



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ  
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ**

**«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ  
ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»**

**Στοχαστική ανάλυση και προσομοίωση  
πολλαπλής κλίμακας του ανέμου στην  
Ελλάδα**

*Δημάκος Α. Ιωάννης*

Αθήνα, Μάρτιος 2014

**«ΕΠΙΣΤΗΜΗ &  
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ  
ΥΔΑΤΙΚΩΝ  
ΠΟΡΩΝ»**

**Επιβλέπων: Καθηγητής Δ. Κουτσογιάννης**



«Ήταν τα καλύτερα χρόνια, ήταν τα χειρότερα χρόνια · ήταν ο αιώνας της σοφίας, ήταν ο αιώνας της τρέλας · ήταν η εποχή της πίστης, ήταν η εποχή της απιστίας · ήταν η εποχή του Φωτός, ήταν η περίοδος του Σκότους · ήταν η άνοιξη της ελπίδας, ήταν ο χειμώνας της απελπισίας · είχαμε τα πάντα μπροστά μας, δεν είχαμε τίποτα μπροστά μας · πηγαίναμε όλοι γραμμή στον παράδεισο, όλοι πηγαίναμε γραμμή προς την άλλη κατεύθυνση.»

Charles Dickens, *Ιστορία δυο πόλεων*



## Ευχαριστίες

---

Ολοκληρώνοντας το ταξίδι μου μέσα από το μεταπτυχιακό αυτό πρόγραμμα, που περιλάμβανε, άλλοτε φουρτούνες και άλλοτε νηνεμία, το μόνο σίγουρο είναι ότι η εμπειρία και η γνώση που αποκόμισα από αυτό το εγχείρημα ήταν ανεκτίμητες. Για αυτό το λόγο, θα ήταν παράλειψη αν δεν ευχαριστούσα κάποιους ανθρώπους, μέσα από αυτό το βήμα, που συνέβαλαν τα μέγιστα για την επίτευξη του τελικού προορισμού.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή και Δάσκαλο Δ. Κουτσογιάννη, για την επίβλεψη της παρούσας εργασίας και για τις σημαντικές παρατηρήσεις του κατά τη διάρκεια εκπόνησής της. Οι γνώσεις του σε συνδυασμό με την απλότητα της σκέψης του αποτέλεσαν έμπνευση για μένα. Επιπρόσθετα, θα ήθελα να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον Επίκουρο Καθηγητή και Δάσκαλο Ν. Μαμάση, που ανενδοίαστα μου υπέγραψε την συστατική επιστολή, απαραίτητη για την έναρξη του ταξιδιού αυτού. Το ανωτέρω 'δίδυμο' αποτελεί πολύ σημαντικό κεφάλαιο για τον τομέα Υδατικών Πόρων.

Επίσης, θα ήθελα να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον υποψήφιο Διδάκτορα Π. Δημητριάδη, για όλες τις ώρες που μου αφιέρωσε και για τις σημαντικές ιδέες του για την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας. Υπήρξε πάντα πρόθυμος να απαντήσει σε απορίες και να μου εξηγήσει το οτιδήποτε. Χωρίς την υποστήριξή του, η ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής δεν θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί. Νοιώθω επίσης την ανάγκη να του πω και μια εξίσου μεγάλη συγγνώμη, που του μετέφερα το άγχος και την αρνητική μου ψυχολογία. Επιπρόσθετα, ευχαριστώ τον υποψήφιο Διδάκτορα Ι. Μαρκόνη για τις συζητήσεις μας σχετικά με τους προβληματισμούς μου, αλλά και το Διδάκτορα Σ. Παπαλεξίου, για την άμεση ανταπόκρισή του σε οποιαδήποτε απορία μου.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω όλα τα παιδιά του μεταπτυχιακού και ιδιαίτερα τα παιδιά της Α' ροής, για τις όμορφες στιγμές που περάσαμε μαζί και για τους προβληματισμούς που μοιραστήκαμε. Ιδιαίτερα θέλω να ευχαριστήσω την Έφη, για όμορφη παρέα της και το Σταμάτη, για όλες τις 'επιστημονικές' διαφορές που είχαμε. Ελπίζω οι διαφωνίες μας αυτές να ήταν για εκείνον όσο επικοινωνιακές ήταν και για μένα. Ελπίζω να ολοκληρωθούν οι προσδοκίες του.

Μεγάλο ευχαριστώ αξίζει και στην παρέα μου από το Καματερό, που ήταν, είναι και ελπίζω να είναι για πάντα, παρόν, να υποστηρίζουν τα θέλω μου. Δε μπορώ να παραλείψω τους γονείς μου Άγγελο και Αναστασία, τον αδερφό μου Δημήτρη, αλλά και τους γονείς της γυναίκας μου Νίκο και Ελευθερία, για την αμέριστη ψυχολογική και ηθική συμπαράστασή τους. Ευχαριστώ επίσης την κόρη μου Αναστασία, για τη συνεργασία της σε όλη μου αυτήν την προσπάθεια.

Τέλος, το μεγαλύτερο ευχαριστώ, ανήκει στην όμορφη και υπομονετική γυναίκα μου Μαρία, που είναι πάντα παρούσα, να υποστηρίζει τις προσωπικές μου ανάγκες, πρακτικά και ουσιαστικά. Την ευχαριστώ για την κατανόησή της σε όλες αυτές τις ατελείωτες ώρες διαβάσματος και άγχους που πέρασα μπροστά σε ένα υπολογιστή, που χωρίς τη συνεργασία της η ολοκλήρωση του μεταπτυχιακού αυτού προγράμματος θα ήταν αδύνατη. Για αυτό το λόγο, το λιγότερο που μπορώ να κάνω είναι να της αφιερώσω αυτή την εργασία.

Δημάκος Ιωάννης



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>Ευχαριστίες</b>	<b>v</b>
<b>Περίληψη</b>	<b>xi</b>
<b>Extended abstract</b>	<b>xiii</b>
<b>1 Εισαγωγή</b>	<b>1</b>
1.1 Γενική περιγραφή της σημασίας της επεξεργασίας της μεταβλητής του ανέμου.....	1
1.2 Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας .....	2
<b>2 Βιβλιογραφική επισκόπηση</b>	<b>7</b>
2.1 Γενικά .....	7
2.2 Υπολογισμός του αιολικού ενεργειακού δυναμικού στην Ελλάδα.....	7
2.3 Προέλευση και μεταφορά της ατμοσφαιρικής υγρασίας και του αέρα στην λεκάνη της Μεσογείου .....	8
2.4 Στοχαστική προσομοίωση του ατμοσφαιρικού ανέμου χρησιμοποιώντας μοντέλο συνεχούς χρόνου.....	10
2.5 Στατιστική προσομοίωση της ταχύτητας του ανέμου στην Αθήνα, Ελλάδα βασισμένη πάνω σε μοντέλα Weibull και ARMA.....	11
2.6 Μακροπρόθεσμη μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου σε τρεις πόλεις των κέντρο-δυτικών Η.Π.Α.....	12
2.7 Χωρική και χρονική προσαρμογή της ταχύτητας και της ενέργειας του ανέμου στις Η.Π.Α. σε ύψος 80 m που προκύπτει από τις μετρήσεις. ....	13
2.8 Μια έρευνα για την αποτίμηση του αιολικού δυναμικού στην Ελλάδα.....	15
2.9 Γενικότερη βιβλιογραφία - επιστημονικά συγγράμματα .....	16
<b>3 Δεδομένα</b>	<b>19</b>
3.1 Ταχύτητα του ανέμου.....	19
3.1.1 Συλλογή των δεδομένων .....	19
3.1.2 Επεξεργασία των δεδομένων .....	20
3.1.3 Πλήθος των δεδομένων και επιλογή των σταθμών μέτρησης. ....	22
3.1.4 Επεξεργασία των δεδομένων reanalysis.....	24
3.1.5 Καταστροφικά φαινόμενα στον Ελλαδικό χώρο που οφείλονται στον άνεμο. ....	30
<b>4 Στατιστική επεξεργασία δεδομένων σταθμών</b>	<b>45</b>
4.1 Στατιστική επεξεργασία των σταθμών.....	45
4.1.1 Μηνιαία ταχύτητα του ανέμου στον Ελλαδικό χώρο.....	45

4.1.2	Μηνιαία τυπική απόκλιση της ταχύτητας του ανέμου στον Ελλαδικό χώρο. ....	49
4.1.3	Μηνιαία παραγωγή του αιολικού ενεργειακού δυναμικού στον Ελλαδικό χώρο. ....	50
4.1.4	Εκτίμηση των παραγόντων σχήματος (k) και κλίμακας (c, m/s) από την κατανομή Weibull. ....	54
4.1.5	Διεύθυνση του ανέμου στον Ελλαδικό χώρο, σε μοίρες (°) .....	56
4.2	Εμπειρική αιολική ισχύς των σταθμών των δεδομένων.....	61
4.2.1	Παραγόμενη αιολική ισχύς από μηνιαία επεξεργασία χρονοσειρών. ....	61
4.2.2	Παραγόμενη αιολική ισχύς από ημερήσια και μηνιαία επεξεργασία σειρών δεδομένων 66 σταθμών στον Ελλαδικό χώρο. ....	62
4.3	Μέγιστες παρατηρημένες τιμές από ταξινομημένο δείγμα σε 66 σταθμούς στον Ελλαδικό χώρο. ....	65
4.3.1	Μέγιστα ημερήσια παρατηρημένα στους 66 σταθμούς σε διαφορετική περίοδο μέτρησης και για ποσοστά 1-5-10-12-30% των μέγιστων ημερήσιων τιμών.....	66
4.3.2	Μέγιστα ημερήσια παρατηρημένα ποσοστά στους 66 σταθμούς σε διαφορετική περίοδο μέτρησης και για συγκεκριμένες ταχύτητες των 5 - 10 - 15 -20 - 25 m/s.....	69
4.3.3	Μέγιστα μηνιαία παρατηρημένα στους 66 σταθμούς σε διαφορετική περίοδο μέτρησης και για ποσοστά 1-5-10-12-30% των μέγιστων ημερήσιων τιμών.....	71
4.3.4	Μέγιστα μηνιαία παρατηρημένα ποσοστά στους 66 σταθμούς σε διαφορετική περίοδο μέτρησης και για συγκεκριμένες ταχύτητες των 5 - 10 m/s.....	75
4.4	Δεδομένα της ριπής (gust) του ανέμου από 32 σταθμούς στον Ελλαδικό χώρο. ....	76
4.4.1	Επεξεργασία των δεδομένων της ριπής του ανέμου σε m/s και εκπόνηση αντίστοιχων χαρτών υπολογισμού .....	77
4.4.2	Ταυτόχρονη επεξεργασία της ριπής και της ταχύτητας του ανέμου σε m/s για την κοινή μέρα εμφάνισης των δυο μεταβλητών.....	79
4.4.3	Συμπεριφορά ταξινομημένου δείγματος της ριπής του ανέμου.....	85
4.5	Εκτίμηση των τάσεων της ταχύτητας του ανέμου για 14 σταθμούς στον Ελλαδικό χώρο για την περίοδο 01/1970 - 04/2013.....	89
4.5.1	Επιμέρους τάσεις για την περίοδο 1/1970 - 12/1990 σε 11 σταθμούς στον Ελλαδικό χώρο. ....	92
4.5.2	Επιμέρους τάσεις για την περίοδο 1/1991 - 04/2013 σε 14 σταθμούς στον Ελλαδικό χώρο. ....	94
<b>5</b>	<b>Εξαγωγή μοντέλου για τη μεταβλητή της ταχύτητας του ανέμου</b>	<b>97</b>
5.1	Γενικά .....	97
5.1.1	Δυναμική Hurst – Kolmogorov .....	97
5.1.2	Στοχαστικές ανελίξεις .....	98
5.1.3	Στατιστική εκτίμηση – ανελίξη συνάθροισης.....	102
5.2	Εξαγωγή του μοντέλου από τα δεδομένα 10 σταθμών .....	104



5.2.1	Εξαγωγή του συντελεστή Hurst μέσω της αμερόληπτης εκτιμήτριας της διασποράς.....	104
5.2.2	Εξαγωγή του συντελεστή Hurst μέσω της τυπικής απόκλισης και του λόγου της τυπικής απόκλισης με της κλίμακα, με λογαριθμικό μετασχηματισμό.....	118
5.3	Προσαρμογή κατανομών για μηνιαία - ημερήσια χρονική κλίμακα των δεδομένων αλλά και για τα δεδομένα της ριπής. ....	120
5.3.1	Προσαρμογή κατανομών για τα μηνιαία δεδομένα .....	120
5.3.2	Προσαρμογή κατανομών για τα ημερήσια δεδομένα. ....	122
5.3.3	Επιλογή των 10 σταθμών προσαρμογής τους μοντέλου. ....	130
5.3.4	Προσαρμογή κατανομών για τα δεδομένα της ριπής του ανέμου. ....	137
<b>6</b>	<b>Παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών της μεταβλητής της ταχύτητας του ανέμου.</b>	<b>143</b>
6.1	Γενικά .....	143
6.2	Στοχαστικά μοντέλα .....	144
6.2.1	Μοντέλο FGN (Fractional Gaussian Noise).....	144
6.3	Μοντέλα απλής ομοιοθεσίας.....	146
6.3.1	Γενικά.....	146
6.3.2	Τυχαίες διακυμάνσεις πολλαπλής κλίμακας – ( A multiple time - scale fluctuation approach) .....	146
6.3.3	Ανέλιξη επιμερισμού – (A disaggregation approach) .....	146
6.3.4	Ανέλιξη συμμετρικού κυλιόμενου μέσου όρου - (A symmetric moving average approach) .....	148
6.4	Εφαρμογή της ανέλιξης των τυχαίων διακυμάνσεων πολλαπλής κλίμακας - ( A multiple time - scale fluctuation approach) .....	148
6.4.1	Γενικά.....	148
6.4.2	Εξαγωγή τριών ανελιξεων – AR(1) – Markov. ....	149
6.4.3	Εφαρμογή της μεθόδου .....	149
6.4.4	Μετασχηματισμός κανονικοποίησης .....	152
<b>7</b>	<b>Συμπεράσματα</b>	<b>163</b>
	<b>Αναφορές</b>	<b>171</b>
	Στην ελληνική γλώσσα .....	171
	Ξενόγλωσσες.....	173



## Περίληψη

---

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε η στατιστική - στοχαστική επεξεργασία της μεταβλητής της ταχύτητας του ανέμου, σε μηνιαία, ημερήσια και μικρότερη κλίμακα. Εξετάστηκε η χωρική και χρονική κατανομή της ταχύτητας του ανέμου και πραγματοποιήθηκε προσπάθεια για τη μοντελοποίηση της μεταβλητής αυτής, με την εξαγωγή ενιαίων στατιστικών χαρακτηριστικών, που αφορούσαν όλη την περιοχή εξέτασης, που ήταν η Ελλάδα. Εξετάστηκε η ύπαρξη μακροπρόθεσμης εμμονής, στην αντίστοιχη χρονική κλίμακα, με τον υπολογισμό του συντελεστή Hurst και την εξαγωγή κλιμακογραμμάτων. Επιπρόσθετα, εξετάστηκαν η ριπή και η διεύθυνση του ανέμου, για μια πληρέστερη εικόνα της μεταβλητής της ταχύτητας, από συγκεκριμένο αριθμό σταθμών, που διέθεταν δεδομένα μετρήσεων. Εξετάστηκαν επίσης και δεδομένα reanalysis, για την εκτίμηση της αξιοπιστίας ενός τέτοιου είδους μετρήσεων και τη σημασία χρησιμοποίησής τους σε περιπτώσεις ελλείψεων μετρήσεων. Ακόμα, εξετάστηκαν και οι τάσεις της ταχύτητας του ανέμου για ενιαία περίοδο αναφοράς, με σκοπό να προσδιοριστεί η συμπεριφορά του ανέμου για την περίοδο εξέτασης και να καταγραφούν σταθμοί με θετικές και αντίστοιχα αρνητικές τάσεις. Επίσης, πραγματοποιήθηκε και η αποτίμηση του θεωρητικού ενεργειακού αιολικού δυναμικού από τα δεδομένα μετρήσεων και προέκυψαν συμπεράσματα σχετικά με το ποιες περιοχές έχουν ικανοποιητικό αιολικό δυναμικό. Προσαρμόστηκαν κατάλληλες κατανομές, τόσο στα δεδομένα της ταχύτητας του ανέμου, όσο και σε αυτά της ριπής. Επιπρόσθετα, πραγματοποιήθηκε η παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών με συγκεκριμένο μοντέλο και με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά για την ταχύτητα του ανέμου, που προέκυψαν από την εν λόγω εργασία. Τέλος, από την εξέταση της μεταβλητής της ταχύτητας του ανέμου, προέκυψε ότι ο άνεμος είναι ισχυρότερος σε περιοχές του κεντρικού κυρίως Αιγαίου και λιγότερο ισχυρός στη βορειότερη Ελλάδα. Παρόμοια ήταν και η χωρική κατανομή του θεωρητικού αιολικού ενεργειακού δυναμικού της χώρας. Από την εξέταση των κλιμακογραμμάτων προέκυψε ενιαία τιμή για το συντελεστή Hurst για όλη την Ελλάδα ( $H=0.75$ ), γεγονός που αποτέλεσε σημαντικό παράγοντα για τη μοντελοποίηση της ευρύτερης περιοχής ενδιαφέροντος, από την εξέταση κάθε μεμονωμένου σταθμού, ξεχωριστά.



# Extended abstract

---

## Introduction

Wind is a fundamental atmospheric variable, which affects weather forecasting, aircraft and marine transportations - operations, construction projects, growth and metabolism rate of many plant species and countless other implications. It is commonly measured with anemometers (m/s), but also can be classified using the older Beaufort scale, which is based on people's observations of specifically defined wind affects. It is governed by chaotic behavior and is therefore difficult to predict. This fact implies that any infinitesimal changes to the initial conditions, will cause completely different behavior to the phenomenon. However, wind behavior, can predicted with some degree of credibility or with a confidence interval. Of great importance is the predictability of wind speed, for areas that extremes occurred, such as hurricanes and typhoons.

Numerous factors and situations affect wind speed on varying time scales, such as pressure gradient, Rossby waves, jet streams and local weather conditions. This fact implies the chaotic behavior of the wind, as it is affected by other meteorological variables, at spatial and temporal variability. Moreover, notably links have been found between wind speed and wind direction, corresponding to the pressure gradient of the atmosphere.

Pressure gradient is a term to describe the difference in air pressure between two points in the atmosphere or on the Earth's surface. It is vital to wind speed, because the greater the difference in pressure, the faster the wind flows to balance out the variation. The pressure gradient, when combined with the Coriolis Effect and friction, also influences wind direction.

Rossby waves are strong winds in the upper troposphere. These operate on a global scale and move from West to East, known as Westerlies. The Rossby waves are themselves a different wind speed from what the experience reveals as in the lower troposphere.

Local weather conditions play a key role in influencing wind speed, as the formation of hurricanes, monsoons and cyclones, as freak weather conditions, can drastically affect the velocity of the wind. (C.Michael Hogan, 2010. *Abiotic factor. Encyclopedia of Earth. eds Emily Monosson and C. Cleveland. National Council for Science and the Environment. Washington DC*)

## Statistical – stochastic data analysis

In this thesis, it is realized the statistical - stochastic treatment of the wind speed, on monthly and daily time scale. Data analyses were extracted from site: <http://www.ncdc.noaa.gov/cdo-web/>, which is a global database of climatologically variables. Wind speed data at Greece, with subsequent data sets, direction and gust, were extracted. The selected analysis stations (Fig. 1, 3), were all the available from the site (83), five of which had no data, thus remain 78. Then the processing of six of the remaining stations had many shortcomings and limited data, thus may not be suitable for processing and reliable conclusions (Fig. 2, 4). For statistical - stochastic process of wind speed, it was initially necessary, processing data in an appropriate format, in order to extract time series.

Data consisted on time series of irregular time step, with shortages of measurements and so it was necessary to formulate time series for further treatment. Statistical features which were

calculated to reveal the behavior of wind speed at Greece were the basic statistical characteristics of a variable, as well as, the calculation of specific estimators and it became obvious the variability of wind speed, at different time scales. Furthermore, it became obvious, the intermittent behavior of wind speed, at all time scales. The shorter the time scale was examined, the less intermittent behavior of the variable revealed. Finally, at monthly time scale, it became clear the cyclostationary behavior of the wind.

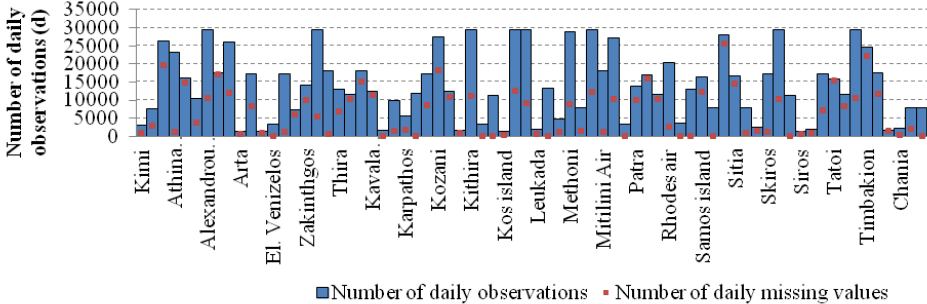


Figure 1: Data stations at Greece, which were analyzed, at daily time scale.

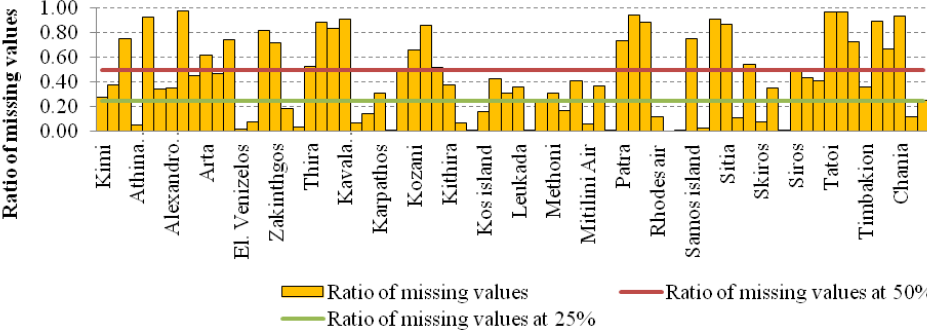


Figure 2: Ratio of missing values at daily time scale.

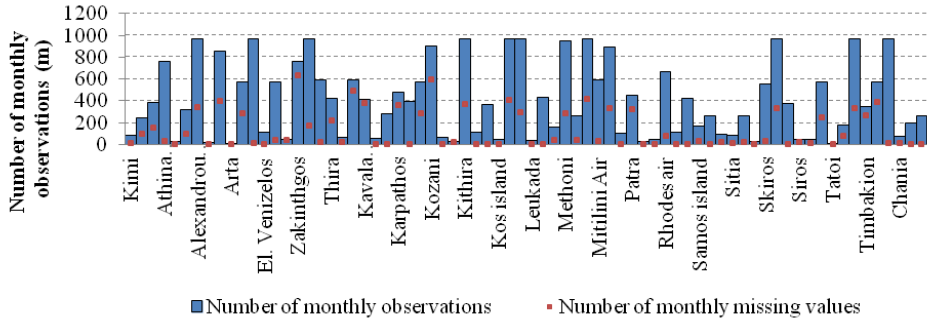


Figure 3: Data stations at Greece, which were analyzed at monthly time scale.

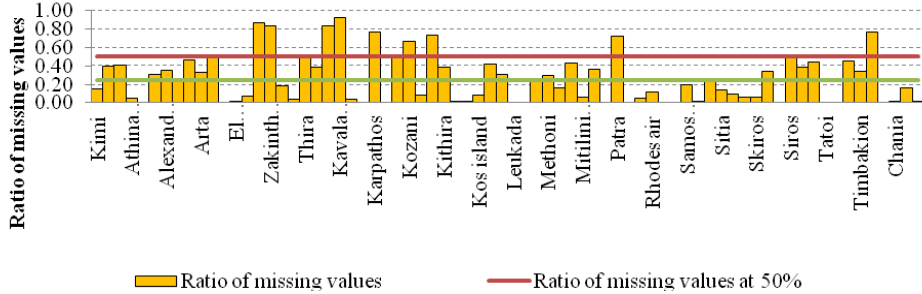


Figure 4: Ratio of missing values at monthly time scale.

## Wind speed

Wind speed time series were elaborated, in order to determine monthly averages from each station and also reckon their spatial and temporal variance at the area of interest. To this end, wind speed (m/s) monthly maps were designed (Fig. 5), in order to reveal the monthly wind speed behavior, at Greece.

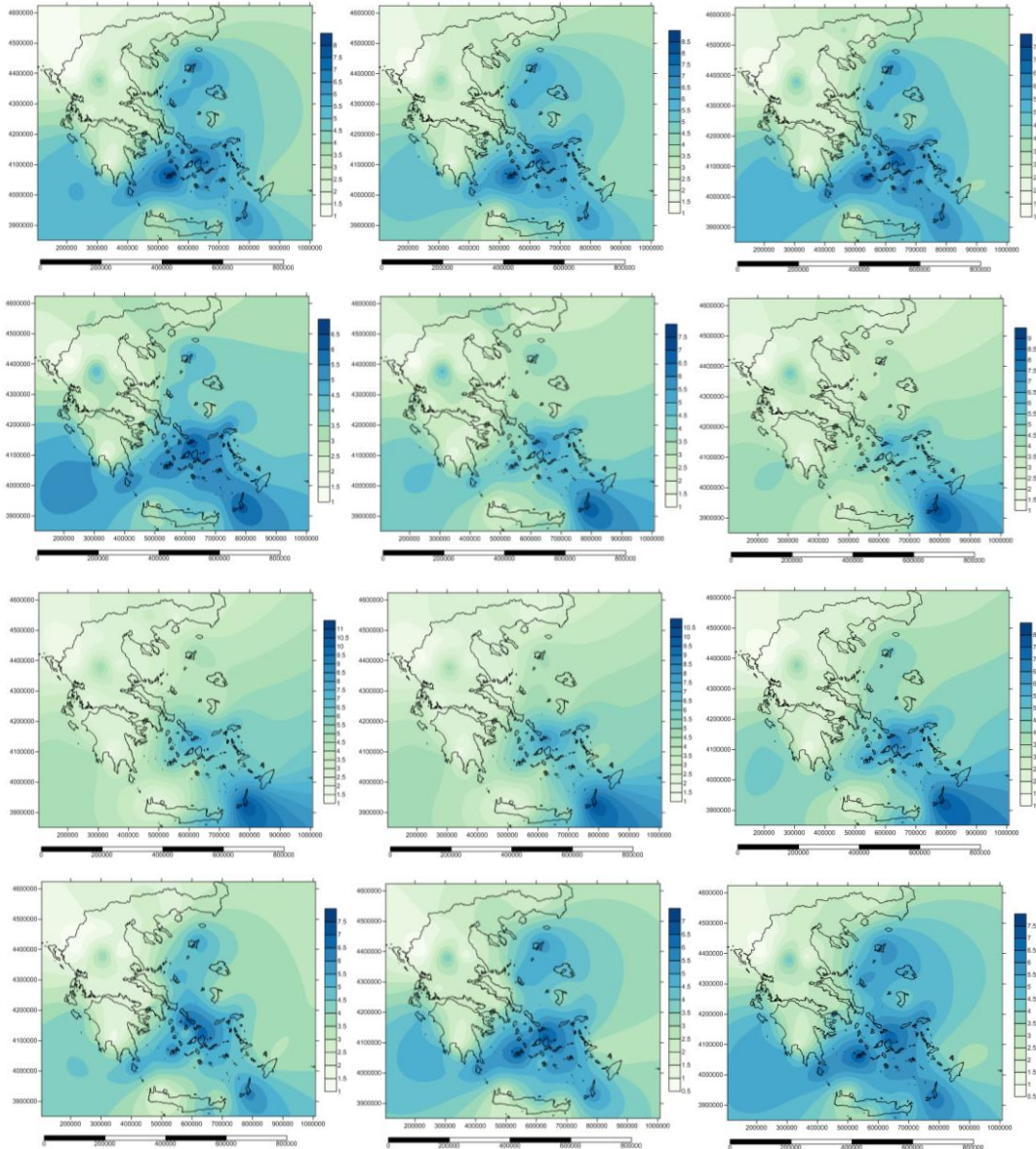


Figure 5: Spatial and temporal disperse of monthly average wind speed from January (top left) to December (bottom right, following right direction when reading).

## Wind direction

Wind direction was calculated for all the 36 stations with the available data, by estimating the monthly average wind direction from each station. Direction data, depicted from where wind blows at degrees ( $^{\circ}$ ), so that for instance, wind directions of  $360^{\circ}$  were concerned northern ones. But, as direction is fragment to the space of  $[0^{\circ}, 360^{\circ}]$  and furthermore, as direction is a vector variable, average should be carefully estimated. The average of two directions that blows from e.g.  $360^{\circ}$  and  $5^{\circ}$ , will be about  $180^{\circ}$ , the opposite direction from the real one. So that, special gauges took place, keeping in mind the above mentioned task and furthermore as

direction data were given from where the wind blows, in order to reveal the truly direction of wind, additions and deductions should be done from  $\pm 180^\circ$  if variable is greater or smaller than  $180^\circ$ . The results revealed (Fig. 6) that most of the percentage of wind's directions in Greece (about 44%) is northern ones and the season that this behavior occurred is winter and specifically corresponded at February (58%).

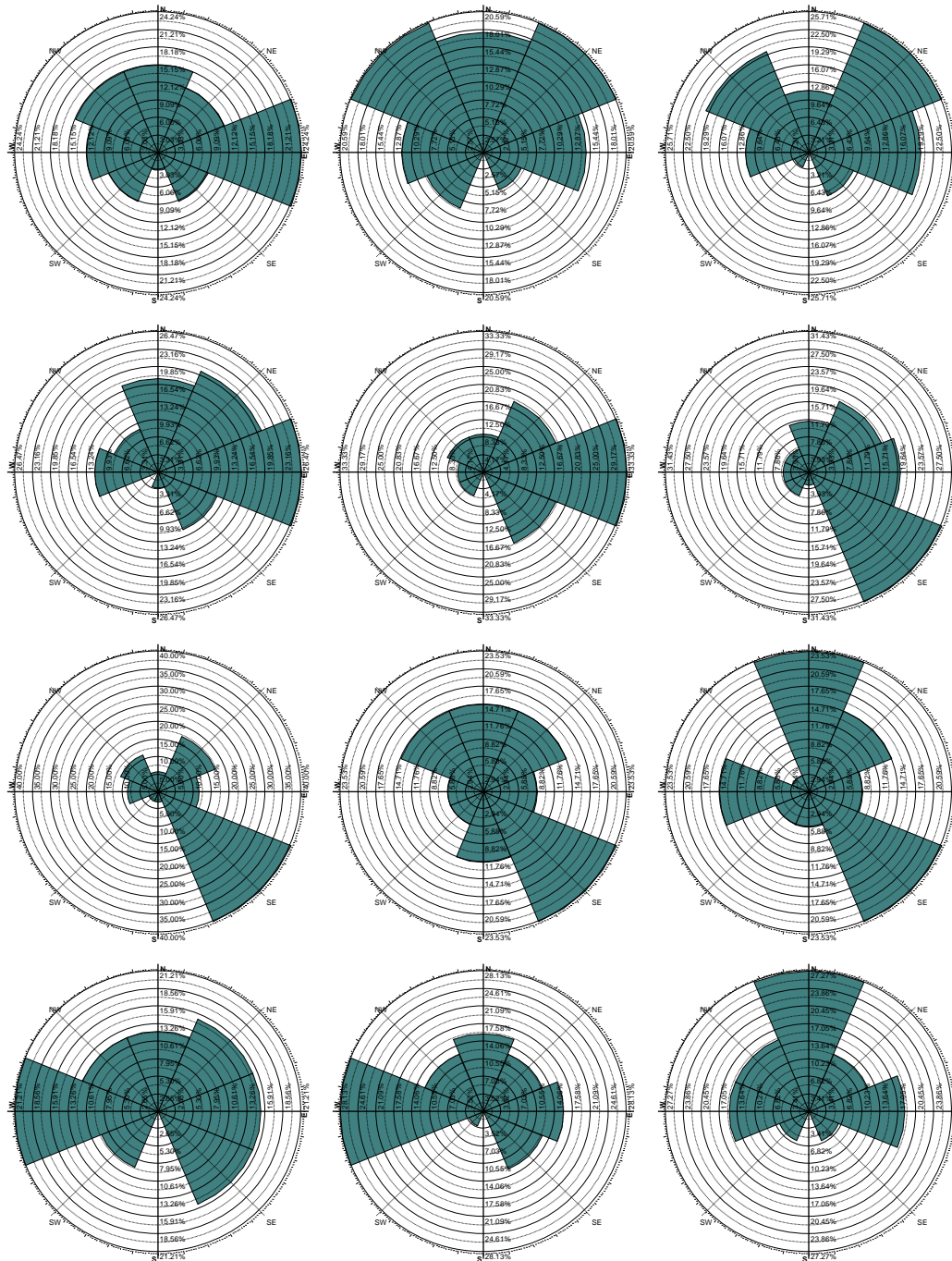


Figure 6: Direction of wind speed at degrees ( $^\circ$ ), from 36 stations of Greece.

### Distribution fitting

Statistical characteristics of wind speed examined at the area of interest, were: mean, standard deviation (variance), coefficient of autocorrelation and autocovariance of time series, at daily and monthly time scale. Furthermore climacograms and power spectras were extracted, for each station, at the same time scale, as the above mentioned. All the important features, that



were necessary for the stochastic processes of wind speed, were derived, by considering all the above statistical treatment, which led to draw conclusions, about the general behavior of this variable.

Hydrognomon software was used for the statistical analysis of the variables, under which the distribution that best fits to the empirical wind speed data (Fig. 7) was assumed to be Weibull, as well as Gamma distribution, which fitted very well to the historical sample, with prevalence of Weibull distribution (Fig. 8) to describe wind speed at both daily and monthly time scale.

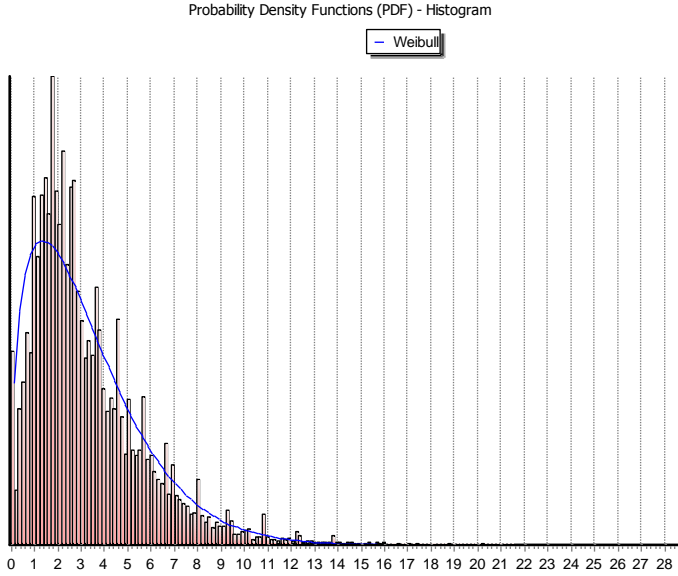


Figure 7: Histogram of the empirical data from Alexandroupoli station, fitted with the Weibull distribution (Hydrognomon).

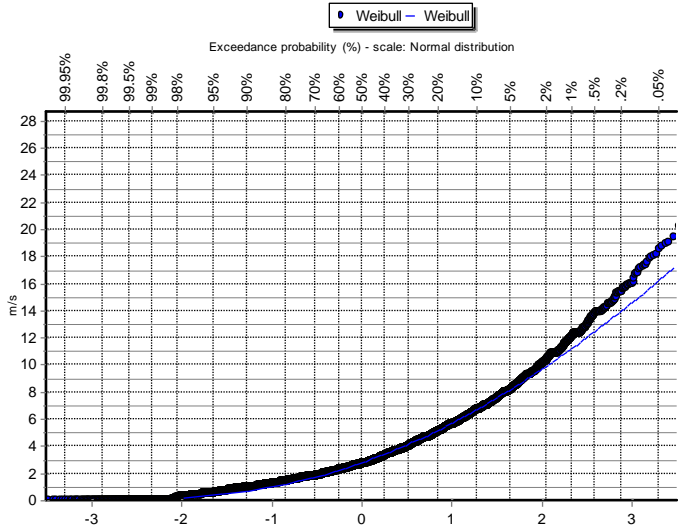


Figure 8: Empirical data and fitting of the Weibull distribution, for Alexandroupoli station (Hydrognomon).

## Wind Gust

Empirical data of wind gust were treated (Fig. 9) and specific distributions were fitted to the observed ones and it was concluded that, the distributions which best fits to the wind gust, were GEV max and Gumbel max, with prevalence of GEV max (Fig. 10). Also, from these calculations, were considered the maximum of the maximum values (maxima of maxima) in groups of 200, 100, 50 and 10 values respectively (right tail of distribution) and in all of the above cases it was concluded that these extreme values were adjusted to the exponential distribution. The above conclusion was resulted from the initial configuration of the sample in ascending order, as displayed the values on a diagram and fitting a trend line to the data. The suitability of the adjustment was tested by the RMSE criterion and in all cases it was showed that the value was approximately 0.85 which appeared very good adaptation to the voltage of the sample.

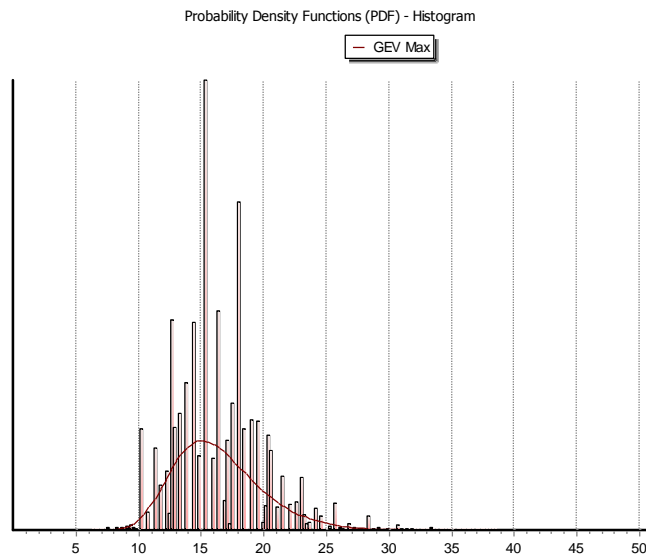


Figure 9: Histogram of the empirical data from Alexandroupoli station, fitted to GEV max distribution (Hydrognomon).

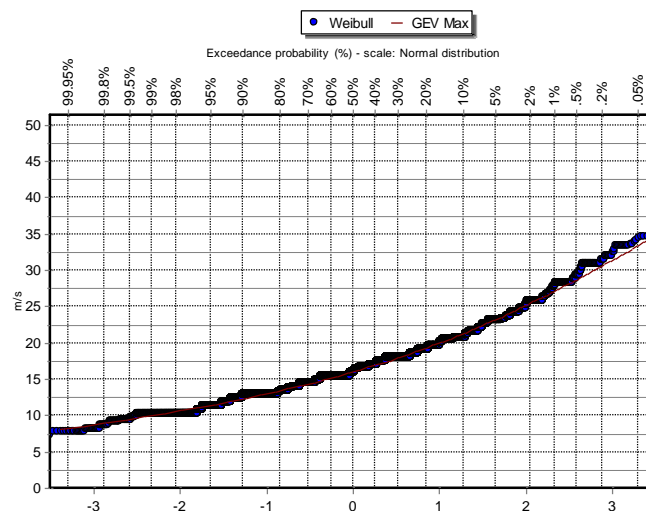


Figure 10: Empirical data and fitting to GEV max distribution, from Alexandroupoli station (Hydrognomon).

As far as, gust data concerned, for a specific number of stations and for a specific observed period, it was held the treatment of the variable, for further comparison with wind speed, at daily time scale, in order to find a relationship between these two variables. Estimations were held at daily time scale and at the same day, so the conjunctions between winds speed and gust, to be directly estimated. Mean (Fig. 11) and standard deviation (Fig. 12), of the differences and the ratio, were calculated, between the two variables, in order to reveal, if they were characterized by a common statistical - stochastic pattern (Fig. 13).

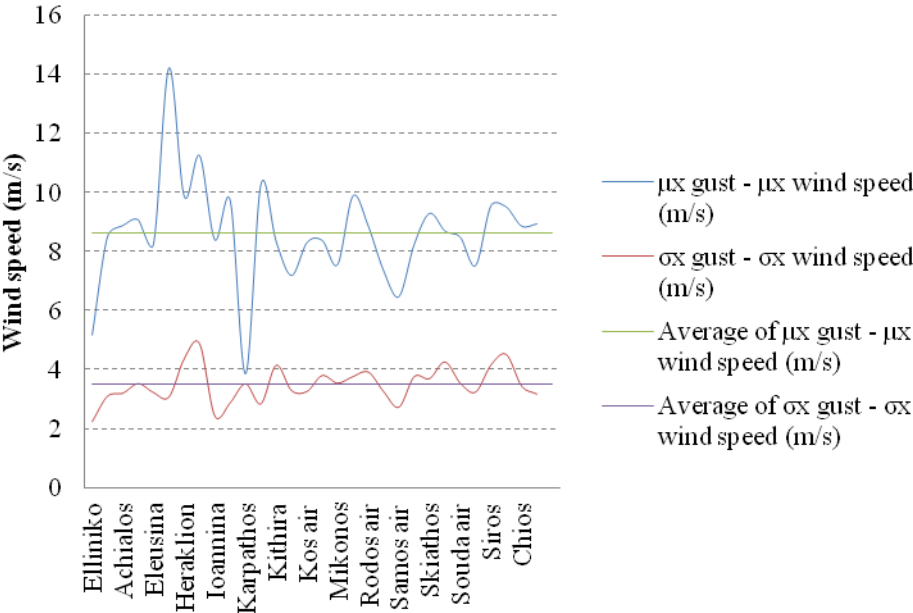


Fig. 11: Mean ( $\mu_x$ ) and standard deviation ( $\sigma_x$ ) of the differences, between gust and wind speed at the same day, at m/s.

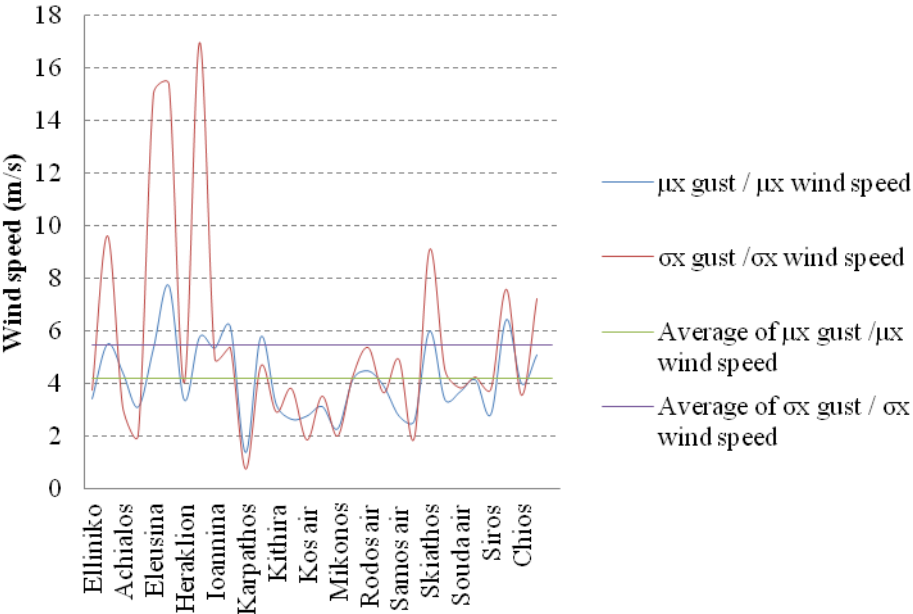


Fig. 12: Mean ( $\mu_x$ ) and standard deviation ( $\sigma_x$ ) of the ratio, between gust and wind speed at the same day.

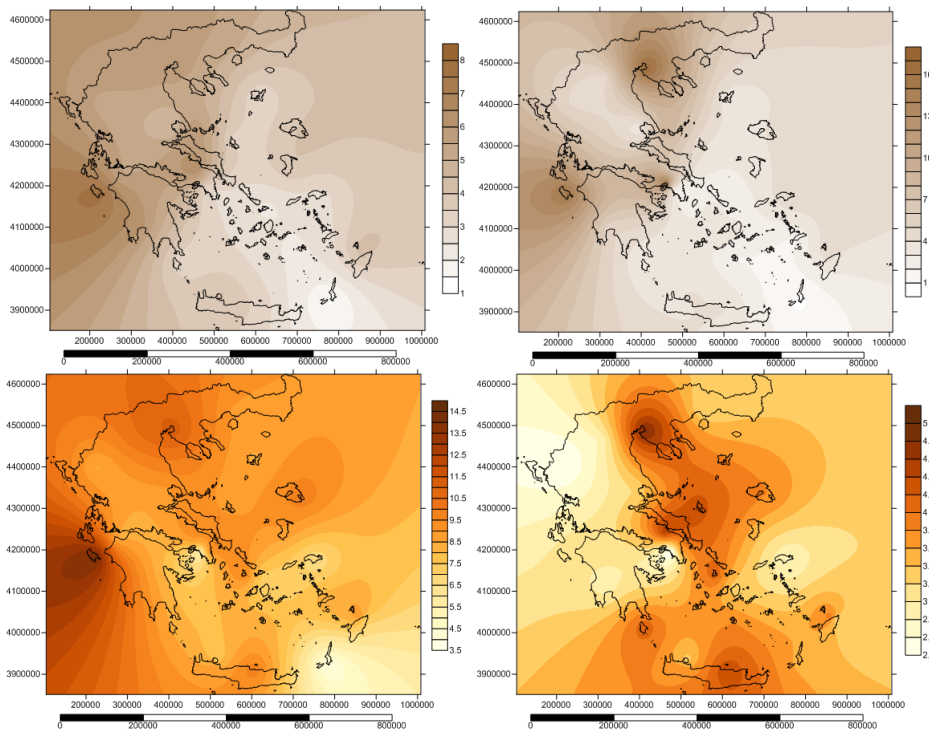


Figure 13: Mean and standard deviation of ratio (upper row) and differences (lower row), between gust and wind speed, at the same day.

### Reanalysis data

Furthermore, treatment of reanalysis data were occurred, for specific stations, due to the measurement period and results were compared with the ones of 30 stations of observed data, to deduce about the reliability on actual measurements (reanalysis). For this purpose, it was performed the calculation of cross correlation of the stations, between the observed and reanalysis data, so the comparison of cross correlation of the stations was occurred, separately, for each station and between stations (Fig. 14), for each data cross correlation, block. This calculation was occurred to quantify the reliability of reanalysis data and finding the use of such data to draw firm conclusions. Cross correlation analysis between observations and reanalysis data revealed good correspondence (values until 0.85) especially to the areas that extreme had occurred and the main result, from the above mentioned analysis, was the fact that values of reanalysis data were spatially dispersed such as observations. Reanalysis data showed the same areas of extreme wind speed as observations, so they are very helpful in cases of observation's lack, when studying a specific area.

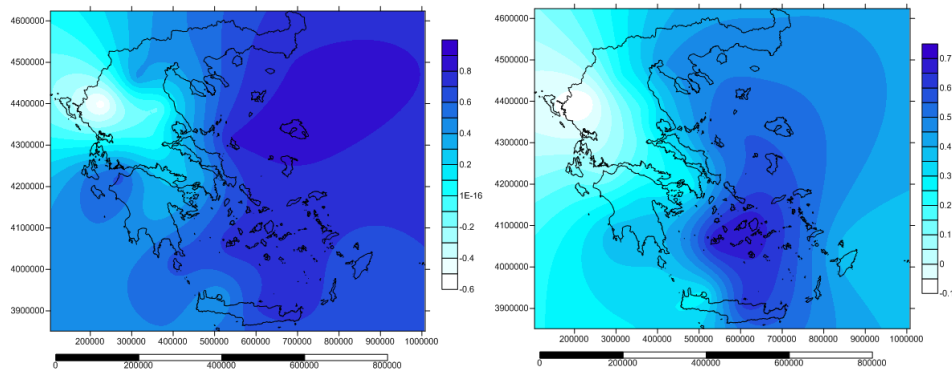


Figure 14: Cross correlations between observed data and reanalysis one (on the left) and cross correlations of the cross correlations between observed data and reanalysis one (on the right).

### Catastrophic events at Greece due to extreme winds

Specific maps were exported, for the most catastrophic events at Greece for every month (Fig 15), related to the extreme wind speed events, in order to show the spatial and temporal dispersion of these phenomena at Greece and find areas where such phenomena occur frequently. Of major importance, for the above process, was the period of time that these phenomena occurred, which results to some conclusions about wind speed trend analysis. Monthly time scale maps were developed, which emphasize to the spatial and temporal distribution of the most catastrophic events, due to the extreme wind speed.

