρά του ελαχίστου, (β) χρονοσειρά του μεγίστου, (γ) χρονοσειρά του μέσου όρου και (δ) χρονοσειρά της τυπικής απόκλισης.**

Ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης και η μέγιστη διαγώνιος γραμμή, η πορεία της οποίας σύμφωνα με το σχ.4.6 παρουσιάζει πολλές ομοιότητες σε κάθε χρονοσειρά της γωνίας του ανέμου. Διαφορετική δομή διακρίνεται στην χρονοσειρά της τυπικής απόκλισης με περισσότερες χαμηλές τιμές.

### 4.3 Σύγκριση Χρονοσειρών Προσομοίωσης Ταχύτητας Ανόδου Ανέμου σε Λόφο

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται η σύγκριση των χρονοσειρών προσομοίωσης της ταχύτητας ανόδου του ανέμου σε λόφο.



Σχ.4.7 Γραφήματα επαναφοράς χρονοσειράς προσομοίωσης ταχύτητας ανόδου ανέμου σε λόφο:

Χρονοσειρές - (α) άξονα x, (β) άξονα y, (γ) άξονα z, (δ) μέτρο ταχύτητας  $f(x,y,z)$ , (ε) γωνία ταχύτητας  $f(x,y,z)$ , (ζ) μέτρο ταχύτητας  $f(x,y)$ , (η) γωνία ταχύτητας  $f(x,y)$ .



Αρχικά στο σχ.4.7 παρατηρούνται στα γραφήματα (α), (β) και (γ) οι συνιστώσες της χρονοσειράς ταχύτητας ανόδου του ανέμου σε λόφο. Η συνιστώσα της ταχύτητας στον άξονα x και y, σύμφωνα με τα αντίστοιχα γραφήματα έχουν πολλές ομοιότητες. Καταρχήν διακρίνονται κυρίως από σημεία που βρίσκονται σε ενδιάμεσες και σε πιο μακρινές αποστάσεις μεταξύ τους. Η χρονοσειρά της συνιστώσας στον άξονα x παρουσιάζει συγκριτικά με την συνιστώσα στον άξονα y περισσότερες απότομες αλλαγές στην δυναμική κατάσταση του συστήματος δεδομένου ότι οι ανοιχτόχρωμες ζώνες κυριαρχούν (ιδιαίτερα στην αρχή της χρονοσειράς σύμφωνα με το σχ.4.7(α)). Επίσης αυτή η συμπεριφορά του συστήματος της συνιστώσας στον άξονα x μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι η κύρια πορεία της ταχύτητα στον λόφο, του οποίου τα μορφολογικά χαρακτηριστικά την επηρεάζουν, γίνεται κυρίως στον άξονα x. Επιπλέον η ύπαρξη μεγάλου μήκος παράλληλων διαγώνιων γραμμών, ιδιαίτερα στην χρονοσειρά της συνιστώσας στον άξονα y, υποδηλώνουν πιθανόν την ύπαρξη περιοδικού σήματος.

Όσον αφορά την σύγκριση των τριών συνιστωσών μαζί διαπιστώνεται ότι η συνιστώσα στον άξονα z διαφέρει πολύ από τις άλλες δύο. Επικρατούν σε αυτή περισσότερες εναλλαγές στην συμπεριφορά του συστήματος. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο ότι η ταχύτητα σε αυτό τον άξονα έχει να αντιμετωπίσει περισσότερους παράγοντες οι οποίοι θα την επηρεάσουν, συγκριτικά με τον άξονα x και y.