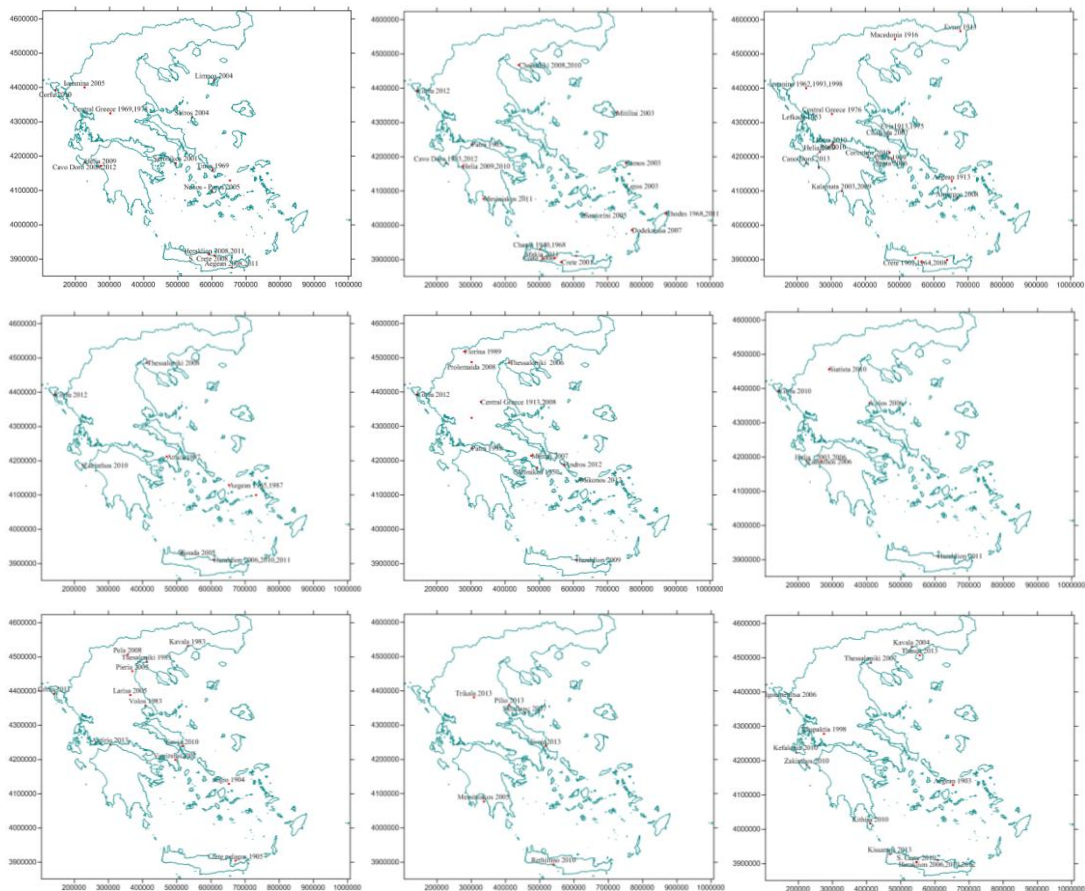




Figure 15: The most catastrophic events, due to extreme wind speed per month, at Greece, from January (top left) to December (bottom right, following right direction when reading).

### Wind speed trends at period (1970-2013)

Specific stations were used, at common measurement period, for wind trend analysis, in order to find the past conduct of wind for the observed period and to draw conclusions about wind speed trends for that period at specific areas. Trend analysis was extracted by linear regression to the empirical data, for every month. For a better realization of results, maps were designed, in order to depict the positive and negative trends for specific areas, all over Greece terrain (Fig 16).

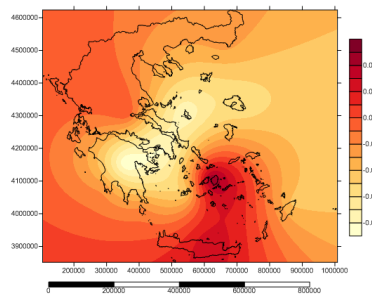


Figure 16: Trends of wind speed at Greece, at the period (1970-2013). Positive trends (red) and negative trends (yellow).

Furthermore, the examined period was split into two smaller ones, in order to extract, differences, at divided examine periods. So the period (1970-2013) was separated into the periods (1970-1990) and (1991-2013) and maps were designed (Fig. 17), in order to reveal any differences with the first examined period. The trends of the examined variable then showed a different view at the period (1970-1990) and almost the same disperse at the period (1992-2013).

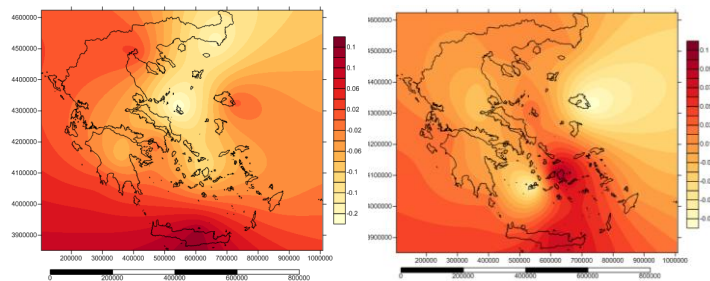


Figure 17: Trend analysis of wind speed variable, at m/s/month, at the periods (1970-1990) (on the right) and (1992-2013) (on the left).

### Theoretical wind energy potential at Greece

Theoretical wind energy potential per month (Fig. 18) was carried out, in plants of ( $W/m^2$ ), from monthly and daily aggregated data sets, and it was performed comparison between them, showed whether they assume same or different results. For a more comprehensive analysis, of the areas due to the quantification of the (theoretical) potential energy and reliability in areas with large (theoretical) potential energy, calculations were carried out, in order to find the percentages of maximum winds, at each region (percentages 1-5-10-20 -30%) at both daily and monthly time scale and vice versa (the percentages of prevailing winds, with specific speed limits at daily and monthly time scale), in order to present a more obvious conclude, about the areas that really have large percentages of high wind speed.

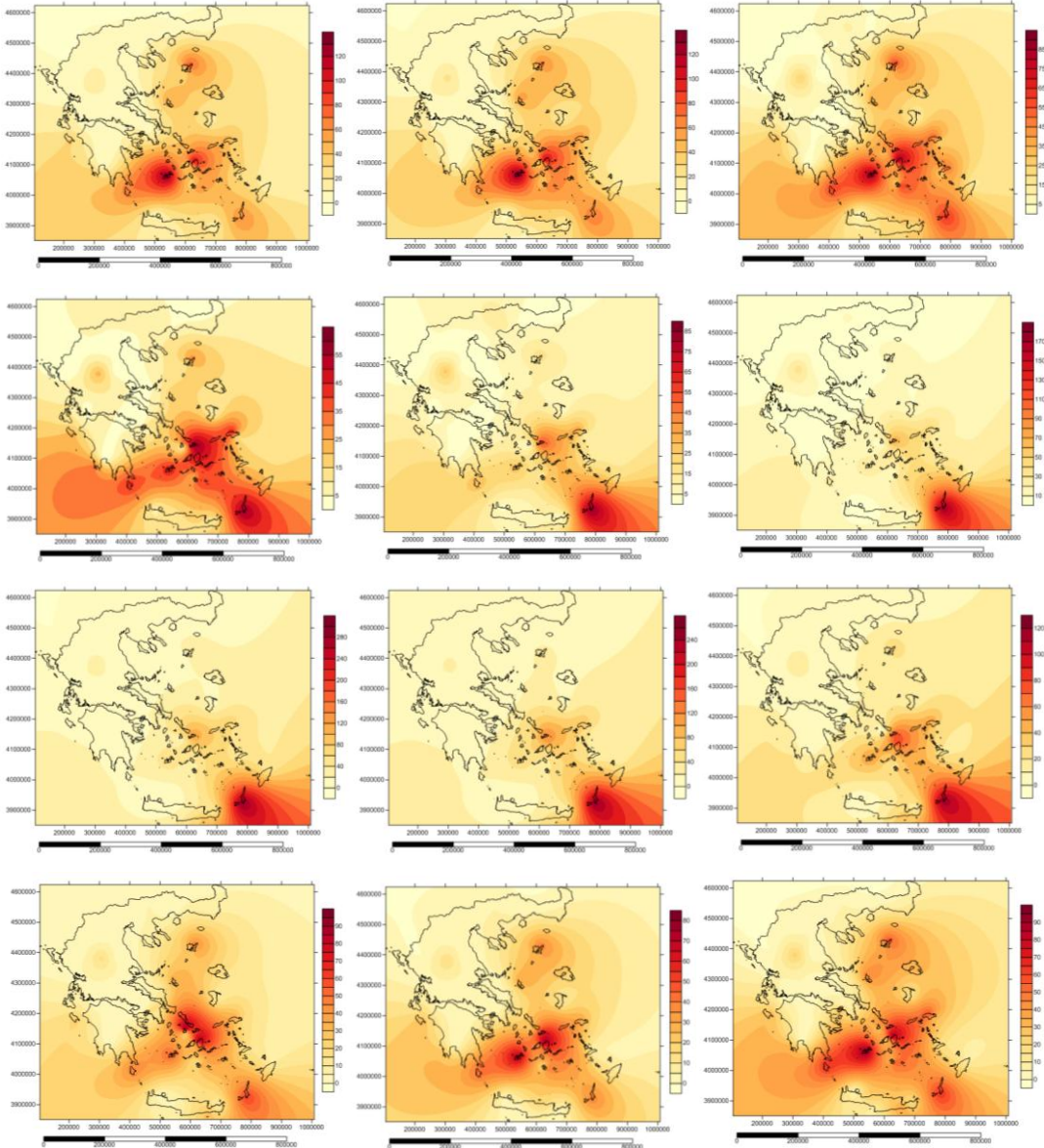


Figure 18: Theoretical wind energy potential for every month ( $W/m^2$ ), from monthly aggregated time series, from January (top left) to December (bottom right, following right direction when reading).

**Weibull shape (k) and scale (c) parameters.**

Adjusting the Weibull distribution to the observed data, it were estimated the shape (Fig. 19) and scale (Fig. 20) parameters of the distribution (k, c) at monthly and daily time scale and also it was revealed their dispersion in the entire country, as well as examined, if these parameters, follow any spatial or seasonal form. Also, from the observed data of wind

direction, it was calculated the spatial and temporal behavior of this variable at Greece, to draw conclusions about the rate of the steering winds at a monthly time scale, as well as, for seasonal and annual one.

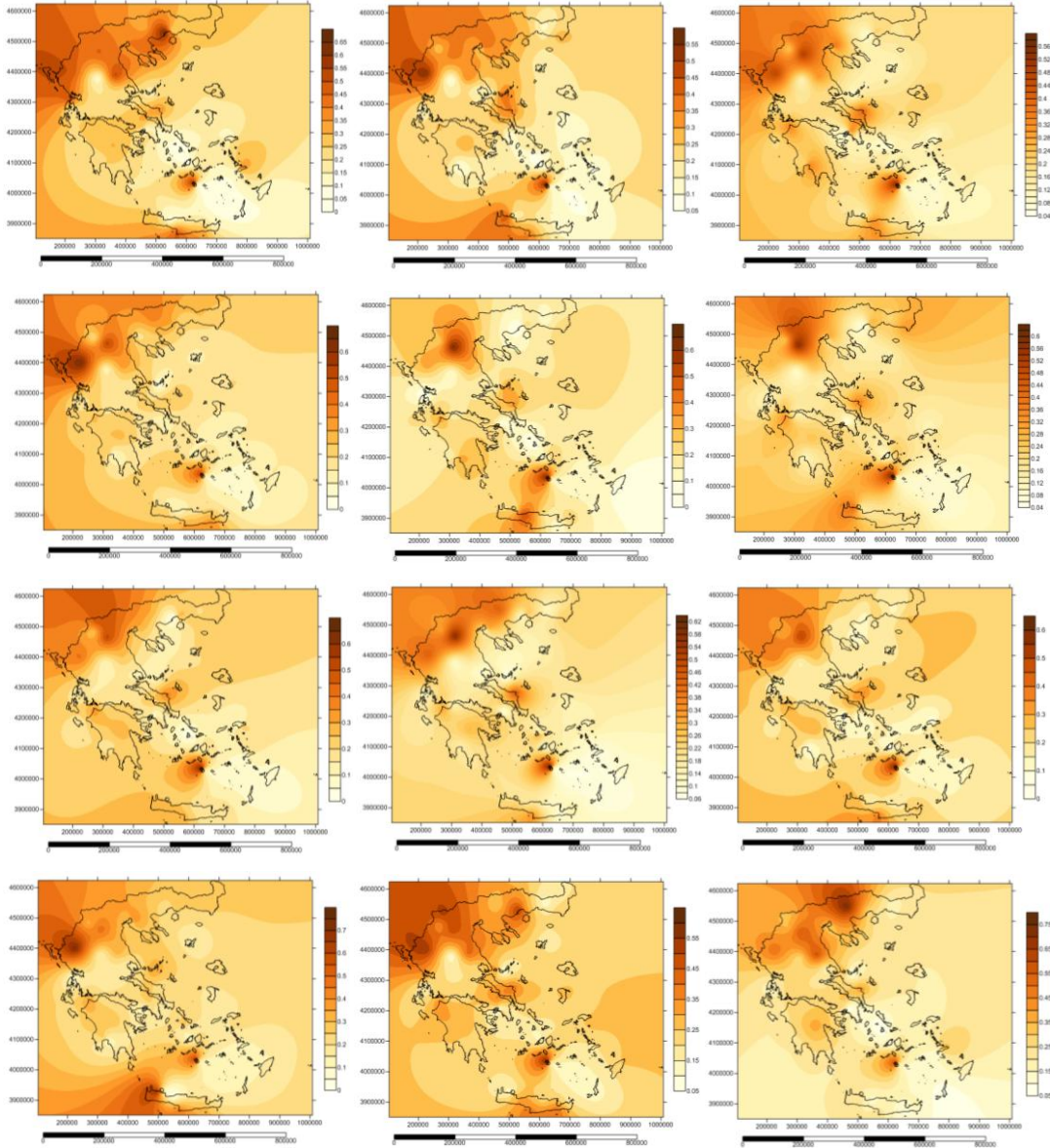
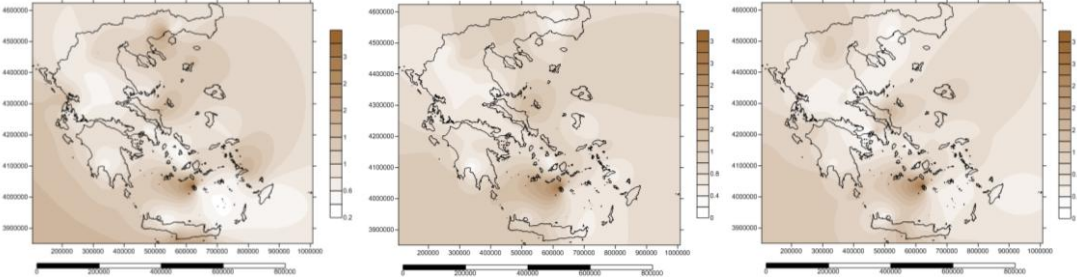


Figure 19: Disperse of the Weibull shape parameter ( $k$ ), from monthly aggregated time series, at Greece, from January (top left) to December (bottom right, following right direction when reading).





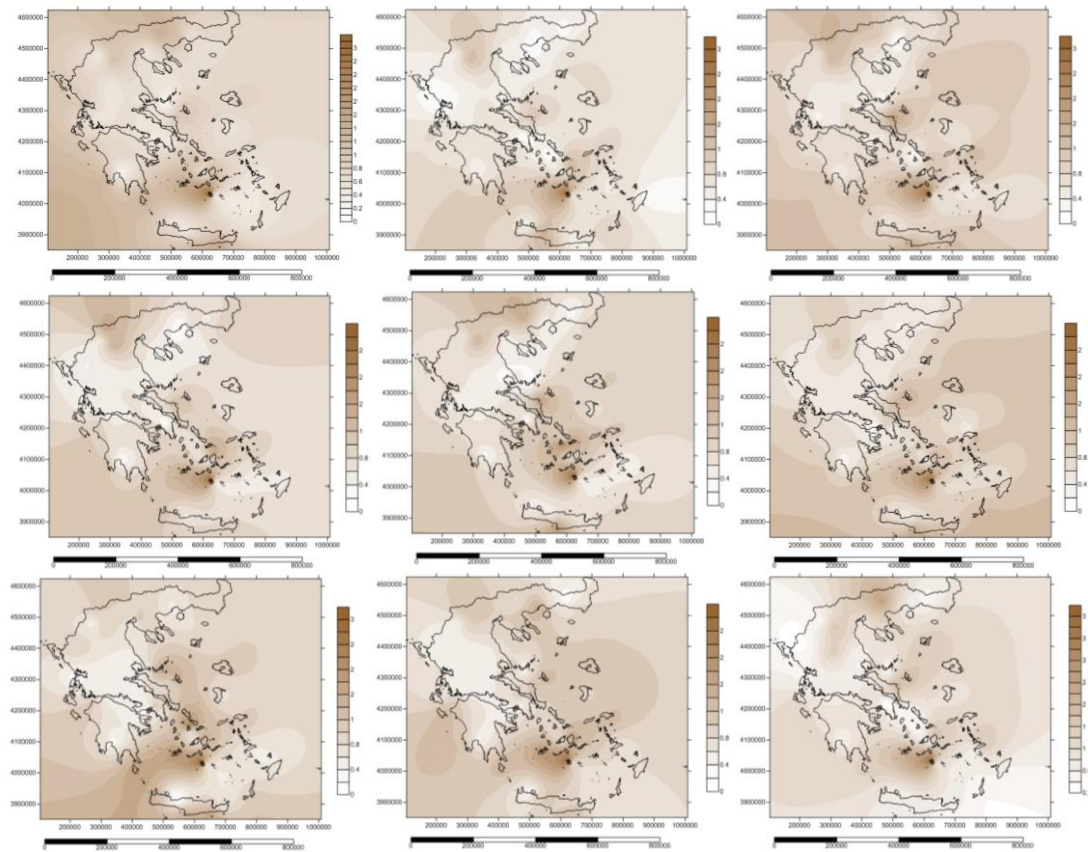


Figure 20: Disperse of the Weibull scale parameter ( $c$ , (m/s)), from monthly aggregated time series, at Greece, from January (top left) to December (bottom right, following right direction when reading).

### Weibull parameter estimation ( $k$ , $c$ )

Parameters of Weibull distribution shape ( $k$ ) and scale ( $c$  (m/s)) ones were estimated through four different approaches, in order to deal with the best fit to the empirical sample. The selected stations were the same as the ones were used for the model fitting and the parameters estimated methods which were used were: (a) M.L.E. (Maximum Likelihood Estimator) (b) L – moments (c) Logarithmic transformed moments (L.T.M.) and (d) Graphical estimation. Results from the above mentioned methods were depicted to a diagram (fig. 21-23), as well as the empirical distribution of the data, from a specific station (Alexandroupoli). The diagram discloses which method best fits to the empirical data, by the shape of Weibull distribution, with parameters estimated from different approaches. The diagram manifested that all the above mentioned estimated methods gave very good approaches. As it is depicted at (Fig. 24-26), MLE and L-moments estimators were not affected by extreme values, so they appeared to be more accurate when estimating distribution's parameters.

Conclusionally, as MLE is a method based on optimization of the logarithmic likelihood function and also as L-moments are not affected by extremes, these two methods seemed to be the more accurate from the others. Finally, parameters estimated by MLE and L-moments methods were fitted better to the tail of empirical distribution, which is important especially for human structures and early warning measures due to extreme wind speed.

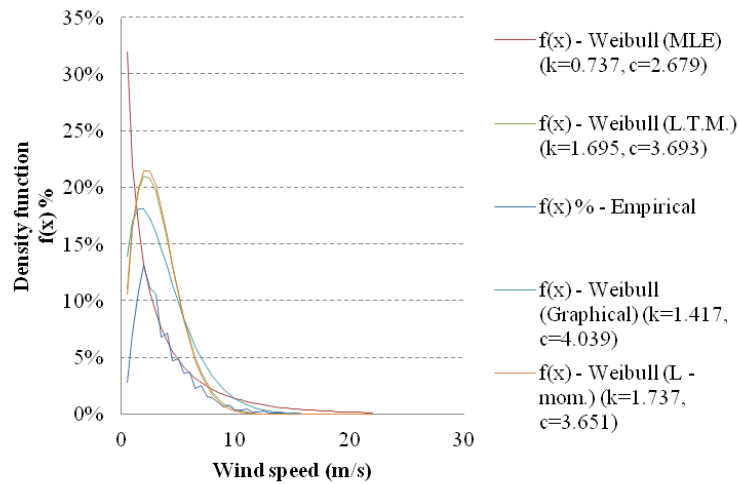


Figure 21: Estimation of Weibull parameters with for different approaches: (a) L – moments, (b) M.L.E. (c) Logarithmic Transformed Moments (L.T.M.) and (d) Graphical.

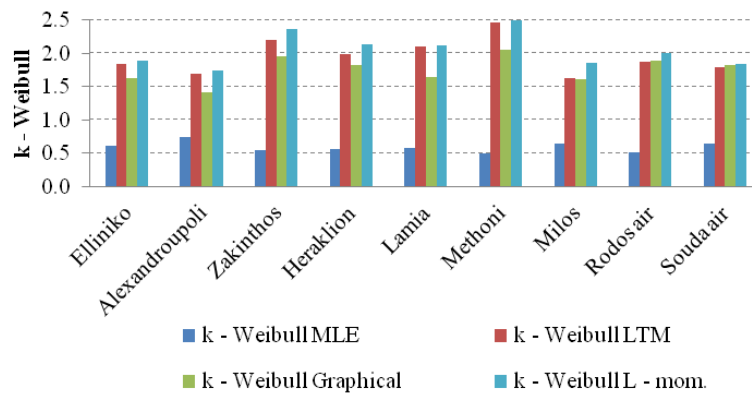


Figure 22: Comparison of Weibull shape (k), parameter estimation, from 9 stations and different estimated methods.

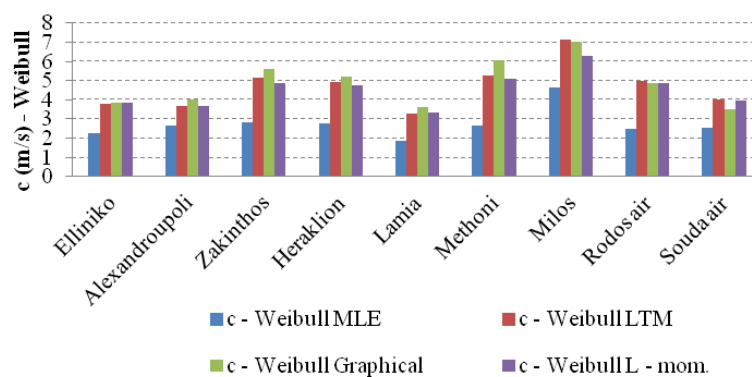


Figure 23: Comparison of Weibull scale (c (m/s)), parameter estimation, from 9 stations and different estimated methods.

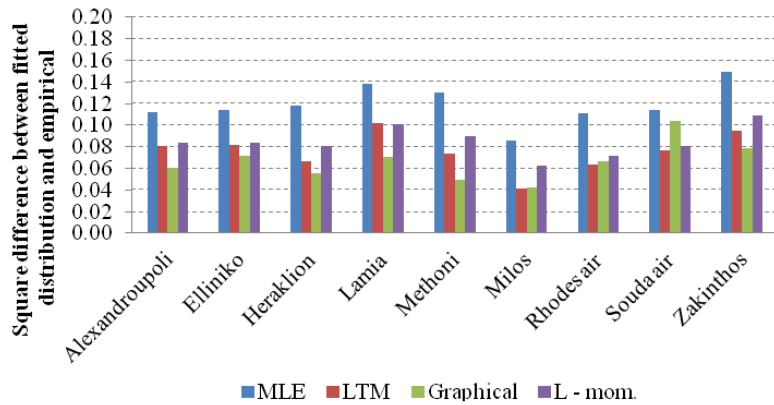


Figure 24: Square difference of fitted distribution and empirical one, of the 9 model estimated stations, with the four mentioned methods.

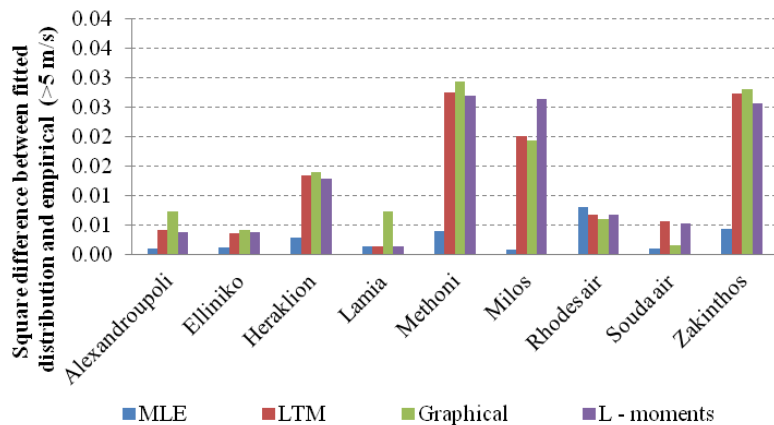


Figure 25: Square difference of fitted distribution and empirical one, of the 9 model estimated stations, with the four mentioned methods, for wind speed greater than 5 m/s.

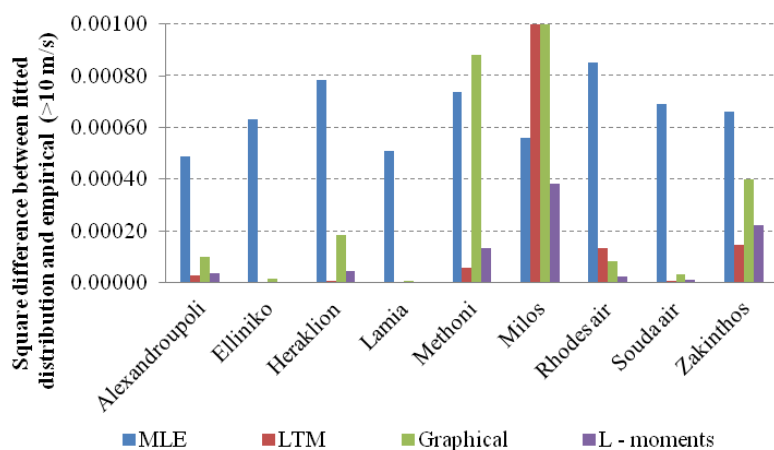


Figure 26: Square difference of fitted distribution and empirical one, of the 9 model estimated stations, with the four mentioned methods, for wind speed greater than 10 m/s.

From the 9 above estimated stations, it was concluded that the least square differences between fitted distribution (with the four mentioned methods) and empirical one, took the

minimum value for graphical method, for all data set. On the contrary, when the sample is clustered for wind speed over 5 and 10 m/s MLE and L-moments had the minimum square difference. Furthermore, due to the fact that in most cases we are interested in extreme wind speed events (energy, weather, early warnings), MLE (Fig. 25) and L-moments (Fig. 26) were found to be the best estimators for Weibull parameters.

### Finding Hurst exponent for wind speed in Greece.

For all performed stations at daily time scale, climacograms were extracted (Fig. 27), from the standardized sample, in order to draw conclusions about the indirect finding of the persistence parameter of the wind speed and the direct calculation of the Hurst coefficient. It was found that climacograms of the examined stations have a relatively same slope, even at large time scale, which led to came up with a specific value of the Hurst coefficient for the entire region of Greece,  $H = 0.75$ .

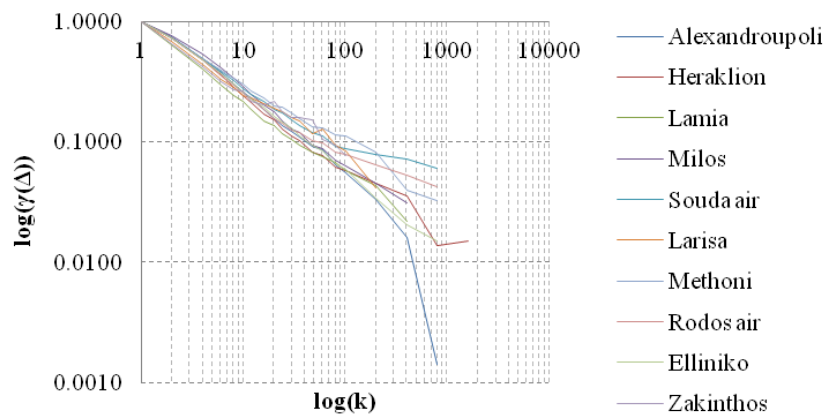


Figure 27: Climacogram, for 10 stations which were took place at wind speed modeling, at the standardized sample.

The above conclusion, led to the selection of 10 specific stations of the entire country, at daily time scale, based on the observed period, missing values and spatial variance of stations at the region of interest, thus conclusions, drawn from the exported model, to be generalized for the entire country. Specific maps were designed, in order to reveal the dispersion of the estimated model parameters (Fig. 28).

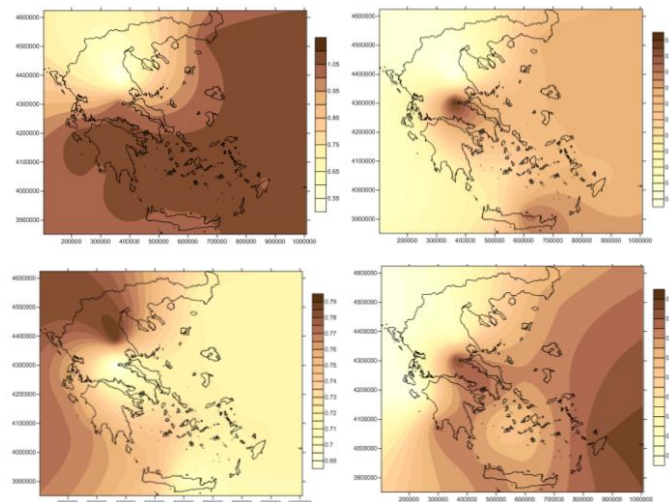


Figure 28: Dispersion of the (a)  $a = \gamma_0$  parameter, (b)  $b = 2H-2$ , parameter, (c) Hurst exponent and (d) model fitting.

The estimation of the standard deviation (variance), was calculated by the unbiased estimator of the variance (Eq. 1, 2) and was adjusted to the selected 10 stations of the standardized data sample (Fig. 29, 30), which, as demonstrated in thesis (Koutsoyiannis, 2003), proved to be the most reliable estimator, contrary to autocorrelation function and spectra (pseudo-spectrum).

$$E [\hat{\gamma}(\Delta)] = \eta(\Delta, T)\gamma(\Delta) \quad (1)$$

$$\eta(\Delta, T) = \frac{1-\gamma(T)/\gamma(\Delta)}{1-\Delta/T} = \frac{1-(\frac{\Delta}{T})^2\Gamma(T)/\Gamma(\Delta)}{1-\Delta/T} \quad (2)$$

Where,

$E [\hat{\gamma}(\Delta)]$ : unbiased estimator of the variance

$\eta(\Delta, T)$ : unbiased coefficient

$\gamma(\Delta)$ : theoretical variance of the sample to the correspondence time scale ( $\Delta$ )

$\gamma(T)$ : theoretical variance of the sample to the correspondence time scale (T)

$\Delta$ : relevant scale calculation

T: entire scale calculation for all data sample

$\Gamma(T)$ : autocovariance function for the discrete time process at time scale (T)

$\Gamma(\Delta)$ : autocovariance function for the discrete time process at time scale ( $\Delta$ )

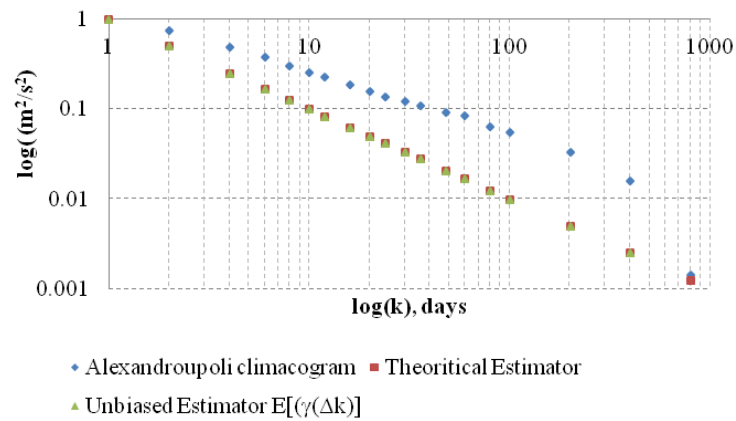


Figure 29: Climacogram of the theoretical, estimated and unbiased estimated variance  $(m/s)^2$ , of Alexandroupoli station.

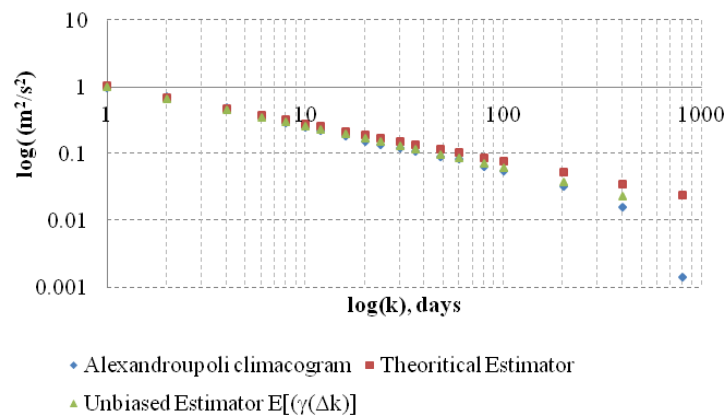


Figure 30: Fitted the unbiased estimator of variance  $E[\hat{\gamma}(\Delta)]$ , to the empirical one  $\gamma(\Delta)$ , of Alexandroupoli station.

Furthermore, Hurst coefficient was estimated from climacograms directly from the empirical data from 10 stations and the results were compared to the unbiased estimated ones. The results seemed to be approximately equal (Fig. 31).

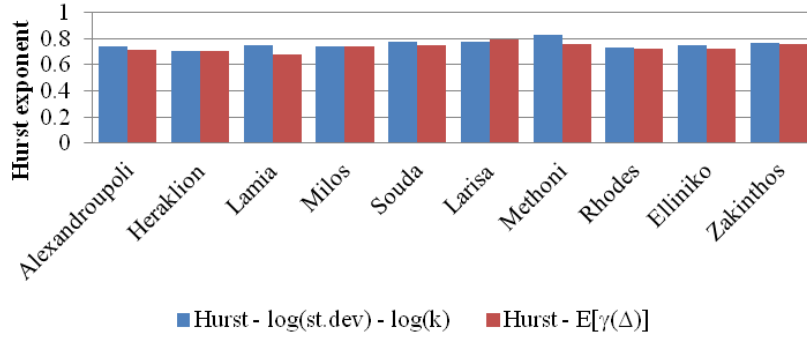


Figure 31: Compared Hurst exponent with empirical climacogram data standard deviation [ $\log(\text{st.dev.}) - \log(k)$ ], (blue) and with unbiased variance estimator  $E[\hat{\gamma}(\Delta)]$ , (red).

### Synthetic time series generation

Synthetic time series, were generated from a particular station (Alexandroupoli), through the process of simple scaling model (Koutsoyiannis, 2002), which presented, the three ways, in which it became possible to produce a synthetic time series from Markov models, adapted to FGN ones, as well as maintain the desired statistical characteristics and persistence (Hurst coefficient) of selected time series. A description of the three methods was held and furthermore, was performed the process of random variations at multiple time scales, wherein, three AR (1) models were summed for the generation of a synthetic time series. Time series, which were extracted from these models, were fitted to normal distribution (production of AR (1) with adaptation to FGN), which does not correspond to the actual behavior of the wind (Fig. 30), which on a daily time scale, Weibull distribution is best adjusted. For that reason, suitable normal transformations were used, which adjusts any distribution to the normal one, tested with means of mean square error (RMSE), resulting from the adjustment of the inverse cumulative distribution function  $(\text{CDF})^{-1}$  on a diagram (Q - Q). The procedure mentioned above, was performed for finding the parameters of the used transformation  $Z(g(x))$  and then, by performing the inverse transformation  $Z(g(x))^{-1}$ , the synthetic time series (which follows normal distribution) were denormalized and so a synthetic time series was generated (Fig. 32-36). Five transformations were applied and results of the generated - denormalized time series appeared at (Fig. 37-40).

Five normalized transformations were fitted to the empirical data in order to estimate their parameters through the gauge of least square error at Quantile-Quantile plot. After the parameter's estimation, the inverse process was held of de-normalized synthetic time series, in order to readjust to the distribution that empirical data follows. The five transformations which used were:

$$Z(t) = [aX(t)^{-\zeta} + \beta] \left( \gamma + \sqrt{\left(1 + \frac{1}{\delta}\right) \ln\{1 + \delta[X(t) - \gamma]^2\}} \right) \quad (3)$$

(Papalexiou *et al.*, 2007), with five parameters ( $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \zeta$ )

$$Z = g(x) = \lambda \left[ 1 + \left(\frac{x}{v}\right)^{-\theta} \right] \sqrt{\left(1 + \frac{1}{\kappa}\right) \ln \left[ 1 + \kappa \left(\frac{x}{\lambda}\right)^2 \right]} \quad (4)$$

(Koutsoyiannis et al., 2011), with four parameters ( $\theta, \kappa, \lambda, v$ )

$$Z = g(X) - g(0); g(x) = c + \operatorname{sgn}(x - c) \lambda \sqrt{\left(1 + \frac{1}{\kappa}\right) \ln \left[ 1 + \kappa \left(\frac{x-c}{\lambda}\right)^2 \right]} \quad (5)$$

(Koutsoyiannis et al., 2008), with three parameters ( $\kappa, \lambda, c$ ) and when  $c=0$ :

$$Z = g(X) - g(0); g(x) = \operatorname{sgn}(x) \lambda \sqrt{\left(1 + \frac{1}{\kappa}\right) \ln \left[ 1 + \kappa \left(\frac{x}{\lambda}\right)^2 \right]} \quad (6)$$

$$y_i^\lambda = \begin{cases} y_i^\lambda; & \lambda \neq 0 \\ \log(y_i); & \lambda = 0 \end{cases} \quad (7)$$

(Box – Cox, 1964), with  $\lambda$  parameter

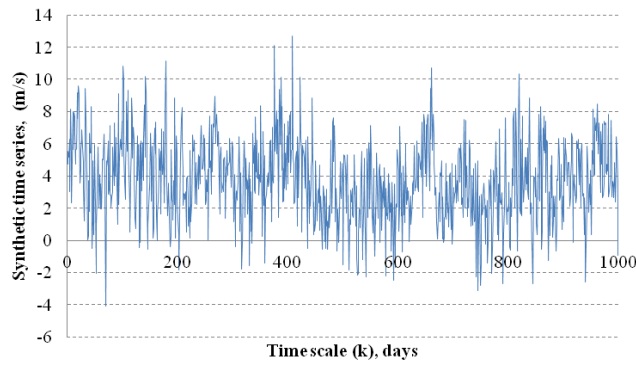


Figure 32: Generated synthetic normalized, time series, from Alexandroupoli station, from the multivariate time scale method. (Koutsoyiannis, 2002).

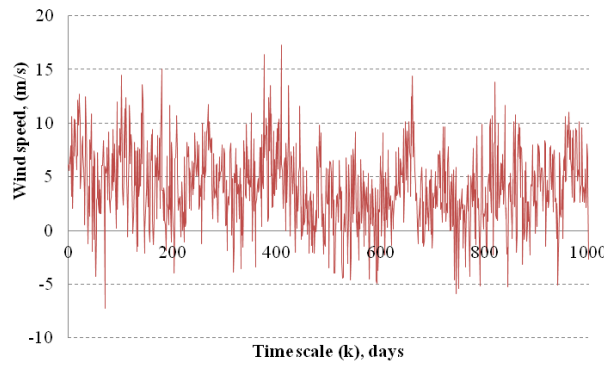


Figure 33: Generated synthetic de - normalized, time series, from Alexandroupoli station, from the normalized transformation proposed by (Papalexiou *et al.*, 2007).

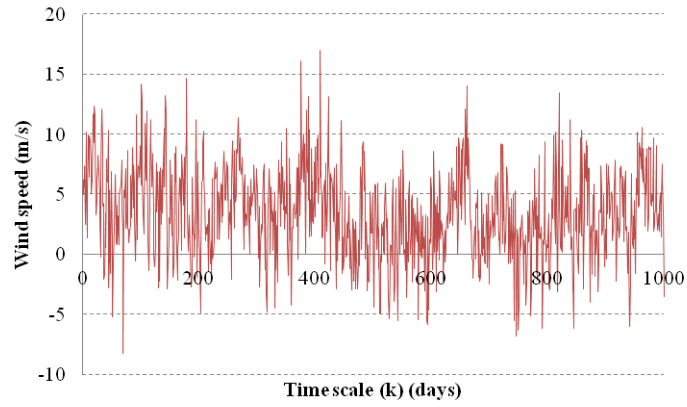


Figure 34: Generated synthetic de - normalized, time series, from Alexandroupoli station, from the normalized transformation proposed by (Koutsoyiannis et al., 2011).

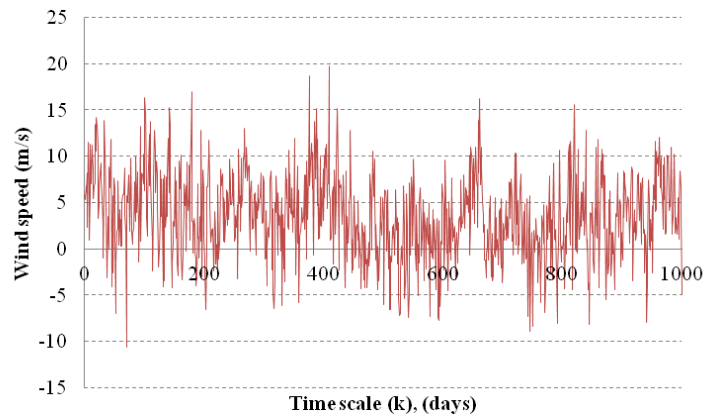


Figure 35: Generated synthetic de - normalized, time series, from Alexandroupoli station, from the normalized transformation proposed by (Koutsoyiannis et al., 2008).

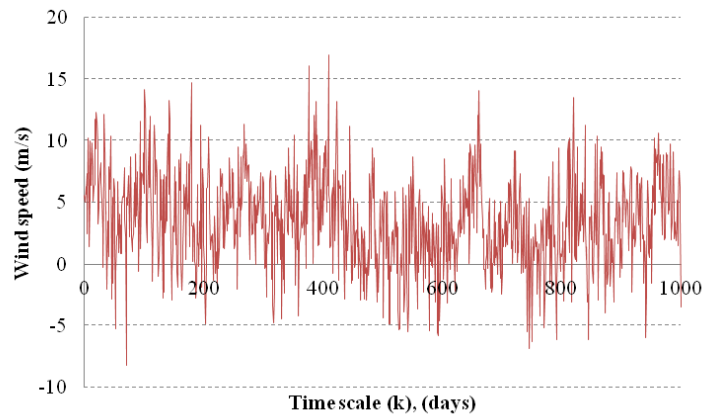


Figure 36: Generated synthetic de - normalized, time series, from Alexandroupoli station, from the normalized transformation proposed by (Koutsoyiannis et al., 2008).



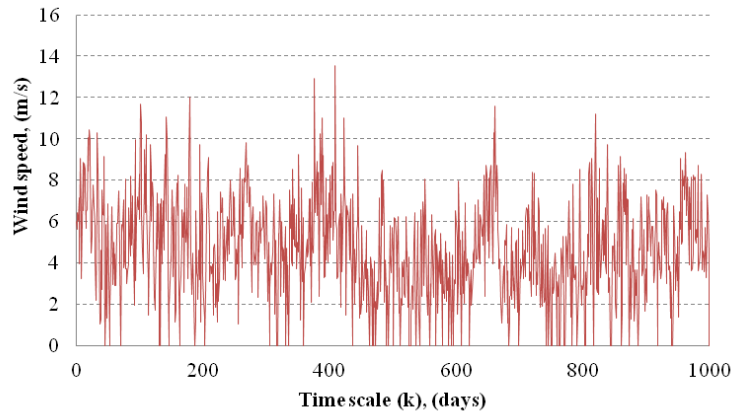


Figure 37: Generated synthetic de - normalized, time series, from Alexandroupoli station, from the normalized transformation proposed by (Box - Cox, 1964).

Specific transformations  $Z(g(x))$  were used in order to normalize the empirical data of the selected station (Alexandroupoli), thus fitting data into Gauss distribution, which is a linear form at Quantile - Quantile plot. Quantile is an expression for the inverse cumulative distribution and with minimizing the RMSE of empirical data with the  $(CDF)^{-1}$  observed data were fitted to the normal inverse cumulative distribution. At the end of the above procedure, parameters of the transformations were estimated, which tend to be useful at the next inverse procedure, de - normalization of data, using the inverse transformation  $Z(g(x))^{-1}$ , which appeared at (Fig. 36-40).

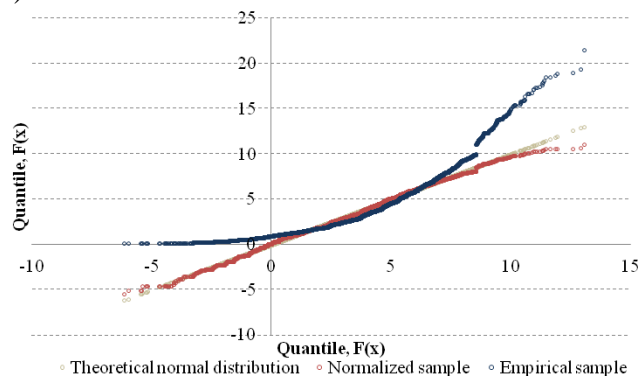


Figure 38: Empirical data (blue), which are fitted (red) to the inverse normal cumulative distribution (oil green) according to the transformation  $Z(g(x))$  proposed by (Papalexiou *et al.*, 2007).

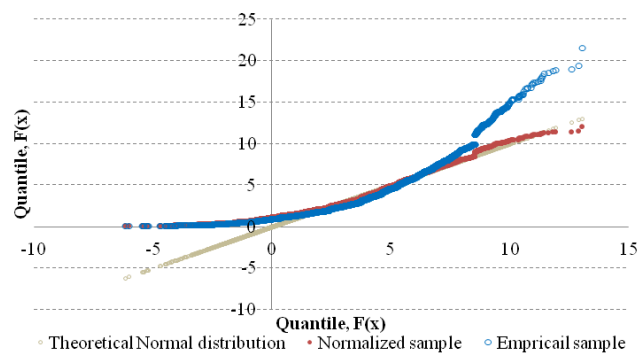


Figure 39: Empirical data (blue), which are fitted (red) to the inverse normal cumulative distribution (oil green) according to the transformation  $Z(g(x))$  proposed by (Koutsoyiannis *et al.*, 2011).

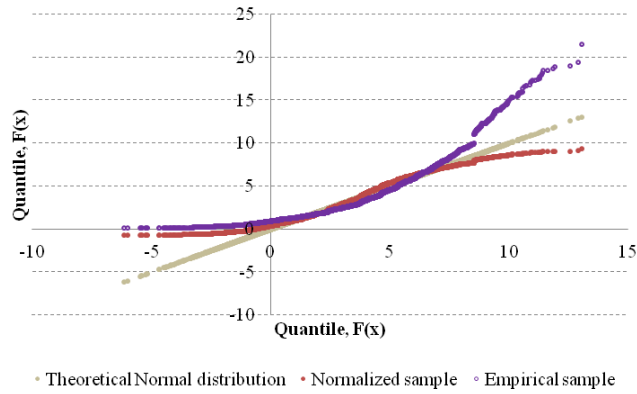


Figure 40: Empirical data (purple), which are fitted (red) to the inverse normal cumulative distribution (oil green) according to the transformation  $Z(g(x))$  proposed by (Koutsoyiannis *et al.*, 2008).

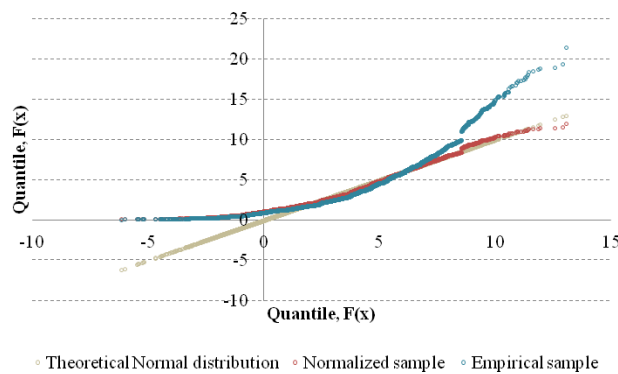


Figure 41: Empirical data (light blue), which are fitted (red) to the inverse normal cumulative distribution (oil green), according to the transformation  $Z(g(x))$  proposed by (Koutsoyiannis *et al.*, 2008).

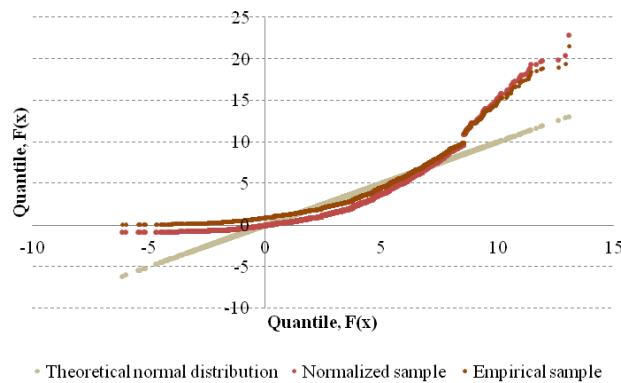


Figure 42: Empirical data (brown), which are fitted (red) to the inverse normal cumulative distribution (oil green), according to the transformation  $Z(g(x))$  proposed by (Box – Cox, 1964).

In order to find which of the transformations, generates a synthetic time series which best fitted to the empirical data, by maintaining specific statistical characteristics as average, standard deviation and autocorrelation at lag = 1, a plot with the statistical characteristics for all of the five synthetic time series from each procedure mentioned above, was designed (Fig. 41), showing if empirical statistical characteristics from the observed data are maintained.

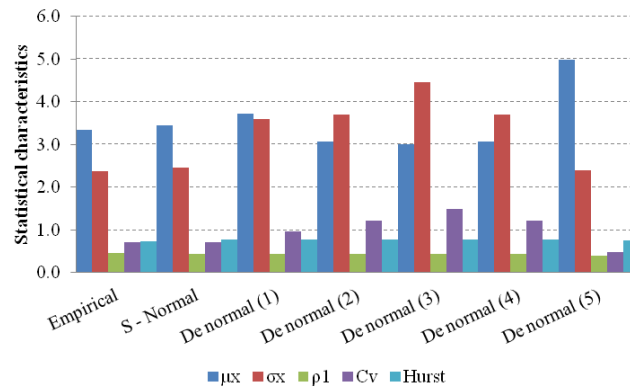


Figure 43: Statistical characteristics from empirical data, normal synthetic time series and five de – normalized synthetic ones, generated from different transformations.

## Conclusions

From the statistical - stochastic analysis, some useful conclusions were extracted about the wind speed behavior in Greece.

- Southern and south - east areas of Greece are the windiest and especially the islands of the central Aegean (Naxos - Milos - Mikonos). Moreover, Rhodes Island and Methoni shows extreme wind episodes annually.
- Standard deviation seemed to keep pace with the same extreme areas mentioned above, as the differences of the maximum and minimum wind speed, makes these variable to be more dispersed.
- Southern and south - east areas seemed to have the higher theoretical wind energy, especially the islands of the central Aegean and also areas such as Methoni and Kithira seemed to have satisfactory wind energy.
- Reanalysis data seemed to be well cross correlated to the observed values, as well as, they imply the same regions of maxima and minima of the wind speed as the observed.
- Weibull distribution best fits the wind speed data, as well as GEV max distribution best fits to the gust.
- The estimation of Weibull's parameters, shape ( $k$ ) and scale ( $c(m/s)$ ) factor seemed to have a specific pattern, which reveals dependence to the area (islands – seashore – continental) and to seasonality (Winter – Autumn – Spring – Summer).
- The best estimator for Weibull's parameters seemed to be MLE and L-moments estimators, which are not affected by extreme values (outliers) of the observed data.
- Wind seemed to blow from northern direction at approximately 45% percentage while 60% of the mentioned percentage corresponds to February.
- Trends of wind speed showed from the period 1970-2013 that wind speed is reduced through years in central Greece with rate 0.05 m/s/month and increased to the rest of the area with rate 0.03m/s/month. Trends for periods 1970-1990 and 1991-2013 showed a reduction at rate 0.07 m/s/month and increment at rate 0.1 to 0.06 m/s/month respectively, for the same regions as the above mentioned.

- Catastrophic events seemed to follow, spatial and temporal wind speed trends. These extreme events appeared at almost the same regions with positive wind speed trends and also most of them are observed the last two or three decades.
- Hurst exponent was calculated from climacograms for all Greece and the value of  $H=0.75$  seemed to fit observed data, well enough.

## **Appendices**

Additionally, at the end of this assignment, there are three appendices in which are gathered the results of the above treatment. The appendix A (in Greek) pooled tables with data processing and the results of the calculations. The appendix B (in Greek), where maps are exported, for a better overview of the spatial distributed results, for monthly - annual and seasonal time scale and finally at the appendix C (in Greek), there are charts, bar charts, histograms and rose charts, to confirm the results and conclusions, drawn from this thesis.





# 1 Εισαγωγή

---

## 1.1 Γενική περιγραφή της σημασίας της επεξεργασίας της μεταβλητής του ανέμου.

Στη σημερινή εκβιομηχανισμένη κοινωνία, όλες οι ανθρώπινες διαδικασίες και η γενικότερη καθημερινότητα χαρακτηρίζεται από αυτοματοποίηση σε όλες της εκφάνσεις του τρόπου ζωής. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην πλήρη τεχνοκρατική και τεχνολογική αφομοίωση των σημαντικότερων παραγόντων, που είναι απαραίτητοι για την επιβίωση και ανάπτυξη κοινωνιών στην χλιετία που διανύουμε. Επίπτωση του παραπάνω γεγονότος, σε συνδυασμό με την ολοένα αυξητική τάση μεγέθυνσης του παγκόσμιου πληθυσμού, καθιστά την επάρκεια σε ενέργεια ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα. Η παραγωγή ενέργειας, σήμερα, βασίζεται σε φυσικούς πόρους οι οποίοι δεν υπάρχουν σε αφθονία, όπως πιστεύεται από πλήθος ανθρώπων, αλλά διανύουμε και μια περίοδο που οι πόροι αυτοί εξαντλούνται, με αποτέλεσμα να αποτελεί επιτακτική η ανάγκη εύρεσης άλλων, ανανεώσιμων πόρων, για την εξασφάλιση των ενεργειακών απαιτήσεων (Katsoulis, 1993 · Chronopoulou *et al.*, 2010 · Schicker *et al.*, 2010). Μια από αυτές τις μορφές ενέργειας είναι και η αιολική (Ιωάννου Χ., 2012)

Ο άνεμος, αποτελεί σημαντική κλιματολογική μεταβλητή, που διέπεται από χαοτική συμπεριφορά και επομένως είναι δύσκολο να προβλεφθεί. Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι οποιεσδήποτε απειροελάχιστες αλλαγές γίνουν στις αρχικές συνθήκες, θα προκαλέσουν τελείως διαφορετική συμπεριφορά στο φαινόμενο. Όμως, μπορεί να προβλεφθεί η συμπεριφορά αυτή με κάποιο βαθμό αξιοπιστίας και κάποιο διάστημα εμπιστοσύνης, που είναι ικανό, ώστε να μπορεί να εκμεταλλευθεί μέρος της ενέργειας που προκύπτει από τον άνεμο. Πολύ σημαντικός παράγοντας προβλεψιμότητας της μεταβλητής αποτελεί η έγκαιρη και έγκυρη ενημέρωση, κυρίως για περιοχές που έχουν προβλήματα από καταστροφικά φαινόμενα όπως κυκλώνες και τυφώνες. Στις περιπτώσεις αυτές ενδεχόμενες απώλειες θα είχαν αποφευχθεί αν υπήρχε σύστημα προειδοποίησης ικανό να προβλέπει την αλλαγή στη συμπεριφορά του κλιματολογικού συστήματος και ενδεχόμενη προειδοποίηση σε περίπτωση που η αλλαγή αυτή ήταν ικανή - με κάποιο επίπεδο αξιοπιστίας - να προκαλέσει καταστροφή.

Η δυσκολία επομένως προβλεψιμότητας του ανέμου οφείλεται σε αυτήν ακριβώς τη χαοτική συμπεριφορά. Δεν είναι επαρκώς ολοκληρωμένοι οι μηχανισμοί γένεσης του ανέμου, ο οποίος επηρεάζεται από όλες τις υπόλοιπες κλιματολογικές μεταβλητές με έμμεσο ή άμεσο τρόπο, αλλά και εξίσου από άλλους παράγοντες, μη κλιματολογικούς. Η κίνηση του ανέμου οφείλεται στις θερμοκρασιακές μεταβολές που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα - το θερμό μέτωπο είναι ελαφρύτερο από το ψυχρό - με αποτέλεσμα να προκαλούνται κινήσεις των αέριων μαζών, με απώτερο στόχο την εξίσωση των θερμοκρασιών αυτών, αφού η φύση επιδιώκει την ισορροπία μέσω της μεγιστοποίησης της εντροπίας της. Επίσης η κίνηση αυτή του ανέμου επηρεάζεται και από την κίνηση της γης - περιστροφή γύρω από τον άξονά της - που προκαλεί αδρανειακές δυνάμεις (Coriolis Effect) και ουσιαστικά χωρίζει, θεωρητικά τη διεύθυνση του ανέμου, σε βασικές ζώνες (κύτταρα) σε παγκόσμιο επίπεδο (Κουτσογιάννης, *Σημειώσεις Υδρομετεωρολογίας*, 2013). Μια τέτοια θεώρηση είναι αρκετά ικανοποιητική και μπορεί να εξηγήσει σε τέτοιο επίπεδο, την αλλαγή στο κλιματικό καθεστώς που επικρατεί σε

κάθε μια διαφορετική κλιματική ζώνη. Όσον αφορά στο θέμα της προβλεψιμότητας όμως υπάρχουν πολύ περισσότερες δυσκολίες και παράγοντες επιρροής.

Η ταχύτητα του ανέμου μετρούμενη σε (m/s), που χρησιμοποιείται για την ποσοτικοποίηση της μεταβλητής, επηρεάζεται από όλες τις υπόλοιπες κλιματολογικές μεταβλητές, όπως έχει προαναφερθεί. Η θερμοκρασία, η κατακρήμνιση, η σχετική υγρασία της ατμόσφαιρας είναι μερικοί από τους παράγοντες που επηρεάζουν τον άνεμο (Μιμίκου, *Τεχνολογία Συστημάτων Υδατικών Πόρων* 1994, 2002), αλλά και κάποιες άλλες μεταβλητές όπως η τύρβη της ατμόσφαιρας, η εξατμοδιαπνοή που επικρατεί σε μια περιοχή, ακόμα και οι τοπολογικοί – ορειογραφικοί παράγοντες, μπορεί να είναι ικανοί για μια τελείως διαφορετική συμπεριφορά της μεταβλητής του ανέμου. Περιοχές με εντονότερο ανάγλυφο προκαλούν περισσότερη τύρβη στην κίνηση του ανέμου που τον επηρεάζουν ενεργειακά, υπάρχει πιθανότητα να επιβραδυνθεί ή να επιταχυνθεί ανάμεσα σε ψηλά ή χαμηλά βουνά, πυκνά δάση, ασκεπείς εκτάσεις και το φαινόμενο της αστικοποίησης, είναι μερικοί μόνο από τους παράγοντες που καθιστούν τον άνεμο δύσκολα προβλέψιμο. Επίσης, επιπρόσθετη δυσκολία αποτελεί το γεγονός ότι όλοι οι προαναφερθέντες κλιματολογικοί παράγοντες είναι επίσης στοχαστικής φύσεως και το γεγονός ότι αλληλοεπηρεάζονται αποτελεί επιπρόσθετα, έναν ακόμα σημαντικό παράγοντα ενδεχόμενης ματαιότητας στην προσπάθεια πρόβλεψης του (Abhishek *et al.*, 1995). Επίσης το γεγονός της έλλειψης αρκετών ενδεχομένως πρωτογενών στοιχείων, τόσο σε ποσότητα (λίγα έτη μετρήσεων, λίγοι σταθμοί μέτρησης κτλ.) όσο και σε ποιότητα (σφάλματα μετρήσεων οργάνων, σφάλματα ανθρώπινου παράγοντα κτλ), αλλά και η αδυναμία των συμβατικών μεθόδων να δώσουν απαντήσεις, τόσο για το μηχανισμό γένεσης των υδρολογικών μεταβλητών, όσο και για τη δυναμική εξέλιξης των υδρολογικών φαινομένων στο χώρο και στο χρόνο, οδήγησε την έρευνα στην τεκμηρίωση στοχαστικών μεθόδων και διαδικασιών για την υπερσκέλιση αρκετών από τα παραπάνω προαναφερθέντα προβλήματα, και έδωσε τη δυνατότητα να δοθούν απαντήσεις σε πολλά από τα διατιθέμενα προβλήματα με αρκετή σαφήνεια (επίπεδο αξιοπιστίας) και ικανοποίηση (βαθμός αξιοπιστίας). Επομένως, οι στοχαστικές διαδικασίες που αναπτύχθηκαν και που συνεχώς εξελίσσονται έχουν στόχο την προσομοίωση των υδρολογικών φαινομένων και την αντιμετώπιση συνθετότερων προβλημάτων προσομοίωσης. Όλοι οι παραπάνω παράγοντες θέτουν τον όρο της μεροληπτικής εκτίμησης στην θεωρητική έκφραση υπολογισμού της μεταβλητής της ταχύτητας του ανέμου, δηλαδή μιας εκτίμησης που η πραγματική τιμή της ταχύτητας με την υπολογισμένη θεωρητική έχουν διαφορά. Όσο μικρότερη είναι αυτή η διαφορά τόσο πιο πετυχημένη είναι η ακολουθούμενη μέθοδος και τόσο πιο αξιόπιστα είναι τα αποτελέσματα. Στην εργασία αυτή γίνεται προσπάθεια στοχαστικής επεξεργασίας της ταχύτητας του ανέμου με τέτοιο τρόπο ώστε να εξαλειφθεί η μεροληψία αυτή και τα εξαγόμενα αποτελέσματα να προσεγγίζουν με τον πληρέστερο τρόπο την πραγματικότητα. Μόνο με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατή η ορθή προσομοίωση του φαινομένου και η μετέπειτα επιτυχής προσομοίωση της συμπεριφοράς της εξεταζόμενης μεταβλητής.

## **1.2 Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας**

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται προσπάθεια στατιστικής - στοχαστής επεξεργασίας της μεταβλητής του ανέμου. Η διάρθρωση της εργασίας αυτής είναι η παρακάτω:

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή της σημασίας της μεταβλητής του ανέμου σε διάφορες εκφάνσεις της καθημερινότητας αλλά και για την ίδια την κοινωνία. Τα αποτελέσματα, από την ορθή εξέταση της μεταβλητής αυτής, μπορεί να είναι έμμεσα ή και



άμεσα. Η ταχύτητα του ανέμου αποτελεί κλιματολογική μεταβλητή με σαφέστατη επιρροή και αλληλεξάρτηση με όλες τις υπόλοιπες κλιματολογικές μεταβλητές, επομένως η σωστή γνώση και επεξεργασία της συμπεριφοράς της για μια συγκεκριμένη περιοχή, αποτελεί πολύ σημαντικό παράγοντα εισροής σε συνθετότερα συστήματα, για την επεξεργασία των συστημάτων αυτών (πχ. ταμιευτήρας, ανεμογεννήτριες), πάντα με κάποιο βαθμό αξιοπιστίας. Επίσης, μπορεί να υπολογιστεί το ενεργειακό δυναμικό μιας χώρας και η αλλαγή της ενεργειακής πολιτικής της σε Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Α.Π.Ε.), που είναι μια παραγωγή περισσότερο φιλική προς το περιβάλλον. Τέλος, η ατμοσφαιρική ρύπανση μιας περιοχής επηρεάζεται από την πνοή των ανέμων τόσο από την ταχύτητα αλλά και από την κατεύθυνση τους, που καθορίζει το χρόνο παραμονής των αέριων ρύπων πάνω από μια συγκεκριμένη περιοχή, δίνοντας και περιβαλλοντικές διαστάσεις στην εξέταση της ταχύτητας του ανέμου.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται εκτενής αναφορά σε δημοσιευμένες εργασίες που αφορούν την ταχύτητα του ανέμου τόσο στον Ελλαδικό χώρο αλλά και στην λεκάνη της Μεσογείου, που επηρεάζουν την συμπεριφορά του ανέμου σε μικρότερη χρονική διακριτότητα. Επίσης, γίνεται αναφορά στο ενεργειακό αιολικό δυναμικό συγκεκριμένων περιοχών στον Ελλαδικό χώρο και επιπρόσθετα, ποιες περιοχές μπορεί να αποτελούν υποψήφιους αποδέκτες συστημάτων ανεμογεννητριών. Επίσης, γίνεται αναφορά σε μοντέλα παραγωγής συνθετικών χρονοσειρών, καθώς επίσης και σε μοντέλα προσαρμογής κατανομών, με σκοπό την μεταξύ τους σύγκριση και την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την αξιοπιστία τού καθενός.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται εκτενής περιγραφή όσον αφορά την πηγή των δεδομένων καθώς επίσης και την περαιτέρω επεξεργασία τους, ώστε να μπορέσουν να αποτελέσουν χρονοσειρές για την στατιστική - στοχαστική επεξεργασία της μεταβλητής της ταχύτητας του ανέμου. Γίνεται αναφορά στο πλήθος των σταθμών αλλά και στο πλήθος των δεδομένων και προκύπτει η καταλληλότητα ή μη κάποιων σταθμών για ασφαλή στατιστικά συμπεράσματα μέσω της επεξεργασίας τους, όσον αφορά στο πλήθος των μετρήσεων τους, σχετικά με τις ελλειπίς. Επιπρόσθετα, γίνεται και ανάλυση των δεδομένων reanalysis και η σύγκρισή τους με το ιστορικό δείγμα για κάθε σταθμό, για την εξέταση της αξιοπιστίας των δεδομένων αυτών και την ασφαλή χρησιμοποίησή τους ως πρωτόγεννη μορφή πληροφορίας, σε περιπτώσεις ελλείψεων δεδομένων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο της εργασίας αυτής γίνεται η στατιστική - στοχαστική επεξεργασία της μεταβλητής της ταχύτητας του ανέμου. Παράγονται τα σημαντικότερα στατιστικά χαρακτηριστικά των χρονοσειρών που είναι η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση τόσο σε ημερήσια όσο και σε μηνιαία χρονική κλίμακα. Επίσης, υπολογίζονται οι αυτοσυσχετίσεις, οι αυτοσυσκεδάσεις, τα κλιμακογράμματα αλλά και τα φάσματα των χρονοσειρών για όλη την περίοδο των μετρήσεων αλλά και για όλους τους σταθμούς. Γνωρίζοντας όλες αυτές τις εκτιμήτριες της μεταβλητής, είναι γνωστή και η συμπεριφορά του ανέμου στις υπολογιζόμενες αυτές χρονικές κλίμακες. Από τον υπολογισμό των παραπάνω χαρακτηριστικών μπορούν να εξαχθούν κάποια συμπεράσματα όσον αφορά στην ύπαρξη μακροπρόθεσμης εμμονής αλλά και στην κυκλοστασιμότητα του ανέμου σε μηνιαία και ημερήσια χρονική κλίμακα. Επιπρόσθετα, πραγματοποιείται και ο υπολογισμός του θεωρητικού ενεργειακού δυναμικού συγκεκριμένων περιοχών στην Ελλάδα, που υπάρχουν μετρήσεις και γίνεται η προσαρμογή της κατάλληλης κατανομής στα δεδομένα, στην αντίστοιχη χρονική κλίμακα. Παρατίθενται χάρτες με τον υπολογισμό των παραμέτρων σχήματος (k) και κλίμακας (c(m/s)) της κατανομής Weibull, που προσαρμόζεται καλύτερα σε ημερήσια και μηνιαία χρονική κλίμακα και εξετάζεται η χωρική και χρονική μεταβολή των παραμέτρων αυτών, με σκοπό να εξεταστεί κάποια, ενδεχόμενη, συγκεκριμένη συμπεριφορά

που έχουν οι παράμετροι αυτοί όσον αφορά το χρόνο (μήνα - έτος - εποχή) αλλά και το χώρο (ηπειρωτικές - παραθαλάσσιες - νησιωτικές) περιοχές. Επιπλέον, υπολογίζεται και ο λόγος της θεωρητικής ενέργειας που προκύπτει από το ημερήσιο και το μηνιαίο χρονικό βήμα και εμφανίζονται χάρτες που εκφράζουν το ποσοστό αυτό, στους οποίους εμφανίζονται περιοχές με μεγαλύτερο ή αντίστοιχα με μικρότερο θεωρητικό ενεργειακό δυναμικό, όσον αφορά στον ανωτέρω αναφερόμενο υπολογισμένο λόγο. Επίσης, το δείγμα των δεδομένων από κάθε σταθμό, ταξινομείται σε φθίνουσα σειρά ώστε να προκύψουν οι μέγιστες παρατηρημένες τιμές για κάθε περιοχή εξέτασης. Από το ταξινομημένο δείγμα επίσης, υπολογίζονται και τα διαστήματα ποσοστών του 1-5-10-20-30 % των μετρήσεων και τις ταχύτητες που προκύπτουν από αυτά, ώστε να επιβεβαιωθεί αν οι περιοχές με υψηλό ενεργειακό δυναμικό ταυτίζονται με τον ανωτέρω υπολογισμό και επίσης να διαπιστωθεί ποιές περιοχές εμφανίζουν τις υψηλότερες ταχύτητες, με τη μεγαλύτερη συχνότητα μετρήσεων. Ο ανωτέρω υπολογισμός, πραγματοποιήθηκε και για την αντίστροφη διαδικασία, με συγκεκριμένο εύρος ταχυτήτων (5-10-15-20-25 m/s), ποιά είναι η συχνότητα εμφάνισης των τιμών των ποσοστών αυτών, για κάθε σταθμό. Πραγματοποιείται, επίσης και η επεξεργασία της ριπής του ανέμου και η σύγκρισή της με τις ημερήσιες παρατηρημένες τιμές του δείγματος, για κάθε σταθμό που υπάρχουν μετρήσεις ριπής και για κοινή περίοδο μέτρησης, με σκοπό την εξέταση κάποιας σχετικής τάσης ανάμεσα στις δυο μεταβλητές. Υπολογίζονται επίσης και οι τάσεις του ανέμου, για κοινή περίοδο μέτρησης 1970-2013, με γραμμική παρεμβολή των τιμών των μετρήσεων του κάθε σταθμού σε μηνιαίο χρονικό βήμα. Επίσης, η προαναφερόμενη περίοδος χωρίζεται σε δυο επιμέρους μικρότερες υποπεριόδους διαστήματος εικοσαετίας, 1970-1990 και 1991-2013, με σκοπό να βρεθεί αν υπάρχουν διαφορές στην τάση του ανέμου στα διαστήματα αυτά σχετικά με την αρχική εξεταζόμενη περίοδο και αν προκύψουν αλλαγές που μπορεί να οφείλονται.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται προσπάθεια εξαγωγής ενιαίου μοντέλου του ανέμου, μέσα από τον υπολογισμό της παραμέτρου μακροπρόθεσμης εμμονής, που αποτελεί η εύρεση του συντελεστή Hurst. Η διαδικασία, εύρεσης του συντελεστή πραγματοποιείται με την εξαγωγή των κλιμακογραμμάτων, που είναι διαγράμματα σε λογαριθμικούς άξονες, με μεταβλητές τη διασπορά (τυπικής απόκλισης) της μεταβλητής του ανέμου και το λογάριθμο της κλίμακας μέτρησης. Από την κλίση του διαγράμματος αυτού προκύπτει ο υπολογισμός του συντελεστή Hurst. Τα κλιμακογράμματα που υπολογίστηκαν για όλους τους σταθμούς, στο τυποποιημένο δείγμα, εμφάνισαν σχετικά κοινή κλίση με μικρό εύρος για τις πρώτες κλίμακες, με αποτέλεσμα να επιλεγούν 10 συνολικά σταθμοί για την εξαγωγή του μοντέλου, με επαρκή περίοδο μέτρησης και με διασπορά σε ολόκληρη την περιοχή εξέτασης, για περισσότερο αξιόπιστα συμπεράσματα. Επομένως, υπολογίστηκε ενιαίος συντελεστής Hurst, για ολόκληρο τον Ελλαδικό χώρο με την ενιαία διασπορά των σταθμών του τυποποιημένου δείγματος. Η εύρεση του συντελεστή Hurst, προέκυψε από προσαρμογή των τιμών της διασποράς  $\gamma(\Delta)$  για κάθε σταθμό, της αμερόληπτης εκτιμήτριας της διασποράς  $E[\hat{\gamma}(\Delta)]$  και προέκυψε μια συγκριμένη τιμή για κάθε σταθμό. Το εύρος των τιμών που προέκυψαν από την ανωτέρω επεξεργασία στους 10 εξεταζόμενους σταθμούς, επέτρεψε την εκτίμηση μιας ενιαίας τιμής για το συντελεστή Hurst, για όλο τον Ελλαδικό χώρο.

Στο έκτο κεφάλαιο γίνεται προσπάθεια παραγωγής συνθετικών χρονοσειρών με μοντέλα απλής ομοιοθεσίας και συγκεκριμένα με τη μέθοδο των τυχαίων διακυμάνσεων πολλαπλής κλίμακας. Σχετικά με τη μέθοδο αυτή, παράγονται τρεις ανεξίτητες με ενιαίο συντελεστή Hurst και στατιστικά χαρακτηριστικά από τον κάθε σταθμό εξέτασης, εξάγοντας τρία AR(1) μοντέλα, που προστίθενται παράγοντας την συνθετική χρονοσειρά, με τα επιθυμητά κάθε φορά στατιστικά χαρακτηριστικά που απαιτούνται. Όμως, επειδή για την παραγωγή της

συνθετικής χρονοσειράς, προσαρμόζονται τα μοντέλα αυτά στον θεωρητικό κλασματικό γκαουσιανό (FGN) για τη διατήρηση του συντελεστή Hurst, αυτό σημαίνει ότι τα δεδομένα της σειράς που παράγονται θα ακολουθούν κανονική κατανομή. Όμως, από προηγούμενο κεφάλαιο, προέκυψε ότι τα δεδομένα του ανέμου σε ημερήσια και μηνιαία χρονική κλίμακα, ακολουθούν κατανομή Weibull. Αυτό σημαίνει ότι τα δεδομένα του δείγματος (εμπειρικά) θα πρέπει να κανονικοποιηθούν, να προσαρμοστούν στην κανονική κατανομή, μέσω συγκεκριμένου τύπου μετασχηματισμού κανονικοποίησης, διαδικασία κατά την οποία υπολογίζονται οι παράμετροι του μετασχηματισμού. Στο επόμενο βήμα υπολογισμού της ανέλιξης, με δεδομένα την παραγόμενη συνθετική (κανονικοποιημένη) χρονοσειρά, πραγματοποιείται αποκανονικοποίηση της, με τον αντίστροφο μετασχηματισμό που προηγουμένως χρησιμοποιήθηκε. Η ανέλιξη αυτή, πραγματοποιείται για πέντε συγκεκριμένους μετασχηματισμούς και τα στατιστικά χαρακτηριστικά της συνθετικής χρονοσειράς που παράγονται από κάθε έναν συγκεντρώνονται σε κατάλληλο διάγραμμα, με σκοπό να πραγματοποιηθεί η σύγκριση μεταξύ τους και να βρεθεί ποιος από αυτούς τους μετασχηματισμούς είναι πλέον κατάλληλος για τη συγκεκριμένη εφαρμογή.

Στο έβδομο κεφάλαιο εξάγονται συμπεράσματα από όλη την στατιστική - στοχαστική επεξεργασία, και προκύπτουν χρήσιμες παρατηρήσεις όσον αφορά στην μελέτη της συμπεριφοράς του ανέμου, στην αντίστοιχη κάθε φορά, εξεταζόμενη, χρονική κλίμακα.



## 2 Βιβλιογραφική επισκόπηση

---

### 2.1 Γενικά

Στο εν λόγω κεφάλαιο πραγματοποιείται βιβλιογραφική αναφορά των σημαντικότερων επιστημονικών συγγραμμάτων σχετικά με την ταχύτητα του ανέμου, τόσο στον Ελλαδικό χώρο (Voivontas *et al.*, 1998 · Bagioras *et al.* 2008 · Fyrippis *et al.*, 2008, 2010 · Philipopoulos *et al.* 2009 · Chronopoulou *et al.*, 2010 · Karamanis, 2013) όσο και σε διάφορες άλλες χώρες (Archer *et al.*, 2003, 2004 · Alaydi *et al.*, 2010 · Islam *et al.*, 2010) και μέσα από τα συγγράμματα αυτά γίνεται αισθητή η μεταβλητή της ταχύτητας και της κατεύθυνσης του ανέμου, τόσο σε τοπικό επίπεδο όσο και σε επίπεδο χώρας (Schicker, *et al.*, 2010). Η επισκόπηση της μεταβλητής αυτής έγινε με διαφορετική διαδικασία προσέγγισης και μεθοδολογίας και η προσαρμογή των μοντέλων που δοκιμάστηκαν άλλοτε ήταν επιτυχής και άλλοτε τα αποτελέσματα δεν ήταν τα αναμενόμενα, καταλήγοντας πάντα σε πολύ χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με το ανεμολογικό καθεστώς της υπό εξέταση περιοχής - τοποθεσίας. Μερικές χρήσιμες παρατηρήσεις από τα επιστημονικά αυτά συγγράμματα αναφέρονται παρακάτω τονίζοντας τα σημαντικότερα σημεία αλλά και τα χρήσιμα εξαγόμενα αποτελέσματα.

### 2.2 Υπολογισμός του αιολικού ενεργειακού δυναμικού στην Ελλάδα

Στη επιστημονική εργασία (Chronopoulou *et al.*, 2010), μελετάται η συμπεριφορά του ανέμου στον Ελλαδικό χώρο, λαμβάνοντας υπόψη την επιτακτική ανάγκη για εύρεση νέων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, φιλικές προς το περιβάλλον, όπως είναι η αιολική ενέργεια, δεδομένου της έλλειψης των αποθεμάτων ορυκτών καυσίμων όπως είναι και το πετρέλαιο, στις επόμενες δεκαετίες. Τονίζεται η σπουδαιότητα της επιστημονικής έρευνας σε θέματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, αφού ο ορυκτός ενεργειακός πλούτος δεν είναι ούτε ανεξάντλητος αλλά και η καύση των ορυκτών αυτών με σκοπό την παραγωγή ενέργειας είναι σε πολλές περιπτώσεις επιζήμια για το περιβάλλον.

Τα δεδομένα της εργασίας αυτής εξήχθησαν από 59 σημεία στον ηπειρωτικό και νησιωτικό χώρο των ετών 1999-2000, με 48 μετεωρολογικούς σταθμούς του Ελληνικού κέντρου ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και 11 σταθμούς από την ελληνική μετεωρολογική υπηρεσία. Το δείγμα των δεδομένων για τη σωστή εξαγωγή συμπερασμάτων έπρεπε να είναι ομαλά κατανομημένο στο χώρο για την κατανομή της πληροφορίας με τρόπο που να μπορεί να δίνει ασφαλή συμπεράσματα για την πληρέστερη εικόνα της μεταβλητής του ανέμου στον Ελλαδικό χώρο. Από την επεξεργασία των δεδομένων, σε ετήσια κλίμακα, παρήχθησαν χάρτες ανεμολογικού δυναμικού (ταχύτητας και κατεύθυνσης), με τη βοήθεια του συστήματος ArcGis 9.3, πολύ χρήσιμοι για τη μελέτη και τοποθέτηση ανεμογεννητριών.

Από τον ετήσιο ανεμολογικό χάρτη προέκυψε το συμπέρασμα ότι εντονότεροι άνεμοι πνέουν στη νησιωτική Ελλάδα από ότι στην ηπειρωτική, με μέση ετήσια ταχύτητα (1-5.5 m/s) και μέγιστο που παρατηρείται στο κεντρικό Αιγαίο. Στην περιοχή του Ιονίου, η μέση ετήσια ταχύτητα κυμαίνεται στα (1-2 m/s) που στην περιοχή των ακτών της νότιας Πελοποννήσου φτάνει τα (3-4 m/s). Στην βόρεια και κεντρική ηπειρωτική Ελλάδα η μέση ετήσια ταχύτητα έχει εύρος (1.5-2.5 m/s) και στο βόρειο τμήμα του Ελλαδικού ηπειρωτικού χώρου έχει εύρος

(3.4-4 m/s). Όσον αφορά στην κατεύθυνση του ανέμου σε ετήσια χρονική κλίμακα το μεγαλύτερο ποσοστό των ανέμων (78%) έχει κατεύθυνση από το βορρά - βορειοανατολικά αλλά και βορειοδυτικά.

Επίσης, στην εργασία αυτή γίνεται αναφορά και στην εποχικότητα του ανέμου εξετάζοντας τη συμπεριφορά του ανέμου ανά εποχή του έτους. Οι μεγαλύτερες ταχύτητες του ανέμου εμφανίζονται το χειμώνα με εύρος τιμών (1-6 m/s) και ετήσια μέγιστα (5.5-6 m/s) στην περιοχή του βόρειου Αιγαίου, ανάμεσα στις ανατολικές Κυκλάδες, την Ικαρία και τα νησιά των βόρειων Δωδεκανήσων. Η πιο ήπια εποχή του έτους είναι η Άνοιξη, με εύρος ταχυτήτων (1-5.5 m/s) και μέγιστα (5-5.5 m/s) για το κεντρικό Αιγαίο, (2.5-3.5 m/s) και την Κρήτη, ενώ για τις ανατολικές Σποράδες, τη βόρεια Εύβοια, τα Κύθηρα, τη Μεθώνη και τα Δωδεκάνησα το εύρος είναι (3.5-4.0 m/s). Οι κατευθύνσεις του ανέμου την εποχή αυτή είναι βόρειες – βορειοανατολικές - βορειοδυτικές κατά χαμηλότερο ποσοστό 68%. Το καλοκαίρι εμφανίζεται τελείως διαφορετική συμπεριφορά με εύρος ταχυτήτων (0.5-6.0 m/s) και μέγιστο τα (5.5-6.0 m/s) στο νότιο και νοτιοανατολικό Αιγαίο, ειδικά στα Δωδεκάνησα, οι άνεμοι επηρεάζονται από το ανεμολογικό ρεύμα που έρχεται από την Ινδία και εμπλουτίζει τα παράλια της Μικράς Ασίας, αλλά και την περιοχή των Δωδεκανήσων. Επιπρόσθετα, η έντονη παρουσία μετεμίων στην περιοχή του Αιγαίου καθιστά την εποχή του καλοκαιριού αρκετά ανεμώδη. Το πλήθος των κατευθύνσεων των ανέμων είναι βόρειοι – βορειοανατολικοί – βορειοδυτικοί με ποσοστό 76%. Τέλος, το φθινόπωρο, το εύρος των τιμών είναι (1-5 m/s) με τις μέγιστες τιμές να είναι στο (4.5-5.0 m/s) που και πάλι εμφανίζονται στο κεντρικό Αιγαίο. Οι ταχύτητες μειώνονται στα (2-3 m/s) στις ανατολικές ακτές της ηπειρωτικής χώρας και αυξάνονται στα (3.5-4.0 m/s) στις ακτές της Μικράς Ασίας. Στο βόρειο Ιόνιο το εύρος των ταχυτήτων είναι (1-2 m/s) που αυξάνεται στις βόρειες ακτές της Πελοποννήσου στα (3.5-4.0 m/s) στη Μεθώνη και στα Κύθηρα. Η αύξηση των ανέμων οφείλεται στην κυκλωνική και αντικυκλωνική διαδικασία. Η διεύθυνση του ανέμου είναι από βόρεια - βορειοανατολικά - βορειοδυτικά με ποσοστό 78%.

Από τη παραπάνω ανάλυση, προέκυψε το συμπέρασμα ότι η Ελλάδα είναι μια από τις περισσότερο ανεμώδης περιοχές της Ευρώπης. Επίσης, οι ταχύτητες του ανέμου στην περιοχή του Αιγαίου είναι μεγαλύτερες από ότι στην ηπειρωτική χώρα, με μέγιστο την περιοχή του κεντρικού Αιγαίου. Επομένως, με σωστή υποδομή μπορεί να αξιοποιηθεί το αιολικό δυναμικό της περιοχής αυτής, εξασφαλίζοντας έτσι την ενεργειακή αυτονομία όλων των νησιών αυτών.

### **2.3 Προέλευση και μεταφορά της ατμοσφαιρικής υγρασίας και του αέρα στην λεκάνη της Μεσογείου**

Στην εργασία των (Schicker *et al.*, 2010), πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός, από δεδομένα της μεταβλητής της ταχύτητας του ανέμου αλλά και σε συνδυασμό με δεδομένα ατμοσφαιρικής υγρασίας, της κίνησης των αέριων μαζών στην ευρύτερη λεκάνη της Μεσογείου, αφού προηγήθηκε η διαμερισματοποίηση της ευρύτερης περιοχής μελέτης σε ζώνες ενδιαφέροντος. Το γεγονός ότι είναι μια περιοχή με χαμηλή βροχόπτωση αλλά υψηλή εξάτμιση, ευνοεί το φαινόμενο της κίνησης και το αποτέλεσμα που προέκυψε ήταν ότι η περιοχή της Μεσογείου αποτελεί σταυροδρόμι ανέμων, με τον άνεμο να εισχωρεί βορειοδυτικά και να συνεχίζει σε δυο διαφορετικά μέτωπα, με το πρώτο να κατευθύνεται νοτιοδυτικά πάνω από τη βόρεια Αφρική και το δεύτερο βορειοανατολικά προς την κεντρική Ασία. Η εξέταση της περιοχής της Μεσογείου, που έχει γίνει και από άλλες μελέτες στο παρελθόν είναι σημαντική, επειδή επηρεάζεται από την αυξημένη υγρασία το χειμώνα, τους υποτροπικούς που δημιουργούν ζεστά και ξηρά καλοκαίρια και από τους Αφρικανικούς και

Ασιατικούς μουσώνες. Επίσης, η ορειογραφία της περιοχής είναι σημαντική, αφού περιστοιχίζεται από μεγάλα και ψηλά όρη, τα οποία δημιουργούν συγκεκριμένες τάσεις πνοής του ανέμου σε συγκεκριμένες περιόδους δημιουργώντας έτσι διάφορα είδη ανέμων.

Τα δεδομένα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν ήταν για 5.5 χρόνια της περιόδου 27 Οκτωβρίου 1999 - 1 Μαΐου 2005, και η ευρύτερη περιοχή διαμερισματοποιήθηκε σε φατνία για περαιτέρω ανάλυση, τόσο σε οριζόντια κλίμακα όσο και καθ' ύψος για την τρισδιάστατη απεικόνιση του φαινομένου. Η χρονική κλίμακα που χρησιμοποιήθηκε για την εξέταση του φαινομένου ήταν: 0-1, 0-5, 0-30 και 0-90 μέρες στις οποίες μπορούσε να γίνει ευδιάκριτη η εξέλιξη του φαινομένου. Επομένως, ο υπολογισμός της υγρασίας προέκυψε από τη διαφορά της εξάτμισης με τη βροχόπτωση συναρτήσει του χρονικού παραθύρου, εξετάζοντας κάθε φορά σε σχέση με το προηγούμενο χρονικό βήμα για να βρεθεί η αύξηση ή μείωση της μεταβλητής και να προκύψει η κίνηση - κατεύθυνση της υγρασίας. Για τον υπολογισμό της βροχόπτωσης, η μείωση της υγρασίας δυο συνεχόμενων χρονικών βημάτων μεταφράστηκε ως βροχόπτωση.

Τα αποτελέσματα που εξήχθησαν ήταν, ότι το κεντρικό μέρος της περιοχής ενδιαφέροντος το οποίο χαρακτηριζόταν από στασιμότητα της συμπεριφοράς του ανέμου, παρουσίαζε και τα μέγιστα στις εξεταζόμενες μεταβλητές (βροχόπτωση - υγρασία). Σημαντικό παράγοντα επίσης αποτέλεσε και η ορειογραφία κατά την οποία μεταβάλλονταν η ταχύτητα του ανέμου και επηρέαζε την ποσότητα υγρασίας της ατμόσφαιρας. Η συμπεριφορά του φαινομένου ήταν παρόμοια στις χρονικές κλίμακες των 0-1 και 0-5 ημερών, με τη δεύτερη να εμφανίζει μεγαλύτερη επιρροή στην βορειοανατολική Ευρώπη από ότι στη βορειοδυτική. Η κλίμακα των 0-30 ημερών έδειξε 2 κύρια ρεύματα, ένα με κατεύθυνση από το Γιβραλτάρ και την Ερυθρά θάλασσα προς την περιοχή της Μεσοποταμίας και το δεύτερο να περνάει πάνω από τα Δαρδανέλια. Στην κλίμακα των 0-90 ημερών προέκυψε η αιτιολόγηση του χαρακτηρισμού της Μεσογείου ως σταυροδρόμι των ανέμων και επίσης, η σημαντική συνεισφορά της στο παγκόσμιο κλιματολογικό καθεστώς. Η είσοδος του ανέμου γίνεται από βορειοδυτικά με τα ρεύματα του Αρκτικού κύκλου να επηρεάζουν τον άνεμο. Η κατεύθυνση του ανέμου συνεχίζει με δυο ρεύματα αντίθετων κατευθύνσεων, ένα ακολουθώντας το 'δρόμο του μεταξίου' στην κεντρική Ασία, βόρεια του οροπεδίου του Θιβέτ και το άλλο με κατεύθυνση από τη βόρεια Αφρική, στον τροπικό του Ατλαντικού, κατά μήκος της βορείου Αμερικής και της Καραϊβικής. Επίσης εξετάζοντας την εποχικότητα του ανέμου προέκυψαν αντίστοιχα συμπεράσματα. Το χειμώνα ο άνεμος πνέει από τον Κόλπο της Λυών, συνεχίζει ανάμεσα στην Τυνησία και τη Σικελία, περνάει από τη βόρεια Κρήτη και φτάνει στην ανατολική Μεσόγειο. Το καλοκαίρι, το κέντρο των μέγιστων ανέμων είναι το Αιγαίο, με την αέρια μάζα να κατευθύνεται προς τη βόρεια Αφρική. Το φθινόπωρο και την άνοιξη παρουσιάζεται παρόμοια συμπεριφορά, με μικρή ταχύτητα του ανέμου στη περιοχή της Αδριατικής.

Επίσης, παρουσιάζεται η εξέλιξη της υγρασίας της ατμόσφαιρας, σχετικά με μηνιαίο χρονικό βήμα και από τη διαδικασία αυτή είναι εμφανής, η εποχικότητα της υγρασίας στη λεκάνη της Μεσογείου, με τις τιμές να ομαδοποιούνται ανά εποχή του έτους. Από τις τιμές αυτές είναι ευδιάκριτος ο εμπλουτισμός της ατμόσφαιρας με υγρασία τους καλοκαιρινούς μήνες, που είναι μειωμένη η βροχόπτωση και οι υδρατμοί αυξάνονται και δημιουργούνται συγκεκριμένες περιοχές, ανάλογα με την τιμή της υγρασίας, οι οποίες εμφανίζουν στασιμότητα σε επίπεδο εποχής. Επομένως, οι μεγαλύτερες τιμές της υγρασίας εμφανίζονται στην κεντρική Μεσόγειο και ιδιαίτερα ανάμεσα στην περιοχή της Ιταλίας και του Αιγαίου, με το μέτωπο να απομειώνεται καθώς κατευθύνεται προς τα ηπειρωτικά τμήματα της περιοχής, που για μια ακόμα φορά επηρεάζονται από την ορειογραφία. Η κύρια κατεύθυνση του μετώπου είναι από τα δυτικά προς τα ανατολικά τους χειμερινούς μήνες, την άνοιξη το μέτωπο παρουσιάζει την

ίδια συμπεριφορά με μεγαλύτερες τιμές στην περιοχή της βόρειας Αφρικής, ενώ το φθινόπωρο και το καλοκαίρι το κύριο μέτωπο χωρίζεται σε δυο ρεύματα, ένα με κατεύθυνση στην βορειοανατολική Ευρώπη και το άλλο με κατεύθυνση τη νοτιοανατολική.

Ο υπολογισμός της κατακρήμνισης γίνεται με τον ίδιο τρόπο με την υγρασία, με τη διαφορά ότι στην περίπτωση αυτή εμφανίζεται μεγαλύτερο εύρος στις τιμές, δηλαδή μεγαλύτερες τιμές στις ακραίες εμφανίσεις της μεταβλητής. Για μια ακόμα φορά είναι εμφανής η εποχικότητα, με τα μέγιστα να εμφανίζονται τη περίοδο του χειμώνα στην κεντρική Μεσόγειο πάνω από το επίπεδο της θάλασσας, με το μέτωπο να ανοίγει προς τα παράλια και την ηπειρωτική περιοχή τις υπόλοιπες εποχές, γεγονός που επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό και από την ορογραφία - τοπογραφία. Επίσης, οι κυκλώνες της δυτικής Μεσογείου βρέθηκε ότι προκαλούν έντονες βροχοπτώσεις και ένα σημαντικό μέρος από την υδάτινη αυτή ποσότητα προέρχεται από την υπολεκάνη των Βαλεαρίδων.

Από την παραπάνω μελέτη, είναι εμφανής η εποχικότητα των εξεταζόμενων μεταβλητών, που για να γίνει αντιληπτή το διάστημα των μετρήσεων περιλαμβάνει 5.5 έτη μετρήσεων, εξεταζόμενα σε διαφορετική χρονική κλίμακα. Επίσης, φαίνεται και η επιρροή της τοπογραφίας στα δημιουργούμενα ρεύματα της υγρασίας και κατακρήμνισης, τα οποία εμφανίζουν την ίδια ροή - κατεύθυνση. Η συνεισφορά της Μεσογείου στις εξεταζόμενες μεταβλητές, στην επιρροή του νοτίου ημισφαιρίου, είναι πολύ σημαντική. Τέλος, μεγαλύτερη αναλυτική αποτύπωση της περιοχής και μεγαλύτερο διάστημα μετρήσεων, θα μπορούσε να δώσει πιο αναλυτικά αποτελέσματα και ενδεχομένως να αποκαλύψει και άλλες συσχετίσεις που στην ανάλυση αυτή δεν είναι εμφανείς.

## **2.4 Στοχαστική προσομοίωση του ατμοσφαιρικού ανέμου χρησιμοποιώντας μοντέλο συνεχούς χρόνου**

Στο επιστημονικό σύγγραμμα του (Calif, 2011) γίνεται προσπάθεια για την κατανόηση της ενέργειας που προκύπτει από τον άνεμο και την επιρροή του από την τύρβη αλλά και την εξάρτηση της μεταβλητής αυτής από τη χρονική κλίμακα. Για αυτό το λόγο γίνεται χρήση στοχαστικών μοντέλων για την αναπαραγωγή και προσομοίωση της συμπεριφοράς αυτής και εξάγονται τα φάσματα της ταχύτητας του ανέμου, εξεταζόμενα σε διάφορες χρονικές κλίμακες. Τέλος, γίνεται σύγκριση των αναπαραγόμενων αποτελεσμάτων με τα εμπειρικά δείγματα και εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα. Η προσομοίωση γίνεται για αριθμό Reynolds =  $10^8$  ο οποίος εκφράζει έντονα τη διαλείπουσα συμπεριφορά για την ταχύτητα του ανέμου και γίνεται μετάβαση από τις υψηλές χρονικές κλίμακες (έτη) σε μικρότερες (λεπτά, δευτερόλεπτα) που η επιρροή της τύρβης είναι πολύ σημαντική. Εξετάζονται δεδομένα από ηλεκτρονικό ανεμόμετρο με μετρήσεις συχνότητας 20 Hz και ύψος 40 m από την επιφάνεια του εδάφους. Διακρίνονται 412 προφίλ του ανέμου χρονικής διακριτότητας 512 sec. Για την φασματική ανάλυση εξετάζεται η παράμετρος  $\beta$  που ανάλογα με τις τιμές που παίρνει εκφράζει στασιμότητα, μη στασιμότητα και ανάμικτη συμπεριφορά. Αν  $1 < \beta < 3$  η συμπεριφορά είναι μη στάσιμη και εξαρτάται μόνο από την χρονική υστέρηση. Επίσης, η συνάρτηση  $\zeta(q)$  αποτελεί τη συνάρτηση σχήματος και η έκφραση  $\zeta(1) = H$  αποτελεί το συντελεστή Hurst. Οι τιμές για τη συνάρτηση  $\zeta(q)$  προκύπτουν από την κλίση του διαγράμματος του φάσματος του ανέμου σε σχέση με τη συχνότητα, για κάθε  $q$ , σε διάγραμμα λογαριθμικών αξόνων. Οι μικρές διαφορές που υπάρχουν σχετικά με τη σταθερά του Kolmogorov (-5/3), οφείλονται στη διαλείπουσα συμπεριφορά του ανέμου. Ακολουθεί η προσαρμογή της εμπειρικής κατανομής της συνάρτησης  $\zeta(q)$  με τη μεταβλητή  $q$ , και τα



αποτέλεσμα έχουν πολύ καλή προσαρμοστικότητα σχετικά με το γραμμικό μοντέλο του Kolmogorov  $\zeta(q) = q/3$ , και το λογαριθμοκανονικό μοντέλο  $\zeta(q) = q/3 + \mu/18(3q-q^2)$ .

Έγινε εισαγωγή ενός πολλαπλασιαστικού στοχαστικού μοντέλου το οποίο μπορούσε να προσομοιώσει και συντελεστές βάρους. Με τον τρόπο αυτό αναπαράγονται μεγάλες διακυμάνσεις και η ενσωμάτωση αυτή δημιουργεί συσχετίσεις μεγάλης κλίμακας που δίνουν στις διακυμάνσεις αυτές τη διαλείπουσα συμπεριφορά. Τα μοντέλα αυτά είναι μη στάσιμα και η κλιμάκωσή τους γίνεται μόνο σε διακριτές μονάδες, επομένως δεν επαρκούν για την αναπαραγωγή στάσιμων διαδικασιών, για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται συνεχή μοντέλα, που ολοκληρώνονται στη μονάδα του χρόνου. Χρησιμοποιείται η προσομοίωση με τη μέθοδο της κίνησης Brown αλλά και με τη διαδικασία του τυχαίου περιπάτου (random walk), και τα αποτελέσματα των μεθόδων αυτών συγκρίνονται με τα εμπειρικά δείγματα. Τα αποτελέσματα έδειξαν προσαρμογή με τα εμπειρικά δεδομένα, με την αναπαράσταση να είναι μη γραμμική και κοίλη, γεγονός που παραπέμπει σε πολυκλιμακωτή συμπεριφορά (multiscaling behavior). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η προσομοίωση με λογαριθμοκανονική πολυκλιμακωτή στοχαστική διαδικασία έχουν τα ίδια στατιστικά χαρακτηριστικά και το ίδιο φάσμα με τα εμπειρικά δεδομένα, σε αντίθεση με τη διαδικασία της κίνησης Brown.