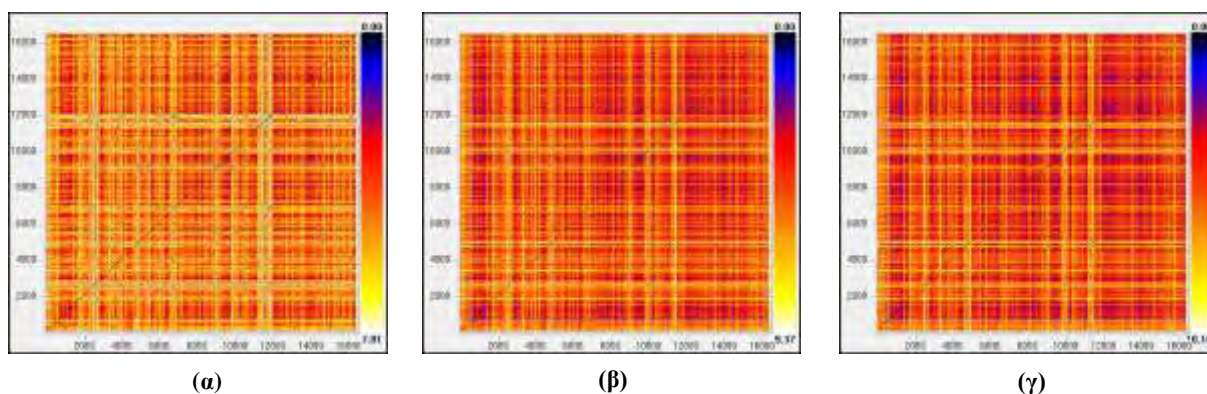
Γενικότερα στην χρονοσειρά της συνιστώσας στον άξονα x διακρίνονται στην αρχή (περίπου 0-6000), έντονες απότομες αλλαγές στην δυναμική κατάσταση του συστήματος (λευκές κουκίδες). Στη συνέχεια επικρατούν περισσότερες σκούρες κουκίδες. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η περιοχή 6700-8000 για την οποία υπερτερεί γύρω από την διαγώνια γραμμή μία λευκή ζώνη. Στο τέλος της πορείας της χρονοσειράς παρατηρούνται ξανά απότομες αλλαγές στην δυναμική του συστήματος. Την ίδια συμπεριφορά παρουσιάζει και η χρονοσειρά του μέτρου της ταχύτητας καθόδου του ανέμου που υπολογίστηκε συναρτήσει όλων των συνιστωσών (σχ.4.7(δ)) και η αντίστοιχη χρονοσειρά που υπολογίστηκε συναρτήσει μόνο των δύο πρώτων συνιστωσών (σχ.4.7(ζ)). Ωστόσο ενδιαφέρον προκαλεί του ότι το γράφημα επαναφοράς του μέτρου της ταχύτητας που προήλθε μόνο από τις δύο συνιστώσες δεν διαφέρει πολύ από το αντίστοιχο του γραφήματος (δ) αλλά είναι αυτό που

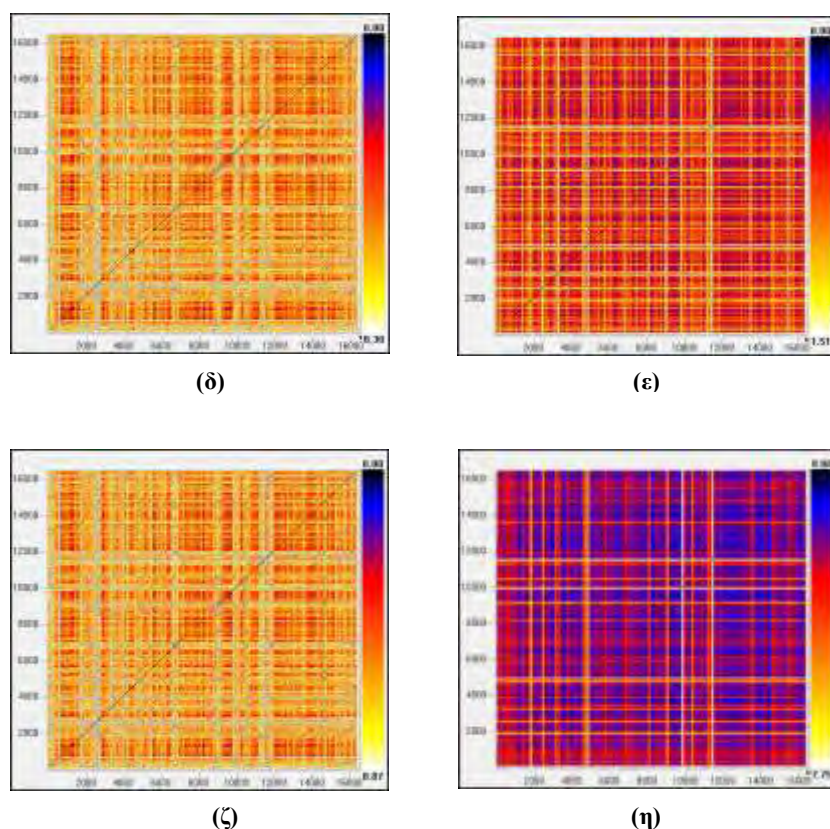
πλησιάζει περισσότερο τη δομή του αντίστοιχου γραφήματος της συνιστώσας στον άξονα x.