## 2.5 Στατιστική προσομοίωση της ταχύτητας του ανέμου στην Αθήνα, Ελλάδα βασισμένη πάνω σε μοντέλα Weibull και ARMA.

Στην επιστημονική εργασία των (Philipopoulos *et al.*, 2009), δίνεται μεγάλη σημασία στην σωστή παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών, για την εκτίμηση της πρόγνωσης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Τα μοντέλα που δοκιμάστηκαν ήταν η Weibull για την αναπαραγωγή της θεωρητικής κατανομής και το ARMA (Autoregressive moving average) μοντέλο αυτοπαλινδρόμησης κινούμενων μέσων όρων, για τη δημιουργία συνθετικών χρονοσειρών, που διατηρούν την μέση τιμή και την τυπική απόκλιση της μεταβλητής της ταχύτητας του ανέμου. Χρησιμοποιήθηκαν ωριαία δεδομένα από έναν σταθμό και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ARMA έδειξαν πολύ καλή προσαρμογή στην κατανομή συχνοτήτων. Κατά την παραγωγή των χρονοσειρών με το μοντέλο αυτό έγινε και σύγκρισή του με τη διαδικασία των νευρωνικών δικτύων για την παραγωγή δεδομένων, βασισμένο στην αυτοσυσχέτιση των χρονοσειρών.

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν από το σταθμό Μετροπόλιταν στην Αθήνα, για διάστημα δέκα ετών από τον Ιανουάριο του 1993 μέχρι το Δεκέμβριο του 2002, ωριαίας χρονικής κλίμακας, σε ύψος 10 m από την επιφάνεια του εδάφους. Οι υπολογισμοί έγιναν για τις 4 πρώτες στατιστικές ροπές, την μέση τιμή, τη διάμεσο, την τυπική απόκλιση, την κύρτωση και την ασυμμετρία και βρέθηκε ότι εμφανίζονται 2 μέγιστα για τη μεταβλητή της μέσης τιμής του ανέμου, τον Ιανουάριο και τον Ιούλιο και ότι η κατανομή των δεδομένων είναι δεξιά τοποθετημένη που σημαίνει ότι υπάρχει αρνητική ασυμμετρία.

Για την προσαρμογή της θεωρητικής κατανομής Weibull υπολογίστηκαν οι παράμετροί της, όπως είναι η παράμετρος σχήματος ( $k$ ) αλλά και η παράμετρος κλίμακας ( $c$  m/s) και με τη βοήθεια της συνάρτησης γάμμα πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός της μεταβλητής, συναρτήσεως των παραπάνω παραγόντων. Τα αποτελέσματα έδειξαν μεγάλη μεταβλητότητα στο ανεμολογικό πεδίο (ο παράγοντας σχήματος  $1.2380 < k < 1.4238$ ) και πολύ καλή προσαρμογή της κατανομής με υπολογισμό του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE) των θεωρητικών και πραγματικών τιμών της μέσης τιμής και τυπικής απόκλισης σε μηνιαία χρονική κλίμακα ( $0.866 < R^2 < 0.922$ ). Αντίστοιχα έγινε χρήση και των μοντέλων ARMA( $p,q$ ) που είναι συνδυασμός των μοντέλων AR( $p$ ) και MA( $q$ ). Τα μοντέλα αυτά

απαιτούν στάσιμες και κανονικοποιημένες χρονοσειρές. Από την εξέταση των αυτοσυσχετίσεων της χρονοσειράς (ACF - Auto Correlation Factor) προκύπτει το συμπέρασμα ότι μετά από  $p$  υστερήσεις το μοντέλο μειώνεται εκθετικά, ενώ μετά από μετά από  $q$  υστερήσεις το μοντέλο τείνει στο μηδέν. Μετά από την δεύτερη ή τρίτη υστέρηση το μοντέλο τείνει στο μηδέν, για αυτό επιλέγεται μοντέλο χαμηλότερης τάξης σύμφωνα με το Μπείσιανό κριτήριο (Bayesian Information Criterion (BIC)). Επομένως οι τάξεις του μοντέλου που επελέγησαν ικανοποιώντας το παραπάνω κριτήριο ήταν ARMA(2,1) για όλους του μήνες εκτός από τον Απρίλιο, τον Οκτώβριο και το Νοέμβριο που χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο ARMA(2,2). Τα μοντέλα αυτά προέκυψαν στάσιμα και αντιστρέψιμα. Για τον έλεγχο της καταλληλότητας των επιλεγμένων μοντέλων έγινε ο έλεγχος Portmanteau Lack - of - fit, που εξετάζει πότε οι αυτοσυσχετίσεις είναι τυχαίες, παίρνοντας τις 15 πρώτες αυτοσυσχετίσεις των υπολοίπων, με διάστημα εμπιστοσύνης 5%. Μια άλλη μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε ήταν οι αυτοσυσχετίσεις για τις 15 πρώτες υστερήσεις και για διάστημα εμπιστοσύνης 15% να είναι εντός των ορίων του τυπικού σφάλματος  $(-2/N^{0.5}, 2/N^{0.5})$ . Για περαιτέρω έλεγχο της προσαρμογής, τοποθετήθηκαν σε διάγραμμα διασποράς οι παρατηρημένες και οι προσομοιωμένες τιμές και βρέθηκε θετική συσχέτιση ( $R = 0.91$ ) που σημαίνει πολύ καλή προσαρμογή του μοντέλου. Επίσης, πολύ καλά αποτελέσματα έδειξαν και οι συγκρίσεις των αυτοσυσχετίσεων για τις παρατηρημένες και για τις προσομοιωμένες τιμές για τις πρώτες 8 υστερήσεις. Όλα τα παραπάνω αποτελέσματα έδειξαν τη σημασία προσομοίωσης του μοντέλου ARMA και τη σημασία του επίσης για τον υπολογισμό της μεταβλητής της ταχύτητας του ανέμου, ακόμα και για μικρές συχνότητες που η κατανομή Weibull δεν δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Επομένως, μπορεί ένα τέτοιο μοντέλο να χρησιμοποιηθεί για την συμπλήρωση των δειγμάτων των δεδομένων.

## **2.6 Μακροπρόθεσμη μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου σε τρεις πόλεις των κέντρο-δυτικών Η.Π.Α.**

Στην επιστημονική εργασία των (Abhishek *et al.*, 2010), πραγματοποιήθηκε μελέτη σε τρεις πολιτείες της κεντροδυτικής Αμερικής, Indianapolis IN, Little Rock (AR), και Cincinnati OH, οι οποίες είναι σχετικά επίπεδες και δεν επηρεάζονται ανεμολογικά από την τοπογραφία της ευρύτερης περιοχής. Για τις δυο πρώτες τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν από το διάστημα 1943-2008 ενώ για την τελευταία από την περίοδο 1948-2008. Έγινε υπολογισμός των συχνοτήτων της νηνεμίας αλλά και 5 κλάσεων συχνοτήτων της ταχύτητας του νέμου, για να εξαχθεί η σχέση με την ποσότητα του Όζοντος στην ατμόσφαιρα, αλλά και η δυνατότητα αερισμού της ατμόσφαιρας υπό καθεστώς άπνοιας, που είναι πολύ σημαντικός παράγοντας για την υγεία, ιδιαίτερα των ασθματικών.

Η μελέτη της ταχύτητας του ανέμου είναι πολύ σημαντική σε μια περιοχή, γιατί επηρεάζεται και επηρεάζει πολλούς παράγοντες. Η μόλυνση της ατμόσφαιρας, η διαδικασία κίνησης της ποσότητας του Όζοντος, προβλήματα υγείας και δυσφορία, εδαφολογικό ανάγλυφο, αλλά και μελέτες για αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας όπως επίσης και για τη σχέση του ανέμου με άλλες κλιματολογικές μεταβλητές όπως η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία, είναι άμεσα συνδεδεμένα με την ταχύτητα του ανέμου. Επίσης, γίνεται ανάλυση παλινδρόμησης, έλεγχος σημαντικότητας και ανάλυση χωρικής συσχέτισης, για να βρεθεί η σχέση ανάμεσα σε μεγάλης κλίμακας ατμοσφαιρικές διεργασίας σχετικά με τις τάσεις του ανέμου στην επιφάνεια της περιοχής ενδιαφέροντος.

Μεγάλη σημασία στη μελέτη του ανέμου έχει η εξεταζόμενη χρονική κλίμακα, που σε ετήσιο επίπεδο αντανακλά τον ευρύτερο ατμοσφαιρικό κύκλο, ενώ σε μικρότερες χρονικές κλίμακες,

εβδομαδιαίες, αλλά και ημερήσιες επηρεάζεται από τους περιστασιακούς κυκλώνες και αντικυκλώνες. Χρησιμοποιήθηκε επίσης η εξέταση της ταχύτητας του ανέμου σε μεγάλη χρονική κλίμακα για να μπορέσουν να βρεθούν οι συσχετίσεις ανάμεσα σε διαφορετικές περιοχές, αλλά και οι επιρροές ανάμεσα σε φαινόμενα μεγάλης χωρικής και χρονικής κλίμακας. Μελέτες που έγιναν στην μεγάλη Βρετανία, στον Καναδά και στην Κίνα στην κλίμακα αυτή, έδειξαν την αλλαγή στον ατμοσφαιρικό κύκλο του ανέμου με αρκετά ευδιάκριτο τον λόγο που οφείλονται οι αλλαγές αυτές.

Επομένως στα πλαίσια της εργασίας αυτής, έγινε προσπάθεια για να βρεθεί η σχέση ανάμεσα στα εξεταζόμενα μετεωρολογικά δεδομένα, τόσο σε τοπικό επίπεδο όσο και σε μεγαλύτερο χωροχρονικά επίπεδο, για να εξαχθεί το συμπέρασμα του κατά πόσο η μία κλίμακα επηρεάζει ή επηρεάζεται από την άλλη. Από τα εξεταζόμενα δεδομένα στις τρεις πολιτείες βρέθηκε μια γενικότερη τάση μείωσης στις συχνότητες εμφάνισης των ανέμων, εκτός από το διάστημα 2.1-4.1 m/s που παρατηρείται μια σχετική ανοδική τάση. Επίσης η μέση ταχύτητα και για τις τρεις περιοχές, για όλο το διάστημα μέτρησης εμφανίζει τάση μείωσης και φαίνεται να υπάρχει αρνητική συσχέτιση στην ποσότητα του Όζοντος στην ατμόσφαιρα και στην ταχύτητα του ανέμου. Οι τιμές της σχέσης αυτής αφορούν μόνο το εποχιακό διάστημα κατά το οποίο το φαινόμενο είναι σε έξαρση και παρατηρείται όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι σε χαμηλά επίπεδα. Οι μεταβλητές που επηρεάζονται σε μεγάλη κλίμακα, από δείκτες όπως είναι ο Ατλαντικός ωκεανός και τα αντίστοιχα ρεύματα, είναι η θερμοκρασία, η κατακρήμνιση και η ταχύτητα του ανέμου. Για να βρεθεί ποιός από τους παράγοντες αυτούς έχει τη μεγαλύτερη σχέση με την ταχύτητα του ανέμου, γίνεται παλινδρόμηση και έλεγχος με το student's test. Επομένως, για καθεμία πόλη και για κάθε έναν από τους υποψήφιους προς επιρροή παράγοντες, τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τις μέσες ετήσιες τιμές της ταχύτητας του ανέμου ήταν ότι, σημαντικότερος παράγοντας σε μεγάλη κλίμακα αποτελεί ο Ειρηνικός ωκεανός (PNA-Pacific North America).

Επίσης έγινε προσπάθεια χωρικής συσχέτισης ανάμεσα στις τρεις αυτές πολιτείες με τη μέθοδο Pearson product moment correlation, για μεγάλη κλίμακα, με θετική συσχέτιση για όλους τους συνδυασμούς των πολιτειών. Επίσης, βρέθηκε ότι η PNA έχει τη μεγαλύτερη σχέση με κάθε μια από τις πολιτείες, που μπορεί να δείχνει ότι οι μέσες ετήσιες τιμές του ανέμου επηρεάζονται σε μεγάλη χρονική κλίμακα από τα ρεύματα του Ειρηνικού, στην νότια Αμερική.

## **2.7 Χωρική και χρονική προσαρμογή της ταχύτητας και της ενέργειας του ανέμου στις Η.Π.Α. σε ύψος 80 m που προκύπτει από τις μετρήσεις.**

Στην επιστημονική εργασία των (Archer *et al.*, 2003, 2004), πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός της ποσότητας του αιολικού δυναμικού σε ύψος 80 m με σκοπό την εύρεση της επάρκειας ενός δικτύου παραγωγής ενέργειας, στην ηπειρωτική χώρα. Χρησιμοποιήθηκαν 1327 σταθμοί με 87 βολιδοσκοπήσεις για το έτος 2000. Βρέθηκε ότι το 24% των σταθμών εμφανίζει ταχύτητες πάνω από 6.9 m/s στα 80 m και το 37% των σταθμών αυτών ήταν παραθαλάσσιοι ή σε μικρή απόσταση από τη θάλασσα. Τονίζεται, η σημασία εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας, γιατί οι ΑΠΕ (Ανανεώσιμη Πηγή Ενέργειας) είναι πολύ περισσότερο φιλική για το περιβάλλον αλλά και πολύ λιγότερο κοστοβόρα, από τα περιορισμένης ποσότητας ορυκτά καύσιμα, τα οποία εμφανίζονται και περισσότερο ακριβά σε επεξεργασία και εξόρυξη.

Ο υπολογισμός της ταχύτητας από τα δεδομένα των 10 m έγινε για το ύψος των 80 m για να προσομοιαστεί άμεσα η ενέργεια του ανέμου αφού το ύψος των χρησιμοποιούμενων τουρμπίνων θα φτάσει το ύψος αυτό. Σημαντική παρατήρηση στην επεξεργασία των δεδομένων αποτέλεσε το γεγονός ότι ο άνεμος επιφανειακά (0-10 m) εμφανίζει μέγιστο ημέρας το απόγευμα λόγω της αυξανόμενης θερμικής ανισορροπίας της ατμόσφαιρας. Αντίθετα, όμως σε μεγαλύτερο υψόμετρο, το φαινόμενο αντιστρέφεται, με τα ελάχιστα να σημειώνονται τις απογευματινές ώρες και τα μέγιστα τη νύχτα. Επομένως, για τη διόρθωση του φαινομένου αυτού και για να μπορεί να υπολογιστεί η τιμή της ταχύτητας του ανέμου στα 80 m με σχετική ακρίβεια ακολουθείται μια μεθοδολογία εξαγωγής ενός παράγοντα  $\rho$ , με τον οποίο πολλαπλασιάζεται κάθε ώρα στο ύψος των 10 m. Επίσης, για την επάρκεια σε αιολική ενέργεια για μια σύγχρονη ανεμογεννήτρια και για την παραγωγή ανταγωνιστικού προϊόντος, έχουν σημασία οι ταχύτητες των ανέμων μεγαλύτερες από 6.9 m/s, για τη συγκεκριμένη μελέτη.

Για την εξαγωγή των συμπερασμάτων, επεξεργαστήκαν τα δεδομένα 10 σταθμών με κριτήριο την επάρκεια-ποιότητα των δεδομένων τους, και υπολογίστηκαν για όλο το διάστημα των μετρήσεων η μέση τιμή, τυπική απόκλιση σε ετήσια κλίμακα όπως επίσης και η παραγόμενη ενέργεια για τις ίδιες στατιστικές παραμέτρους. Βρέθηκε ότι η ταχύτητα του ανέμου είναι μια μεταβλητή σε ωριαία κλίμακα, με διακυμάνσεις περίπου 50% τόσο από τη μηνιαία όσο και από την ετήσια τιμή. Επίσης, η ταχύτητα του ανέμου τις απογευματινές ώρες ήταν η μικρότερη από ότι σε κάποιο άλλο χρονικό διάστημα κατά τη διάρκεια της ημέρας. Ακόμη, η μεταβλητότητα του ανέμου από τον υπολογισμό της τυπικής απόκλισης παρουσιάζει πολύ μεγαλύτερες διακυμάνσεις, αλλά η μέγιστη απόκλιση είναι εντός του κάτω ορίου για την εγκατάσταση ανεμογεννήτριας, που είναι 3.31 m/s για την συγκεκριμένη εφαρμογή. Η συμπεριφορά του ανέμου σε μεγάλες ταχύτητες δεν εμφανίζεται με έντονα διαλείπον χαρακτήρα.

Επίσης έγινε προσαρμογή του μοντέλου Reylight (εφάμιλλο του Weibull), με αντίστοιχο υπολογισμό της συνάρτησης σχήματος  $k$  αλλά και της συνάρτησης κλίμακας  $c$ , για τη σύγκριση με την εμπειρική κατανομή του δείγματος και έδειξε ότι για τους περισσότερους σταθμούς προσαρμόζεται πολύ καλά. Από την εξέταση των δειγμάτων ταχύτητες ανέμου μικρότερες από 3 m/s στα 10 m εμφανίστηκαν μόνο στο 10.1% των σταθμών, που σημαίνει μόνο στο 10.1% των ωρών του έτους δεν έχω ικανοποιητικό άνεμο και μάλιστα το μεγαλύτερο ποσοστό νηνεμίας εμφανίζεται το χειμώνα από ότι το καλοκαίρι.

Μέσω της ταχύτητας του ανέμου και συναρτήσει της επιφάνειας της περωτής της ανεμογεννήτριας, πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός της παραγόμενης (θεωρητικά) ενέργειας από τις μέσες ωριαίες τιμές για κάθε ημέρα για το έτος 2000 και έγινε ο υπολογισμός της μέσης ωριαίας παραγόμενης ενέργειας, όπως επίσης και της μηνιαίας. Το μηνιαίο εύρος ήταν μέγιστο το Σεπτέμβριο (1813 W/m<sup>2</sup>) και ελάχιστο το Νοέμβριο (908 W/m<sup>2</sup>). Παρατηρήθηκε επίσης ότι στους τελευταίους μήνες του χειμώνα, παρά την ύπαρξη μεγάλης συχνότητας μικρών ταχυτήτων ανέμου, η μέση ταχύτητα του ανέμου είναι μεγάλη και άρα και η παραγόμενη ενέργεια. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην ύπαρξη επιπλέον τροπικών κυκλώνων την περίοδο εκείνη στο βόρειο ημισφαίριο, που χαρακτηρίζεται από θυελλώδη καιρό με έντονες ταχύτητες στον άνεμο, με ταυτόχρονες εναλλαγές νηνεμίας, χαμηλής ταχύτητας ανέμου. Λιγότεροι τροπικοί κυκλώνες εμφανίζονται το καλοκαίρι λόγω του συστήματος υψηλού βαρομετρικού, με αποτέλεσμα να παράγεται μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας κατά τους χειμερινούς μήνες. Το γεγονός ότι ο τύπος υπολογισμού της ενέργειας είναι συνάρτηση της τρίτης δύναμης της ταχύτητας, οι υψηλές ταχύτητες της ουράς του ανέμου έχουν πολύ μεγαλύτερη επίδραση στην τυπική απόκλιση από ότι στη μέση τιμή.

Από τα αποτελέσματα της έρευνας προέκυψε ότι η χωρική κατανομή του δικτύου των ανεμογεννητριών παίζει σημαντικό ρόλο στη μείωση του εύρους της τυπικής απόκλισης για όσο μεγαλώνει η επιφάνεια του δικτύου. Επίσης, ένα δίκτυο μπορεί να αυξήσει το κατώφλι των ανέμων με αποτέλεσμα να μειώσει το ποσοστό των ελάχιστων ανέμων σε μια περιοχή αυξάνοντας την παραγόμενη ενέργεια. Επειδή η φύση του ανέμου ακολουθεί την κατανομή Reylight, η μέση τιμή του ανέμου σε ένα μήνα σε μια οποιαδήποτε ώρα, σε μια τυχαία τοποθεσία, είναι αξιόπιστος δείκτης συγκρινόμενος με την δύναμη του ανέμου την ίδια ώρα αλλά σε οποιαδήποτε τυχαία μέρα του ίδιου μήνα. Τέλος, ακόμα και αν η τυπική απόκλιση της ταχύτητας του ανέμου είναι μεγάλη, η αιολική δύναμη του ανέμου σε μια μέση περίοδο ακολουθεί τη μέση ταχύτητα του ανέμου.

## **2.8 Μια έρευνα για την αποτίμηση του αιολικού δυναμικού στην Ελλάδα.**

Στην επιστημονική εργασία (Katsoulis, 1993), πραγματοποιείται σύγκριση της ταχύτητας της μεταβλητής του ανέμου, που προκύπτει από διάφορες περιοχές του Ελλαδικού χώρου και πραγματεύεται την παραγόμενη ενέργεια από τις τοποθεσίες αυτές, με τη βοήθεια της θεωρητικής κατανομής Weibull και υπολογίζοντας κάθε φορά τις παραμέτρους της. Οι πιθανότερες τοποθεσίες είναι παραθαλάσσιες και ειδικά στα νησιά του Αιγαίου με ετήσια παραγωγή ενέργειας ( $600 \text{ W/m}^2$ ), ενώ υποψήφιες θέσεις τοποθέτησης ανεμογεννητριών αποτελούν και τα νησιά του Ιονίου, με ετήσια παραγωγή ενέργειας ( $200 \text{ W/m}^2$ ). Άλλες θέσεις, ηπειρωτικές, που εξετάστηκαν, χαμηλού υψομέτρου, με ήπια τοπογραφία, εμφάνισαν πολύ χαμηλότερο υποψήφιο ενεργειακό δυναμικό υποπολλαπλάσιας τάξης ( $20 \text{ W/m}^2$ ).

Η αύξηση των ορυκτών καυσίμων, όπως το πετρέλαιο, ιδιαίτερα στον Ελλαδικό χώρο, καθιστά επιτακτική την ανάγκη για εύρεση άλλων πηγών ενέργειας και δη ανανεώσιμων. Στη συγκεκριμένη εργασία γίνεται προσπάθεια μέσω της κατανομής Weibull, να γίνει υπολογισμός του ενεργειακού δυναμικού με βάση τα δεδομένα από διάφορους σταθμούς σε όλον τον Ελλαδικό χώρο, με σκοπό να ποσοτικοποιηθεί το ενεργειακό αιολικό δυναμικό. Κάτι τέτοιο όμως παρουσιάζει δυσκολίες δεδομένου ότι η ταχύτητα του ανέμου είναι μια μεταβλητή που παρουσιάζει έντονη διακύμανση ανάμεσα στις διάφορες ώρες της ημέρας αλλά και σε κάθε εποχή του χρόνου. Επίσης, επηρεάζεται από πολλές παραμέτρους όπως είναι η έντονη τοπογραφία και η γειτνίαση με παραθαλάσσιες τοποθεσίες. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν από 42 σταθμούς διάσπαρτους σε ολόκληρη τη χώρα και οι μετρήσεις ήταν από 3, 8 και 24 παρατηρήσεις κατά τη διάρκεια της ημέρας. Επίσης οι χρονοσειρές δεν ήταν παντού συνεχείς λόγω ελλείψεων στις μετρήσεις και τα χρονικά διαστήματα μέτρησης ήταν από 5 έως 30 έτη. Οι τιμές ήταν σε κλίμακα Beaufort αλλά και οι μετρήσεις δεν ήταν όλες στο ίδιο ύψος. Επομένως υπήρξε η ανάγκη για μετατροπή της μεταβλητής σε μονάδες (m/s) αλλά και η αναγωγή ενιαίου υψομέτρου. Για τη αναγωγή στο ενιαίο υψόμετρο των 10 m σημαντικό ρόλο παίζει η τραχύτητα του εδάφους, για αυτό το λόγο θα πρέπει να επιλεγεί κάθε φορά η κατάλληλη τιμή της μεταβλητής  $z_0$  για την προσομοίωση της επιρροής της τραχύτητας που επηρεάζει σημαντικά στα ύψη αυτά. Για την εξαγωγή των μηνιαίων και ετήσιων υπολογισμών υπολογίστηκαν οι μέσοι όροι των ημερήσιων παρατηρήσεων.

Πραγματοποιήθηκε εφαρμογή για την καταλληλότητα της επιλογής της κατανομής Weibull στην προσαρμογή στα δεδομένα και βρέθηκε πολύ ικανοποιητική, σχετικά με το ιστόγραμμα των δεδομένων στις περισσότερες των περιπτώσεων, στα οποία απεικονίζονταν η ταχύτητα και η συχνότητα εμφάνισης ανάλογα με την κλάση. Έγινε ο υπολογισμός των παραμέτρων  $k$  σχήματος και  $c$  (m/s) κλίμακας από τα οποία εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα για τα

αποτελέσματα. Από τα δεδομένα και τον υπολογισμό της θεωρητικά παραγόμενης ενέργειας εμφανίζεται διαφορετική συμπεριφορά ανάμεσα στην ηπειρωτική χώρα, τις παραθαλάσσιες περιοχές και τα νησιά. Επίσης ανάλογα με την εποχή η παράμετρος  $c$  εμφανίζεται μικρή στα νησιά κατά τους χειμερινούς μήνες ενώ αντίθετα η παράμετρος κλίμακας  $k$  είναι αρκετά μεγάλη το διάστημα των μηνών Νοέμβριο - Φεβρουάριο. Το γεγονός των υψηλών τιμών της παραμέτρου  $k$ , μεγαλύτερο από μονάδα, υποδηλώνει την έντονη μεταβλητότητα του ανέμου και τη διαλείπουσα συμπεριφορά του. Επίσης σημαντικός παράγοντας δυσκολίας στον υπολογισμό του ενεργειακού δυναμικού της χώρας αποτελεί και η έντονη ορογραφία και συγκεκριμένα η οροσειρά της Πίνδου που ουσιαστικά αποτελεί φραγμό των ανέμων με κατεύθυνση από τα ανατολικά προς τα δυτικά. Στο ανωτέρω περιγραφόμενο γεγονός προστίθεται και η χαμηλότερη ετήσια ενέργεια που παράγεται από τα Ιόνια νησιά σχετικά με τα νησιά του Αιγαίου.

Από τα παραπάνω αποτελέσματα προέκυψε ότι οι περιοχές με την μεγαλύτερη ενεργειακή παραγωγή είναι τα νησιά του Αιγαίου αλλά και τα νησιά του Ιονίου με τις μέγιστες τιμές να εμφανίζονται την εποχή του χειμώνα και του καλοκαιριού, που εμφανίζονται μέγιστα στην ταχύτητα του ανέμου. Πολύ σημαντικό παράγοντα αποτελεί η τοπογραφία της περιοχής, το έντονο ανάγλυφο αλλά και η τοποθεσία, αν βρίσκεται κοντά σε θάλασσα, σε νησί ή στην ηπειρωτική χώρα. Επίσης, ο υπολογισμός της διαθέσιμης ενέργειας έγινε για το ύψος των 10 m όμως οι περισσότερες ανεμογεννήτριες ξεπερνούν τα ύψη αυτά που σημαίνει ότι υπάρχει μεγαλύτερη ποσότητα διαθέσιμης ενέργειας που μπορεί να είναι εκμεταλλεύσιμη. Επίσης, δυσκολία στην εκτίμηση αποτελεί και η επιρροή της μακροκλίμακας - τοπικών φαινομένων στην γενικότερη συμπεριφορά του ανέμου. Για αυτό το λόγο είναι πολύ σημαντικό να υπολογιστεί η επιρροή της τύρβης στις διάφορες περιοχές και ειδικότερα στις ακτές κατά τη διάρκεια ύπαρξης έντονων ανέμων από τα όρη το χειμώνα, αλλά και κατά τη διάρκεια των μετεμίων το καλοκαίρι ώστε να βρεθούν τα βασικότερα χαρακτηριστικά της στασιμότητας αυτής.

## **2.9 Γενικότερη βιβλιογραφία - επιστημονικά συγγράμματα**

Από τη γενικότερη βιβλιογραφική επισκόπηση, έχει γίνει αποδεκτό, από πλήθος επιστημόνων, το γεγονός ότι πρέπει οι χώρες, σε παγκόσμιο επίπεδο, να μεταβάλλουν την ενεργειακή πολιτική τους. Το γεγονός αυτό συνάδει με τη μείωση των διαθέσιμων εξορυξίμων κοιτασμάτων, αλλά και με την προσπάθεια προώθησης των ΑΠΕ (Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας), που αποτελούν ανεξάντλητο ενεργειακό παραγωγό, αλλά και την πλέον φιλική προς το περιβάλλον και οικονομική, μορφή ενέργειας. Μια από τις μορφές αυτές ενέργειας αποτελεί και η αιολική. Ο παραπάνω παράγοντας, αποτελεί χαρακτηριστικό στοιχείο της προσπάθειας αρκετών επιστημόνων, που ασχολούνται με τη στοχαστική επεξεργασία της μεταβλητής της ταχύτητας του ανέμου, για τον αμερόληπτο υπολογισμό και την ακριβή εκτίμηση της παραγόμενης ενέργειας, σε διάφορες περιοχές. Στην εργασία (Bagiorgas *et al.*, 2007) γίνεται προσπάθεια εκτίμησης του αιολικού δυναμικού στην ανατολική Ελλάδα, αντίστοιχα στις εργασίες των (Fyrippis *et al.*, 2008, 2010 · Chronopoulou *et al.*, 2010), γίνεται επίσης προσπάθεια εκτίμησης του αιολικού δυναμικού στο κεντρικό Αιγαίο και συγκεκριμένα στη Νάξο, αλλά και σε ολόκληρη την Ελλάδα, αντίστοιχα. Επίσης στις εργασίες των (Mayhoub *et al.*, 1997 · Rosen *et al.*, 1998 · Alaydi *et al.*, 2010 · Raihani *et al.*, 2012), πραγματοποιείται υπολογισμός του αιολικού δυναμικού, συγκεκριμένων περιοχών, Αίγυπτος, Ερυθρέα, Γάζα και Μαρόκο αντίστοιχα, με σκοπό την πρόταση, συγκεκριμένων σημείων τοποθέτησης αιολικών πάρκων ή μεμονωμένων ανεμογεννητριών, για την

εκμετάλλευση, όσο το δυνατόν μεγαλύτερου ποσοστού από τη διαθέσιμη ενέργεια και με απώτερο στόχο την ενεργειακή αυτονομία των περιοχών αυτών.

Επιπρόσθετα, εκτός από τον απευθείας υπολογισμό του αιολικού δυναμικού μέσω της προσαρμογής κατανομών (Karamanis, 2013), γίνεται και προσπάθεια σωστής - αξιόπιστης επεξεργασίας των παρατηρημένων δεδομένων που κάθε χώρα, από τους μετρητικούς σταθμούς, διαθέτει. Το παραπάνω γεγονός συνίσταται στην αμερόληπτη στοχαστική επεξεργασία της μεταβλητής της ταχύτητας του ανέμου, ώστε τα εξαγόμενα αποτελέσματα να είναι συμβατά με την πραγματικότητα, διατηρώντας περιθώρια αλλά και από κοινού στατιστικά χαρακτηριστικά, των χρονοσειρών. Επομένως, γίνεται προσπάθεια για αξιόπιστη παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών, που να διατηρούν, με ικανοποιητικό τρόπο, τα στατιστικά χαρακτηριστικά της αρχικής - ιστορικής χρονοσειράς των παρατηρήσεων. Οι προσπάθειες των (Koutsoyiannis, 2000, 2003 · Wang *et al.*, 2013), αποτελούν χαρακτηριστικό παράδειγμα, που μέσα από την αυστηρότητα των μαθηματικών εννοιών, πραγματοποιείται η εύρεση μεθόδων για την αμερόληπτη στοχαστική επεξεργασία ατμοσφαιρικών φυσικών μεταβλητών, που μπορεί να βρει άμεση εφαρμογή και για την μεταβλητή της ταχύτητας του ανέμου. Στις ανωτέρω εργασίες, παρουσιάζονται μέθοδοι για την παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών που διατηρούν τα αρχικά στατιστικά χαρακτηριστικά του ιστορικού δείγματος και επίσης σημαντικούς συντελεστές με μεγάλη φυσική σημασία (Hurst). Πραγματοποιείται σύγκριση διαφόρων μοντέλων (Philippopoulos *et al.*, 2009) που υπάρχουν στη βιβλιογραφία (AR(1), ARMA(1,1), ARMA(2,2)) και από την παραγωγή των συνθετικών χρονοσειρών προκύπτουν συμπεράσματα για την καταλληλότητα ή μη κάποιων από αυτά να περιγράψουν με αξιόπιστο τρόπο την πραγματικότητα. Επίσης, στην εργασία των (Carapellucci *et al.*, 2012, 2013), γίνεται προσπάθεια εύρεσης νέας μεθόδου για την παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών με διακριτοποίηση του χρόνου, αλλά ακόμα και με θεώρηση του χρόνου ως μια συνεχή μεταβλητή, όπως πραγματικά συμβαίνει (Calif, 2011), με σκοπό να προσομοιαστεί πιο αξιόπιστα η πραγματικότητα και τα συμπεράσματα που θα προκύψουν από μια ενδεχόμενη στοχαστική επεξεργασία να είναι αξιόπιστα. Επιπρόσθετα, πιο εφαρμόσιμες μέθοδοι με την έννοια της απλότητάς και ταχύτητάς τους, έχουν πραγματοποιηθεί από το (Koutsoyiannis, 2002), που παράγονται συνθετικές χρονοσειρές, διατηρώντας, υψηλή αυτοσυσχέτιση και εμμονή της ιστορικής χρονοσειράς, με απλή άθροιση Μαρκοβιανών μοντέλων (τριών AR(1)). Επίσης, για την πληρέστερη κατανόηση της μεταβλητής της ταχύτητας του ανέμου, εξετάζεται σε μεγαλύτερη κλίμακα από την τοπική (π.χ. Λεκάνη Μεσογείου), ώστε να καταστεί σαφές ποιές δομές επηρεάζουν στην κλίμακα αυτή τον άνεμο (Schicker *et al.*, 2010), με δορυφορικά δεδομένα διακριτοποιημένα σε κানাβο, ώστε να μπορεί να προσεγγιστεί ικανοποιητικά η οποιαδήποτε κίνησή του ανέμου, με την έμμεση μέτρηση της εξάτμισης αλλά και της σχετικής υγρασίας της ατμόσφαιρας. Συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών χρησιμοποιούνται και από τους (Voivontas *et al.*, 1998) για την ακριβέστερη και εποπτικότερη επεξεργασία της μεταβλητής της ταχύτητας του ανέμου. Στην εργασία του (Karamanis *et al.*, 2013), εκτός από την εκτίμηση της παραγόμενης ενέργειας μέσω ανεμογεννητριών, πραγματοποιείται αντίστοιχα και μια οικονομικοτεχνική μελέτη - ανάλυση σχετικά με τα πλεονεκτήματα εφαρμογής μιας τέτοιας μεθόδου σε συγκεκριμένη χωρική και χρονική κλίμακα και μάλιστα τίθεται και το ζήτημα διασυννοριακών συνεργασιών για τη στροφή στις Α.Π.Ε., με όφελος εκάτερων των συμμετεχόντων. Τέλος, στην εργασία του (Hokimoto, 2013), πραγματοποιείται μια νέα μέθοδος εύρεσης της ταχύτητας του ανέμου μέσω της μέτρησης του ύψους του κυματισμού στη θάλασσα. Εκτιμάται, ότι μια τέτοια μέθοδος είναι απαλλαγμένη από τα γεωμορφολογικά εμπόδια που μπορεί να συναντήσει ο άνεμος κατά τη διέλευσή του και να αλλοιωθεί, αλλά είναι αμφιλεγόμενο το γεγονός της

ακρίβειας εκτίμησης του ύψους του κυματισμού και της αντίστοιχης μοντελοποίησης του, για την καθολική εφαρμογή μιας τέτοιας μεθόδου.



## 3 Δεδομένα

---

### 3.1 Ταχύτητα του ανέμου

Η ταχύτητα του ανέμου αποτελεί θεμελιώδη ατμοσφαιρική μεταβλητή η οποία επηρεάζει την πρόγνωση του καιρού, τα αεροσκάφη, τις θαλάσσιες δραστηριότητες, τα κατασκευαστικά έργα, την ανάπτυξη και το ρυθμό μεταβολισμού πολλών φυτικών ειδών. Μπορεί να μετρηθεί με ένα κοινό ανεμόμετρο, όπως επίσης και να κατηγοριοποιηθεί, χρησιμοποιώντας την παλαιότερη κλίμακα Beaufort, η οποία βασίζεται στην παρατήρηση ανθρώπων από τις επιπτώσεις του ανέμου. Επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες και καταστάσεις, που λειτουργούν σε ποικίλες κλίμακες. Αυτές περιλαμβάνουν την κλίση πίεσης, Rossby κύματα και αεροχειμάρους, όπως επίσης επηρεάζεται και από τις τοπικές καιρικές συνθήκες. Γίνονται επίσης προσπάθειες να συνδεθεί η ταχύτητα του ανέμου με τη διεύθυνση του, κυρίως μέσω της κλίσης πίεσης που εμφανίζεται στην ατμόσφαιρα. Κλίση πίεσης είναι ένας όρος για να περιγράψει την διαφορά στην πίεση του αέρα μεταξύ δύο σημείων στην ατμόσφαιρα ή στην επιφάνεια της Γης. Είναι ζωτικής σημασίας να ταχύτητα του ανέμου, επειδή όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά πίεσης, τόσο περισσότερο επιταχύνεται ο άνεμος, για να ισορροπήσει τη διακύμανση. Η κλίση της ατμοσφαιρικής πίεσης (βαροβαθμίδα), όταν συνδυάζεται με την αδρανειακή δύναμη Coriolis (Coriolis effect) και την τύρβη, αποτελεί παράγοντα καθοριστικό για την κατεύθυνση του ανέμου.

Rossby κύματα, είναι οι ισχυροί άνεμοι στην ανώτερη τροπόσφαιρα. Αυτά λειτουργούν σε παγκόσμια κλίμακα και μετακινούνται από τη Δύση στην Ανατολή (Westerlies). Τα κύματα Rossby αποτελούν μια διαφορετική ταχύτητα ανέμου, από αυτό που βιώνουμε στην κατώτερη τροπόσφαιρα. Οι τοπικές καιρικές συνθήκες αποτελούν σημαντικό παράγοντα, με το σχηματισμό τυφώνων, με την παρουσία μουσώνων και τη δημιουργία κυκλώνων, που αποτελούν ασυνήθιστα καιρικά φαινόμενα, που μπορούν να επηρεάσουν δραστικά την ταχύτητα του ανέμου.

(C.Michael Hogan. 2010. *Abiotic factor. Encyclopedia of Earth. eds Emily Monosson and C. Cleveland. National Council for Science and the Environment. Washington DC*)

#### 3.1.1 Συλλογή των δεδομένων

Στην παρούσα διπλωματική πραγματοποιείται η στατιστική-στοχαστική, επεξεργασία δεδομένων ανέμου που αφορούν σε μεταβλητές ταχύτητας - διεύθυνσης αλλά και ριπής του ανέμου. Πηγή των δεδομένων των μετρήσεων αποτέλεσε το διαδίκτυο και συγκεκριμένα το site: <http://www.ncdc.noaa.gov/cdo-web/>, που περιέχει όλες τις κλιματολογικές μεταβλητές, που αναφέρονται ότι επηρεάζουν άμεσα ή έμμεσα το κλιματολογικό καθεστώς (θερμοκρασία, σχετική υγρασία, άνεμος, χιονόπτωση κτλ). Στην παρούσα διπλωματική εξετάζεται ο άνεμος στον Ελλαδικό χώρο, επομένως επιλέγηκαν 78 Σταθμοί εντός των ελληνικών συνόρων. Στην πραγματικότητα το πλήθος των σταθμών μέτρησης ήταν 84, αλλά 6 από τους σταθμούς αυτούς δεν είχαν καθόλου δεδομένα επομένως απορρίφθηκαν για τις ανάγκες της εργασίας, αλλά και από τους 78 σταθμούς οι έξι είχαν ελάχιστα δεδομένα που δεν μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για περαιτέρω επεξεργασία.

Με την είσοδο στο αντίστοιχο site για την συλλογή των δεδομένων, σου δίνεται η δυνατότητα επιλογής του επιθυμητού αριθμού - σταθμών, με γραφική επιλογή της

αντίστοιχης περιοχής ενδιαφέροντος, η οποία πρέπει να περιλαμβάνει τους επιθυμητούς σταθμούς της ενδεχόμενης επεξεργασίας. Μετά από τη διαδικασία αυτή εμφανίζεται πίνακας με τα χαρακτηριστικά των σταθμών που έχουν επιλεγεί και με αντίστοιχη επιλογή των σταθμών ενδιαφέροντος, συλλέγεται το αρχείο για κάθε σταθμό. Αφού πραγματοποιηθεί και η διαδικασία αυτή, δίνεται η επιλογή στο χρήστη για άμεση συλλογή του επιλεχθέντος αρχείου, το οποίο μετά από μερικά λεπτά κατεβαίνει στην ηλεκτρονική διεύθυνση που έχει ήδη, σε προηγούμενα βήματα, εισάγει ο χρήστης στο σύστημα.

Το αρχείο που έχει στη διάθεσή του ο χρήστης αποτελείται από 4 επιπλέον αρχεία σε μορφή \*.txt. Τα αρχεία αυτά δίνουν πληροφορίες σχετικά με την μετρητική μεταβλητή, τα χαρακτηριστικά του σταθμού μέτρησης όπως επίσης και τα στοιχεία των μεταβλητών που χαρακτηρίζουν την κάθε μέτρηση. Πιο συγκεκριμένα η μορφή των αρχείων για έναν τυχαία επιλεγμένο σταθμό είναι:

(1) <http://www1.ncdc.noaa.gov/pub/orders/9387866459466dat.txt> - DS3505 - Surface Data, Hourly Global - Data File

(2) <http://www1.ncdc.noaa.gov/pub/orders/9387866459466stn.txt> - DS3505 - Surface Data, Hourly Global - Stations included in your search

(3) <http://www1.ncdc.noaa.gov/pub/orders/9387866459466inv.txt> - DS3505 - Surface Data, Hourly Global - Data inventory for your search

(4) <http://www1.ncdc.noaa.gov/pub/orders/9387866459466doc.txt> - DS3505 - Surface Data, Hourly Global - format documentation

Στο πρώτο αρχείο δίνονται πληροφορίες σχετικά με την μεταβλητή του ανέμου: ταχύτητα - διεύθυνση - ριπή του ανέμου σε μεταβλητό χρονικό βήμα και για χρονικό διάστημα διαφορετικό για κάθε σταθμό, ανάλογα με την ύπαρξη του κάθε σταθμού και την έναρξη λειτουργίας του. Στο δεύτερο αρχείο δίνονται πληροφορίες σχετικά με την ονομασία και το χαρακτηριστικό αριθμό του κάθε σταθμού - γεωγραφικές συντεταγμένες και υψόμετρο. Στο τρίτο αρχείο δίνεται συγκεντρωτικός πίνακας του αριθμού των μετρήσεων των χαρακτηριστικών του ανέμου για κάθε μήνα για κάθε έτος μέτρησης. Στο τέταρτο αρχείο δίνονται πληροφορίες για τα μετρητικά χαρακτηριστικά και τί αυτά αντιπροσωπεύουν για κάθε μια μέτρηση.

### **3.1.2 Επεξεργασία των δεδομένων**

Για τη στατιστική-στοχαστική επεξεργασία των χαρακτηριστικών της μέτρησης του κάθε σταθμού τα δεδομένα πρέπει να μετατραπούν σε κατάλληλη μορφή ώστε να μπορούν να είναι συμβατά για περαιτέρω επεξεργασία από το πρόγραμμα Hydrognomon (Υδρογνώμων). Για να γίνει αυτό αντιγράφεται ο πίνακας δεδομένων σε αρχείο excel ώστε να γίνει η κατάλληλη επεξεργασία στα δεδομένα στο αρχείο αυτό. Η επεξεργασία συνίσταται στη δημιουργία χρονοσειρών για κάθε μια μετρητική μεταβλητή. Οι χρονοσειρές που παράγονται αφορούν τρεις μεταβλητές: την ταχύτητα του ανέμου, την κατεύθυνση και τις ριπές του ανέμου.

Αρχικά κάποιες τιμές των μετρήσεων ή είναι λάθος ή δεν έχουν πραγματοποιηθεί και για αυτό το λόγο εμφανίζονται με τιμή 999.9 που σημαίνει σφάλμα μέτρησης. Επομένως οι τιμές αυτές θα πρέπει να διαγραφούν από το δείγμα μέτρησης για να μην δημιουργήσουν σφάλματα κατά τη στατιστική επεξεργασία. Αντιγράφονται οι τιμές μέτρησης σε ένα φύλλο του excel και με την εντολή του φίλτρου επιλέγεται ολόκληρος ο πίνακας μέτρησης και με την επιλογή της στήλης που περιέχονται οι τιμές μέτρησης της ταχύτητας, τοποθετούνται οι τιμές από τη μεγαλύτερη προς τη μικρότερη. Αυτό γίνεται για να εμφανιστούν άμεσα οι τιμές

που έχουν σφάλμα που αναγράφονται με τιμή 999.9 και με την εντολή countif επιλέγεται η στήλη αυτή για να μετρηθούν οι τιμές αυτές και να διαγραφούν από το δείγμα μέτρησης. Αφού διαγραφούν οι τιμές αυτές πρέπει να τοποθετηθούν και πάλι οι τιμές σε αυστηρή χρονολογική σειρά που πραγματοποιείται με την εντολή του φίλτρου και πάλι που μόνο αυτή τη φορά δεν επιλέγεται ολόκληρος ο πίνακας αλλά η στήλη που περιέχει την ημερομηνία μέτρησης και τοποθετούνται οι τιμές από την παλαιότερη στη νεότερη. Με αυτό τον τρόπο εξάγεται η χρονοσειρά για κάθε μία μεταβλητή που μας ενδιαφέρει.

Τα προβλήματα που παρουσιάζονται κατά τη διεξαγωγή της επεξεργασίας αυτής συνίσταται κυρίως στη συμβατότητα των δεδομένων για επεξεργασία από το πρόγραμμα Υδρογνώμων. Πιο συγκεκριμένα: Κατά τη μεταφορά των δεδομένων από το αρχείο \*.txt σε αρχείο excel τα δεδομένα εισάγονται σε μια στήλη. Επομένως είναι απαραίτητος ο χωρισμός σε στήλες όπως ακριβώς ήταν στο αρχικό αρχείο. Οι στήλες που έχουν ξεχωριστά την ημερομηνία και την ώρα θα πρέπει να ενοποιηθούν σε μία ώστε στο ίδιο κελί να έχω και την ώρα και την ημερομηνία μέτρησης ώστε κατά την εισαγωγή της χρονοσειράς στο πρόγραμμα να μπορεί να αντιληφθεί διαφορετικές τιμές μέτρησης. Η παραπάνω διαδικασία πραγματοποιήθηκε με τον παρακάτω τρόπο: Έγινε αντιγραφή του αρχείου σε μορφή \*.txt σε φύλλο excel. Τα δεδομένα αντιγράφηκαν σε μια στήλη και για τη διατήρηση των δεδομένων σε μορφή πίνακα από την επιλογή Δεδομένα - Κείμενο σε στήλες, γίνεται ο χωρισμός των στοιχείων στην επιθυμητή δομή του πίνακα. Το κρίσιμο στοιχείο είναι τα δεδομένα του χρόνου (ημερομηνία και ώρα) να τοποθετηθούν στην ίδια στήλη ώστε να αποτελέσουν από κοινού χαρακτηριστικό χρόνου για την εκάστοτε μέτρηση. Πρέπει επίσης να φτιαχτεί και η μορφή της ημερομηνίας με την επιλογή μορφή - προσαρμογή - σε δομή yyyy-mm-dd hh:mm, που σημαίνει ότι πρέπει να τοποθετηθεί χρόνος, ο μήνας, η ημέρα, η ώρα και το λεπτό μέτρησης με τη σειρά που αναγράφονται για να μπορεί να γίνει εύκολα η διακριτοποίηση στο χρονικό διάστημα που έγινε η μέτρηση και να γίνει κατανοητή από το πρόγραμμα Υδρογνώμων η χρονική διακριτότητα.