Αντίστοιχα παρατηρούμε ότι το γράφημα επαναφοράς της χρονοσειράς της συνιστώσας της ταχύτητας στον άξονα y πλησιάζει περισσότερο τη δομή του γραφήματος (ε) και (η), δηλαδή τα γραφήματα που αφορούν την γωνία, αυτό μπορεί να οφείλεται σε παράγοντες σχετικούς με την μορφολογία του εδάφους. Πρέπει να αναφερθεί ότι συμπεριφορά της χρονοσειράς της γωνία είναι σχεδόν ίδια είτε αυτή υπολογιστεί συναρτήσει όλων των συνιστωσών είτε μόνο των δύο πρώτων. Γενικότερα η διαφορετική συμπεριφορά του συστήματος και της συνιστώσας της ταχύτητας στον άξονα z δεν φαίνεται να επηρεάζει τα αποτελέσματα για το μέτρο και την γωνία του μεγέθους αντίστοιχα στις δύο περιπτώσεις.

#### 4.4 Σύγκριση Χρονοσειρών Προσομοίωσης Ταχύτητας Καθόδου Ανέμου σε Λόφο

Παρακάτω γίνεται αντίστοιχα η σύγκριση των χρονοσειρών προσομοίωσης της ταχύτητας καθόδου του ανέμου σε λόφο.





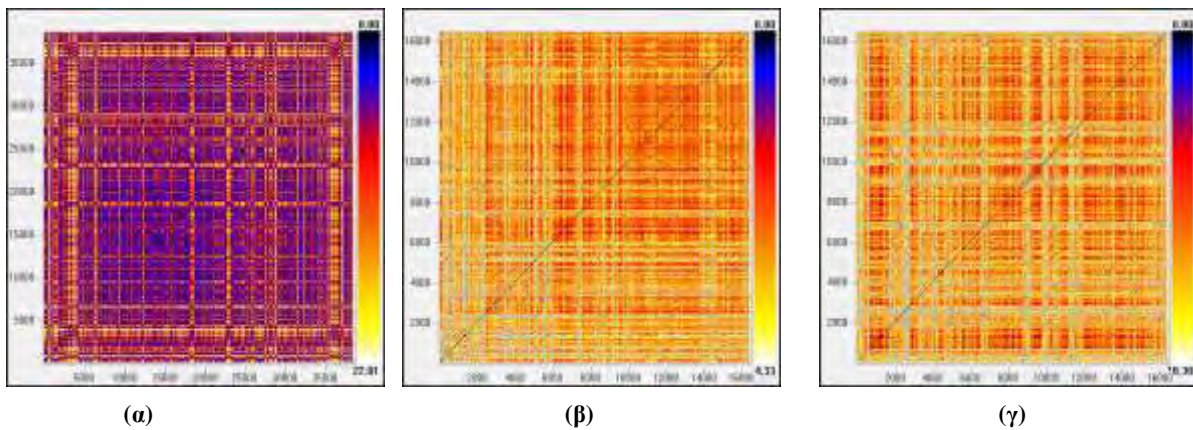
**Σχ.4.8 Γραφήματα επαναφοράς χρονοσειράς προσομοίωσης ταχύτητας καθόδου ανέμου σε λόφο: Χρονοσειρές - (α) άξονα x, (β) άξονα y, (γ) άξονα z, (δ) μέτρο αχύτητας  $f(x,y,z)$ , (ε) γωνία ταχύτητας  $f(x,y,z)$ , (ζ) μέτρο ταχύτητας  $f(x,y)$ , (η) γωνία ταχύτητας  $f(x,y)$ .**

Για τις χρονοσειρές προσομοίωσης ταχύτητας ανόδου του ανέμου σε λόφο παρατηρούμε αρχικά στο σχ.4.8 τις χρονοσειρές των συνιστωσών, οι οποίες έχουν γραφήματα επαναφοράς που ακολουθούν παρόμοια δυναμική. Ιδιαίτερα η χρονοσειρά της συνιστώσας στον άξονα y έχει σχεδόν πανομοιότυπο γράφημα με αυτό της συνιστώσας στον άξονα z. Γενικότερα και στις τρεις συνιστώσες επικρατούν οι ενδιάμεσες αποστάσεις μεταξύ των σημείων και στα γραφήματα (β) και (γ) υπάρχουν και σκουρόχρωμες περιοχές που υποδηλώνουν την ύπαρξη σημείων σε πιο κοντινές αποστάσεις.

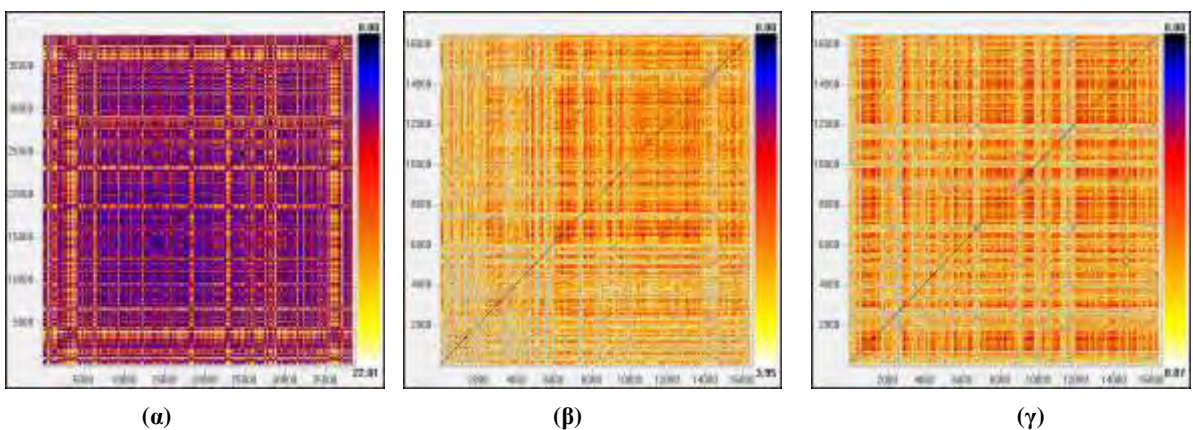
Στα γραφήματα (δ) και (ζ) που αντιστοιχούν στο μέτρο της ταχύτητας καθόδου συναρτήσει όλων των συνιστωσών ή μόνο των δύο είναι σχεδόν όμοια, οι αλλαγές που παρατηρούνται όσο εξελίσσεται η χρονοσειρά είναι όμοιες. Συνεπώς το γεγονός ότι η χρονοσειρά της συνιστώσας στον άξονα z εμφανίζει το ίδιο γράφημα με την

χρονοσειρά της συνιστώσας στον άξονα  $y$ , εξηγεί το γεγονός που δεν επηρεάζεται το μέτρο από την εάν αυτό υπολογιστεί μόνο από τις δύο συνιστώσες. Ωστόσο δεν συμβαίνει το ίδιο και με την γωνία της ταχύτητας αντίστοιχα. Η γωνία της ταχύτητας συναρτήσει μόνο των δύο πρώτων συνιστωσών εμφανίζει πολλά σημεία τα οποία βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους.

#### 4.5 Σύγκριση Μεγεθών Χρονοσειρών Πεδίου με Προσομοίωσης



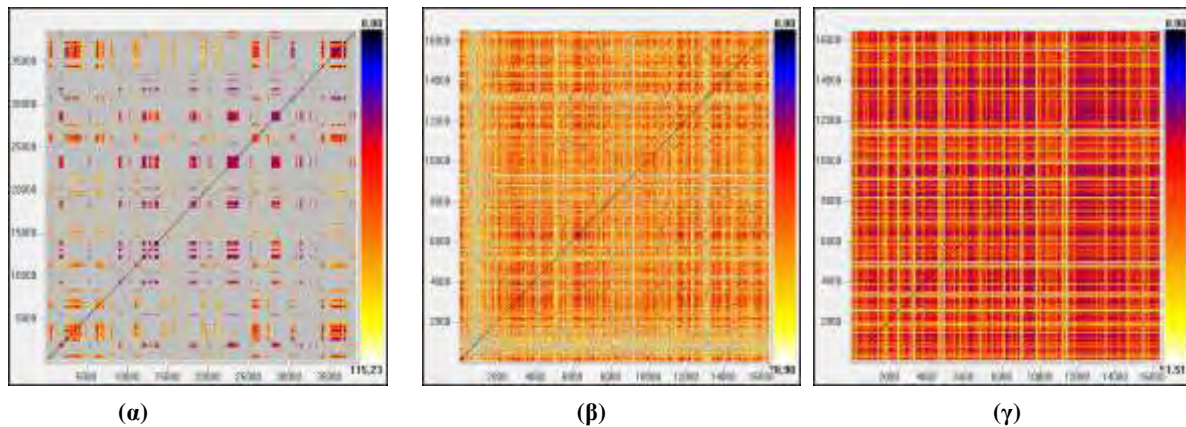
Σχ.4.9 Σύγκριση γραφημάτων επαναφοράς χρονοσειρών πεδίου και προσομοίωσης. (α) χρονοσειρά πεδίου ταχύτητας ανέμου του μέσου όρου και (β) χρονοσειρά προσομοίωσης ταχύτητας ανόδου ( $f(x,y,z)$ ), (γ) χρονοσειρά προσομοίωσης ταχύτητας καθόδου ( $f(x,y,z)$ ).