Το πρόβλημα του δημιουργείται με τον παραπάνω τρόπο είναι ότι η μορφή της ημερομηνίας και της ώρας που είναι πλέον στο ίδιο κελί, αποτελείται από ένα οκταψήφιο και ένα τετραψήφιο νούμερο που είναι χωρισμένα μεταξύ τους με κενό. Πρέπει επομένως να τους δοθεί η παραπάνω μορφή. Με την εντολή mid (text, αριθμός έναρξης, αριθμός χαρακτήρων) γίνεται ο χωρισμός του κειμένου σε κείμενο με επιλεγμένο αριθμό χαρακτήρων. Έτσι γίνεται ο χωρισμός για το έτος - μήνα - μέρα - ώρα - λεπτό σε ξεχωριστές στήλες. Με την εντολή time (ώρες, λεπτά, δευτερόλεπτα) με την επιλογή της αντίστοιχης ώρας ουσιαστικά δημιουργείται ένα κελί που έχει τη σωστή ώρα μέτρησης αλλά λάθος ημερομηνία - αποτελείται από την ημερομηνία έναρξης του excel που είναι το 1900. Με την εντολή Date (χρόνος, μήνας, μέρα) και τη σωστή επιλογή του χρόνου - μήνα και ημέρας δημιουργείται ένα κελί το οποίο έχει την επιθυμητή μορφή, yyyy-mm-dd hh:mm, σωστή ημερομηνία αλλά λανθασμένη ώρα - συνεχόμενη εμφάνιση του 00:00. Για την τελική μορφή και ορθότητα του χρονικού σημείου της μέτρησης γίνεται πρόσθεση των 2 στηλών που έχουν φτιαχτεί: μια στήλη που αντιπροσωπεύει λάθος ημερομηνία - σωστή ώρα και μια επόμενη στήλη με σωστή ημερομηνία - λάθος ώρα. Το αποτέλεσμα της πρόσθεσης των δυο στηλών μας δίνει τη σωστή χρονική στιγμή μέτρησης σε ποιότητα (μορφή) και ποσότητα (ορθότητα τιμής).

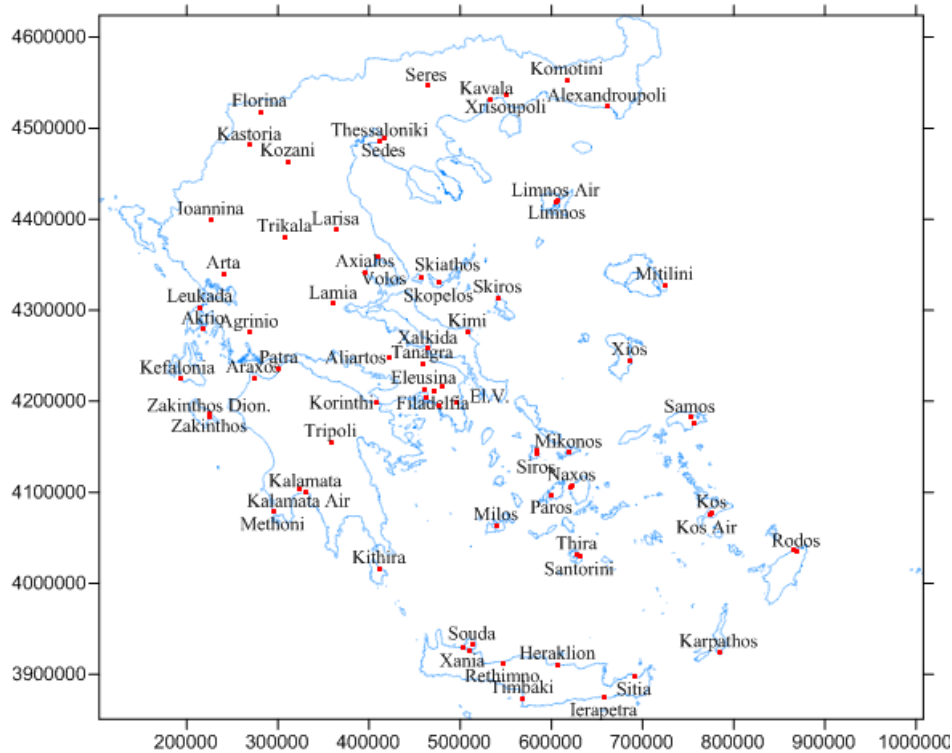
Επομένως, αφού έχει κατασκευαστεί η σωστή μορφή της χρονικής ακολουθίας, δημιουργούνται τρία επιπλέον φύλλα που το κάθε ένα θα περιλαμβάνει την χρονοσειρά ενδιαφέροντος, ένα φύλλο για κάθε μια μετρητική μεταβλητή (ταχύτητα ανέμου - κατεύθυνση και ριπή, αν υπάρχει). Τα δεδομένα επομένως αυτά εισάγονται στο πρόγραμμα Υδρογνώμων και διατηρούνται σε μορφή αρχείου με προέκταση \*.hts. Η μορφή αυτή του

αρχείου εξυπηρετεί το γεγονός ότι κάθε φορά που ανοίγουμε ένα αρχείο της μορφής αυτής, γίνεται απευθείας εισαγωγή της χρονοσειράς στο σύστημα - πρόγραμμα και είναι ουσιαστικά έτοιμο για στατιστική ή οποιαδήποτε άλλη επεξεργασία, χωρίς να απαιτούνται επιπλέον ενέργειες για την εισαγωγή των δεδομένων στο σύστημα. Σημαντικό στοιχείο αποτελεί η ορθή διεξαγωγή της παραπάνω εργασίας για την τελική εξαγωγή της αντίστοιχης χρονοσειράς, γιατί οποιοδήποτε λάθος ή αλλοίωση των αρχικών δεδομένων, θα αποτελέσει καθοριστικό παράγοντα για την ασφάλεια των εξαγόμενων συμπερασμάτων από την επεξεργασία των δεδομένων μέσω του προγράμματος. Λάθος εισαγωγή δεδομένων θα οδηγήσει σε επισφαλή - λάθος συμπεράσματα.

### **3.1.3 Πλήθος των δεδομένων και επιλογή των σταθμών μέτρησης.**

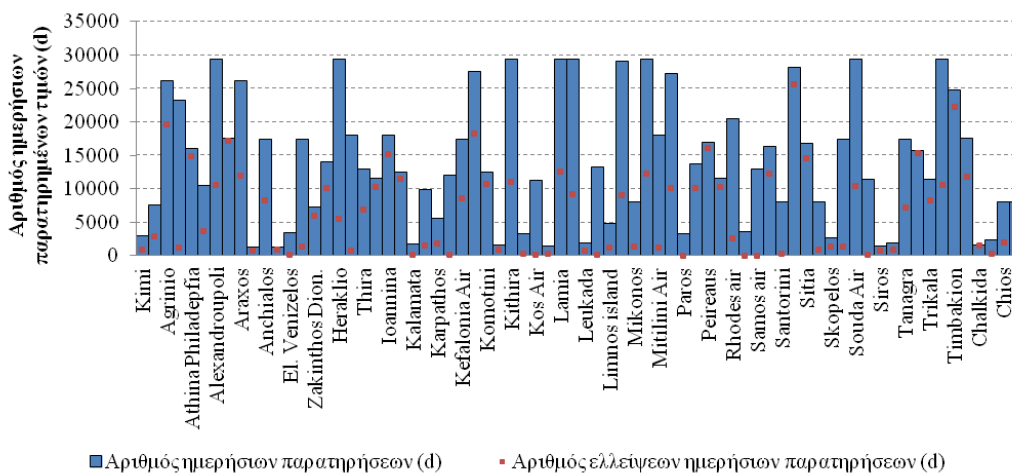
Αρχικά οι σταθμοί επιλογής που αφορούσαν τη μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου στον Ελλαδικό χώρο ήταν 78. Η περίοδος μέτρησης του κάθε σταθμού διέφερε σε κάθε σταθμό όσον αφορά στο πλήθος των δεδομένων αλλά και στη χρονική διακριτότητα των δεδομένων. Οι περισσότερες χρονοσειρές ήταν ακανόνιστου χρονικού βήματος με διακριτότητα μετρήσεων από 10 min έως 1 day στην ίδια χρονοσειρά. Η επεξεργασία επομένως των χρονοσειρών αυτών έγινε στο υπολογιστικό πρόγραμμα Υδρογνώμων, που αρχικά σταθεροποιήθηκε το χρονικό βήμα της κάθε σειράς με βάση τη μικρότερη χρονική διακριτότητα της και μετά πραγματοποιήθηκε η επεξεργασία της κάθε σειράς με συνάθροιση στο αντίστοιχο χρονικό βήμα ενδιαφέροντος. Οι χρονοσειρές που φτιάχτηκαν με το πρόγραμμα αυτό ήταν ημερήσιες - μηνιαίες που κάθε μια από αυτές χρησιμοποιήθηκε για συγκεκριμένο σκοπό στην παρούσα διπλωματική. Στο παράρτημα Α παρατίθεται πίνακας δεδομένων με τους συγκεκριμένους σταθμούς που χρησιμοποιήθηκαν στην επεξεργασία αλλά και με τις ελλείψεις τιμές του κάθε σταθμού.

Από τον συγκεκριμένο πίνακα οι συντεταγμένες του κάθε σταθμού δίνονται σε δεκαδική μορφή και απαιτείται επεξεργασία για την εισαγωγή τους στο ΕΓΣΑ 87 (Ελληνικό γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς). Αρχικά γίνεται η επεξεργασία τους για μετατροπή του δεκαδικού συστήματος συντεταγμένων σε φ και λ συντεταγμένες μετρημένες σε μοίρες πρώτα και δεύτερα. Για να πραγματοποιηθεί ο υπολογισμός αυτός διατηρείται το ακέραιο μέρος το οποίο αποτελεί τις μοίρες και το δεκαδικό μέρος πολλαπλασιάζεται με 60. Το ακέραιο μέρος του εξαγόμενου αποτελέσματος αποτελεί τα πρώτα και το δεκαδικό πολλαπλασιάζεται για μια ακόμα φορά με το 60 και το αποτέλεσμα από την πράξη αυτή αποτελεί τα δεύτερα. Με την παραπάνω διαδικασία οι συντεταγμένες του δεκαδικού συστήματος έχουν μετατραπεί σε συντεταγμένες φ και λ. Οι συντεταγμένες αυτές εισάγονται σε μετατροπέα στο excel gr87transform.xls και μετατρέπονται απευθείας σε συντεταγμένες κατά ΕΓΣΑ87 (πηγή:<http://www.awmn.net/showthread.php?t=9756>). Από το πλήθος των αρχικών σταθμών (78) λόγω έλλειψης δεδομένων τελικά η επεξεργασία πραγματοποιήθηκε σε 66 από αυτούς με τα γεωγραφικά τους στοιχεία να παρατίθενται στον παραπάνω πίνακα. Επίσης, για καλύτερη εποπτεία της διασποράς των σταθμών στον Ελλαδικό χώρο σχεδιάστηκε ο Χάρτης 3.1, που αποτυπώνει τη θέση του κάθε σταθμού στην Ελλάδα.

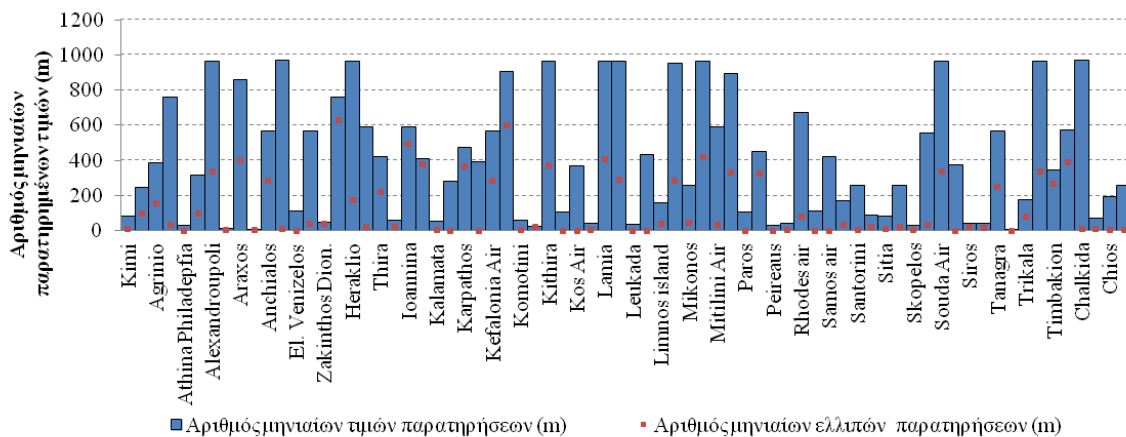


Χάρτης 3.1: Αποτυπώνεται η θέση των σταθμών των δεδομένων στην Ελλάδα.

Από τον παραπάνω Χάρτη 3.1, προκύπτει ότι από το πλήθος των σταθμών και τη διασπορά τους στον Ελλαδικό χώρο, μπορούν να διεξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα όσον αφορά τη στατιστική - στοχαστική επεξεργασία των σταθμών. Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας όσον αφορά την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων αποτελεί και το πλήθος των υπό επεξεργασία δεδομένων. Στα σχήματα 3.1 και 3.2 παρατίθεται το πλήθος των δεδομένων με τις ελλειπείς τιμές του κάθε σταθμού, σε ημερήσια και μηνιαία χρονική κλίμακα.

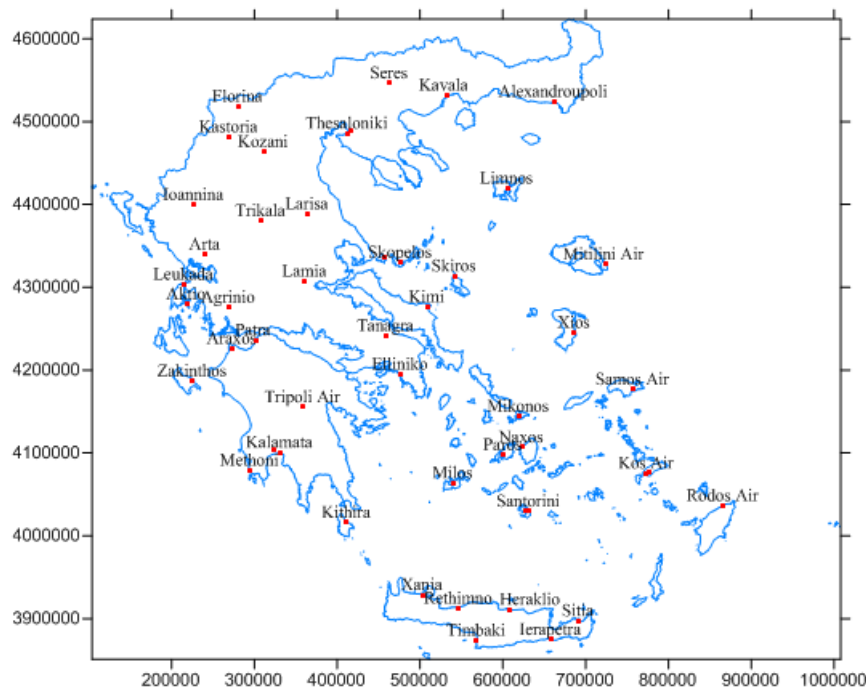


Σχήμα 3.1: Διάγραμμα που αποτυπώνεται ο κάθε σταθμός μέτρησης, στον οριζόντιο άξονα, με τη μπλε ράβδο το πλήθος των μετρήσεων του κάθε σταθμού και με κόκκινη τελεία αποτυπώνεται το πλήθος των ελλειπών δεδομένων, σε ημερήσια χρονική κλίμακα.



Σχήμα 3.2: Διάγραμμα που αποτυπώνεται ο κάθε σταθμός μέτρησης, στον οριζόντιο άξονα, με τη μπλε ράβδο το πλήθος των μετρήσεων του κάθε σταθμού και με κόκκινη τελεία αποτυπώνεται το πλήθος των δεδομένων που λείπουν, σε μηνιαία βάση.

Επομένως, από τα ποσοστά των ελλείπων τιμών σε μηνιαία κυρίως βάση γίνεται επιλογή των τελικών σταθμών επεξεργασίας που αποτυπώνονται στον παρακάτω Χάρτη 3.2.



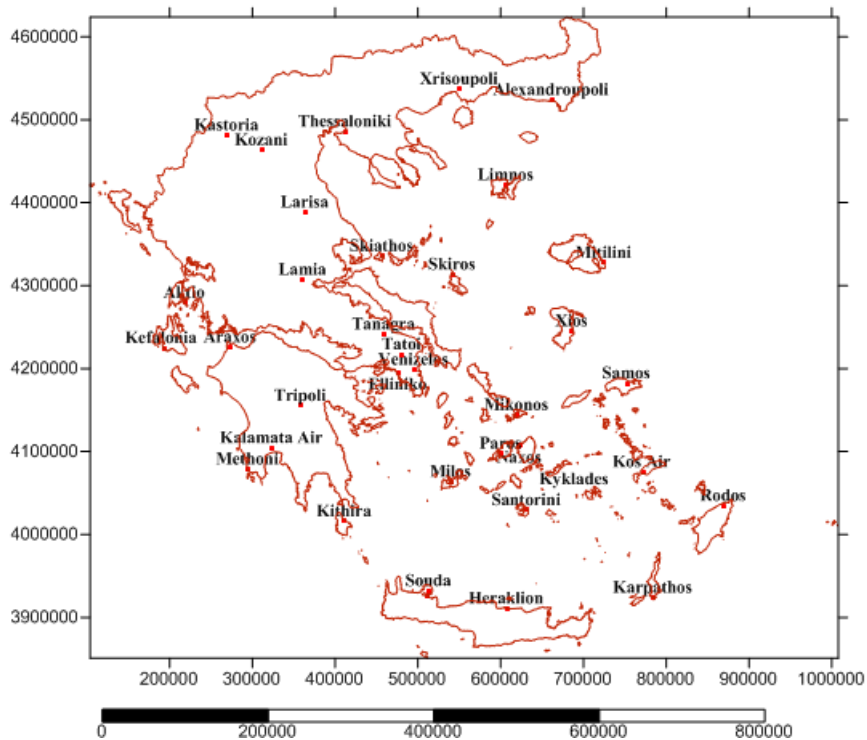
Χάρτης 3.2: Χάρτης που αποτυπώνεται η τελική επιλογή των σταθμών επεξεργασίας.

### 3.1.4 Επεξεργασία των δεδομένων reanalysis

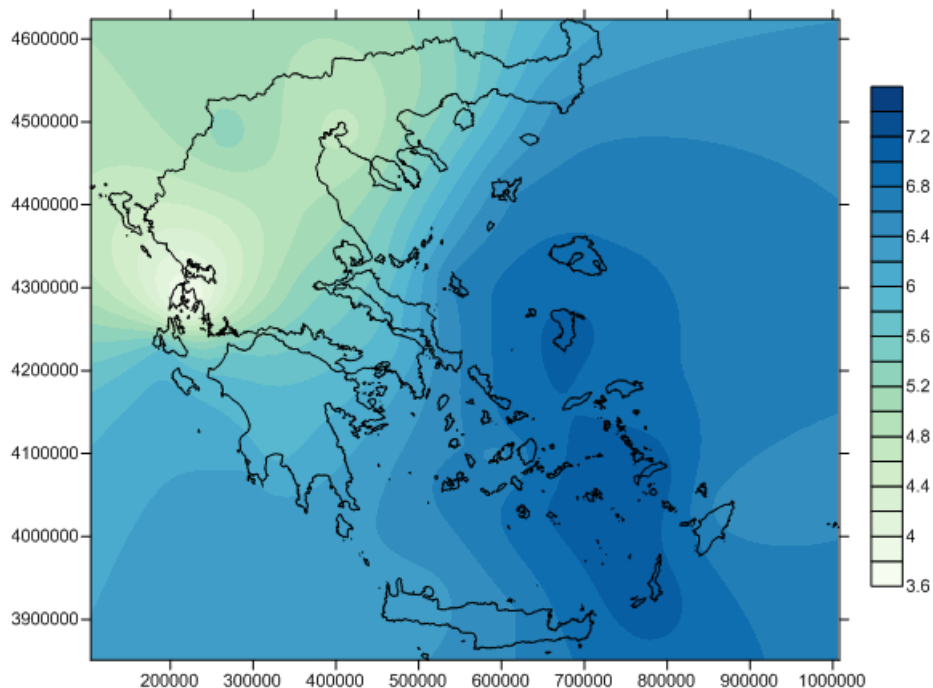
Επιπρόσθετα, στην παρούσα διπλωματική γίνεται και επεξεργασία των δεδομένων reanalysis για 21 σταθμούς για την περίοδο 1/1979 έως 8/2012 για να προκύψει η αξιοπιστία των πραγματικών δεδομένων με τα παραπάνω. Τα δεδομένα αυτά δεν αποτελούν πραγματικές παρατηρήσεις αλλά προσομοιωμένα δεδομένα με ένα μοντέλο στο οποίο προσομοιώνεται η ιστορική πληροφορία της εκάστοτε εξεταζόμενης μεταβλητής, διατηρώντας κάποια στατιστικά χαρακτηριστικά με την ιστορική χρονοσειρά και προσπαθώντας να επιτευχθεί κάποια στατιστική συνέπεια με αυτά. Το πλήθος των σταθμών (36) προσδιορίστηκε από την

περίοδο μέτρησης των δεδομένων reanalysis η οποία θα έπρεπε να είναι απολύτως συμβατή με την περίοδο μέτρησης των πραγματικών δεδομένων για να μπορεί να γίνει η απόλυτη σύγκριση των 2 μεγεθών. Το ύψος μέτρησης και των δυο μεταβλητών είναι στα 10 m για να υπάρχει επίσης και ενιαίο υψόμετρο μέτρησης για να μπορούν να εξαχθούν αξιόπιστα συμπεράσματα από την σύγκριση των 2 μεταβλητών. Η κλίμακα μέτρησης των παραπάνω μεγεθών είναι η μηνιαία για την κοινή περίοδο μέτρησης και το υψόμετρο που προαναφέρθηκε. Παρακάτω, παρατίθεται ο Χάρτης 3.3, με αποτύπωση των 36 σταθμών για τον υπολογισμό της μεταβλητής της ταχύτητας του ανέμου σε μηνιαία βάση.

Σκοπός της παράθεσης των δεδομένων αυτών είναι να υπολογιστεί η ταχύτητα του ανέμου σε μηνιαία βάση και να αντιπαρατεθεί με την πραγματική ταχύτητα του ανέμου στην ίδια χρονική βάση ώστε να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για την ποιότητα των δεδομένων αυτών και για την χρησιμότητά τους σε περιπτώσεις ελλείψεων των μετρήσεων. Παρακάτω παρατίθεται ο Χάρτης 3.4, που αποτυπώνεται η μέση ετήσια ταχύτητα του Ελλαδικού χώρου με την επεξεργασία των δεδομένων reanalysis.



Χάρτης 3.3: Χάρτης με τους 36 σταθμούς των δεδομένων reanalysis.



Χάρτης 3.4: Χάρτης που αποτυπώνει τη μέση ετήσια ταχύτητα (m/s), για τους 36 σταθμούς υπολογισμού των δεδομένων reanalysis στον Ελλαδικό χώρο.

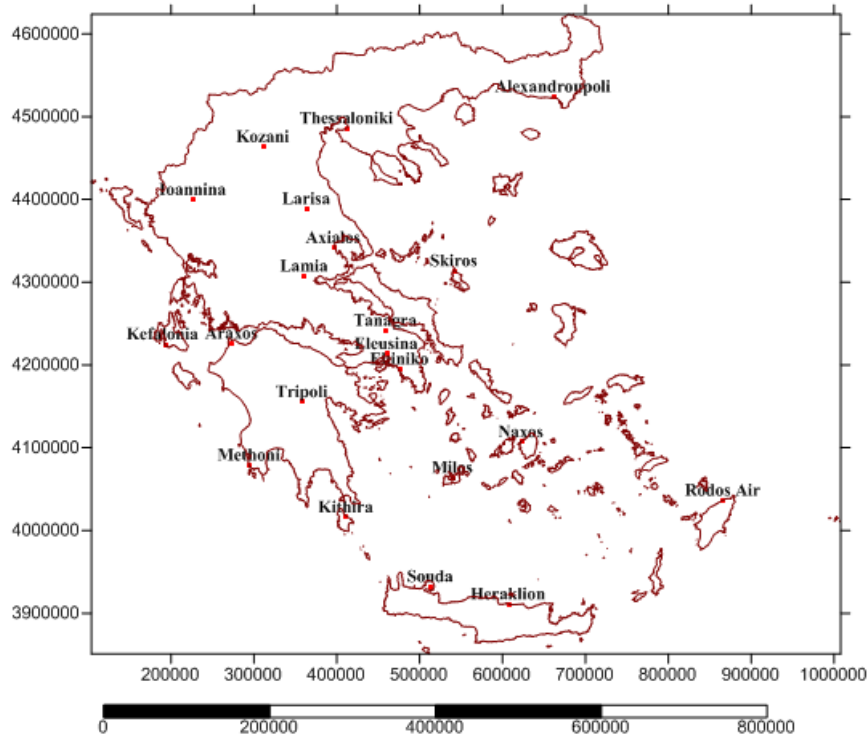
Για την ποσοτικοποίηση της διαφοράς των δεδομένων reanalysis αλλά και των πραγματικών δεδομένων με βάση τα οποία έγινε η παρούσα διπλωματική, υπολογίζονται οι ετεροσυσχετίσεις ανάμεσα στους αντίστοιχους σταθμούς των δεδομένων reanalysis και των πραγματικών, για κάθε έναν σταθμό, για να είναι ικανή μια σύγκριση ανάμεσα στις δυο ομάδες δεδομένων. Για να πραγματοποιηθεί η διαδικασία αυτή επιλέχθηκαν 21 σταθμοί με κοινή περίοδο μέτρησης αλλά και κοινό υψόμετρο μέτρησης στα 10 m για να μπορεί να πραγματοποιηθεί η σύγκριση με κοινό σημείο αναφοράς, επηρεαζόμενο το αποτέλεσμα, από όσο το δυνατόν λιγότερους παράγοντες. Επιπρόσθετα, για να επαληθευτεί αυτή η διαφορά των δυο ομάδων δεδομένων πραγματοποιείται και η παρακάτω διαδικασία. Υπολογίζονται οι ετεροσυσχετίσεις του κάθε σταθμού με όλους τους υπόλοιπους τόσο για τα πραγματικά δεδομένα όσο και για τα δεδομένα reanalysis, με τα ίδια χαρακτηριστικά (κοινό επίπεδο μέτρησης και περίοδο μέτρησης) και δημιουργούνται δυο πίνακες, ένας για κάθε ομάδα δεδομένων, που αντιπροσωπεύει τις ετεροσυσχετίσεις των σταθμών μεταξύ τους. Παίρνοντας τις ετεροσυσχετίσεις του κάθε σταθμού με τους υπόλοιπους και από τις δυο ομάδες για τον ίδιο σταθμό, μπορούμε και πάλι να υπολογίσουμε τις ετεροσυσχετίσεις του κάθε σταθμού με τους υπόλοιπους από κάθε ομάδα (κοινό σταθμό) ώστε να προκύψουν οι ετεροσυσχετίσεις μεταξύ των σταθμών - και των ετεροσυσχετίσεων των υπόλοιπων σταθμών - για κάθε ομάδα.

Από την παραπάνω διαδικασία προκύπτουν δυο πίνακες που ο πρώτος αποτελείται από τις ετεροσυσχετίσεις των σταθμών σε κάθε ομάδα δεδομένων και ο δεύτερος αποτελείται από τις ετεροσυσχετίσεις των ετεροσυσχετίσεων των σταθμών με τους υπόλοιπους για κάθε ομάδα και για τις δυο ομάδες. Στο παράρτημα A7 - A8, παρατίθενται οι πίνακες υπολογισμού και για τις δυο διαδικασίες, ενώ για την καλύτερη εποπτεία των αποτελεσμάτων πραγματοποιείται η παράθεση των δεδομένων των πινάκων σε χάρτες, ώστε να είναι πιο εμφανείς οι υπολογιζόμενες ετεροσυσχετίσεις.

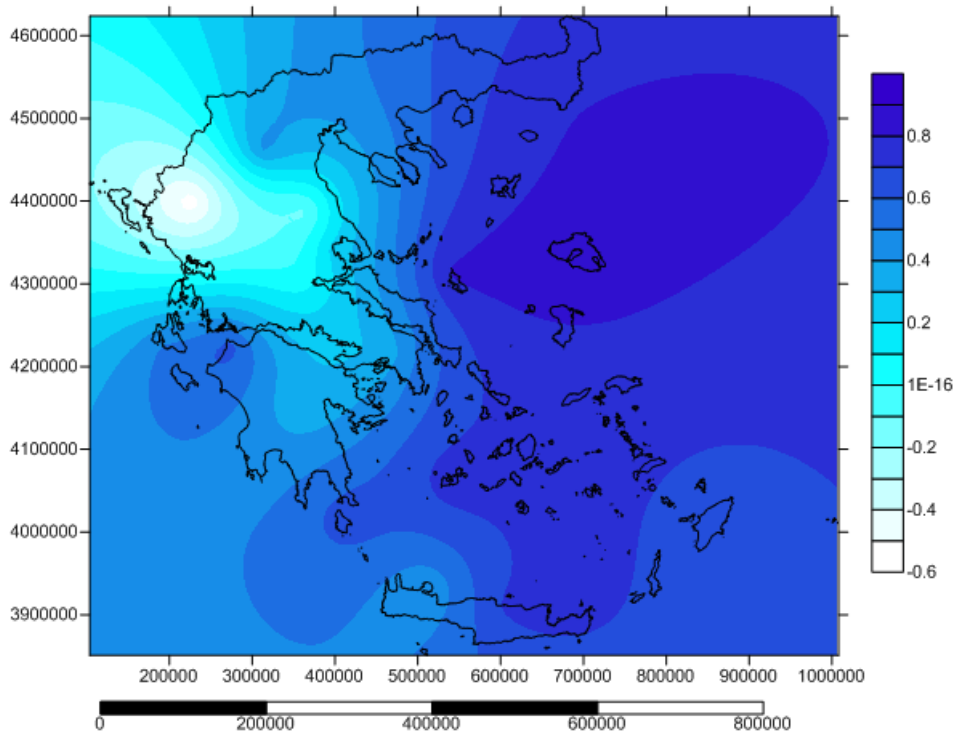
Για την εύρεση των παραπάνω ετεροσυσχετίσεων και για τις δυο ομάδες δεδομένων πραγματοποιήθηκε η ίδια διαδικασία. Παρατέθηκαν τα δεδομένα των μέσων μηνιαίων



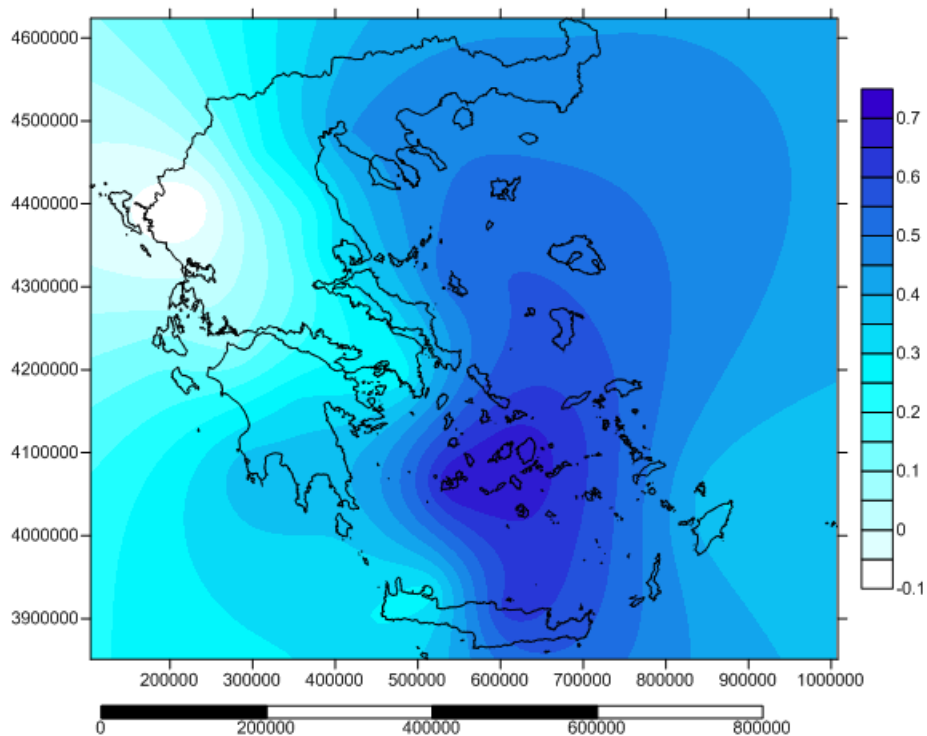
ταχυτήτων σε πίνακα με τα έτη των μετρημένων τιμών για την περίοδο από 1/1979 έως 8/2012. Υπολογίστηκαν οι ετεροσυσχετίσεις του κάθε σταθμού από κάθε ομάδα με τον κοινό σταθμό τους από την άλλη ομάδα για μηδενική υστέρηση (lag). Από την παραπάνω διαδικασία προέκυψαν 21 τιμές όσες και οι σταθμοί. Επιπρόσθετα, αφού έγινε ο υπολογισμός των ετεροσυσχετίσεων κάθε σταθμού με τους υπόλοιπους από κάθε ομάδα, τοποθετήθηκαν οι τιμές σε έναν πίνακα, για την κάθε ομάδα δεδομένων και υπολογίστηκαν οι ετεροσυσχετίσεις αυτές μεταξύ τους. Το αποτέλεσμα της παραπάνω διαδικασία έγινε για μηδενική υστέρηση επομένως το αποτέλεσμα είναι για μια ακόμα φορά 21 τιμές, όσοι και οι σταθμοί υπολογισμού. Παρακάτω παρατίθενται οι χάρτες 3.5, 3.6 και 3.7, που προέκυψαν από τις δυο παραπάνω διαδικασίες.



Χάρτης 3.5: Χάρτης που δείχνει τους σταθμούς με τους οποίους έγιναν οι ετεροσυσχετίσεις για τις δυο ανωτέρω περιγραφόμενες διαδικασίες.



Χάρτης 3.6: Χάρτης που αποτυπώνονται σε ισarithμικές καμπύλες οι ετεροσυσχετίσεις του κάθε σταθμού για τις δυο ομάδες δεδομένων (reanalysis και πραγματικά).

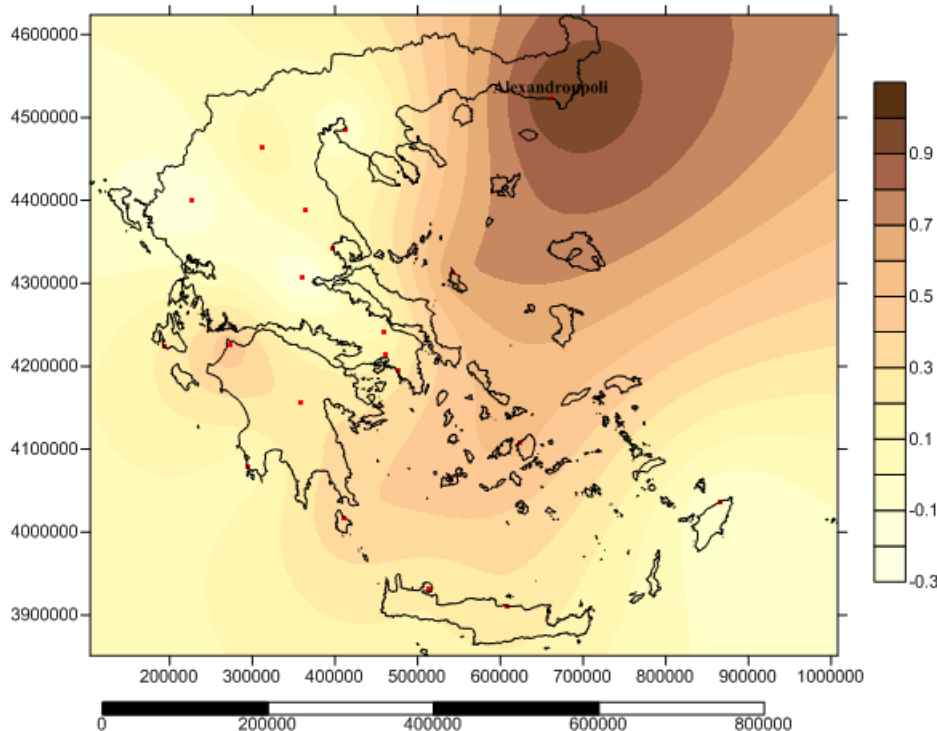


Χάρτης 3.7: Χάρτης που αποτυπώνονται σε ισarithμικές καμπύλες οι ετεροσυσχετίσεις των ετεροσυσχετίσεων του κάθε σταθμού με όλους τους υπόλοιπους από κάθε ομάδα δεδομένων (reanalysis και πραγματικά).

Από τον Χάρτη 3.6, γίνεται κατανοητό ότι τα δεδομένα reanalysis μπορεί να μην ταυτίζονται με τα πραγματικά, αλλά δίνουν τις ίδιες περιοχές κατηγοριών ανέμου. Το γεγονός αυτό

γίνεται κατανοητό από το αποτέλεσμα των ετεροσυσχετίσεων του κάθε σταθμού με τον ίδιο από κάθε ομάδα με τη μέγιστη ετεροσυσχέτιση πλησιάζει το 0.80 ενώ στα περισσότερα σημεία - σταθμούς είναι κάτω από το 0.5 που σημαίνει ότι τα δεδομένα μεταξύ τους δεν έχουν καλή συσχέτιση. Επιπρόσθετα, το ίδιο συμπέρασμα προκύπτει και από την εξέταση του Χάρτη 3.7, με μάλιστα λιγότερο θετικά αποτελέσματα αφού η μέγιστη ετεροσυσχέτιση των σταθμών πλησιάζει το 0.70 και το μεγαλύτερο ποσοστό των σταθμών είναι κάτω από την τιμή του 0.5 που εκφράζει μικρή συσχέτιση ανάμεσα στα δεδομένα. Ιδιαίτερα όμως σε περιοχές που εμφανίζονται οι μεγαλύτερες ταχύτητες του ανέμου (Κ. Αιγαίο και συνολικότερα στο Αιγαίο) οι συσχετίσεις ανάμεσα στις δυο μεταβλητές είναι αρκετά ικανοποιητικές.

Τέλος στο παράρτημα Β6 παρατίθενται οι ετεροσυσχετίσεις του κάθε σταθμού με όλους τους υπόλοιπους 21 για τα πραγματικά δεδομένα. Από τους χάρτες του παραρτήματος, εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα όσον αφορά τη διατήρηση των ετεροσυσχετίσεων με την απόσταση από τον κάθε σταθμό. Σταθμοί παραθαλάσσιοι και νησιωτικοί που δεν παρεμβάλλονται γεωμορφολογικά εμπόδια ανάμεσά τους και έντονη ορειογραφία, διατηρούν τις ετεροσυσχετίσεις ανάμεσα στους σταθμούς για αρκετά μεγάλη απόσταση σχετικά με τους ηπειρωτικούς σταθμούς και δη αυτούς που βρίσκονται σε περιοχές με έντονο γεωμορφολογικό ανάγλυφο. Για παράδειγμα αναφέρεται ο σταθμός της Αλεξανδρούπολης, Χάρτης 3.8, με όλους τους υπόλοιπους για τα πραγματικά δεδομένα και γίνεται αντιληπτό ότι η ετεροσυσχέτιση του σταθμού αυτού διατηρείται για μέση απόσταση περίπου 270 km. Η διατήρηση κάποιας ετεροσυσχέτισης ανάμεσα στους σταθμούς γίνεται με όριο το 0.5.



Χάρτης 3.8: Χάρτης ετεροσυσχετίσεων του σταθμού της Αλεξανδρούπολης για τα πραγματικά δεδομένα.

Στο παράρτημα Β7 παρατίθενται χάρτες σε μηνιαία ετήσια και εποχιακή βάση για τα δεδομένα reanalysis των παραπάνω σταθμών.

### 3.1.5 Καταστροφικά φαινόμενα στον Ελλαδικό χώρο που οφείλονται στον άνεμο.

Το κλίμα της Ελλάδος, που οφείλεται στη γεωγραφική της θέση χαρακτηρίζεται ως εύκρατο, με υγρούς χειμώνες και ζεστά καλοκαίρια. Το πολύπλοκο όμως γεωγραφικό της ανάγλυφο δημιουργεί κάποιες τοπικές ιδιαιτερότητες που διαφοροποιούν το κλίμα σε συγκεκριμένες περιοχές, με τρόπο, ώστε να πραγματοποιούνται πιο έντονα μετεωρολογικά φαινόμενα σε κάποιες περιοχές. Η οροσειρά της Πίνδου προκαλεί μεγάλες βροχοπτώσεις στη δυτική Ελλάδα και ομβροσκιά στην ανατολική με έντονες διαφοροποιήσεις στην πνοή του ανέμου και μεταβολή στο βαρομετρικό του κάθε τύπου. Επίδραση στο μικροκλίμα της κάθε περιοχής παρατηρείται και από την πνοή του ανέμου (ένταση και διεύθυνση) που διαφοροποιείται κυρίως από την ηπειρωτική και τη νησιωτική χώρα και οφείλεται στη μεγάλη θερμοχωρητικότητα της θάλασσας, η οποία έχει την ιδιότητα να διατηρεί τη θερμοκρασία της για μεγάλο χρονικό διάστημα προκαλώντας έντονες θερμοκρασιακές διαφοροποιήσεις με το υπόλοιπο περιβάλλον. Το γεγονός αυτό προκαλεί έντονες διαφοροποιήσεις στη διεύθυνση αλλά και στην ένταση του ανέμου που σε συνδυασμό με το έντονο γεωμορφολογικό ανάγλυφο μπορεί να προκαλέσει ο άνεμος καταστροφικά φαινόμενα τοπικά ακόμα και για λίγες ώρες.

Τα πιο συχνά καταστροφικά φαινόμενα που οφείλονται κυρίως στους παραπάνω παράγοντες είναι κυρίως οι ανεμοθύελλες, οι αμμοθύελλες που προέρχονται από τη βόρειο Αφρική, οι ανεμοστρόβιλοι, τα παλιρροϊκά κύματα, οι λασποβροχές, τα funnel clouds καθώς και η επιτάχυνση του ανέμου, που σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να φτάσει και να ξεπεράσει τα 180 km/h. Η ένταση των παραπάνω φαινομένων μπορεί να είναι τέτοια που μπορεί να προκαλέσει απώλεια ζωών με άμεσο ή έμμεσο τρόπο, προκαλώντας ναυάγια ή πτώσεις μεταφορικών μέσων (αεροπλάνα - ελικόπτερα) στοιχίζοντας τη ζωή σε δεκάδες ανθρώπους.

Τα funnel cloud (χοανοειδές σύννεφο) συνήθως αποτελούν την αιτία ενός ανεμοστρόβιλου. Είναι ένα σύννεφο σε σχήμα χωνιού, που συνδέεται με μια περιστρεφόμενη στήλη αέρα και εκτείνεται από τη βάση του νέφους (συνήθως σύννεφα που βρίσκονται σε μεγάλο υψόμετρο με πυκνή παρουσία υδρατμών - cumulus) , που όμως δεν φτάνουν το έδαφος ή την επιφάνεια του νερού, εάν είναι πάνω από υδάτινη επιφάνεια. Ένα τέτοιο σύννεφο είναι συνήθως ορατό με τη μορφή κωνικού σχήματος ή βελόνας, που όμως προεξέχει από την κύρια βάση του σύννεφου. Συνήθως σύννεφα τέτοιου είδους συνδυάζονται με υπέρ - καταγιδοφόρα νέφη.

Εάν ένα τέτοιο σύννεφο χοάνη αγγίζει το έδαφος, γίνεται ανεμοστρόβιλος. Οι περισσότεροι ανεμοστρόβιλοι προκαλούνται από τέτοιους σχηματισμούς των νεφών, αλλά πολλά από αυτά δεν έρχονται σε επαφή με το έδαφος και έτσι δεν μετατρέπονται σε ανεμοστρόβιλους ή με το νερό ώστε να γίνουν υδροστρόβιλοι. Δεν είναι όμως πάντα απαραίτητη η ύπαρξη funnel cloud για την εμφάνιση ενός ανεμοστρόβιλου, αλλά προκαλούνται κυρίως από την κυκλωνική ροή του ανέμου που σε συνδυασμό με την επιφάνεια του εδάφους μπορεί να προκαλέσει αντίστοιχα φαινόμενα. Ορισμένοι ανεμοστρόβιλοι μπορεί να εμφανίζονται μόνο ως δίνη, χωρίς προφανή χοάνη που εκτείνεται κάτω από τη βάση των νεφών. Είναι αισθητός ένας τέτοιος σχηματισμός και από τον παραγόμενο ήχο που περιγράφεται σαν βούισμα μελισσών, ή σαν την πτώση του νερού από έναν καταρράκτη. Επίσης, χαρακτηριστικό είναι και ότι η πίεση του περιβάλλοντος χώρου μειώνεται αισθητά σε βαθμό που μπορεί να προκαλέσει και τραυματισμό. (Cooley J. R., and M. E. Soderberg, 1973: *Cold air funnels clouds. NOAA Tech. Memo. NWS CR-52, Scientific Services Division, NWS Central Region, Kansas City, MO, 29 pp*)

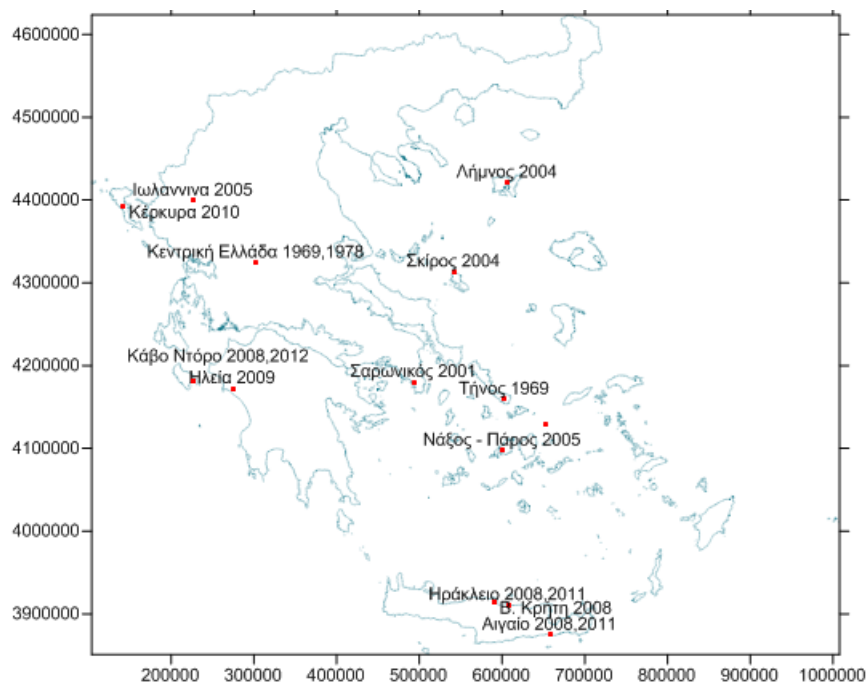
Ενώ φυσικές καταστροφές που οφείλονται κυρίως στις πλημμύρες μπορούν με κάποιο βαθμό αξιοπιστίας να προβλεφθούν αλλά και να αντιμετωπιστούν, η ταχύτητα του ανέμου, είναι

πολύ δύσκολο να προβλεφθεί με ικανό βαθμό αξιοπιστίας αλλά και οι καταστροφικές επιπτώσεις των έντονων φαινομένων είναι πολύ δύσκολο να αντιμετωπιστούν. Επιπρόσθετα, ενώ στις περισσότερες των περιπτώσεων, οι πλημμύρες οφείλονται στην ανυπαρξία αντιπλημμυρικών έργων ή και σε λανθασμένες αντιπλημμυρικές μελέτες, όσον αφορά τις καταστροφικές επιπτώσεις από τη πνοή του ανέμου δεν είναι καθόλου εύκολο έως και αδύνατο κάτι τέτοιο να αντιμετωπιστεί ορθά με τέτοιου είδους πολιτικές. Η έντονη ταχύτητα του ανέμου που μπορεί να εμφανιστεί σε οποιαδήποτε περιοχή, με οποιαδήποτε ένταση αλλά και με οποιαδήποτε διάρκεια δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί εύκολα οργανωμένα και συστηματικά. Ιδιαίτερα σε χώρες όπως η Ελλάδα που τα φαινόμενα αυτά είναι αρκετά σπάνια αλλά υπαρκτά, είναι αρκετά επίπονο να δημιουργηθεί οργανωμένος μηχανισμός αντιμετώπισης καταστροφών, που να οφείλονται σε ακραία ανεμολογικά μετεωρολογικά φαινόμενα. Η αντιμετώπιση τέτοιων φαινομένων γίνεται κυρίως σε ατομικό και ιδιωτικό επίπεδο, με μέτρα προστασίας που λαμβάνει καθένας για τη διάσωση της ιδιωτικής του περιουσίας και ζωής.