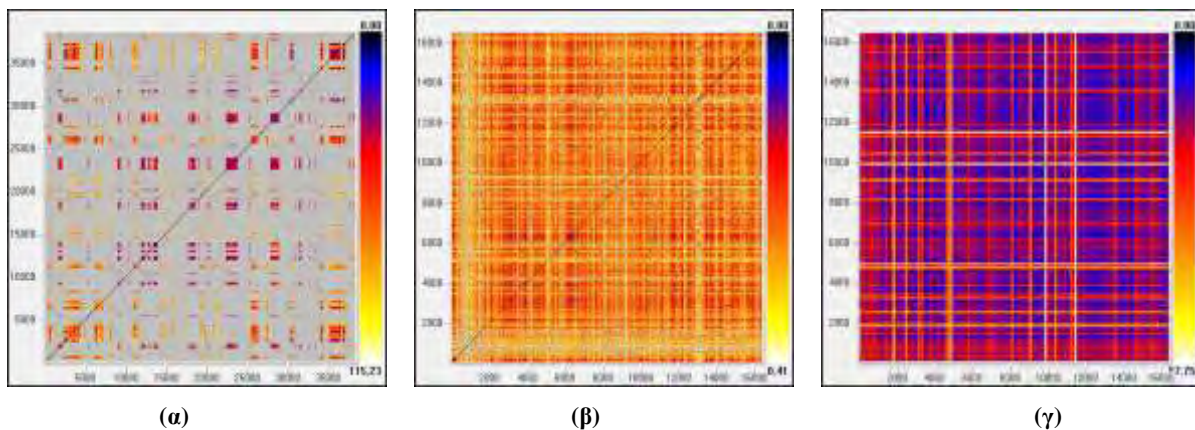
Σχ.4.10 Σύγκριση γραφημάτων επαναφοράς χρονοσειρών πεδίου και προσομοίωσης. (α) χρονοσειρά πεδίου ταχύτητας ανέμου του μέσου όρου και (β) χρονοσειρά προσομοίωσης ταχύτητας ανόδου ( $f(x,y)$ ), (γ) χρονοσειρά προσομοίωσης ταχύτητας καθόδου ( $f(x,y)$ ).



Η χρονοσειρά πεδίου που αφορά την ταχύτητα ανέμου διαφέρει αισθητά από τις αντιστοιχες χρονοσειρές προσομοίωσης σύμφωνα με το σχ.4.9 και το σχ.4.10. Η χρονοσειρά πεδίου παρουσιάζει σημεία σε κοντινές αποστάσεις ενώ αντίστοιχα της προσομοίωσης επικρατούν τα σημεία σμε ενδιάμεσες και μεγάλες αποστάσεις.



**Σχ.4.11 Σύγκριση γραφημάτων επαναφοράς χρονοσειρών πεδίου και προσομοίωσης. (α) χρονοσειρά πεδίου γωνίας ανέμου του μέσου όρου και (β) χρονοσειρά προσομοίωσης γωνίας ταχύτητας ανόδου ( $f(x,y,z)$ ), (γ) χρονοσειρά προσομοίωσης γωνίας ταχύτητας καθόδου ( $f(x,y,z)$ ).**



**Σχ.4.12 Σύγκριση γραφημάτων επαναφοράς χρονοσειρών πεδίου και προσομοίωσης. (α) χρονοσειρά πεδίου γωνίας ανέμου του μέσου όρου και (β) χρονοσειρά προσομοίωσης γωνίας ταχύτητας ανόδου ( $f(x,y)$ ), (γ) χρονοσειρά προσομοίωσης γωνίας ταχύτητας καθόδου ( $f(x,y)$ ).**

Επίσης πολλές είναι και οι διαφορές όσον αφορά τις χρονοσειρές πεδίου και προσομοίωσης του μεγέθους της γωνίας όπως φαίνεται στα σχ.4.11 και 4.12. Στις

χρονοσειρές προσομοιώσεις τα σημεία που εμφανίζονται αφορούν κυρίως ενδιάμεσες αποστάσεις ενώ στις χρονοσειρές πεδίου διακρίνουμε πολλές γκρι ζώνες.

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε η ανάλυση χρονοσειρών πεδίου και προσομοίωσης που αφορούν την ταχύτητα του ανέμου. Έχοντας στην κατοχή μας ένα σύνολο χρονοσειρών τόσο για την ταχύτητα όσο και τη γωνία του ανέμου, χρησιμοποιήθηκαν γραμμικές και μη γραμμικές μέθοδοι (φάσμα ισχύος, ανακατασκευή χώρου φάσεων, διάσταση συσχέτισης, μέση αμοιβαία πληροφορία και εκθέτες Lyapunov) και ιδιαίτερα χρησιμοποιήθηκαν νεότερες μη γραμμικές μέθοδοι (μέθοδος της ποσοτικής ανάλυσης επαναφοράς - Recurrence Qualification Analysis και γραφήματα επαναφοράς ΓΕ - Recurrence Plots), προκειμένου να προκύψουν συμπεράσματα από την ανάλυση αυτών των χρονοσειρών, σχετικά με την δυναμική συμπεριφορά του συστήματος.

Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν την πολύπλοκη συμπεριφορά με ενδείξεις χαοτικής συμπεριφοράς (Karakasidis, Charakoulos, 2009). Η πολυπλοκότητα φαίνεται ιδιαίτερα από την ανάλυση ΓΕ όπου εντοπίζονται περιοχές μετάβασης μεταξύ διαφορετικών συμπεριφορών. Το γεγονός ότι το σύστημα εμφανίζει πολυπλοκότητα σημαίνει ότι απαιτούνται αρκετές εξισώσεις (βαθμοί ελευθερίας) προκειμένου να το περιγράψουμε.

Οι χρονοσειρές πεδίου συμπεριφέρονται διαφορετικά από τις χρονοσειρές προσομοίωσης. Εμφανίζονται περιοχές μετάβασης, διαφορετικές συνήθως στις αντίστοιχες ομάδες χρονοσειρών πεδίου και προσομοίωσης, όπου η δυναμική κατάσταση του συστήματος εναλλάσσεται και παρατηρούνται πολλές περιοχές στις οποίες εμφανίζει το σύστημα χαοτική συμπεριφορά, συμπέρασμα που προκύπτει και από το μέγιστο εκθέτη Lyapunov ο οποίος παρουσιάζεται θετικός σε όλες τις χρονοσειρές και όπως αναφέρθηκε και παραπάνω από τα γραφήματα επαναφοράς. Στις χρονοσειρές προσομοίωσης για την ταχύτητα ανόδου και καθόδου του ανέμου υπολογίστηκε το μέτρο και η γωνία αντίστοιχα, όπου έχουν διαφορετική δομή. Το μέτρο της ταχύτητας ανόδου εμφανίζει εναλλαγές στην ντετερμινιστική συμπεριφορά. Αρχικά η χρονοσειρά παρουσιάζει μικρή προβλεψιμότητα ενώ προς το τέλος υπάρχουν περιοχές με μεγάλο ποσοστό ντετερμινισμού συνεπώς υπάρχει καλύτερη προβλεψιμότητα. Αν και υπάρχουν περισσότερες απότομες αλλαγές στην δυναμική του συστήματος του μέτρου της ταχύτητας, παρόμοια είναι και η

συμπεριφορά που εμφανίζει και η γωνία. Στην ταχύτητα καθόδου αντίστοιχα, η χρονοσειρά του μέτρου εμφανίζει προβλεψιμότητα ενώ και η γωνία παρουσιάζει μεγαλύτερη σταθερότητα.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι προχωρημένες μέθοδοι ανάλυσης μπορούν να μας δώσουν χρήσιμα στοιχεία για μεταβάσεις το συστήματος μεταξύ διαφορετικών καταστάσεων. Επίσης η διάσταση συσχέτισης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πληροφορία για την ανάλυση και πρόβλεψη χρονοσειρών με μεθόδους όπως νευρωνικά δίκτυα όπου είναι σημαντική η γνώση του αριθμού μεταβλητών του συστήματος.