Παρακάτω παρατίθενται 12 χάρτες στους όποιους έχουν ομαδοποιηθεί τα κυριότερα καταστροφικά φαινόμενα και δυστυχήματα που έχουν προκληθεί από την έντονη ταχύτητα του ανέμου στον Ελλαδικό χώρο. Τα δεδομένα αυτά αναφέρονται σε καταστροφικά φαινόμενα που οφείλονται σε έντονα μετεωρολογικά φαινόμενα στον Ελλαδικό χώρο, από τα τέλη του 19ου αιώνα μέχρι σήμερα. Τα φαινόμενα αυτά έχουν διακριτοποιηθεί μόνο σε αυτά που οφείλονται στην έντονη ταχύτητα του ανέμου και τα άμεσα ή έμμεσα αποτελέσματα που μπορεί αυτή να έχει. Τέλος, ομαδοποιούνται και καταρτίζονται στους χάρτες 3.9-3.20, τα φαινόμενα αυτά ανάλογα με τον αντίστοιχο μήνα που αυτά παρουσιάστηκαν, για να βρεθεί κάποιο ενδεχόμενο σχήμα περιοδικότητας, ακόμα και σε αυτά τα ακραία γεγονότα ή μήπως προκύψουν κάποια χρήσιμα συμπεράσματα όσον αφορά την εμμονή επισύμβασης των γεγονότων αυτών σε συγκεκριμένες περιοχές. Στους χάρτες 3.9-3.20, που παρατίθενται παρακάτω σημειώνεται η περιοχή που συνέβη το ακραίο γεγονός αλλά και η χρονολογία που αυτό συνέβη. Επίσης σε κάθε χάρτη προσαρτάται πίνακας 3.1-3.12, με περισσότερες πληροφορίες σχετικά με το αντίστοιχο γεγονός που αποτυπώνεται στον εκάστοτε χάρτη<sup>1</sup>.

---

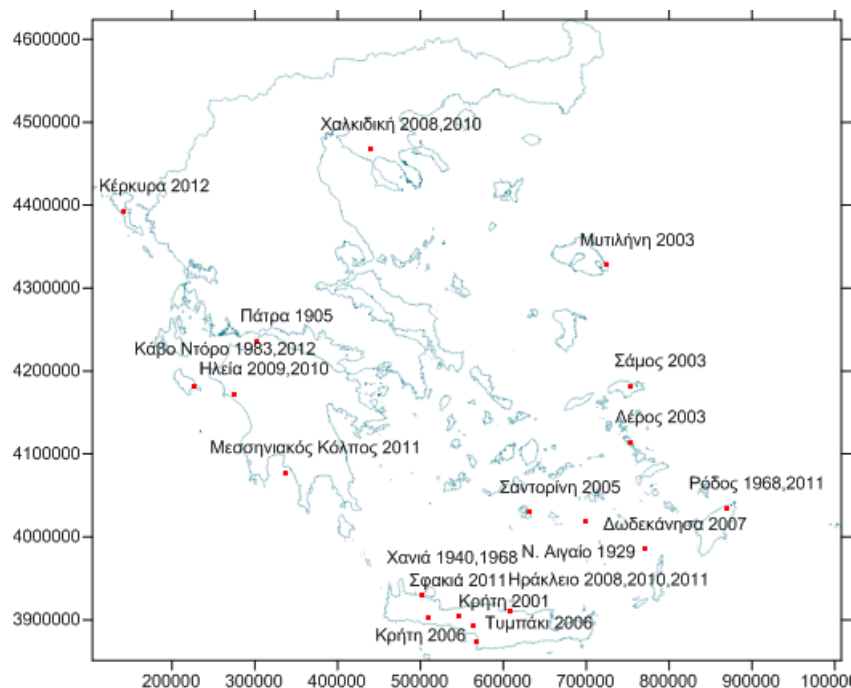
<sup>1</sup> Οι πίνακες που κολουθούν στο υποκεφάλαιο 3.1.5 περιέχουν στοιχεία από την πηγή: *Ενοποιημένο αρχείο ερασιτεχνών μετεωρολόγων, ESWD και εθνικών υπηρεσιών (Εθνική Βιβλιοθήκη, EPT, EAA)*.



Χάρτης 3.9: Χάρτης στον οποίο απεικονίζεται η περιοχή και το έτος που συνέβη καταστροφικό φαινόμενο που οφείλεται στον άνεμο, για το μήνα Ιανουάριο στον Ελλαδικό χώρο.

Πίνακας 3.1: Πίνακας: Καταστροφικά φαινόμενα στον Ελλαδικό χώρο για το μήνα Ιανουάριο.

Έτος	Περιοχή	Γ. μήκος	Γ. πλάτος	Καταστροφικό φαινόμενο	Θάνατοι
1978	Κεντρική Ελλάδα	303021.64	4324235.65	Ανεμοθύελλα	
2012	Κάβο Ντόρο	227491.37	4181286.89	144.8 km/h	
2001	Σαρωνικός	493761.50	4180113.99	Πτώση ελικοπτερου	4
2005	Ιωάννινα	227083.94	4399306.19	Ανεμοθύελλα	
2008	Αιγαίο	658127.15	3874414.78	Ανεμοστρόβιλος	
2008	Ηράκλειο	607494.19	3910589.58	Ανεμοστρόβιλος	
2008	Κάβο Ντόρο	227491.37	4181286.89	138.4 km/h	
1969	Τήνος	603218.52	4159150.08	Ανεμοθύελλα	
1969	Κεντρική Ελλάδα	590588.49	3914501.46	Ανεμοθύελλα	
2004	Λήμνος	606805.69	4421044.16	Ανεμοθύελλα	
2004	Σκύρος	541824.12	4313219.19	Ανεμοθύελλα	
2008	Βόρεια Κρήτη	590588.49	3914501.46	100 km/h	
2011	Αιγαίο	652585.49	4128401.90	Έντονοι Β. Άνεμοι	
2009	Ηλεία	274587.12	4172398.79	Υδροστρόβιλος	
2005	Νάξος - Πάρος	600769.56	4097351.85	Υδροστρόβιλος	
2010	Κέρκυρα	142049.55	4392876.29	Υδροστρόβιλος	
2011	Ηράκλειο	607494.19	3910589.58	Υδροστρόβιλος	

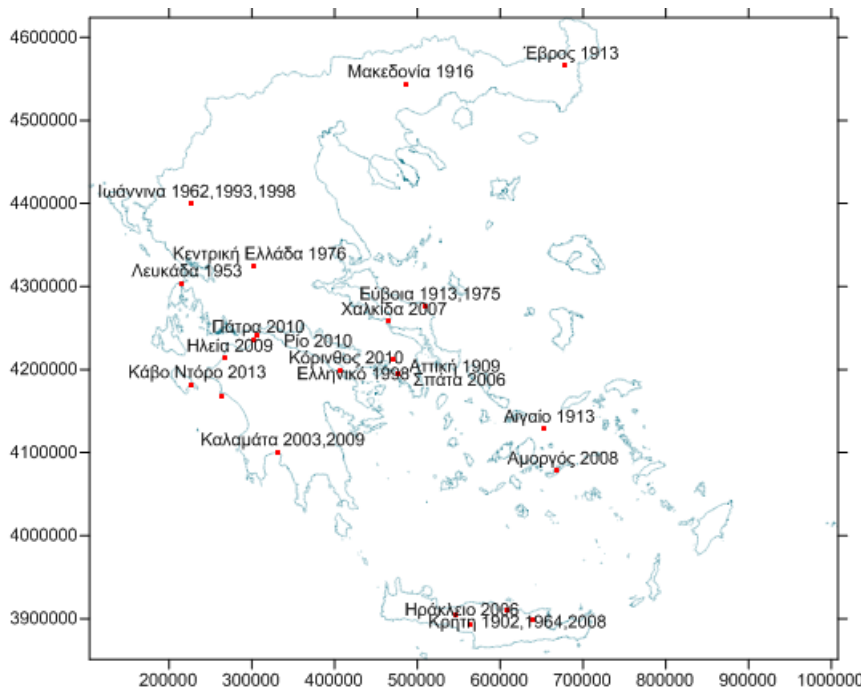


Χάρτης 3.10: Χάρτης στον οποίο απεικονίζεται η περιοχή και το έτος που συνέβη καταστροφικό φαινόμενο που οφείλεται στον άνεμο, για το μήνα Φεβρουάριο στον Ελλαδικό χώρο.

Πίνακας 3.2: Καταστροφικά φαινόμενα στον Ελλαδικό χώρο για το μήνα Φεβρουάριο.

Έτος	Περιοχή	Γ. Μήκος	Γ. Πλάτος	Καταστροφικό φαινόμενο	Θάνατοι
1968	Ρόδος	869343.90	4034284.45	Ναυάγιο	
2012	Κάβο Ντόρο	227491.37	4181286.89	127.1km/h	
2003	Μυτιλήνη	724942.29	4327423.29	Ανεμοθύελλα	
2003	Σάμος	752588.79	4181948.31	Ανεμοθύελλα	
2003	Λέρος	753170.25	4114176.19	Ανεμοθύελλα	
2010	Χαλκιδική	439850.65	4467369.88	Ανεμοστρόβιλος	
2011	Σφακιά	508691.57	3902250.55	Ανεμοθύελλα	
1929	Νότιο Αιγαίο	699339.93	4019418.12	Ανεμοθύελλα	
1940	Χανιά	501586.88	3929849.11	Ανεμοθύελλα	
1983	Κάβο Ντόρο	227913.77	4181286.89	Ανεμοθύελλα	28
2011	Ρόδος	869343.90	4034284.45	Ανεμοθύελλα	
2006	Κρήτη	546559.15	3903660.33	Αμμοθύελλα	
2007	Δωδεκάνησα	770618.40	3984971.13	Αμμοθύελλα	
2001	Κρήτη	564579.06	3892125.89	Αμμοθύελλα	
2005	Σαντορίνη	631545.61	4029315.21	Ανεμοθύελλα	
1905	Πάτρα	301609.39	4235984.41	Ανεμοθύελλα	
1968	Χανιά	501586.88	3929849.11	Παλιρροϊκό κ.	6
2010	Ηλεία	274587.12	4172398.78	Υδροστρόβιλος	
2012	Κέρκυρα	142049.54	4392876.29	Υδροστρόβιλος	
2006	Τυμπάκι	568439.41	3873299.99	Υδροστρόβιλος	

Έτος	Περιοχή	Γ. Μήκος	Γ. Πλάτος	Καταστροφικό φαινόμενο	Θάνατοι (Συνέχεια)
2009	Ηλείας	274587.12	4172398787	Υδροστρόβιλος	
2011	Ηράκλειο	607494.19	3910589.58	Υδροστρόβιλος	
2008	Ηράκλειο	607494.19	3910589.58	Υδροστρόβιλος	
2010	Ηράκλειο	607494.19	3910589.58	Υδροστρόβιλος	
2008	Χαλκιδική	439850.65	4467369.88	Υδροστρόβιλος	
2011	Μεσσηνία Κ.	336680.86	4077609.75	Υδροστρόβιλος	



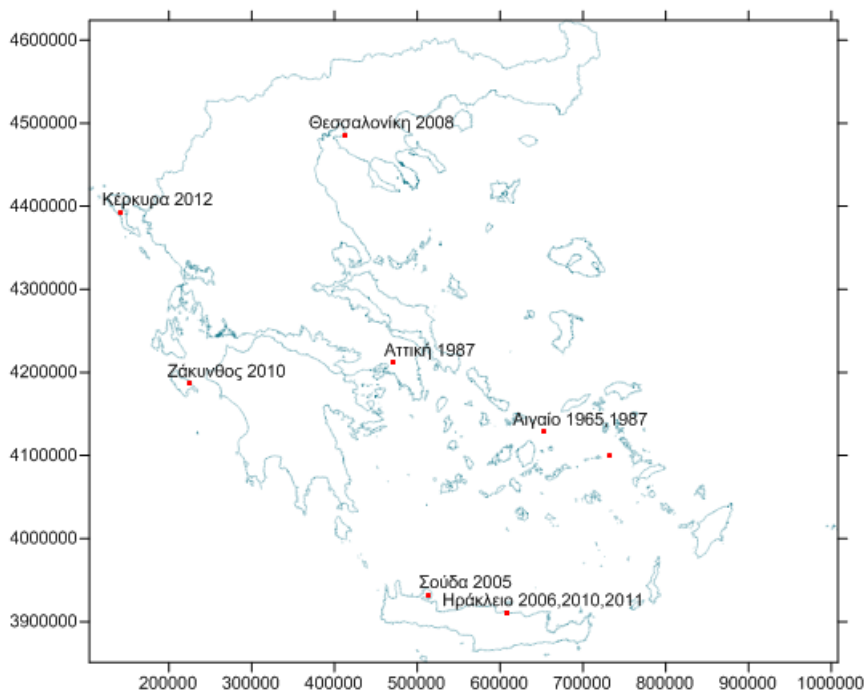
Χάρτης 3.11: Στον οποίο απεικονίζεται η περιοχή και το έτος που συνέβη καταστροφικό φαινόμενο που οφείλεται στον άνεμο, για το μήνα Μάρτιο στον Ελλαδικό χώρο.

Πίνακας 3.3: Καταστροφικά φαινόμενα στον Ελλαδικό χώρο για το μήνα Μάρτιο.

Έτος	Περιοχή	Γ. μήκος	Γ. πλάτος	Καταστροφικό φαινόμενο	Θάνατοι
1913	Εύβοια	508703.75	4276031.57	Ανεμοθύελλα	
1913	Αιγαίο	652585.49	4128401.90	Ανεμοθύελλα	
1913	Έβρος	678855.64	4565991.85	Ανεμοθύελλα	
1902	Κρήτη	546559.15	3903660.34	Αφρικ. Σκόνη	
1916	Μακεδονία	485384.82	4543366.20	Ανεμοθύελλα	10
2010	Κόρινθος	407727.44	4198876.41	Αφρικ. Σκόνη	
2010	Ρίο	305883.40	4241772.12	100km/h	
2010	Πάτρα	301609.39	4235984.42	100km/h	
1953	Λευκάδα	215012.88	4303342.94	Funnel cloud	
2006	Σπάτα	476506.75	4194753.56	Ανεμοθύελλα	
1962	Ιωάννινα	227083.94	4399306.19	Ανεμοθύελλα	
1964	Κρήτη	564579.06	3892125.90	Ανεμοθύελλα	
2003	Καλαμάτα	331009.48	4100196.43	100km/h	



Έτος	Περιοχή	Γ. μήκος	Γ. πλάτος	Καταστροφικό φαινόμενο	Θάνατοι (Συνέχεια)
2007	Χαλκίδα	465104.85	4257701.31	Ανεμοθύελλα	
1909	Αττική	470778.43	4211415.00	Ανεμοθύελλα	
2008	Κρήτη	640067.36	3897724.50	Αφρικ. Σκόνη	
1998	Ιωάννινα	227083.94	4399306.19	Ανεμοθύελλα	
1998	Ελληνικό	476506.75	4194753.56	120km/h	
2009	Ηλεία	267075.01	4213486.40	Ανεμοστρόβιλος	2
2013	Κάβο Ντόρο	227491.37	4181286.89	140km/h	
1975	Εύβοια	263780.47	4168381.38	Ανεμοθύελλα	
1993	Ιωάννινα	227083.94	4399306.19	Ανεμοθύελλα	
1976	Κεντρική Ελλάδα	303021.64	4324235.65	Ανεμοθύελλα	
2006	Ηράκλειο	607494.19	3910589.59	Υδροστρόβιλος	
2009	Καλαμάτα	331009.48	4100196.43	Υδροστρόβιλος	
2008	Αμοργός	669139.83	4077784.97	Υδροστρόβιλος	

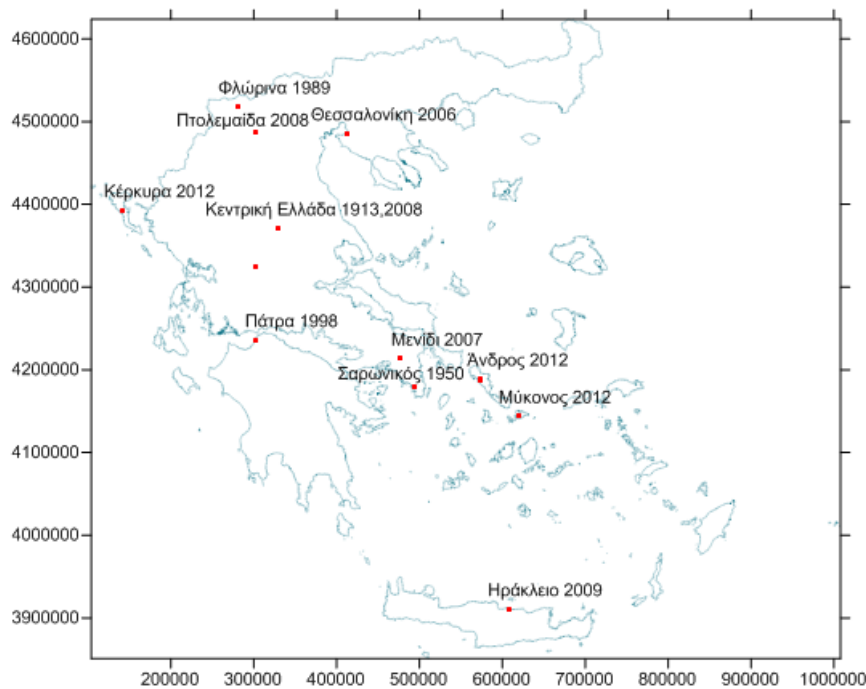


Χάρτης 3.12: Στον οποίο απεικονίζεται η περιοχή και το έτος που συνέβη καταστροφικό φαινόμενο που οφείλεται στον άνεμο, για το μήνα Απρίλιο στον Ελλαδικό χώρο.

Πίνακας 3.4: Καταστροφικά φαινόμενα στον Ελλαδικό χώρο για το μήνα Απρίλιο.

Έτος	Περιοχή	Γ. μήκος	Γ. πλάτος	Καταστροφικό φαινόμενο	Θάνατοι
2005	Σούδα	513598.44	3932139.04	Αφρικ. σκόνη	
1965	Αιγαίο	652585.49	4128401.90	Λασποβροχή	
1987	Αιγαίο	731361.27	4099791.07	10-11 Beaufort	
1987	Αττική	470778.43	4211414.99	10-11 Beaufort	
2006	Ηράκλειο	607494.19	3910589.58	Υδροστρόβιλος	
2011	Ηράκλειο	607494.19	3910589.58	Υδροστρόβιλος	

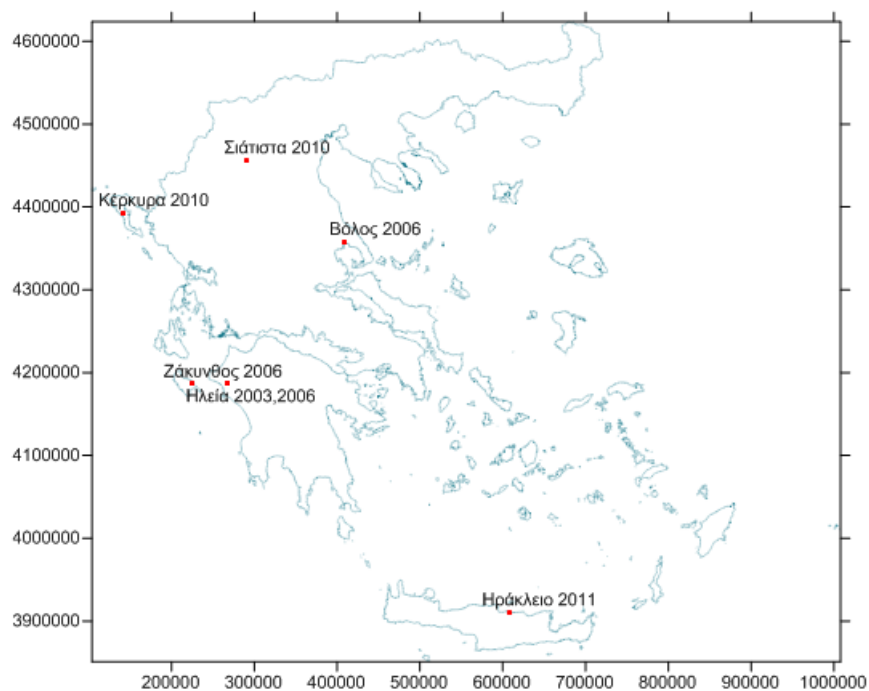
Έτος	Περιοχή	Γ. μήκος	Γ. πλάτος	Καταστροφικό φαινόμενο	Θάνατοι
2010	Ηράκλειο	607494.19	3910589.58	Υδροστρόβιλος	
2012	Κέρκυρα	142049.54	4392876.29	Υδροστρόβιλος	
2010	Ζάκυνθος	225476.84	4186292.07	Υδροστρόβιλος	
2008	Θεσσαλονίκη	412486.49	4485648.15	Υδροστρόβιλος	



Χάρτης 3.13: Στον οποίο απεικονίζεται η περιοχή και το έτος που συνέβη καταστροφικό φαινόμενο που οφείλεται στον άνεμο, για το μήνα Μάιο στον Ελλαδικό χώρο.

Πίνακας 3.5: Καταστροφικά φαινόμενα στον Ελλαδικό χώρο για το μήνα Μάιο.

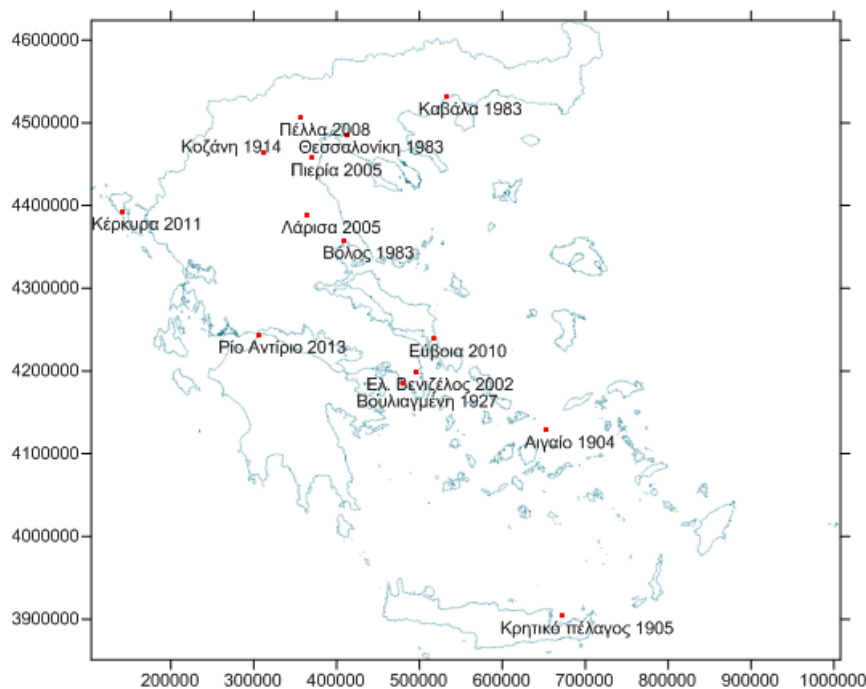
Έτος	Περιοχή	Γ. μήκος	Γ. πλάτος	Καταστροφικό φαινόμενο	Θάνατοι
1950	Σαρωνικός	493761.50	4180113.99	Ανεμοθύελλα	
1913	Κ. Ελλάδα	328537.52	4370954.84	Ναυάγιο	1
1989	Φλώρινα	280608.51	4517896.48	Ανεμοθύελλα	1
1998	Πάτρα	301609.39	4235984.41	Ανεμοθύελλα	
2006	Θεσσαλονίκη	412486.49	4485648.15	Ανεμοστρόβιλος	
2008	Κ. Ελλάδα	303021.64	4324235.65	Αφρικ. σκόνη	
2007	Μενίδι	476999.38	4213583.34	funnel cloud	
2012	Άνδρος	574368.61	4189077.54	Ανεμοστρόβιλος	
2008	Πτολεμαΐδα	302832.64	4486318.46	Ανεμοστρόβιλος	
2009	Ηράκλειο	607494.19	3910589.58	Υδροστρόβιλος	
2012	Κέρκυρα	142049.54	4392876.29	Υδροστρόβιλος	
2012	Μύκονος	619436.40	4143738.92	Υδροστρόβιλος	
2012	Άνδρος	573767.86	4187931.69	Υδροστρόβιλος	



Χάρτης 3.14: Στον οποίο απεικονίζεται η περιοχή και το έτος που συνέβη καταστροφικό φαινόμενο που οφείλεται στον άνεμο, για το μήνα Ιούνιο στον Ελλαδικό χώρο.

Πίνακας 3.6: Καταστροφικά φαινόμενα στον Ελλαδικό χώρο για το μήνα Ιούνιο.

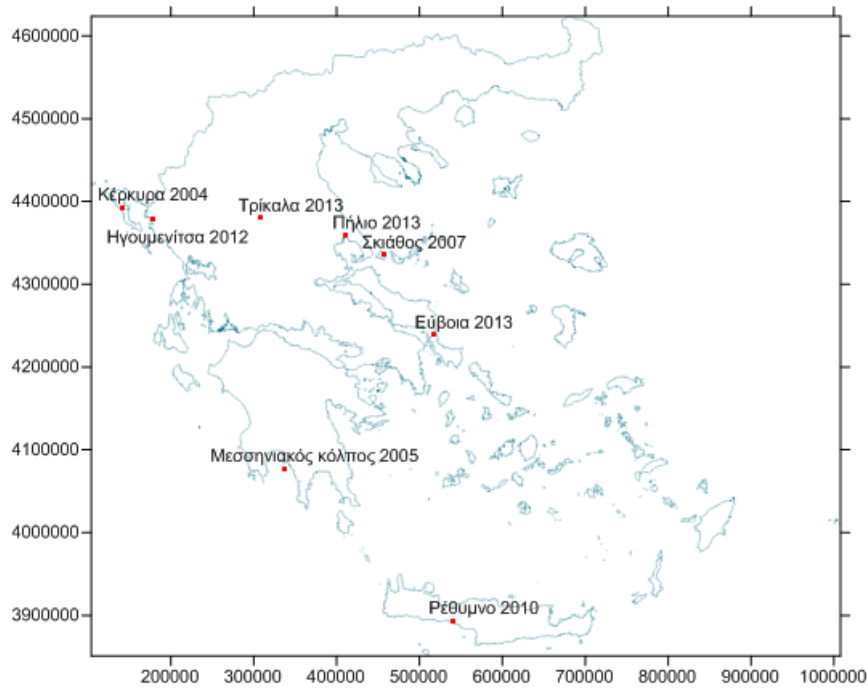
Έτος	Περιοχή	Γ. μήκος	Γ. πλάτος	Καταστροφικό φαινόμενο	Θάνατοι
2010	Σιάτιστα	290719.12	4456496.61	Ανεμοστρόβιλος	
2003	Ηλεία	266769.60	4186437.27	Ανεμοστρόβιλος	
2006	Βόλος	409549.14	4358023.81	Ανεμοθύελλα	
2010	Κέρκυρα	142049.54	4392876.29	Υδροστρόβιλος	
2006	Ζάκυνθος	225476.84	4186292.07	Υδροστρόβιλος	
2006	Ηλεία	266769.60	4186437.27	Υδροστρόβιλος	
2011	Ηράκλειο	607494.19	3910589.58	Υδροστρόβιλος	
2007	Περία	370696.91	4457724.29	Υδροστρόβιλος	



Χάρτης 3.15: Στον οποίο απεικονίζεται η περιοχή και το έτος που συνέβη καταστροφικό φαινόμενο που οφείλεται στον άνεμο, για το μήνα Ιούλιο στον Ελλαδικό χώρο.

Πίνακας 3.7: Καταστροφικά φαινόμενα στον Ελλαδικό χώρο για το μήνα Ιούλιο.

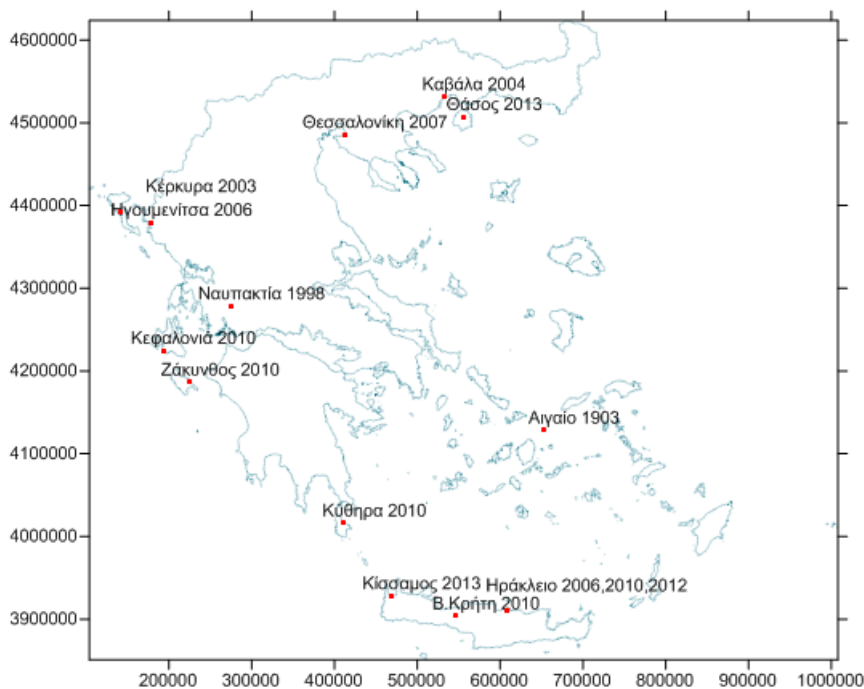
Έτος	Περιοχή	Γ. μήκος	Γ. πλάτος	Καταστροφικό φαινόμενο	Θάνατοι
2013	Ρίο Αντίρριο	305397.27	4243788.74	Ανεμοθύελλα	
1927	Βουλιαγμένη	480344.45	4186021.54	Ανεμοθύελλα	
1904	Αιγαίο	652585.49	4128401.90	Ανεμοθύελλα	
2005	Πιερία	370696.91	4457724.29	Ανεμοθύελλα	
2005	Λάρισα	364146.52	4388197.74	Ανεμοθύελλα	
1914	Κοζάνη	311561.64	4463414.04	Ανεμοθύελλα	
1983	Θεσσαλονίκη	412486.49	4485648.15	Ανεμοθύελλα	
1983	Καβάλα	532224.91	4531365.33	Ανεμοθύελλα	7
1983	Βόλος	409549.14	4358023.82	Ανεμοθύελλα	
2010	Εύβοια	517051.74	4238533.87	Ανεμοστρόβιλος	
2002	Ελ. Βενιζέλος	495606.12	4198357.80	Ανεμοστρόβιλος	
2008	Πέλλα	356742.69	4506282.40	Ανεμοστρόβιλος	
2011	Κέρκυρα	142049.54	4392876.29	Υδροστρόβιλος	
1905	Κρητικό π.	672912.63	3903625.32	Υδροστρόβιλος	



Χάρτης 3.16: Στον οποίο απεικονίζεται η περιοχή και το έτος που συνέβη καταστροφικό φαινόμενο που οφείλεται στον άνεμο, για το μήνα Αύγουστο στον Ελλαδικό χώρο.

Πίνακας 3.8: Καταστροφικά φαινόμενα στον Ελλαδικό χώρο για το μήνα Αύγουστο.

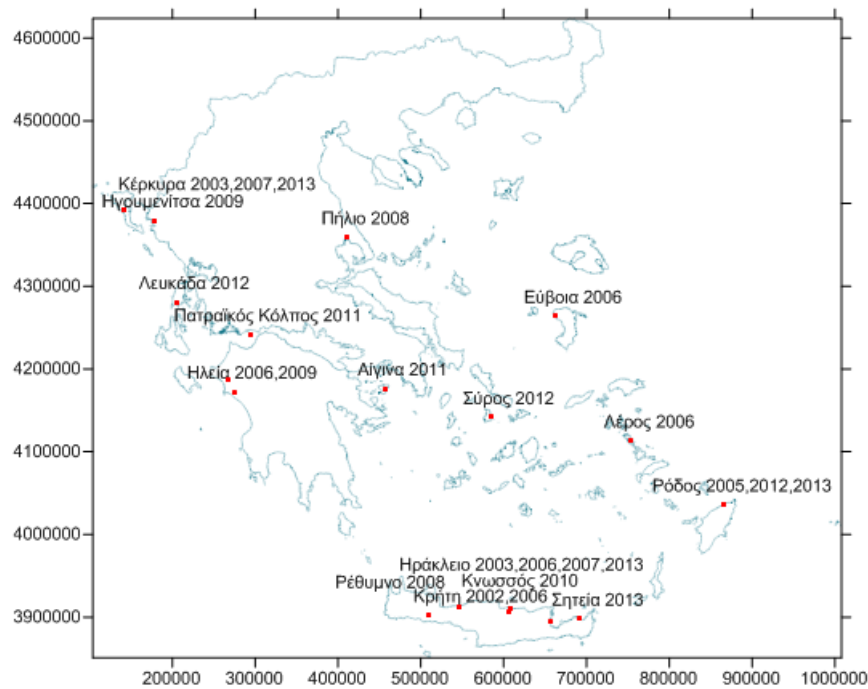
Έτος	Περιοχή	Γ. μήκος	Γ. πλάτος	Καταστροφικό φαινόμενο	Θάνατοι
2013	Τρίκαλα	308132.43	4380195.00	Ανεμοθύελλα	
2010	Ρέθυμνο	541149.04	3893375.43	Ανεμοθύελλα	
2012	Ηγουμενίτσα	178919.28	4379480.59	Ανεμοθύελλα	
2007	Σκιάθος	456805.93	4335421.89	Ανεμοθύελλα	
2013	Εύβοια	517051.74	4238533.86	Ανεμοστρόβιλος	
2005	Μεσ. κόλπος	336680.86	4077609.75	Υδροστρόβιλος	
2004	Κέρκυρα	142049.54	4392876.29	Υδροστρόβιλος	
2013	Πήλιο	411620.37	4359171.63	Υδροστρόβιλος	



Χάρτης 3.17: Στον οποίο απεικονίζεται η περιοχή και το έτος που συνέβη καταστροφικό φαινόμενο που οφείλεται στον άνεμο, για το μήνα Σεπτέμβριο στον Ελλαδικό χώρο.

Πίνακας 3.9: Καταστροφικά φαινόμενα στον Ελλαδικό χώρο για το μήνα Σεπτέμβριο.

Έτος	Περιοχή	Γ. μήκος	Γ. πλάτος	Καταστροφικό φαινόμενο	Θάνατοι
1903	Αιγαίο	652585.49	4128401.90	Ανεμοθύελλα	
2003	Κέρκυρα	142049.54	4392876.29	Ανεμοστρόβιλος	
1998	Ναυπακτία	275285.31	4278479.05	Ανεμοστρόβιλος	
2004	Καβάλα	532224.91	4531365.32	Ανεμοστρόβιλος	
2007	Θεσσαλονίκη	412486.49	4485648.15	Υδροστρόβιλος	
2010	Ηράκλειο	607494.19	3910589.58	Υδροστρόβιλος	
2010	Βόρεια Κρήτη	546559.15	3903660.33	Υδροστρόβιλος	
2006	Ηγουμενίτσα	178919.28	4379480.59	Υδροστρόβιλος	
2010	Κύθηρα	411715.61	4015761.60	Υδροστρόβιλος	
2006	Ηράκλειο	607494.19	3910589.58	Υδροστρόβιλος	
2013	Κίσαμος	468607.23	3927747.52	Υδροστρόβιλος	
2013	Θάσος	556378.37	4507426.87	Υδροστρόβιλος	
2012	Ηράκλειο	607494.19	3910589.58	Υδροστρόβιλος	
2010	Κεφαλονιά	193153.55	4224616.56	Υδροστρόβιλος	
2010	Ζάκυνθος	225476.84	4186292.07	Υδροστρόβιλος	

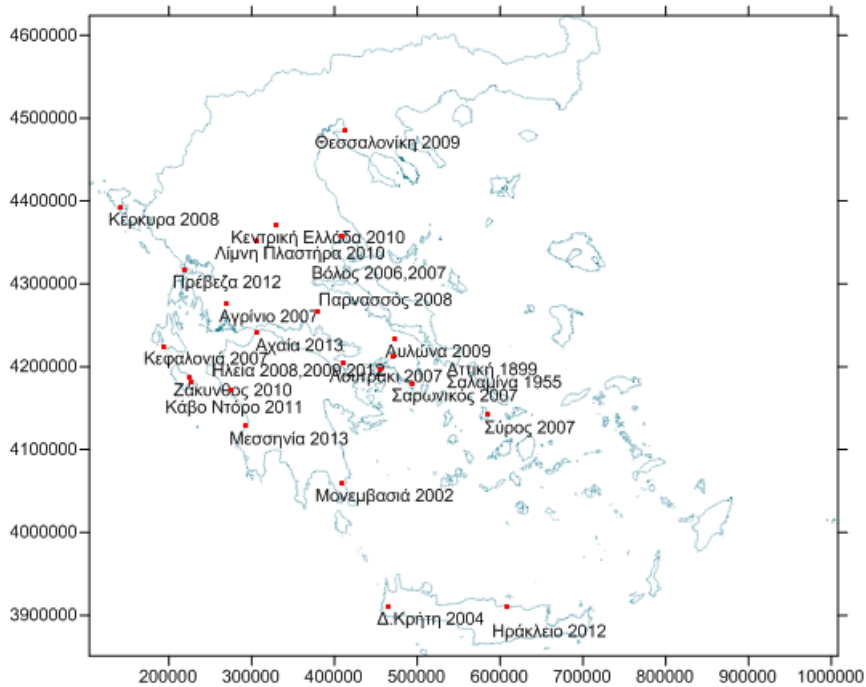


Χάρτης 3.18: Στον οποίο απεικονίζεται η περιοχή και το έτος που συνέβη καταστροφικό φαινόμενο που οφείλεται στον άνεμο, για το μήνα Οκτώβριο στον Ελλαδικό χώρο.

Πίνακας 3.10: Καταστροφικά φαινόμενα στον Ελλαδικό χώρο για το μήνα Οκτώβριο.

Έτος	Περιοχή	Γ. μήκος	Γ. πλάτος	Καταστροφικό φαινόμενο	Θάνατοι
2010	Κνωσός	605527.51	3906036.89	Ανεμοστρόβιλος	
2012	Λευκάδα	204951.83	4280799.64	Ανεμοθύελλα	
2003	Κέρκυρα	142049.54	4392876.29	Ανεμοστρόβιλος	
2006	Εύβοια	662047.86	4264194.06	Ανεμοθύελλα	
2006	Ηλεία	274587.12	4172398.78	Ανεμοθύελλα	
2013	Ρόδος	866196.18	4036065.82	Υδροστρόβιλος	
2013	Κέρκυρα	142049.54	4392876.29	Υδροστρόβιλος	
2005	Ρόδος	866196.18	4036065.82	Υδροστρόβιλος	
2013	Ρόδος	866196.18	4036065.82	Υδροστρόβιλος	
2013	Ηράκλειο	607494.19	3910589.58	Υδροστρόβιλος	
2013	Σητεία	691666.33	3897962.11	Υδροστρόβιλος	
2003	Ηράκλειο	607494.19	3910589.58	Υδροστρόβιλος	
2006	Κρήτης	656251.55	3894969.39	Υδροστρόβιλος	
2006	Λέρος	754322.23	4113655.52	Υδροστρόβιλος	
2008	Πήλιο	411620.37	4359171.63	Υδροστρόβιλος	
2011	Αίγινα	456382.47	4176189.68	Υδροστρόβιλος	
2012	Ρόδος	866196.18	4036065.82	Υδροστρόβιλος	
2006	Ηράκλειο	607494.19	3910589.58	Υδροστρόβιλος	
2007	Κέρκυρα	142049.54	4392876.29	Υδροστρόβιλος	
2008	Ρέθυμνο	546970.50	3911980.45	Υδροστρόβιλος	

Έτος	Περιοχή	Γ. μήκος	Γ. πλάτος	Καταστροφικό φαινόμενο	Θάνατοι (Συνέχεια)
2009	Ηλεία	266769.60	4186437.27	Υδροστρόβιλος	
2007	Ηράκλειο	607494.19	3910589.58	Υδροστρόβιλος	
2011	Πατραϊκός Κ	293924.67	4241790.69	Υδροστρόβιλος	
2002	Κρήτη	508691.19	3902651.02	Υδροστρόβιλος	
2009	Ηγουμενίτσα	178919.28	4379480.59	Υδροστρόβιλος	
2012	Σύρος	584064.50	4141550.48	Υδροστρόβιλος	



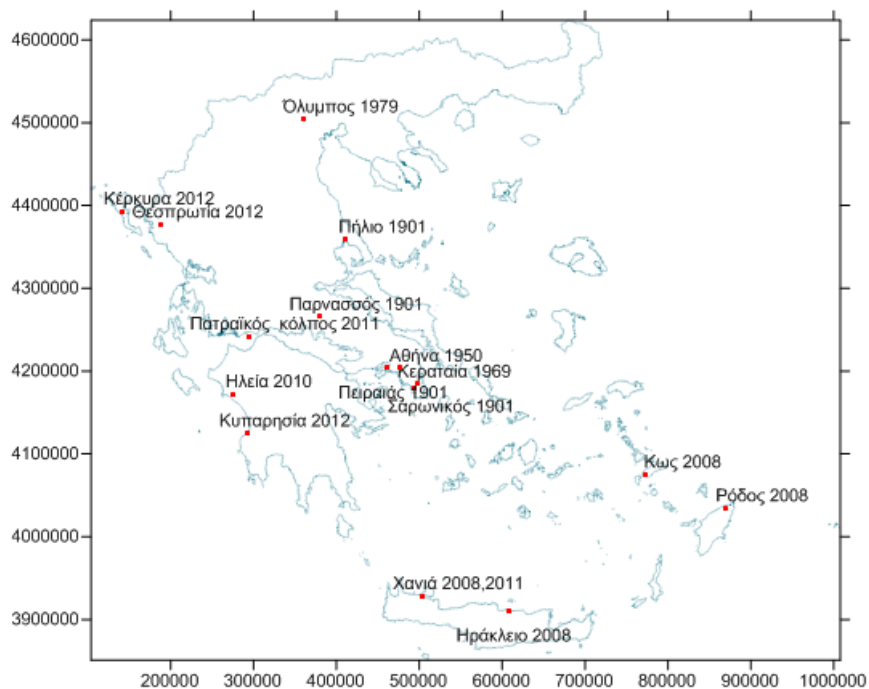
Χάρτης 3.19: Στον οποίο απεικονίζεται η περιοχή και το έτος που συνέβη καταστροφικό φαινόμενο που οφείλεται στον άνεμο για το μήνα Νοέμβριο στον Ελλαδικό χώρο.

Πίνακας 3.11: Καταστροφικά φαινόμενα στον Ελλαδικό χώρο για το μήνα Νοέμβριο.

Έτος	Περιοχή	Γ. μήκος	Γ. πλάτος	Καταστροφικό φαινόμενο	Θάνατοι
2013	Μεσσηνία	293397.09	4128017.55	Ανεμοθύελλα	
2013	Αχαΐα	306147.53	4240624.52	Ανεμοθύελλα	
2009	Ηλεία	274587.12	4172398.78	Ανεμοστρόβιλος	
2010	Ζάκυνθος	225476.84	4186292.07	Ανεμοστρόβιλος	
2002	Μονεμβασιά	408656.36	4058998.60	Ανεμοστρόβιλος	
2010	Λίμνη Πλ/τήρα	306404.47	4352039.95	130km/h	
2006	Βόλος	409549.14	4358023.81	71km/h	
2007	Λουτράκι	410440.24	4203593.28	Ανεμοθύελλα	
2009	Αιολώνα	473361.45	4233566.62	Ανεμοστρόβιλος	
2010	Κ. Ελλάδα	328537.52	4370954.84	African dust	
2009	Θεσσαλονίκη	412486.49	4485648.15	Ανεμοστρόβιλος	



Έτος	Περιοχή	Γ. μήκος	Γ. πλάτος	Καταστροφικό φαινόμενο	Θάνατοι (Συνέχεια)
2011	Κάβο Ντόρο	227491.37	4181286.89	119km/h	
2004	Δυτική Κρήτη	464558.38	3910510.53	Ανεμοθύελλα	
2007	Αγρίνιο	269227.05	4275720.50	Ανεμοστρόβιλος	
2007	Κεφαλονιά	193153.55	4224616.56	Ανεμοστρόβιλος	
2008	Ηλεία	274587.12	4172398.78	Ανεμοστρόβιλος	
2007	Βόλος	409549.14	4358023.81	funnel cloud	
2008	Κέρκυρα	142049.54	4392876.29	Ανεμοστρόβιλος	
1899	Αττική	470778.43	4211414.99	Ανεμοθύελλα	
1955	Σαλαμίνα	455121.56	4196291.29	Ανεμοθύελλα	1
2008	Παρνασσός	379912.55	4265830.07	180km/h	
2012	Πρέβεζα	218548.42	4317171.78	Ανεμοστρόβιλος	
2012	Ηλεία	274587.12	4172398.78	Ανεμοστρόβιλος	
2007	Σαρωνικός	493761.50	4180113.99	Υδροστρόβιλος	
2007	Σύρος	584064.50	4141550.48	Υδροστρόβιλος	
2012	Ηράκλειο	607494.19	3910589.58	Υδροστρόβιλος	



Χάρτης 3.20: Στον οποίο απεικονίζεται η περιοχή και το έτος που συνέβη καταστροφικό φαινόμενο που οφείλεται στον άνεμο για το μήνα Δεκέμβριο στον Ελλαδικό χώρο.

Πίνακας 3.12: Καταστροφικά φαινόμενα στον Ελλαδικό χώρο για το μήνα Δεκέμβριο.

Έτος	Περιοχή	Γ. μήκος	Γ. πλάτος	Καταστροφικό φαινόμενο	Θάνατοι
2008	Χανιά	502972.71	3928493.95	110km/h	
2010	Ηλεία	274587.12	4172398.78	Ανεμοστρόβιλος	
2008	Ρόδος	869343.90	4034284.45	Ανεμοστρόβιλος	
1966	Μητρώο π.	408001.23	2975234.37	Ναυάγιο	240
1969	Κερατέα	497994.91	4184272.42	Πτώση Α/φους	90
1950	Αθήνα	475995.16	4203507.93	Ανεμοθύελλα	
1979	Όλυμπος	360651.00	4504357.17	Ανεμοθύελλα	3 ορειβ.
1901	Σαρωνικός	493761.50	4180113.99	Ανεμοθύελλα	
1901	Πειραιάς	461969.90	4203992.63	Ανεμοθύελλα	
1901	Πήλιο	411714.33	4359016.40	105km/h	
1901	Παρνασσός	379912.55	4265830.07	148km/h	
2011	Χανιά	502972.71	3928493.95	Υδροστρόβιλος	
2008	Ηράκλειο	607494.19	3910589.58	Υδροστρόβιλος	
2012	Κυπαρισσία	293398.87	4125087.54	Υδροστρόβιλος	
2008	Κως	773696.25	4075164.28	Υδροστρόβιλος	
2012	Θεσπρωτία	188785.90	4377285.64	Υδροστρόβιλος	
2011	Πατρ. κολ.	293924.67	4241790.69	Υδροστρόβιλος	
2012	Κέρκυρα	142049.54	4392876.29	Υδροστρόβιλος	

## 4 Στατιστική επεξεργασία δεδομένων σταθμών

---

### 4.1 Στατιστική επεξεργασία των σταθμών

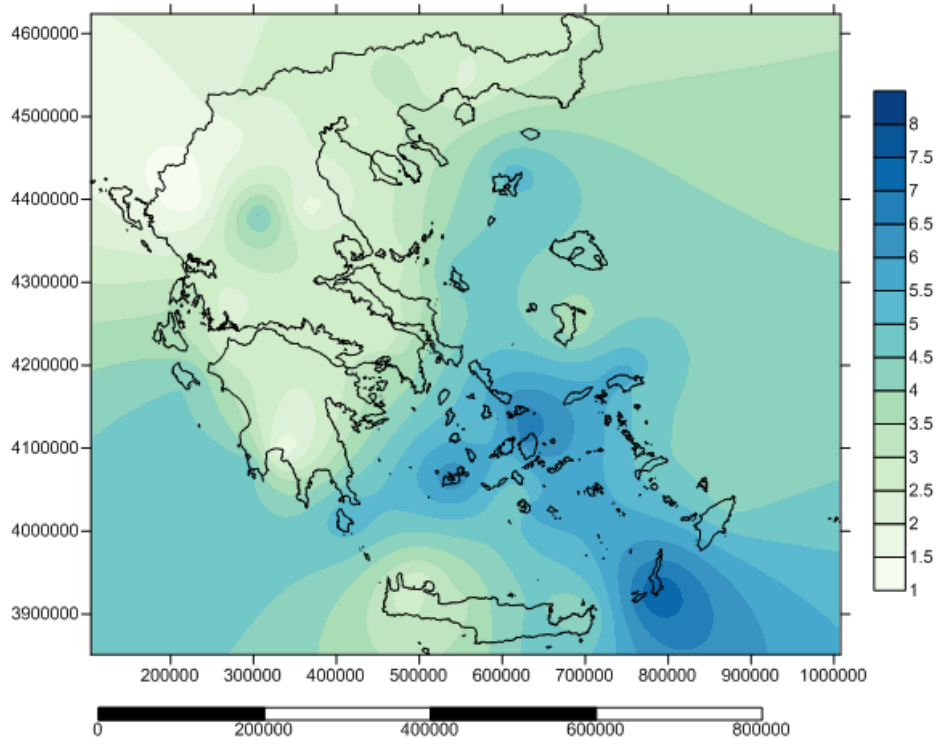
Στο παραπάνω κεφάλαιο παρατίθενται οι σταθμοί που υπολογίζονται για την στατιστική επεξεργασία. Η επεξεργασία των δεδομένων των σταθμών γίνεται σε μηνιαία βάση για να μπορέσει να εξαχθεί ο ανεμολογικός χαρακτήρας της περιοχής της Ελλάδος. Η διασπορά των σταθμών στο χώρο είναι ικανή να αποτυπώσει μια τέτοια συμπεριφορά του ανέμου, αφού όπως παραπάνω παρατίθεται σε χάρτη στο προηγούμενο κεφάλαιο, οι σταθμοί είναι διάσπαρτοι σε όλο τον Ελλαδικό χώρο, αποτελώντας με αυτόν τον τρόπο αξιόπιστο παράγοντα εκτίμησης της ενιαίας συμπεριφοράς του ανέμου. Από την εξέταση της μεταβλητής του ανέμου, σχεδιάζονται χάρτες που αφορούν στην ταχύτητα και τυπική απόκλιση του ανέμου σε μηνιαία και εποχιακή κλίμακα και επιπρόσθετα αποτυπώνεται και ο υπολογισμός του αιολικού δυναμικού του Ελλαδικού χώρου με προσαρμογή στην κατανομή Weibull.