Προτάσεις για μελλοντική μελέτη αφορούν στην διερεύνηση της αφαίρεσης θορύβου στις χρονοσειρές πεδίου καθώς φάνηκε η ύπαρξη του διαφάνηκε από την ανάλυση της διάστασης συσχέτισης, καθώς επίσης και η πρόβλεψη αυτών των χρονοσειρών. Σε ότι αφορά τις χρονοσειρές προσομοίωσης θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ανάλυσης μεγίστου-ελαχίστου (Kugiumtzis) καθώς και η επίδραση του χρόνου δειγματοληψίας. Επίσης θα ήταν πολύ ενδιαφέρουσα η ανάλυση με νεότερες μεθόδους ανάλυσης χρονοσειρών με τη μέθοδο δικτύων (networks), προκειμένου τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα που θα προκύψουν να χρησιμοποιηθούν προς όφελός μας.



## 6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Συριόπουλος Κ. και Λεοντίσης Α., ‘Χάος –Ανάλυση και Πρόβλεψη Χρονοσειρών’.
2. Παπαϊωάννου Γ., ‘Χαοτικές Χρονοσειρές – Θεωρία και Πράξη’.
3. Στρίτζη Μ.Γ., ‘Ανάλυση Χρονοσειρών’ .
4. Κουγιουμτζής Δ. (2009), ‘Χρονοσειρές’
5. Kugiumtzis D., ‘State Space Reconstruction Parameters in the Analysis of Chaotic Time Series - the Role of the Time Window Length’, Physica D, Vol 1996, pp 13-28, 1996.
6. Φράγκου Α. ΥΔΡΟΜΕΔΩΝ, ‘Μη γραμμική Ανάλυση Χρονοσειρών Στάθμης Ποταμού Νέστου’ 2<sup>η</sup> Συνάντηση Υποψήφιων Διδασκτόρων και Μεταπτυχιακών Φοιτητών, Βόλος 2008
7. Karakasidis T., Fragkou A., Liakopoulos A. (2007), ‘Applications of Reccurence Qualification in Nonlinear Time Series Analysis’. (20<sup>th</sup> International Conference/Summer School, Nonlinear Science and Complexity, Patras July 16-28 2007.
8. Marwan N. (2003), ‘Encounters with Neighbours, Current Developments of Concepts based on Reccurence Plotw and their Applications’.
9. Marwan N. et al. (2007), ‘Reccurence Plots for the Analysis of Complex Systems’ [Physics reports 438 (2007) 237-239].
10. Brockwell P. and Daviw R., ‘Time Series – Theory and Methods’ (2<sup>nd</sup> edition, Springel).
11. Chatfield C. (2004), ‘The Analysis of Time Series – An Introduction’ (6<sup>th</sup> edition, Chapman&Hall/CRC).
12. Elert G. (1995-2007), ‘The Chaos Hypertexbook’, ([http:// hypertexbook.com](http://hypertexbook.com)).
13. Meiss J. et al, ‘What’s phase space? (nonlinear science)’
14. Kanz H. and Schreiber T. (2004), ‘Nonlinear Time Series Analysis’, (2<sup>th</sup> edition, Cambridge University Press).

15. Hamilton J. (1994), 'Time Series Analysis'.
16. Recurrence Plots and Cross Recurrence Plots, (<http://www.recurrence-plot.tk/>).
17. Visual Recurrence Analysis, (<http://nonlinear.110mb.com/vra/>).
18. Sprott J. C., 'Chaos and Time-Series Analysis', (Oxford University Press, 2003).
19. Abarbanel, H.D.I. [1996] 'Analysis of Observed Chaotic Data'.
20. Echman J.P., Kamphorst S.O and Ruelle D. (1987), 'Recurrence Plots of Dynamical Systems', Europhysics Letters Vol. 4, pp 973-977.
21. Hegger R., Kanz H. and Schreiber T. (March 2007) , 'Nonlinear Time Series Analysis, TISEAN 3.0.1.'
22. Zbilut J.P., Webber (1992). 'Embedding and Delays as Derived from Quantification of Recurrence Plots'. Physics Letters A Vol 171, pp. 199-203.