#### 4.1.1 Μηνιαία ταχύτητα του ανέμου στον Ελλαδικό χώρο.

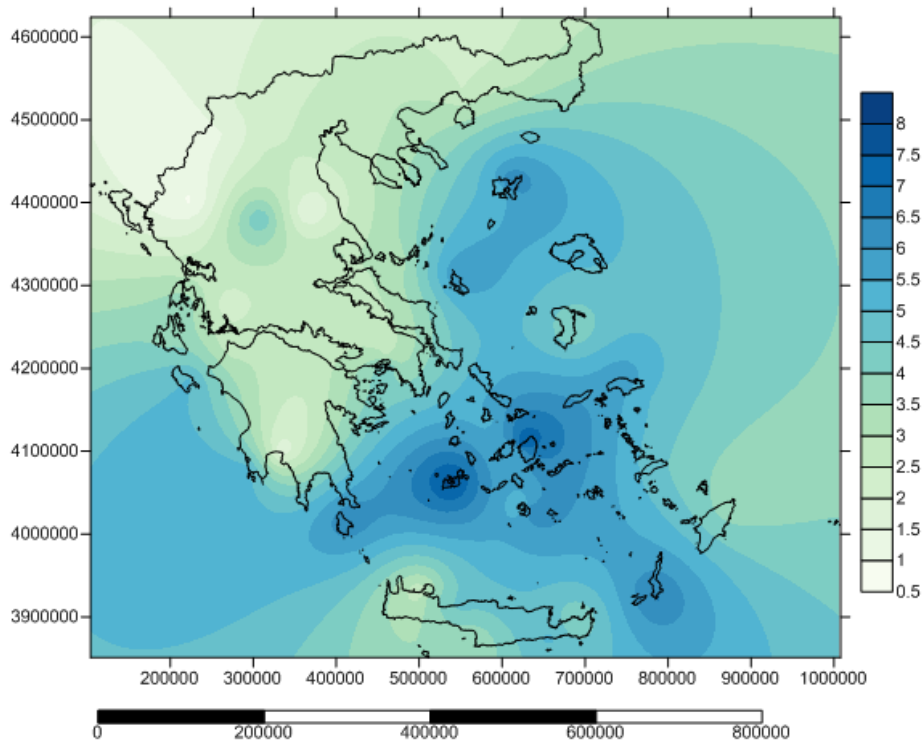
Από την επεξεργασία των δεδομένων των σταθμών εξάγονται χάρτες που αφορούν στην μηνιαία τιμή της ταχύτητας του ανέμου. Εξάγεται για κάθε μήνα η μέση τιμή μέσω του προγράμματος Υδρογνώμων, όπου κατά την εξαγωγή των μηνιαίων χρονοσειρών από τις ημερήσιες σειρές παράγονται απευθείας τα στατιστικά χαρακτηριστικά των μεταβλητών όλων των ροπών και όλων των κατανομών. Από τα δεδομένα αυτά εξάγονται μηνιαίοι χάρτες για την ταχύτητα αλλά και χάρτες εποχικότητας που δείχνουν τη χρονική διασπορά της εξεταζόμενης μεταβλητής. Παρακάτω στο παράρτημα Α που ακολουθεί, παρατίθεται πίνακας υπολογισμού της ταχύτητας σε μηνιαία βάση αλλά και υπολογισμός της μέσης ετήσιας ταχύτητας του ανέμου σε 66 επιλεγμένους σταθμούς. Από την παραπάνω επεξεργασία προκύπτουν οι χάρτες 4.1-4.5, για την ετήσια και εποχιακή συμπεριφορά του ανέμου που παρατίθενται παρακάτω.

Από τον Χάρτη 4.1, εμφανίζεται ένα δυτικό μέτωπο του ανέμου με τιμές της ταχύτητας να κυμαίνονται από 0.5 έως 4.5 m/s στα δυτικά παράλια της Ελλάδος και συγκεκριμένα στις περιοχές της βορειοδυτικής Ελλάδος οι τιμές κυμαίνονται από 0.5 έως 2.5 m/s, αλλά όσο το μέτωπο κατευθύνεται προς τα νοτιοδυτικά παράλια της Πελοποννήσου, επιταχύνεται με τις τιμές να φτάνουν έως και τα 4.5 m/s. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι ο άνεμος κατά την πορεία του σε αυτήν την κατεύθυνση δεν συναντά κάποιο εμπόδιο από έντονο ανάγλυφο ή ορογραφία, με αποτέλεσμα να επιταχύνεται, με τιμές να φτάνουν μέχρι και τα 5 m/s στα δυτικά παράλια της Κρήτης. Όσο ο άνεμος διεισδύει στα εσωτερικά της ενδοχώρας μειώνεται η ταχύτητά του λόγω του έντονου ηπειρωτικού αναγλύφου, με τιμές να φτάνουν μέχρι τα 3 m/s σε συγκεκριμένες περιοχές της κεντρικής Ελλάδος και το μέτωπο επιταχύνεται για μια ακόμα φορά κατευθυνόμενο προς τα δυτικά παράλια της Μ. Ασίας, αφού στο ανοιχτό πέλαγος ο άνεμος δεν συναντά κάποιο εμπόδιο με αποτέλεσμα να επιταχύνεται και να φτάνει τις ταχύτητες των 8.0 m/s στην περιοχή του κεντρικού Αιγαίου και συγκεκριμένα στο νησί της Νάξου και ακόμα μεγαλύτερες ταχύτητες να εμφανίζονται στη νοτιοδυτική Ελλάδα και συγκεκριμένα στο νησί της Ρόδου. Ταχύτητες παρόμοιας κλίμακας εμφανίζονται και στα νησιά Σαντορίνη, Μύκονος, Κήθυρα και Κάρπαθο. Επίσης, η ταχύτητα του ανέμου στον

Ελλαδικό χώρο εξετάζεται και για κάθε μια εποχή του χρόνου, με τα χαρακτηριστικά να αποτυπώνονται στους χάρτες 4.2-4.5, όπως φαίνονται παρακάτω.



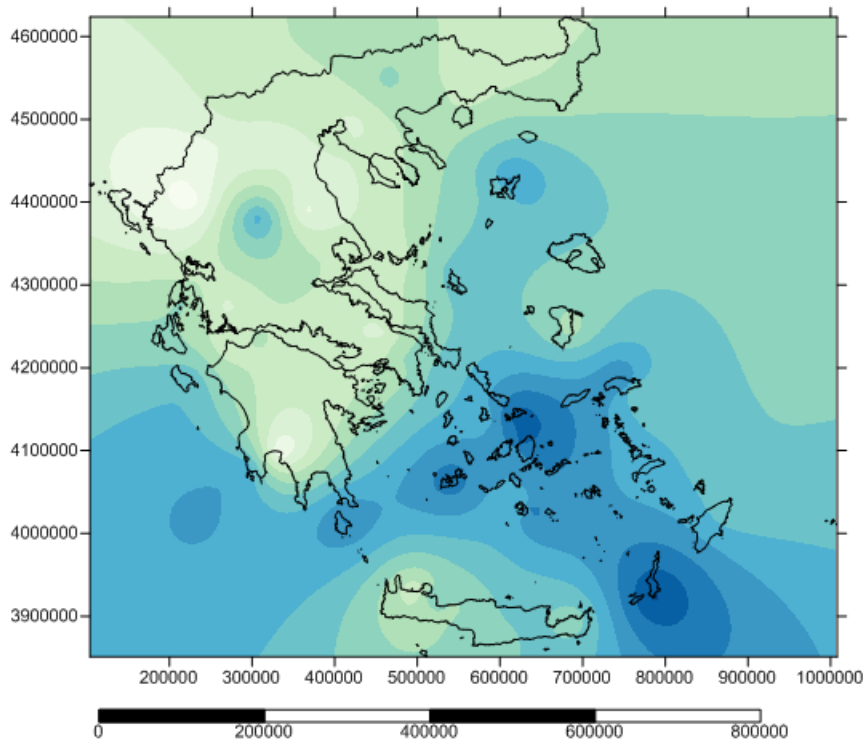
Χάρτης 4.1: Ετήσιο δείγμα ταχυτήτων του ανέμου στην Ελλάδα, σε m/s.



Χάρτης 4.2: Εποχικό δείγμα ταχυτήτων, για το χειμώνα στην Ελλάδα, σε m/s.

Στον Χάρτη 4.2, αποτυπώνεται η συμπεριφορά του ανέμου για το χειμώνα, με το μέτωπο του ανέμου να αυξάνεται από τα δυτικά προς τα ανατολικά. Στα δυτικά παράλια ο άνεμος

κυμαίνεται από 0.5 έως 4 m/s με την ταχύτητα να αυξάνεται προς τα νοτιοδυτικά παράλια της Πελοποννήσου και τη δυτική Κρήτη. Στην κεντρική Ελλάδα οι ταχύτητες μειώνονται λόγω του έντονου αναγλύφου, κυρίως από την οροσειρά της Πίνδου, όπου συνεχίζει να επιταχύνεται στις περιοχές που έχουν ανοιχτό οριζοντιογραφικό ανάγλυφο - πεδιάδες και συγκεκριμένα στις περιοχές της Λάρισας, της Λαμίας και της Θεσσαλίας και συνεχίζει ολοένα αυξανόμενο στο Αιγαίο πέλαγος και συγκεκριμένα στο κεντρικό Αιγαίο, στα νησιά των Κυκλάδων. Για μια ακόμα φορά οι μέγιστες ταχύτητες του ανέμου εμφανίζονται στα νησιά Νάξος, Μήλος, Λήμνος, Κήθυρα, με τις ταχύτητες να κυμαίνονται από 6.5 έως 8 m/s και επίσης ταχύτητες της τάξης των 5 έως 6 m/s εμφανίζονται στα νησιά Σάμος, Σκύρος και Πάρος.

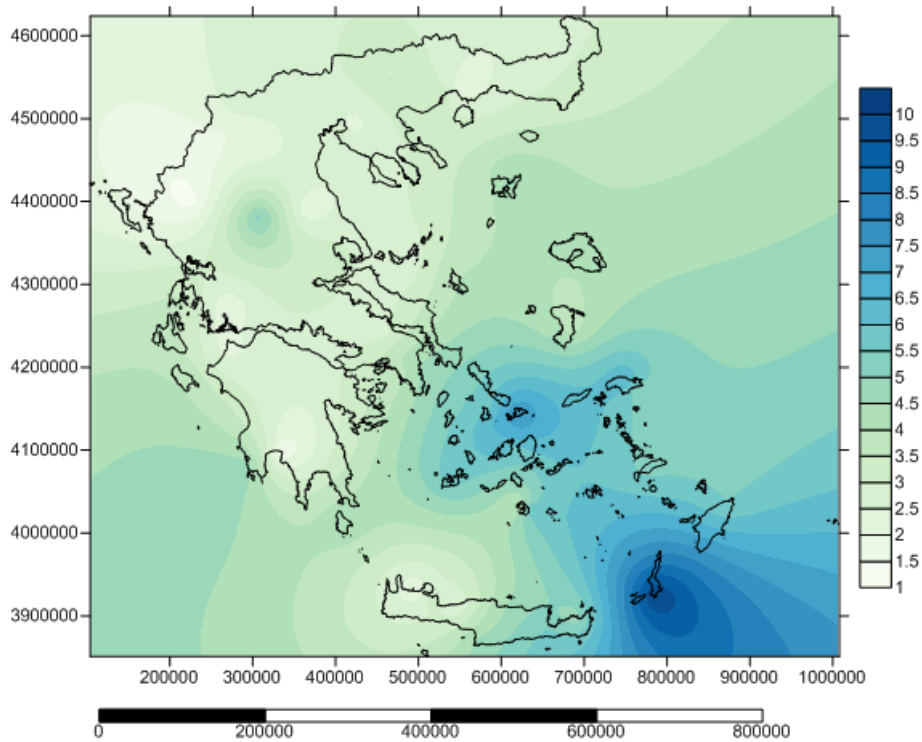


Χάρτης 4.3: Εποχικό δείγμα ταχυτήτων για την άνοιξη στην Ελλάδα, σε m/s.

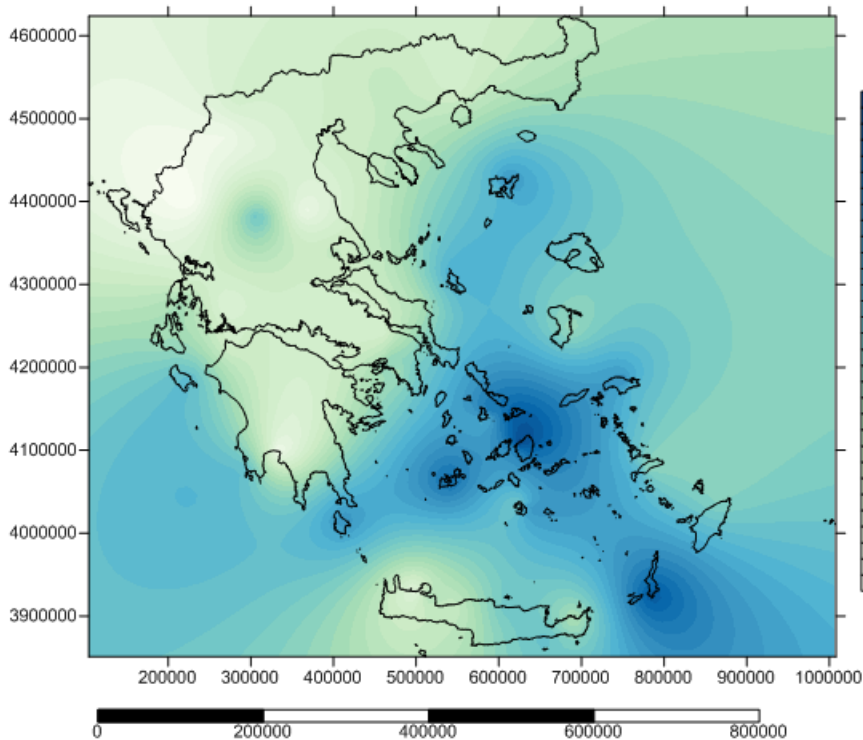
Η διαφορά με το χειμώνα, Χάρτης 4.3, είναι ότι ενώ εμφανίζονται στα ίδια σημεία οι μέγιστες τιμές του ανέμου και η ίδια ανεμολογική συμπεριφορά, με την επιτάχυνση του ανέμου να πραγματοποιείται από τα ανατολικά προς τα δυτικά οι μέγιστες ταχύτητες του ανέμου εμφανίζονται μειωμένες κατά 1 έως 2 m/s στις περιοχές που εμφανίζονται τα μέγιστα αλλά και στις υπόλοιπες περιοχές. Οι μέγιστες τιμές της ταχύτητας του ανέμου εμφανίζονται στο κεντρικό Αιγαίο και στην ανατολική περιοχή της Κρήτης. Στη βόρειο ανατολική αλλά και βορειοδυτική Ελλάδα οι τιμές κυμαίνονται από 0.5 έως 2.5 m/s ενώ στις περιοχές που εμφανίζονται οι μέγιστες τιμές κυμαίνονται από 5 έως 6.5 m/s.

Στο Χάρτη 4.4, εμφανίζονται οι μέγιστες τιμές της ταχύτητας του ανέμου να κυμαίνονται στο ίδιο εύρος με την εποχή του χειμώνα και στις ίδιες περιοχές. Για μια ακόμα φορά στο κεντρικό Αιγαίο εμφανίζονται τα μέγιστα με το εύρος όμως τιμών να είναι από 6.5 έως 8.0 m/s. Το γεγονός αυτό οφείλεται στα ισχυρά μελέτμια που πνέουν στον Ελλαδικό χώρο τον μήνα Αύγουστο κυρίως, καθιστώντας τα νησιά του κεντρικού Αιγαίου ιδιαίτερα επηρεασμένα από το φαινόμενο αυτό. Ο άνεμος πνέει από τα δυτικά, επιταχυνόμενος προς τα ανατολικά με αυξανόμενο ρυθμό, πλησιάζοντας ταχύτητες πλέον των 8 m/s στην ανατολική περιοχή της

Κρήτης και ιδιαίτερα στο χώρο ανάμεσα στην ανατολική Κρήτη και στα δυτικά παράλια της Μ. Ασίας.



Χάρτης 4.4: Εποχικό δείγμα ταχυτήτων για το καλοκαίρι στην Ελλάδα, σε m/s.



Χάρτης 4.5: Εποχικό δείγμα ταχυτήτων για το φθινόπωρο στην Ελλάδα, σε m/s.

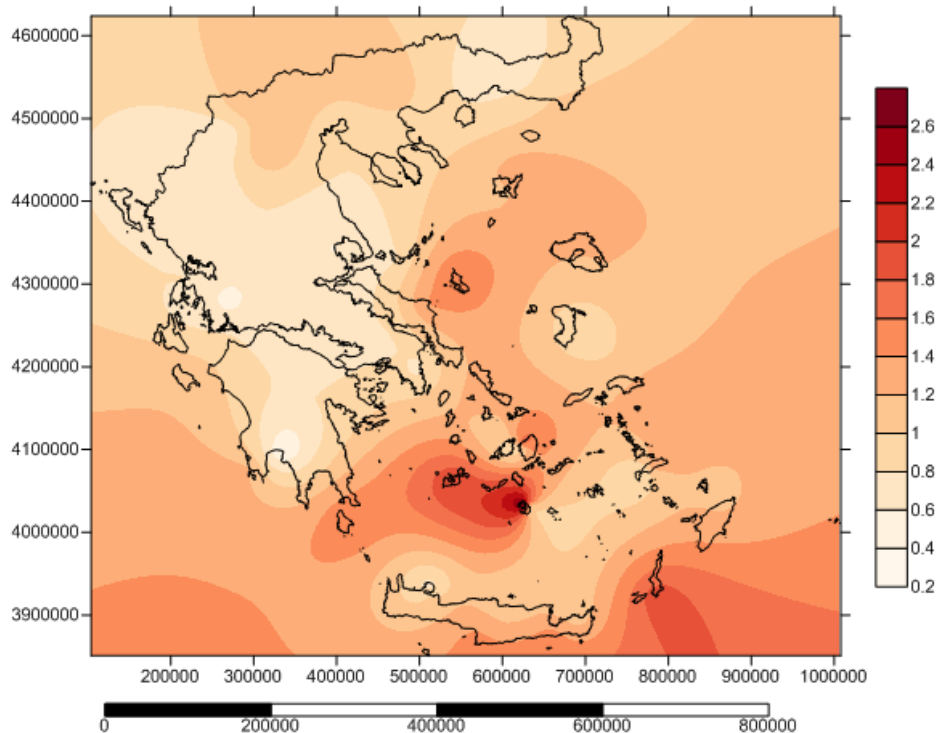
Η ίδια συμπεριφορά παρουσιάζεται και για το φθινόπωρο Χάρτης 4.5, στο ανεμολογικό καθεστώς της Ελλάδος, με τον άνεμο να επιταχύνεται από τα ανατολικά προς τα δυτικά, με

τις μέγιστες τιμές να εμφανίζονται στο κεντρικό Αιγαίο και στην ανατολική περιοχή της Κρήτης ανάμεσα στην Κρήτη και στα παράλια της Μ. Ασίας. Οι ταχύτητες του ανέμου εμφανίζονται μειωμένες κατά 2 - 3 m/s σε μέγιστη τιμή, που σημαίνει ότι το δυναμικό της Ελλάδος μειώνεται την εποχή του φθινοπώρου.

Από τους παραπάνω χάρτες 4.1-4.5, είναι εμφανές ότι ο άνεμος εμφανίζει παρόμοια συμπεριφορά σε εποχική χρονική κλίμακα, με τις διαφορές ανάμεσα στις εποχές να εμφανίζονται κυρίως στο εύρος της ταχύτητας, από περιοχή σε περιοχή, που οφείλεται στη διαφορετικότητα των ατμοσφαιρικών συνθηκών, από εποχή σε εποχή. Οι ταχύτητα του ανέμου, επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες με σημαντικότερη την ατμοσφαιρική πίεση που εμφανίζει διαφορετικότητα ανάλογα με την εποχή. Οι διαφορές, σε περιοχές υψηλού και χαμηλού βαρομετρικού αποτελούν διαφορές στις ατμοσφαιρικές πιέσεις που προκαλούν επιτάχυνση ή μη της ταχύτητας του ανέμου σε μεγαλύτερη κλίμακα. Με έμμεσο τρόπο, η διαφορά αυτή μπορεί να φανεί από το βροχομετρικό καθεστώς κάθε περιοχής, που σημαίνει ότι περιοχές που εμφανίζουν έντονες βροχοπτώσεις είναι περιοχές που επικρατούν χαμηλά βαρομετρικά ατμοσφαιρικών πιέσεων, όπου η περιοχή υψηλών πιέσεων προσπαθώντας να εξισορροπήσει τη διαφορά αυτή των πιέσεων, επιταχύνει τον άνεμο αυξάνοντας την ταχύτητά του. Σε περιπτώσεις που η διαφορά αυτή είναι μεγάλη, είναι πολύ πιθανό να δημιουργηθούν ανεμοστρόβιλοι, που μπορεί να προκαλέσουν ανυπολόγιστες καταστροφές και να κοστίσουν ζωές. Στο παράρτημα Β1 παρατίθενται χάρτες για τη μέση ταχύτητα του ανέμου για κάθε μήνα για την πληρέστερη κατανόηση του ανεμολογικού καθεστώτος στο Ελλαδικό χώρο.

#### **4.1.2 Μηνιαία τυπική απόκλιση της ταχύτητας του ανέμου στον Ελλαδικό χώρο.**

Για την πληρέστερη κατανόηση των ανεμολογικών διαφορών της ταχύτητας του ανέμου και για την επισκόπηση των διαφορών που εμφανίζονται στο εύρος των ταχυτήτων από περιοχή σε περιοχή πραγματοποιείται ο υπολογισμός της τυπικής απόκλισης για κάθε περιοχή και για κάθε μήνα, αλλά και σε ετήσιο επίπεδο. Παρακάτω στο παράρτημα Α που ακολουθεί, παρατίθεται πίνακας με τον υπολογισμό των τυπικών αποκλίσεων για κάθε μήνα και ετήσια για τους υπό εξέταση σταθμούς. Από τον πίνακα του παραρτήματος Α προκύπτει ότι η τυπική απόκλιση κυμαίνεται από τιμές 0.33 έως 2.76 m/s για όλους τους υπό εξέταση σταθμούς, με τις μέγιστες τιμές να εμφανίζονται κυρίως στα νησιά με εύρος από 1.00 έως 2.76 m/s αλλά και στους παραθαλάσσιους σταθμούς. Οι υπόλοιποι σταθμοί εμφανίζουν πολύ λιγότερες διακυμάνσεις της ταχύτητας σε μηνιαία αλλά και σε ετήσια βάση. Το γεγονός αυτό οφείλεται κυρίως στο έντονο ηπειρωτικό ανάγλυφο που εμφανίζουν οι ηπειρωτικοί σταθμοί στον Ελλαδικό χώρο με τον άνεμο να εμποδίζεται από την ορογραφία και από τις ψηλές οροσειρές της δυτικής Ελλάδος, να αποκτήσει υψηλή τιμή. Παράλληλα, στην περιοχή του Αιγαίου και ιδιαίτερα στην περιοχή του κεντρικού Αιγαίου στην νησιωτική χώρα, ο άνεμος δεν παρεμποδίζεται από εμπόδια κατά τη διέλευσή του με αποτέλεσμα να μπορεί να πάρει πολύ υψηλές τιμές και επομένως οι διακυμάνσεις να παρουσιάζονται με εντονότερο τρόπο (διασπορά δείγματος). Στον Χάρτη 4.6, παρουσιάζονται οι διακυμάνσεις της ταχύτητας του ανέμου (τυπική απόκλιση-διασπορά) σε ετήσια βάση, για την καλύτερη εποπτικότητα του παραπάνω συμπεράσματος.



Χάρτης 4.6: Ετήσια διακύμανση της ταχύτητας του ανέμου στην Ελλάδα, σε m/s..

Από τον Χάρτη 4.6, είναι εμφανές ότι οι περιοχές που παρουσιάζουν υψηλές ταχύτητες σε ετήσια χρονική κλίμακα ταυτίζονται με τις περιοχές που παρουσιάζουν μεγάλη διακριτότητα όσον αφορά στην τιμή της ταχύτητας του ανέμου. Όλοι οι παραθαλάσσιοι σταθμοί και κυρίως οι νησιωτικοί εμφανίζουν μεγάλη ανομοιομορφία στη διακύμανση της ταχύτητας. Οι μεγαλύτερες διαφορές εμφανίζονται στα νησιά του Αιγαίου και συγκεκριμένα στη Σαντορίνη, στη Μήλο, στην Κάρπαθο, στη Νάξο, στη Λήμνο, στη Μύκονο, στην Κω, στη Μυτιλήνη, στη Ρόδο, στη Σάμο και στη Σύρο. Επίσης, υψηλές τιμές εμφανίζονται στα Κήθυρα, που από εποχή σε εποχή, αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου, από το μέτωπο το οποίο κατέρχεται από τα δυτικά, με κατεύθυνση τη Ζάκυνθο και τη Κεφαλονιά. Τέλος, οι ηπειρωτικές περιοχές που εμφανίζουν μεγάλη διακύμανση κατά τη διάρκεια του έτους, είναι οι έντονα παραθαλάσσιοι σταθμοί ή περιοχές με ήπιο ηπειρωτικό ανάγλυφο, επομένως είναι περιοχές που δεν εμποδίζεται η επιτάχυνση του ανέμου και η αύξηση της ταχύτητας του. Αυτές οι περιοχές είναι η Ιεράπετρα, το Τυμπάκι, η Κύμη, η Μεθώνη, η Κοζάνη, το Ρέθυμνο, η Φλώρινα, οι Σέρρες και η Σητεία. Παρακάτω, στο παράρτημα Β2 παρατίθενται χάρτες για τη μέση τυπική απόκλιση του ανέμου για κάθε μήνα αλλά και για κάθε εποχή για την πληρέστερη κατανόηση του ανεμολογικού καθεστώτος στο Ελλαδικό χώρο.

#### 4.1.3 Μηνιαία παραγωγή του αιολικού ενεργειακού δυναμικού στον Ελλαδικό χώρο.

Η εξέταση της μεταβλητής της ταχύτητας του ανέμου πραγματοποιείται για την αξιοποίηση του αιολικού ενεργειακού δυναμικού στην Ελλάδα, με την εύρεση συγκεκριμένων περιοχών με έντονα ανεμολογική δραστηριότητα, ώστε να αποτελέσουν υποψήφιας περιοχές στις οποίες θα μπορούσαν εγκατασταθούν αυτόνομες ανεμογεννήτριες ή να γίνουν αιολικά πάρκα με συστοιχίες ανεμογεννητριών. Η σημερινή ενεργειακή παραγωγή γίνεται κυρίως από ορυκτά καύσιμα σε πολύ μεγάλο ποσοστό, όπως είναι ο λιγνίτης, οι γαιάνθρακες και το πετρέλαιο. Τα ορυκτά αυτά καύσιμα δεν βρίσκονται σε αφθονία στη φύση αλλά και η ενεργειακή παραγωγή τους δεν είναι καθόλα φιλική προς το περιβάλλον. Το γεγονός αυτό



αποδεικνύεται από τις εκπομπές των αερίων αυτών κατά την εξαγωγή και επεξεργασία των ορυκτών αυτών, αλλά και από τον τρόπο με τον οποίο εξορύσσονται αυτά τα υλικά ο οποίος δεν είναι καθόλου φιλικός προς το περιβάλλον. Επίσης, οι πηγές αυτές ενέργειας δεν είναι ανεξάντλητες, αλλά πεπερασμένες που σημαίνει, ότι δεν βρίσκονται σε αφθονία στη φύση, αλλά υπάρχουν συγκεκριμένα κοιτάσματα στα έγκατα της γης. Επίσης, η τεχνολογία έχει δώσει την ικανότητα στον άνθρωπο να μπορεί να εκμεταλλευτεί τα κοιτάσματα αυτά σε συγκεκριμένα βάθη, περιορίζοντας επιπρόσθετα τη διαθεσιμότητα των κοιτασμάτων αυτών, αφού είναι συγκεκριμένα τα όρια του βάθους μέχρι τα οποία ο άνθρωπος μπορεί να κάνει ασφαλή και οικονομική εξόρυξη. Η διαδικασία σταματάει όταν το κόστος για την εξόρυξη υπερβαίνει τη εκμετάλλευση του καυσίμου, παράγοντας που καθιστά απαγορευτική την εξόρυξη από μεγαλύτερα βάθη. Τέλος, η εκμετάλλευση των ορυκτών αυτών καυσίμων από τη φύση πραγματοποιείται ήδη για αρκετές δεκαετίες, με τον άνθρωπο να έχει εκμεταλλευτεί μεγάλο μέρος από τις διαθέσιμες ποσότητες τα τελευταία 150 χρόνια με αποκορύφωμα τα τελευταία 50 χρόνια, γεγονός που έχει επιταχυνθεί από την αύξηση του πληθυσμού, αλλά και από την αλματώδη τεχνολογική πρόοδο. Μελέτες δεικνύουν, ότι την επόμενη τριακονταετία τα αποθέματα του πετρελαίου θα έχουν εξαντληθεί και ότι ήδη διανύουμε την περίοδο που έχουμε ξεπεράσει τα μέγιστα διαθέσιμα αποθέματα και βρισκόμαστε ήδη στην φθίνουσα παριά της καμπύλης αποθεμάτων και χρόνου, εννοώντας ότι τα διαθέσιμα αποθέματα ολοένα και περιορίζονται. Γεγονός που αποδεικνύει τον παραπάνω ισχυρισμό αποτελεί και η αύξηση της τιμής των καυσίμων την τελευταία πενταετία σε ολόκληρο τον κόσμο, αφού η οικονομική-τεχνοκρατική νοοτροπία, πρεσβεύει την άποψη ότι προϊόντα με μικρή διαθεσιμότητα και μεγάλη ζήτηση είναι προϊόντα στα οποία η τιμή μονάδος τους αυξάνεται με το πέρασμα του χρόνου, όσο η σχέση παραγωγής και ζήτησης επεκτείνεται σε βάθος χρόνου. Η ελαστικότητα επομένως του προϊόντος αυτού είναι πολύ μικρή, αφού δεν υπάρχουν εναλλακτικές περιοχές ενέργειας, στις οποίες μπορεί να απευθυνθεί ο καταναλωτής και παράλληλα η εκμετάλλευση της ενέργειας αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την επιβίωση και την καθημερινότητα των ανθρώπων.

Από τους παραπάνω παράγοντες προκύπτει η επιτακτική ανάγκη για στροφή προς άλλες ενεργειακές πολιτικές και δη την εκμετάλλευση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ), που είναι η εκμετάλλευση πηγών ενέργειας με φιλικό προς το περιβάλλον τρόπο, αλλά και οι φυσικές μορφές ενέργειας (αιολική, ηλιακή, θαλάσσια κτλ) οι οποίες αποτελούν ανεξάντλητο πλούτο, σε περίπτωση που αξιοποιηθούν με τον κατάλληλο τρόπο. Η παραπάνω ενεργειακή πολιτική των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας δίνει πολύ σημαντικό βήμα στον τρόπο εκμετάλλευσης της ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο, αυξάνοντας την ελαστικότητα της ενέργειας, αφού ο καταναλωτής πλέον μπορεί να αποφασίσει με ποιόν τρόπο θα προμηθεύεται την ενέργεια του. Η ενεργειακή αυτή πολιτική αποτελεί έντονη πολιτική δραστηριότητα την τελευταία περίπου εικοσαετία, με αποκορύφωμα την τελευταία δεκαετία, που γίνονται ικανοποιητικές προσπάθειες για την εκμετάλλευση της δυναμικότητας του ανέμου, του ήλιου και του νερού με υπερβολικές και φιλόδοξες κατασκευές πολλές φορές αλλά με μικρό ποσοστό εκμετάλλευσης στις περισσότερες περιπτώσεις. Επιπρόσθετα, δεν υπάρχει δυνατότητα αποθήκευσης της ενέργειας, που αποτελεί πολύ σημαντικό κεφάλαιο κατά την εκμετάλλευση της ενέργειας. Η τεχνολογική πρόοδος στο κομμάτι της ενεργειακής πολιτικής μέσω ΑΠΕ, βρίσκεται ακόμα σε πρώιμο στάδιο, χωρίς να υπάρχει δυνατότητα, με τις επικρατούσες υποδομές, να αυτονομηθεί ενεργειακά μια περιοχή εκμεταλλεζόμενη αποκλειστικά ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, εκτός από κάποιες εξαιρέσεις. Ο βέλτιστος οικονομικοτεχνικός προσανατολισμός θα πρέπει να είναι τέτοιος, ώστε να συμφέρει ενεργειακά μια τέτοια πολιτική.

Επομένως, για μια μελλοντική εκμετάλλευση του ενεργειακού αιολικού δυναμικού στην Ελλάδα, αποτυπώνεται χάρτης ο οποίος απεικονίζει σε ισο-ενεργειακές καμπύλες το μέγιστο αιολικό δυναμικό το οποίο μπορεί να παραχθεί από μια περιοχή ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου, σε μηνιαία αλλά και σε ετήσια χρονική κλίμακα. Οι μονάδα μέτρησης του αιολικού δυναμικού είναι  $W/m^2$  που δείχνει την ενέργεια που μπορεί να παραχθεί από μια περιοχή ανά επιφάνεια πτερωτής, όπου μπορεί κάθε φορά να προσαρμοστεί η ανωτέρω τιμή με βάση τη χρησιμοποιούμενη ανεμογεννήτρια (πλήθος πτερωτών-άνοιγμα πτερωτών) αλλά και του ύψους στο οποίο εγκαθίσταται η ανεμογεννήτρια. Όσο αυξάνεται το υψόμετρο, τόσο μεγαλύτερη είναι και η ταχύτητα του ανέμου, η οποία αυξάνεται βάσει της παρακάτω λογαριθμικής σχέσης:

$$\frac{u_2}{u_1} = \ln \left( \frac{\frac{z_2}{z_0}}{\frac{z_1}{z_0}} \right) \quad (4.1)$$

Στη συγκεκριμένη διπλωματική, τα δεδομένα της ταχύτητας του ανέμου ήταν ανηγμένα στο επίπεδο των 10 m, με αποτέλεσμα να μην απαιτείται η παραπάνω προσαρμογή. Επομένως, η ενέργεια του ανέμου υπολογίστηκε μέσω της κατανομής Weibull στο ανωτέρω αναφερόμενο υψόμετρο, που είναι η κατανομή που περισσότερο προσαρμόζεται στην ταχύτητα του ανέμου, σε μηνιαία αλλά και ημερήσια χρονική κλίμακα και δίνεται από τη σχέση (4.2):

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{c}\right)^k} \quad (4.2)$$

Από τη σχέση αυτή (Αθροιστική συνάρτηση κατανομής), υπολογίζεται η θεωρητική ισχύς που έχει μια περιοχή η οποία όμως είναι μικρότερη από την πραγματική που μπορεί να αποδώσει μια ανεμογεννήτρια. Για την καλύτερη προσέγγιση της πραγματικότητας χρησιμοποιείται ο παρακάτω τύπος ο οποίος αποτελείται από απομειωτικούς συντελεστές και αποτελεί την ονομαστική ισχύ μιας ανεμογεννήτριας:

$$I = \frac{1}{2} C n_M n_E \rho u^3 \quad (4.3)$$

με τους συντελεστές της παραπάνω σχέσης να δίνονται παρακάτω:

C: Συντελεστής ισχύος

$n_M$ : Βαθμός απόδοσης μηχανικού συστήματος

$n_E$ : Βαθμός απόδοσης ηλεκτρομηχανικής μετατροπής

$\rho$ : Πυκνότητα του ανέμου (σταθερή και ίση με  $1.225 kg/m^3$ )

u: Ταχύτητα του ανέμου σε m/s.

Οι παραπάνω προαναφερθέντες συντελεστές, αποτελούν παράγοντες απομειωτικούς για την απόδοση του συστήματος ισχύος μιας ανεμογεννήτριας για μια περιοχή και προσεγγίζουν με ρεαλιστικό τρόπο την πραγματική απόδοση που μπορεί μια περιοχή να έχει. Επιπρόσθετα, στην παραπάνω διαδικασία, θα πρέπει να συμπεριληφθεί και το όριο του Betz που αποδίδει την μέγιστη ισχύ που μπορεί μια ανεμογεννήτρια να αποδώσει και προσδιορίζεται από την παρακάτω σχέση:

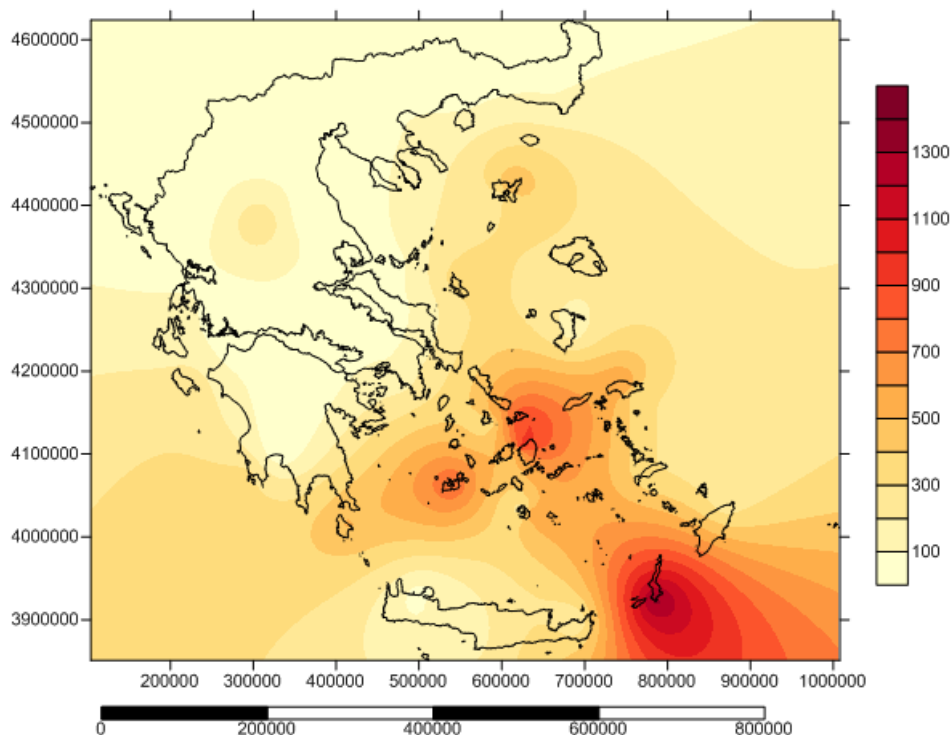
$$I_{A,MAX} = \left(\frac{16}{27}\right) \frac{1}{2} \rho u^3 \quad (4.4)$$

$\rho$ : Πυκνότητα του ανέμου (σταθερή και ίση με  $1.225 kg/m^3$ )

u: Ταχύτητα του ανέμου σε m/s.

Από την εξίσωση (4.4), συμπεραίνουμε ότι υπολογίζεται ο βαθμός απόδοσης από το πηλίκο της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος προς την εισερχόμενη ενέργεια του αέρα. Ουσιαστικά είναι ο αεροδυναμικός βαθμός απόδοσης πτερωτής και έχει μέγιστο όριο την τιμή  $C \leq 16/27 = 0.593$  (όριο Betz, 1919). Πρακτικά στην περίπτωση καλού σχεδιασμού ο συντελεστής κυμαίνεται στο 0.35. Το γινόμενο των συντελεστών του αρχικού τύπου υπολογισμού της ισχύος κυμαίνεται σε μια μέση τιμή του 0.90 που σε συνδυασμό με το λόγο του Betz, που εκφράζει το μέγιστο βαθμό που μπορεί να αποδοθεί από το σύστημα, προκύπτει η τελική ισχύς, αν τη θεωρητική ισχύ την απομειώσω πολλαπλασιάζοντας την με το γινόμενο των δυο συντελεστών:

Τελικός, συντελεστής = λόγος του Betz \* Βαθμός απόδοσης μηχανικού συστήματος \* Βαθμός απόδοσης ηλεκτρομηχανικής μετατροπής =  $(16/27) \eta_M \eta_E = 0.593 * 0.90 = 0.533$ . Αυτό σημαίνει ότι η τελική απόδοση του συστήματος στο μέγιστο βαθμό απόδοσης είναι περίπου η μίση του θεωρητικού δυναμικού μιας περιοχής, σε συγκεκριμένο υψόμετρο μέτρησης. Ο υπολογισμός των μονάδων είναι σε  $W/m^2$  για αυτό το λόγο στον τύπο παραλείπεται ο παράγοντας A: επιφάνεια ανοίγματος πτερωτής της συγκεκριμένης ανεμογεννήτριας υπολογισμού ( $m^2$ ) που σε αυτή την περίπτωση η ισχύς θα υπολογίζονταν σε W. Για τον υπολογισμό της ενέργειας που προκύπτει από την παραπάνω σχέση αρκεί ο τύπος της ισχύος να πολλαπλασιαστεί με τις ώρες λειτουργίας της ανεμογεννήτριας και επομένως το εξαγόμενο αποτέλεσμα θα έχει πλέον μονάδες Whrs ή αντίστοιχα kWhrs. Στο παράρτημα A φαίνεται ο πίνακας με το ενεργειακό δυναμικό του ελλαδικού χώρου σε μηνιαία αλλά και ετήσια βάση και χάρτης για την καλύτερη εποπτεία των περιοχών με την διαθέσιμη ενέργεια. Επίσης παρατίθεται και χάρτης 4.7, για την καλύτερη εποπτεία και το αντίστοιχο αιολικό δυναμικό της κάθε περιοχής. Η ενέργεια αποτυπώνεται μέσω των ισο - ενεργειακών καμπύλων που παρατίθενται και προκύπτουν σε κάθε σταθμό μέσω της μεθόδου krigging.



Χάρτης 4.7: Ετήσιο αιολικό δυναμικό στην Ελλάδα, σε  $W/m^2$ .

Από τον Χάρτη 4.7, είναι εμφανές το γεγονός ότι περιοχές με υψηλές ταχύτητες που έχουν αναφερθεί σε προηγούμενους χάρτες, αποτελούν και περιοχές οι οποίες έχουν αυξημένη

διαθέσιμη αιολική ενέργεια. Η θεωρητική ενέργεια της περιοχής προκύπτει από τη σχέση (4.5):

$$P = \left(\frac{16}{27}\right) n_M n_E \frac{1}{2} \rho u^3 \quad (4.5)$$

η οποία πολλαπλασιαζόμενη με την  $F(x)$  που έχει υπολογιστεί μέσω της Weibull μας δίνει τη διαθέσιμη αιολική ενέργεια. Παρακάτω στο παράρτημα Β3 παρατίθενται χάρτες για τη μέση αιολική ενέργεια, για κάθε μήνα αλλά και σε εποχιακή βάση, για την πληρέστερη κατανόηση του ανεμολογικού καθεστώτος στο Ελλαδικό χώρο.

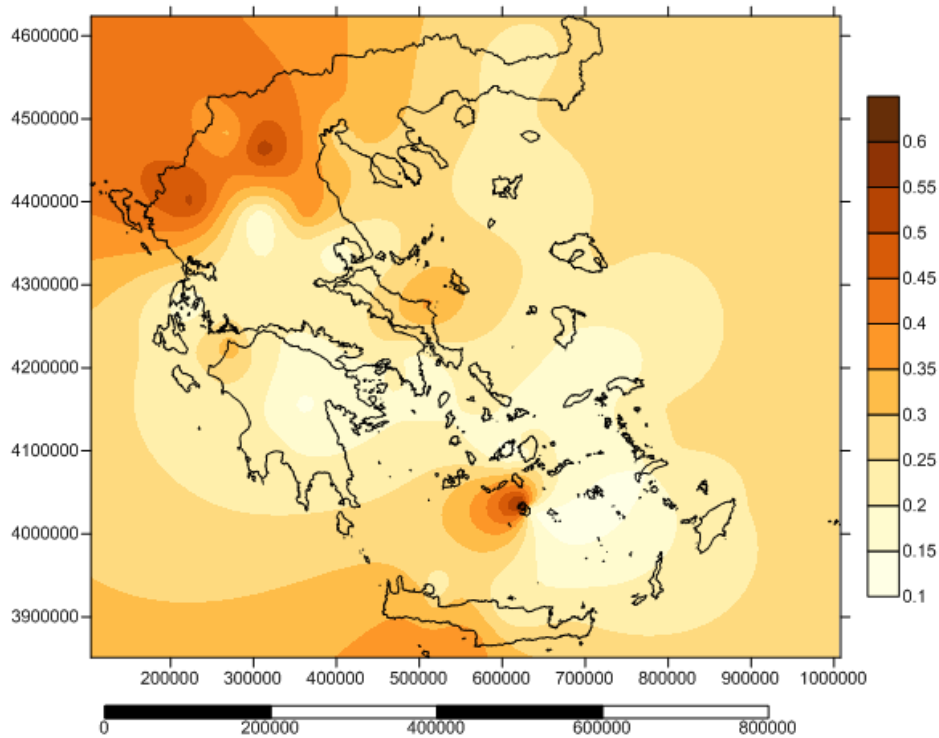
#### 4.1.4 Εκτίμηση των παραγόντων σχήματος ( $k$ ) και κλίμακας ( $c$ , m/s) από την κατανομή Weibull.

Για την εκτίμηση της κατανομής Weibull είναι απαραίτητος ο υπολογισμός των παραμέτρων της κατανομής που είναι η παράμετρος σχήματος  $k$  και η παράμετρος κλίμακας  $c$  (m/s). Ο υπολογισμός των παραμέτρων αυτών, παρατίθεται για κάθε μήνα αλλά και για ολόκληρο το έτος και φαίνεται η διακύμανση των εκτιμήσεων ανάμεσα σε ηπειρωτικές και νησιωτικές περιοχές αλλά και οι μεταβολές στις παραμέτρους με την εναλλαγή των εποχών. Ο υπολογισμός των παραμέτρων μπορεί να γίνει με πολλούς τρόπους. Ο συνηθέστερος τρόπος είναι η γραφική εκτίμηση από τη γραφική απεικόνιση της ποσότητας  $\{-\ln[1 - F(u)]\}$  και της ποσότητας  $\ln(u)$ . Από τη γραφική απεικόνιση των δυο παραπάνω ποσοτήτων, η κλίση (slope) της ευθείας που προκύπτει αποτελεί τον παράγοντα  $k$ , ενώ ο υπολογισμός της τομής με τον άξονα των  $X$  (intercept) δίνει την ποσότητα  $\{-\ln(c)\}$  από την οποία με αναλυτική επίλυση μπορεί να προκύψει η τιμή της παραμέτρου  $c$  (m/s). Στην παρούσα διπλωματική, ο υπολογισμός των μηνιαίων τιμών των παραμέτρων  $k$  και  $c$  προέκυψε απευθείας από το πρόγραμμα Υδρογνώμων με εισαγωγή των μηνιαίων σειρών στο πρόγραμμα. Οι πίνακες που προέκυψαν για τις μηνιαίες τιμές των δυο παραγόντων παρατίθενται στο παράρτημα Α του τεύχους των παραρτημάτων.

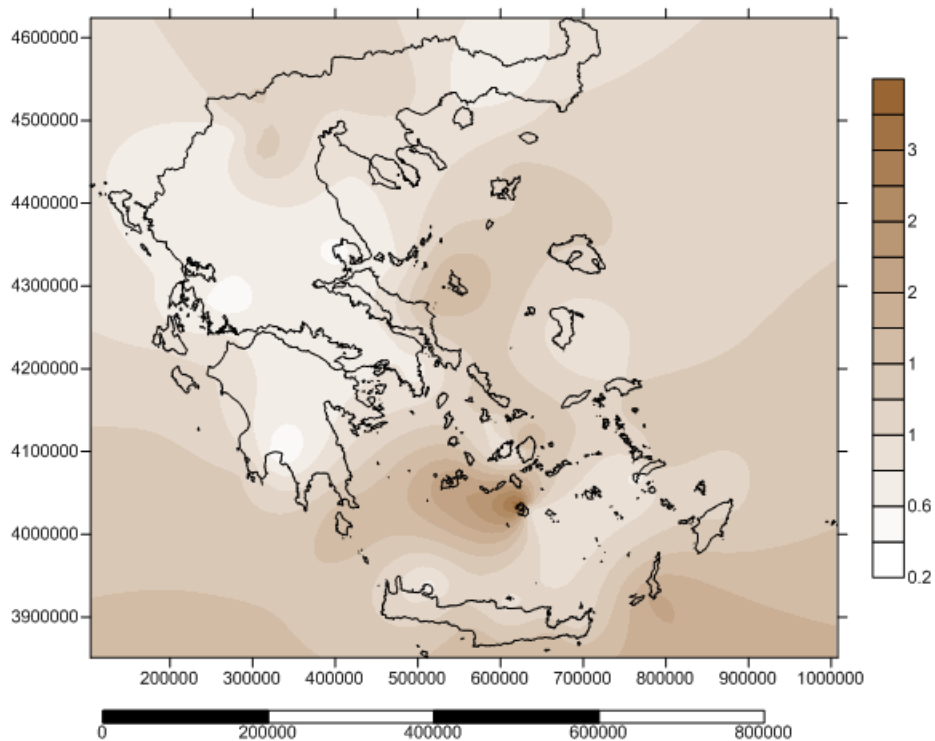
Από την επεξεργασία, προκύπτει ότι η μέση ετήσια τιμή της παραμέτρου σχήματος  $k$  κυμαίνεται από 0.12 έως 0.64 με το εύρος των μέσων τιμών να κυμαίνεται από 0.01 έως 0.75. Η μέγιστη μέση ετήσια τιμή εμφανίζεται στο νησί της Σαντορίνης (0.64), ενώ οι περιοχές που έχουν εύρος από 0.3 έως 0.6 είναι η Κοζάνη, τα Ιωάννινα, η Φλώρινα, η Λάρισα, το Τυμπάκι, η Κύμη, οι Σέδες, ο Άραξος, η Καστοριά, τα Χανιά, το Ρέθυμνο, οι Σέρρες και η Σκύρος. Οι υπόλοιποι σταθμοί εμφανίζουν τιμές κάτω από 0.30.

Από τον Χάρτη 4.8, εμφανίζεται ανομοιογένεια όσον αφορά τις τιμές της παραμέτρου  $k$  με τη διαφοροποίηση να συνίσταται κυρίως ανάμεσα στην ηπειρωτική και νησιωτική χώρα, με τις μεγαλύτερες τιμές να εμφανίζονται κυρίως στην ηπειρωτική χώρα λόγω του έντονου γεωμορφολογικού αναγλύφου, με τις υψηλότερες τιμές να συγκεντρώνονται στην βόρεια και βόρειο ανατολική χώρα, γεγονός που δικαιολογείται και από το μέτωπο του ανέμου που έχει κατεύθυνση από τα δυτικά προς τα ανατολικά. Παρακάτω, στο παράρτημα Β4 παρατίθενται χάρτες για την εκτίμηση της παραμέτρου  $k$  της κατανομής Weibull για κάθε μήνα και εποχικά, για την πληρέστερη κατανόηση του ανεμολογικού καθεστώτος στο Ελλαδικό χώρο. Η μεγαλύτερη τιμή της παραμέτρου κλίμακας εμφανίζεται στο νησί της Σαντορίνης (3.0), ενώ στις περιοχές Μήλος, Κάρπαθος, Νάξος, Σκύρος, Κύθηρα, Τυμπάκι, Ιεράπετρα, Κύμη, Λήμνος, Κοζάνη, Μύκονος, Ρέθυμνο, Κως, Μυτιλήνη, Φλώρινα, Μεθώνη, Ρόδος, Σέρρες, Ζάκυνθος και Λήμνος το εύρος της παραμέτρου κυμαίνεται από 1.1 έως 3.0. Στους υπόλοιπους σταθμούς οι τιμές της παραμέτρου κυμαίνονται από 0.0 έως 1.0. Για την καλύτερη εποπτεία της χωροθέτησης των σταθμών και των αντίστοιχων τιμών της

παραμέτρου κλίμακας  $c$  (m/s) παρατίθεται ο Χάρτης 4.9, με ισοτιμικές καμπύλες της παραμέτρου κλίμακας της κατανομής Weibull.



Χάρτης 4.8: Ετήσια απεικόνιση της παραμέτρου σχήματος  $k$  της κατανομής Weibull.



Χάρτης 4.9: Ετήσια απεικόνιση της παραμέτρου κλίμακας  $c$  της κατανομής Weibull, σε m/s.

Από τον Χάρτη 4.9, οι νησιωτικές αλλά και οι παραθαλάσσιες περιοχές εμφανίζονται με τις υψηλότερες τιμές της παραμέτρου κλίμακας, με τις μέγιστες τιμές να εμφανίζονται για μια

ακόμα φορά στο Αιγαίο και δη στο κεντρικό Αιγαίο. Στο παράρτημα B5-B6 παρατίθενται χάρτες για την εκτίμηση της παραμέτρου σχήματος  $k$  και κλίμακας  $c$  (m/s), της κατανομής Weibull, για κάθε μήνα και εποχικά, για την πληρέστερη κατανόηση του ανεμολογικού καθεστώτος στο Ελλαδικό χώρο.

#### 4.1.5 Διεύθυνση του ανέμου στον Ελλαδικό χώρο, σε μοίρες (°)

Η διεύθυνση του ανέμου είναι μια μεταβλητή που δύσκολα υπολογίζεται αξιόπιστα αλλά και είναι η πλέον επηρεασμένη από τη γεωμορφολογία του εδάφους. Περιοχές με έντονο γεωμορφολογικό ανάγλυφο, παρουσιάζουν διακυμάνσεις στη διεύθυνση του ανέμου που οφείλονται στα φυσικά εμπόδια που συναντά ο άνεμος κατά τη διέλευση του. Επίσης, σταθμοί που βρίσκονται κοντά σε κατοικημένες και ιδιαίτερα σε πυκνοκατοικημένες περιοχές όπως είναι οι μεγαλουπόλεις, που αποτελούνται από υψηλά κτίρια, η διεύθυνση του ανέμου επηρεάζεται από τα τεχνητά αυτά εμπόδια σε τοπικό επίπεδο, αλλάζοντας τη διεύθυνσή του ακόμα και σε μεγαλύτερη κλίμακα. Ο βασικότερος όμως παράγοντας ο οποίος επηρεάζει την κατεύθυνση της κίνησης του ανέμου είναι και ο παράγοντας που επηρεάζει την ταχύτητα κίνησης του και αποτελεί η θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα σε διαφορετικά σημεία του περιβάλλοντος. Η φύση προσπαθεί να ισορροπήσει τις διαφορές που εμφανίζονται σε διάφορα σημεία της ατμόσφαιρας (μεγιστοποίηση της εντροπίας) τόσο στην πίεση όσο και στην θερμοκρασία, προκαλώντας μεταβολές στη διεύθυνση του ανέμου.

Το βασικό χαρακτηριστικό του ανέμου στον Ελλαδικό χώρο είναι ότι, η βασική διεύθυνση του ανέμου προέρχεται από τα δυτικά. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην επίδραση παραγόντων σε μεγαλύτερη κλίμακα από την τοπική και η οποία είναι κυρίως η δύναμη Coriolis. Η δύναμη Coriolis είναι μια αδρανειακή δύναμη, που προκαλείται από την περιστροφή της γης. Πιο συγκεκριμένα, είναι φαινόμενη δύναμη η οποία εμφανίζεται σε μη αδρανειακά συστήματα αναφοράς. Ο δεύτερος νόμος του Νεύτωνα σε ένα σύστημα αναφοράς του οποίου οι άξονες περιστρέφονται με γωνιακή ταχύτητα  $\vec{\omega}$  γράφεται (για σταθερή μάζα) ως:

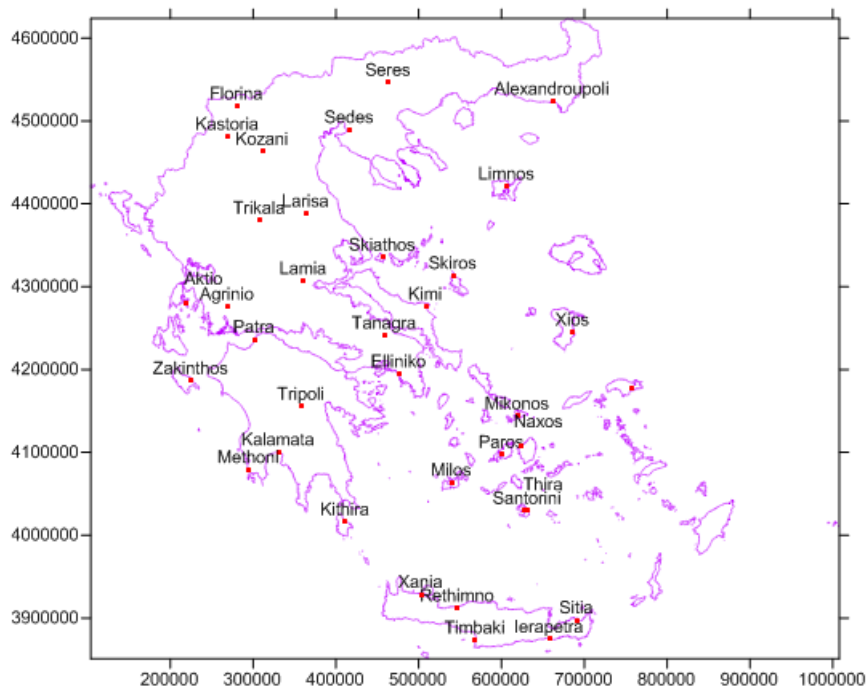
$$m \left( \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} \right)_R = m \left( \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} \right)_I - 2m \vec{\omega} \times \frac{d\vec{r}}{dt} - m \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}) \quad (4.6)$$

Ο δείκτης  $I$  υποδηλώνει το αδρανειακό σύστημα αναφοράς (επομένως,  $m \left( \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} \right)_R$  είναι η πραγματική δύναμη η οποία δέχεται το σώμα) και ο δείκτης  $R$  υποδηλώνει το περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς. Ως εκ τούτου, η επιτάχυνση του σώματος στο περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς είναι αποτέλεσμα της συνισταμένης της πραγματικής δύναμης που του ασκείται και δύο επιπλέον "φανταστικών" δυνάμεων οι οποίες δεν έχουν κάποιο φυσικό αίτιο και δεν εμφανίζονται στο αδρανειακό σύστημα αναφοράς. Ο όρος  $2m \vec{\omega} \times \frac{d\vec{r}}{dt}$  αποτελεί τη δύναμη Coriolis η οποία είναι πάντα κάθετη στην ταχύτητα του σώματος. Η δύναμη Coriolis εξηγεί την αντιωρολογιακή (ως προς παρατηρητή στον Νότιο πόλο) κίνηση του ανέμου στην επιφάνεια της γης. Η επιφάνεια της γης λόγω της περιστροφής, αλλάζει κατεύθυνση, κι επομένως επιταχύνεται. Όμως σε ένα επιταχυνόμενο σύστημα αναφοράς, δεν ισχύουν οι νόμοι κίνησης του Νεύτωνα. Χρειαζόμαστε έτσι μία δύναμη που να εξηγεί αυτήν την κίνηση, την δύναμη Coriolis. Κάθε κίνηση στο Βόρειο ημισφαίριο εκτρέπεται προς τα δεξιά και στο νότιο ημισφαίριο είναι αντίθετα προς τα αριστερά και εφ' όσον η δύναμη είναι κάθετη στην ταχύτητα, οι τροχιές των ανέμων είναι κυκλικές.

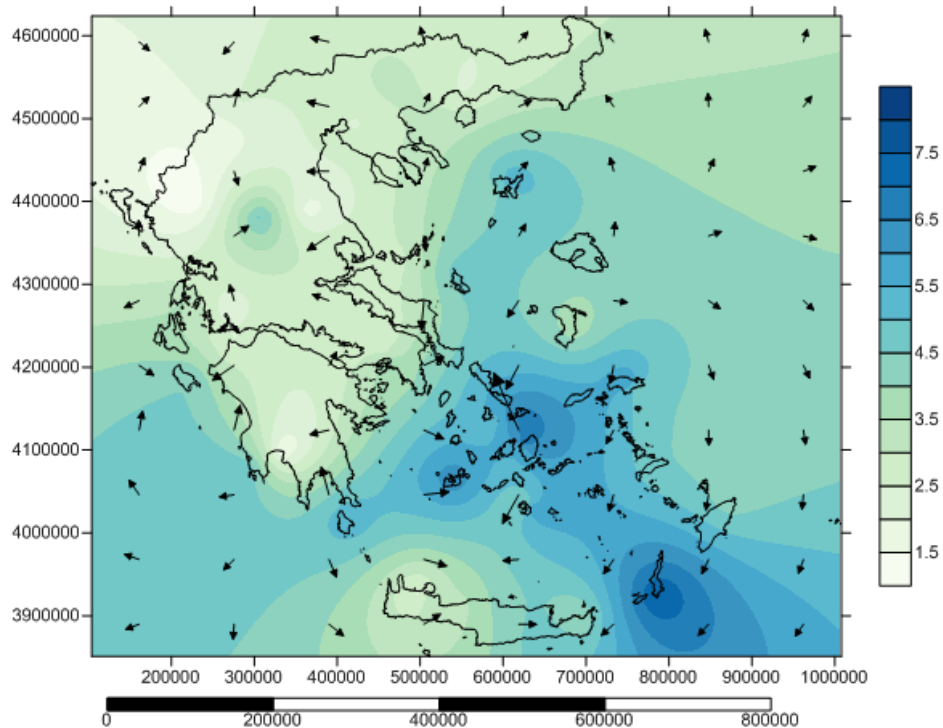
Επιπρόσθετα, το ανεμολογικό καθεστώς της Ελλάδος επηρεάζεται σε μεγαλύτερη κλίμακα και από το Μεσογειακό ρεύμα (Mediterranean Oscillation) το οποίο με τη σειρά του

επηρεάζεται από το ρεύμα της Βόρειας Αρκτικής ζώνης, αλλά και από το ανεμολογικό καθεστώς της βόρειο - δυτικής Αφρικάνικης Ηπείρου αλλά και της Ασιατικής ενδοχώρας (Schicker *et al.* 2010). Επομένως, από όλους τους παραπάνω προαναφερθέντες παράγοντες, η διεύθυνση του ανέμου είναι μια μεταβλητή, η οποία επηρεάζεται σε τοπικό επίπεδο αλλά και σε μεγαλύτερη κλίμακα από ποικιλία μετεωρολογικών και μη, παραγόντων, καθιστώντας έτσι την μεταβλητή αυτή, την πλέον χαοτική και δύσκολο να ποσοτικοποιηθεί.

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας έχει πραγματοποιηθεί επεξεργασία στα δεδομένα της διεύθυνσης του ανέμου, μετρούμενα σε μοίρες και με συνδυασμό των διαγραμμάτων ρόδου για κάθε σταθμό με τη βοήθεια της μεθόδου krigging, έχουν σχεδιαστεί χάρτες, που αφορούν τη διεύθυνση του ανέμου στον Ελλαδικό χώρο σε μηνιαίο - ετήσιο αλλά και σε εποχιακό επίπεδο. Η διεύθυνση των δεδομένων δίνεται σε μοίρες, οι οποίες αντιπροσωπεύουν τη γωνία που σχηματίζει ο πραγματικός βοράς με τη διεύθυνση από την οποία φυσάει ο άνεμος. Οι σειρές της διεύθυνσης του ανέμου έχουν εισαχθεί στο πρόγραμμα Υδρογνώμων και έχουν υπολογιστεί ως διανυσματικές σειρές. Επομένως, από την παραπάνω διαδικασία έχουν εξαχθεί πίνακες με τη μέση μηνιαία διεύθυνση του ανέμου. Περαιτέρω επεξεργασία δίνει τη διεύθυνση του ανέμου σε εποχικό αλλά και σε ετήσιο επίπεδο. Παρακάτω, αναφέρεται ο ετήσιος Χάρτης 4.11, της διεύθυνσης του ανεμολογικού καθεστώτος στον Ελλαδικό χώρο και στο παράρτημα Β8 παρατίθενται οι χάρτες για τη διεύθυνση του ανέμου σε μηνιαία βάση αλλά και εποχική. Ο υπολογισμός της μέσης μηνιαίας διεύθυνσης του ανέμου έχει πραγματοποιηθεί για 36 σταθμούς Χάρτης 4.10, οι οποίοι απεικονίζονται παρακάτω.



Χάρτης 4.10: Αποτυπώνονται οι 36 σταθμοί με του οποίους γίνεται η επεξεργασία των ανεμολογικών στοιχείων της διεύθυνσης του ανέμου στον Ελλαδικό χώρο.



Χάρτης 4.11: Αποτυπώνεται η διεύθυνση του ανέμου σε μοίρες (°) σε ετήσια βάση στον Ελλαδικό χώρο σε συνδυασμό με την ετήσια ταχύτητα του ανέμου σε m/s.

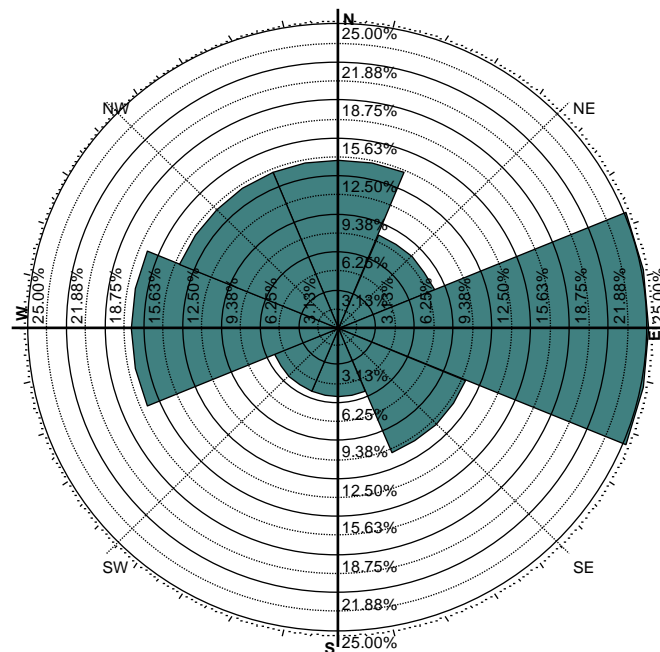
Οι χάρτες της διεύθυνσης του ανέμου, Χάρτης 4.11, που έχουν σχεδιαστεί στην παρούσα εργασία έχουν εξαχθεί από δεδομένα 36 σταθμών που δείχνουν την κατεύθυνση από την οποία ο άνεμος πνέει. Όπως προαναφέρθηκε, τα δεδομένα αφορούν τη γωνία που σχηματίζεται από τον πραγματικό βορά και από τη διεύθυνση από την οποία φυσάει ο άνεμος σε μοίρες (degrees). Αυτό σημαίνει, ότι από τον παραπάνω χάρτη το βέλος απεικονίζει την πραγματική φορά και κατεύθυνση του ανέμου που είναι αυτή των δεδομένων. Εάν ο άνεμος για παράδειγμα έχει διεύθυνση  $330^\circ$  αυτό σημαίνει ότι ο άνεμος αυτός πνέει από βόρειο - δυτικά με κατεύθυνση νότιο - ανατολική. Η κατεύθυνση προς την οποία πνέει μπορεί να υπολογιστεί με απλή αφαίρεση ή πρόσθεση αντίστοιχα των  $180^\circ$ . Εάν η διεύθυνση των δεδομένων είναι μεγαλύτερη από  $180^\circ$  τότε αφαιρούμε από τη διεύθυνση που έχουμε  $180^\circ$  για να βρούμε προς τα πού πνέει και αντίστοιχα, αν είναι μικρότερο από  $180^\circ$  τότε το προσθέτουμε. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα για να εξάγουμε τη διεύθυνση του προς τα πού κινείται ο άνεμος αφού  $330^\circ > 180^\circ$  τότε  $330^\circ - 180^\circ = 150^\circ$ . Επομένως, ο άνεμος αυτός κινείται με κατεύθυνση από βόρειο - δυτικά ( $330^\circ$ ) - NW προς τα νότιο - ανατολικά ( $150^\circ$ ) - SE και γενικότερα ο άνεμος αυτός θα χαρακτηριζόταν βόρειος με την έννοια της κατεύθυνσης από την οποία πνέει.

Η επεξεργασία των σειρών του ανέμου και η εισαγωγή τους έγινε στο πρόγραμμα Υδρογνώμων, όπου εισήχθησαν οι σειρές με το χαρακτηριστικό vector series για να αντιμετωπιστούν από το πρόγραμμα ως διανυσματικά μεγέθη. Οι μέσες μηνιαίες τιμές των διευθύνσεων του ανέμου από 36 σταθμούς επεξεργασίας εξήχθησαν από το πρόγραμμα σε κατάλληλο πίνακα, ο οποίος βρίσκεται στο αντίστοιχο παράρτημα. Αντίστοιχα, ο ετήσιος χάρτης αλλά και οι εποχικοί σχεδιάστηκαν από τις μέσες τιμές του παραπάνω πίνακα σε περιβάλλον excel. Προσοχή δόθηκε ιδιαίτερα σε διαφορές τιμών που ήταν πάνω από  $180^\circ$  και οι οποίες επεξεργάστηκαν με κατάλληλο τρόπο για να εξαχθούν τα σωστά αποτελέσματα για



τη μέση τιμή των μεγεθών. Τιμές του 1<sup>ου</sup> και του 4<sup>ου</sup> τεταρτημορίου των διευθύνσεων αντιμετωπίστηκαν με τον παρακάτω τρόπο: έστω ότι έπρεπε να υπολογιστεί η μέση διεύθυνση των δεδομένων 330° και 15°. Ο μέσος όρος των τιμών αυτών προκύπτει ίσος με 173° που στην πραγματικότητα είναι λανθασμένος, αφού και οι δυο αρχικοί άνεμοι πνέουν από βόρεια και η μέση τιμή τους προκύπτει άνεμος ο οποίος πνέει από νότια. Σε αυτήν την περίπτωση υπολογίζεται η μέση τιμή με τον ακόλουθο τρόπο:  $\{(360^\circ - 330^\circ + 15^\circ)/2\} + 330^\circ = 353^\circ$ . Σε περίπτωση που από την παραπάνω παράσταση υπολογιστεί διεύθυνση άνω των 360° αφαιρείται από τις 360° και παραμένει στο 1° τεταρτημόριο. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται ότι η μέση τιμή των διευθύνσεων θα είναι ανάμεσα στα αρχικά δεδομένα και όχι κάτι τελείως διαφορετικό όπως προέκυψε από τον αρχικά αναφερόμενο υπολογισμό. Οι υπολογισμοί για την ετήσια τιμή έγιναν ανά δυο, αφού πρώτα υπολογίστηκε ο μέσος όρος των δυο πρώτων μηνών (Ιανουάριος - Φεβρουάριος). Το εξαγόμενο αποτέλεσμα με το Μάρτιο και οι διαδοχικοί υπολογισμοί συνεχίστηκαν μέχρι και το μήνα Δεκέμβριο που ουσιαστικά προέκυψε ο ετήσιος μέσος όρος της διεύθυνσης του ανέμου για τον κάθε σταθμό. Αυτό πραγματοποιήθηκε για τον έλεγχο των τιμών των δεδομένων, ώστε οι μεταξύ τους διαφορές να μην ξεπερνούν τις 180° αρχικά και σε περίπτωση που ίσχυε κάτι τέτοιο, αντιμετωπίστηκαν οι περιπτώσεις ξεχωριστά, ανάλογα με το τεταρτημόριο που βρίσκονταν οι τιμές των δεδομένων.

Επιπρόσθετα, με τη βοήθεια του προγράμματος Υδρογνώμων έχουν γίνει και διαγράμματα ρόδου (rose diagrams), Σχήμα 4.1, στα οποία είναι εμφανής η διεύθυνση του ανέμου αλλά και το ποσοστό των αντίστοιχων ανέμων που πνέουν από τη συγκεκριμένη κάθε φορά διεύθυνση. Παρακάτω παρατίθεται διάγραμμα ρόδου, με την ετήσια διεύθυνση του ανέμου Σχήμα 4.1, και τα υπόλοιπα διαγράμματα σε μηνιαία και εποχιακή χρονική κλίμακα παρατίθεται στο παράρτημα Γ7.



Σχήμα 4.1: Διάγραμμα ρόδου (rose diagram) στο οποίο αποτυπώνονται τα ποσοστά των διευθύνσεων του ανέμου για τους συνολικά 36 σταθμούς επεξεργασίας στην Ελλάδα σε ετήσια χρονική κλίμακα.

Τα δεδομένα της διεύθυνσης του ανέμου αποτέλεσαν δεδομένα που έδειχναν από ποια διεύθυνση προέρχεται ο άνεμος. Για να γίνουν επομένων χάρτες διανυσματικοί τα δεδομένα αυτά που ήταν σε μοίρες έπρεπε να τροποποιηθούν κατάλληλα ώστε το διάνυσμα (vector)

του εξαγόμενου χάρτη να δείχνει την πραγματική φορά του ανέμου. Ο υπολογισμός αυτός έγινε σε περιβάλλον excel και κάθε φορά εξετάζονταν τα δεδομένα των διευθύνσεων αν είναι μεγαλύτερα ή μικρότερα από 180°. Σε περίπτωση που τα δεδομένα ήταν πάνω από 180° αφαιρούνταν από τις 180° ώστε η νέα φορά να αποτελούσε την πραγματική φορά του ανέμου, προς τα πού κατευθύνεται ο άνεμος. Στην περίπτωση που τα δεδομένα ήταν μικρότερα των 180° γίνονταν η ίδια διαδικασία, αλλά αυτή τη φορά με πρόσθεση των 180°. Επομένως από την παραπάνω διαδικασία δημιουργήθηκε ο παρακάτω Πίνακας 4.1, ο οποίος αποτελείται από τις βασικές και δευτερεύουσες διευθύνσεις, που σε καθεμία αναφέρεται το αντίστοιχο ποσοστό του ανέμου που πνέει από τη συγκεκριμένη διεύθυνση ανά μήνα - εποχή και ετήσια.

Πίνακας 4.1: Αποτυπώνονται τα ποσοστά των διευθύνσεων που πνέει ο άνεμος για κάθε μια διεύθυνση σε μηνιαία - εποχιακή και ετήσια βάση.

Ποσοστά μηνιαίων διευθύνσεων του ανέμου στην Ελλάδα (%)								
Μήνας/Εποχή	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Ιανουάριος	15.2	12.1	24.2	9.1	3.0	9.1	12.1	15.2
Φεβρουάριος	17.6	20.6	14.7	5.9	0.0	8.8	11.8	20.6
Μάρτιος	11.4	25.7	20.0	8.6	0.0	2.9	11.4	20.0
Απρίλιος	17.6	20.6	26.5	11.8	2.9	0.0	11.8	8.8
Μάιος	9.1	18.2	33.2	18.2	0.0	6.1	6.1	9.1
Ιούνιος	11.4	17.2	20.0	31.4	2.9	5.7	5.7	5.7
Ιούλιος	5.7	17.1	11.4	40.0	2.9	2.9	8.6	11.4
Αύγουστος	14.7	14.7	8.8	23.5	11.8	5.9	5.9	14.7
Σεπτέμβριος	23.5	14.7	8.8	23.5	5.9	5.9	14.8	2.9
Οκτώβριος	12.1	15.2	15.2	15.2	0.0	9.1	21.1	12.1
Νοέμβριος	15.6	12.5	15.6	12.5	0.0	3.1	28.1	12.6
Δεκέμβριος	27.2	12.1	18.1	6.1	0.0	6.1	15.2	15.2
Ετήσια	13.9	8.3	25.0	11.1	5.6	5.5	16.7	13.9
Χειμώνας	20.0	17.1	17.1	8.6	0.0	8.6	14.3	14.3
Ανοιξη	8.3	30.6	27.8	8.3	8.3	0.0	11.1	5.6
Καλοκαίρι	5.6	16.7	16.7	30.6	5.5	5.6	8.2	11.1
Φθινόπωρο	17.6	8.8	14.7	14.7	0.0	11.8	17.6	14.8

Επομένως από τον παραπάνω Πίνακα 4.1, συμπεραίνουμε ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των ανέμων που πνέουν ετησίως είναι βόρειοι (συμπεριλαμβανομένους τους βόρειο - ανατολικούς και βόρειο - δυτικούς ανέμους) με ποσοστό 44.2%. Το μέγιστο ποσοστό εμφανίζεται το μήνα Φεβρουάριο (58.8%) και το ελάχιστο το μήνα Ιούλιο (34.2%). Αντίστοιχα οι νότιοι άνεμοι (συμπεριλαμβανομένου τους νότιο - δυτικούς και νότιο - ανατολικούς) πνέουν με ποσοστό 25.1% με τα ελάχιστα και μέγιστα ποσοστά να εμφανίζονται τους μήνες Ιούλιο (45.8%) και Μάρτιο (11.5%). Οι ανατολικοί άνεμοι πνέουν με ποσοστό 18% με μέγιστη τιμή το μήνα Μάιο (33.2%) και ελάχιστη το μήνα Αύγουστο (8.8%) και αντίστοιχα το ποσοστό των ανέμων που πνέουν από δυτικά είναι 12.7% με μέγιστη τιμή το μήνα Νοέμβριο (28.1%) και ελάχιστη το μήνα Ιούνιο (5.7%).

## 4.2 Εμπειρική αιολική ισχύς των σταθμών των δεδομένων

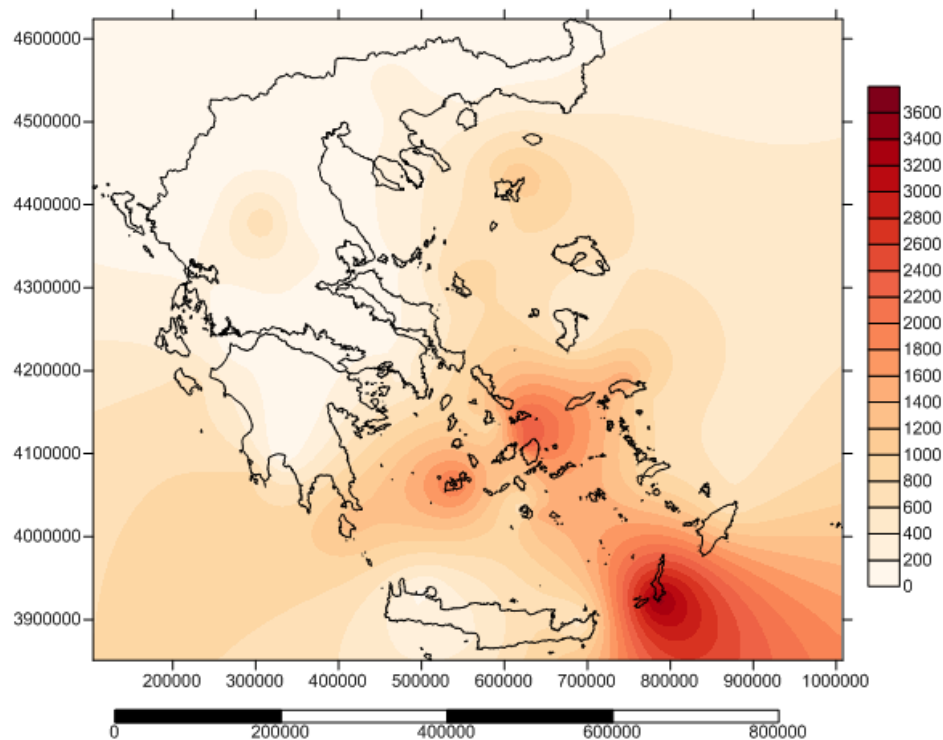
Οι σταθμοί επεξεργασίας των δεδομένων είναι διάσπαρτοι σε ολόκληρη την έκταση του Ελλαδικού χώρου, επομένως η οποιαδήποτε ανάλυση στο δείγμα αυτό είναι ασφαλής για τη συμπεριφορά του ανέμου σε ολόκληρο τον Ελλαδικό χώρο, αφού η διασπορά της θέσης των σταθμών εξασφαλίζει ανομοιογένεια στις συνθήκες μέτρησης με βάση τις τοπικές ανομοιομορφίες σε μικρή κλίμακα που εμφανίζονται σε κάθε διαφορετική θέση. Επομένως, από το δείγμα αυτό των σταθμών (66) και για διαφορετική περίοδο μέτρησης σε κάθε σταθμό εξάγεται, η ετήσια εμπειρική ισχύς της ταχύτητας του ανέμου ( $W/m^2$ ), από τη μηνιαία χρονοσειρά του κάθε σταθμού. Από τη μηνιαία ταχύτητα που προκύπτει από τη επεξεργασία του κάθε σταθμού για κάθε περιοχή, εφαρμόζεται ο εμπειρικός τύπος  $P = \frac{1}{2}\rho u^3$  με το  $\rho$  να αποτελεί την πυκνότητα του ανέμου σε ( $kg/m^3$ ) σταθερή και ίση με  $1225 kg/m^3$  ενώ το  $u$  είναι η μηνιαία υπολογισμένη ταχύτητα του ανέμου για τον κάθε σταθμό, όπως έχει εξαχθεί από τη συναθροισμένη χρονοσειρά των επεξεργασμένων δεδομένων (Κουτσογιάννης Δ., *Σημειώσεις Υδρομετεωρολογίας*, 2013). Η παραπάνω επεξεργασία είναι χρήσιμη για την εξασφάλιση της ευρύτερης έκτασης στην οποία μπορεί να παραχθεί αξιόλογο ενεργειακό δυναμικό στον Ελλαδικό χώρο. Για την περισσότερο αξιόπιστη ενεργειακή παραγωγή που μπορεί να προκύψει από κάποιο συγκεκριμένο τύπο ανεμογεννήτριας, είναι απαραίτητα τα τεχνικά χαρακτηριστικά της εν λόγω ανεμογεννήτριας αλλά και του ύψους τοποθέτησης των πτερυγίων, αφού η ταχύτητα του ανέμου αλλάζει σημαντικά με την αύξηση του ύψους, όπως έχει προαναφερθεί. Μερικά από αυτά τα χαρακτηριστικά είναι, το ύψος τοποθέτησης της ανεμογεννήτριας, όπως έχει προαναφερθεί, ο αριθμός των πτερυγίων της, το μήκος των πτερυγίων που δίνει συγκεκριμένο εμβαδόν για τον υπολογισμό του εκτοπισμένου αέρα και η εξαγωγή της ενέργειας από τον τύπο της ισχύος, αλλά επίσης και δύο ακόμα πολύ σημαντικά χαρακτηριστικά όπως είναι, η καμπύλη λειτουργίας μιας ανεμογεννήτριας και του προκύπτοντος συντελεστή απόδοσης της ανεμογεννήτριας αυτής, που μπορεί να αποτυπωθεί με πολλούς τρόπους.

### 4.2.1 Παραγόμενη αιολική ισχύς από μηνιαία επεξεργασία χρονοσειρών.

Κάθε ανεμογεννήτρια λειτουργεί σε ένα συγκεκριμένο εύρος ταχυτήτων από μια ελάχιστη έως μια μέγιστη και για ένα συγκεκριμένο αριθμό ωρών το έτος. Η ελάχιστη ταχύτητα είναι απαραίτητη για την έναρξη λειτουργίας μιας ανεμογεννήτριας, που σε αντίθετη περίπτωση παραμένει σταθερή και δεν παράγεται ενέργεια, ενώ κατά την παρατεταμένη λειτουργία σε μεγάλες ταχύτητες ανέμου, μπορεί να προκληθούν τεχνικά προβλήματα σε αυτή ή ακόμα και σε ακραίες περιπτώσεις να καταστραφεί. Οι φθορές μιας ανεμογεννήτριας, σε παρατεταμένη έκθεση σε πολύ υψηλές ταχύτητες του ανέμου, αντιβαίνουν στην τεχνικοοικονομική πολιτική μιας τέτοιας επένδυσης, αφού ουσιαστικά η παραγόμενη ενέργεια αντισταθμίζεται με το κόστος φθοράς και αντικατάστασης των μηχανικών μέρων του συστήματος που έχουν υποστεί βλάβη, αλλά ακόμα και να μην έχουν φθαρεί κάποια μέρη σε βαθμό αντικατάστασης, με το πέρασμα των ετών, μειώνεται σημαντικά η ενεργειακή παραγωγή, με αποτέλεσμα να αποβαίνει έμμεσα επιζήμια, για τον εκάστοτε ιδιοκτήτη. Από την παραπάνω αναφορά είναι εμφανές ότι ο υπολογισμός της παραγόμενης ισχύος και δη της παραγόμενης ενέργειας είναι απόρροια πολλών παραγόντων, τόσο τεχνικών, που αφορούν την ίδια τη γεννήτρια, αλλά και κλιματολογικών, αφού πρέπει να μετρηθεί η ταχύτητα του ανέμου με αξιόπιστο τρόπο, ώστε να μπορεί να αναχθεί με ασφάλεια σε οποιοδήποτε ύψος, για τον υπολογισμό της ενέργειας της εκάστοτε ανεμογεννήτριας.

Επιπρόσθετα, ένα σημαντικό χαρακτηριστικό που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη για την επιλογή της θέσης μιας ανεμογεννήτριας ή ενός πάρκου (σύνολο ανεμογεννητριών

κατάλληλα διατεταγμένων) είναι, όχι μόνο οι περιοχές που εμφανίστηκαν ή που εμφανίζονται μεγάλες ταχύτητες ανέμου, αλλά ο συνδυασμός μεγάλων ταχυτήτων και διάρκειας πνοής του ανέμου, που θα αποτελέσει συνδυασμό μέγιστης απόδοσης μιας ανεμογεννήτριας. Για αυτό το λόγο, για τον υπολογισμό της εμπειρικής ισχύος σε κάθε περιοχή χρησιμοποιήθηκε η μέση μηνιαία ταχύτητα της μεταβλητής, του ανέμου για κάθε μήνα - εποχικά και ετήσια όπως επίσης έγιναν και χάρτες με ταξινομημένες χρονοσειρές σε αύξουσα σειρά (από τη μεγαλύτερη τιμή στη μικρότερη) και υπολογίστηκε το αντίστοιχο ποσοστό (1% - 5% - 10% - 20% - 30%) των μέγιστων ταχυτήτων κάθε περιοχής και εξήχθησαν χάρτες για την καλύτερη εποπτεία των περιοχών που έχουν υψηλές ταχύτητες αλλά και σε τί συχνότητα αυτές εμφανίζονται. Παρακάτω, παρατίθεται ο Χάρτης 4.12, με τη μηνιαία εμπειρική παραγωγή ισχύος από την ταχύτητα του ανέμου αλλά και χάρτες που δείχνουν τη συχνότητα που εμφανίζονται οι ταχύτητες αυτές στο αντίστοιχο ποσοστό υπολογισμού. Στο παράρτημα Β9 παρουσιάζονται, οι υπόλοιποι χάρτες που αποτυπώνουν την παραγόμενη ισχύ τόσο σε μηνιαίο, όσο και σε εποχιακό επίπεδο.

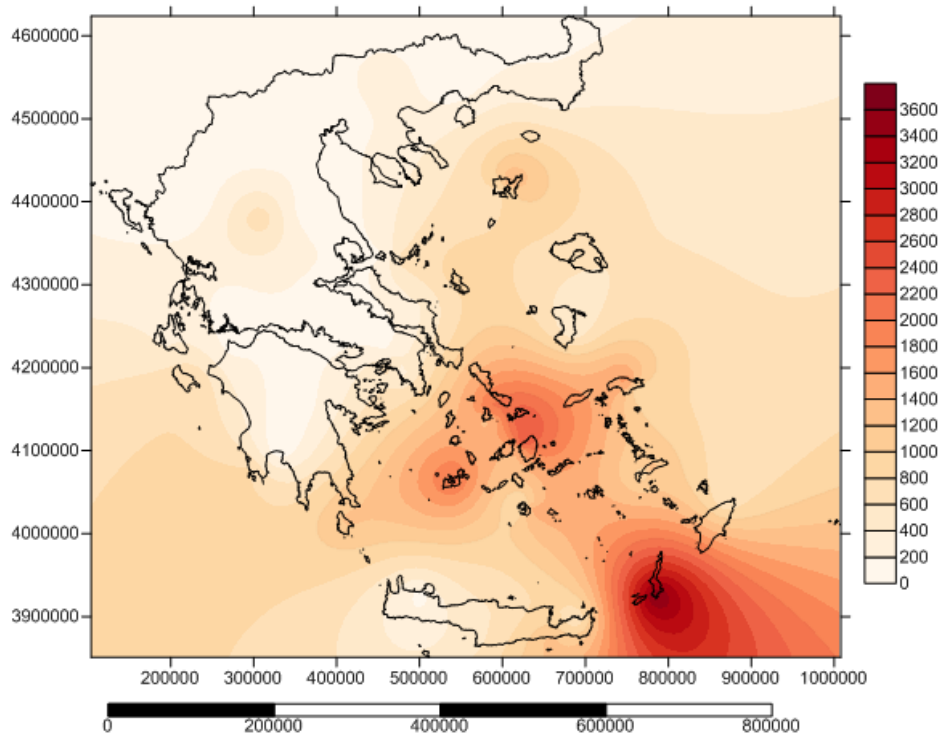


Χάρτης 4.12: Ετήσια παραγωγή ισχύος ( $W/m^2$ ) του ανέμου από μηνιαία συναθροισμένη χρονοσειρά για κάθε περιοχή.

#### 4.2.2 Παραγόμενη αιολική ισχύς από ημερήσια και μηνιαία επεξεργασία σειρών δεδομένων 66 σταθμών στον Ελλαδικό χώρο.

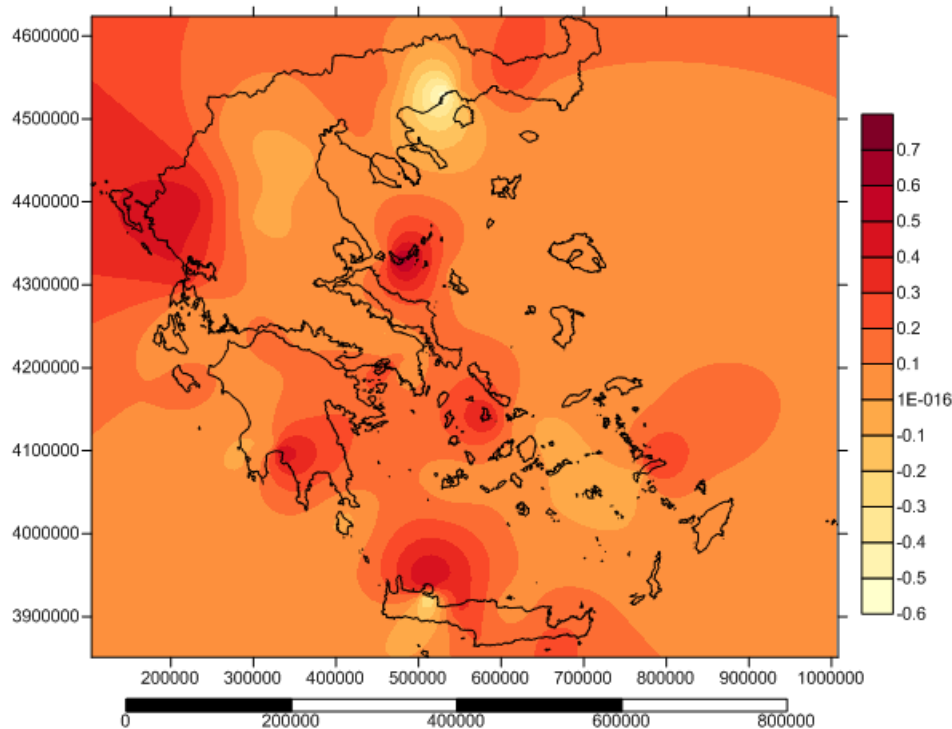
Η ίδια διαδικασία με την παραγόμενη ισχύ για κάθε ένα μήνα πραγματοποιείται και στο εν λόγω κεφάλαιο με σκοπό να αποτιμηθεί η οποιαδήποτε διαφορά υπάρχει στον τελικό υπολογισμό της ισχύος, από τα ημερήσια δεδομένα αλλά και από τα μηνιαία. Όσο η πληροφορία των δεδομένων αναφέρεται σε μικρότερη χρονική κλίμακα (πχ ωριαία) τότε είναι περισσότερο ασφαλής η εκτίμηση της ισχύος και επομένως της παραγόμενης ενέργειας, γιατί μπορεί με εμπειρικό τρόπο (ιστόγραμμα συχνοτήτων) να υπάρχει αξιόπιστη πρωτογενής πληροφορία, η οποία και να χρησιμοποιηθεί για την εξαγωγή των πραγματικών ωρών λειτουργίας μιας ανεμογεννήτριας και η εμπειρικά παραγόμενη ισχύς να είναι πολύ κοντά στο πραγματικό μέγεθος απόδοσης (Ιωάννου, 2012). Παρακάτω παρατίθεται ο Χάρτης 4.13, με

την ετήσια παραγωγή της ισχύος από ημερήσιες τιμές, από τα δεδομένα των ίδιων σταθμών από συνάθροιση των αρχικών χρονοσειρών των δεδομένων.



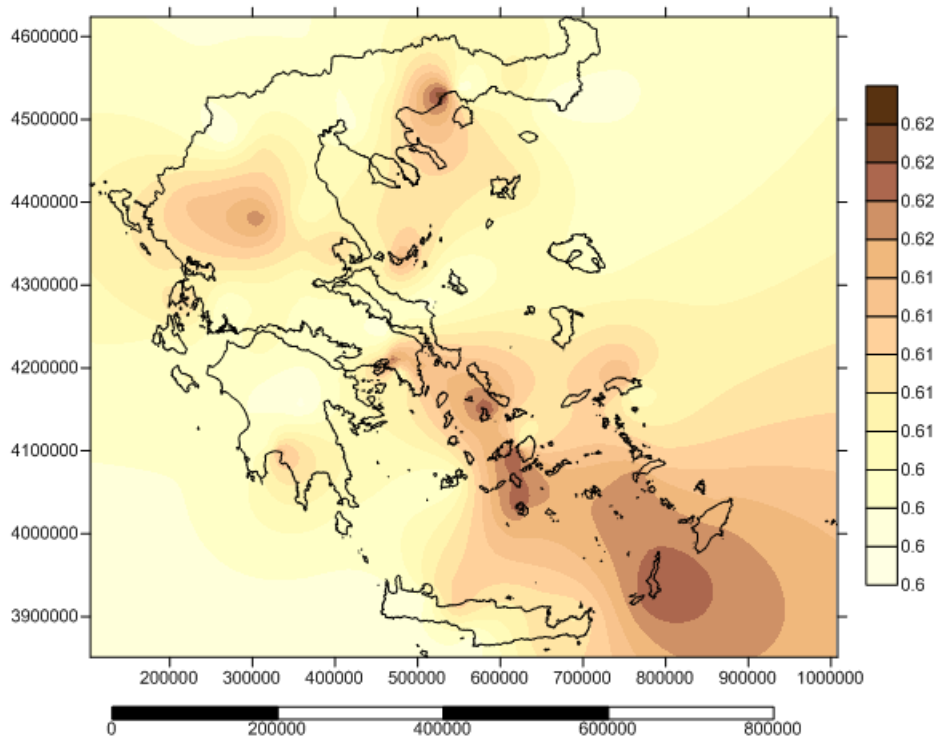
Χάρτης 4.13: Ετήσια παραγωγή ισχύος ( $W/m^2$ ) του ανέμου από ημερήσια συναθροισμένη χρονοσειρά σε μηνιαία για κάθε περιοχή.

Από τη σύγκριση με τον παραπάνω Χάρτη 4.12, που αφορά την εξαγόμενη ισχύ από μηνιαία δεδομένα, δεν προκύπτουν σημαντικές διαφορές και η εικόνα που εμφανίζει ο χάρτης είναι σχεδόν ίδια σε ετήσιο επίπεδο. Στο παράρτημα B10, αποτυπώνονται οι υπόλοιποι χάρτες σε μηνιαία αλλά και σε εποχική βάση. Η ταυτόσημη εικόνα των χαρτών υπολογισμού της μηνιαίας ισχύος από μηνιαία και ημερήσια δεδομένα δε σημαίνει ότι ανάμεσα στους υπολογισμένους μήνες δεν υπάρχουν αρκετές διαφορές στον υπολογισμό, απλά υπάρχουν κάποιοι μήνες που είναι μεγαλύτερη και σε κάποιους άλλους μικρότερη η υπολογισμένη ισχύς, με αποτέλεσμα οι διαφορές αυτές στο τελικό αθροιστικό ετήσιο μέγεθος να αυτοαναιρούνται. Για αυτό το λόγο σκόπιμο είναι, η ανάλυση να επεκταθεί και για κάθε μήνα ξεχωριστά στον οποίο συγκρίνονται οι αντίστοιχες μηνιαίες τιμές της ισχύος που εξήχθησαν από τις μηνιαίες και από τις ημερήσιες τιμές αντίστοιχα. Στον παρακάτω Χάρτη 4.14, αποτυπώνεται η διαφορά εκφρασμένη σε ποσοστό της ετήσιας ισχύος από την ημερήσια και τη μηνιαία, διαιρούμενη με την ημερήσια για να προκύψει το ποσοστό αύξησης ή μείωσης αντίστοιχα της υπολογισμένης ισχύος: (μηνιαία ισχύ από ημερήσια δεδομένα – μηνιαία ισχύ από μηνιαία δεδομένα) / μηνιαία ισχύ από ημερήσια δεδομένα. Τα αποτελέσματα του υπολογισμού αυτού πινακοποιήθηκαν και παρουσιάζονται στο αντίστοιχο παράρτημα A10 - A12 αλλά και η εξαγωγή χαρτών που είναι περισσότερο εμφανής η διαφορά των τιμών της ισχύος αλλά και η περιοχή στην οποία πραγματοποιήθηκε η διαφορά αυτή, παρουσιάζονται στους αντίστοιχους χάρτες του παραρτήματος B11.



Χάρτης 4.14: Ετήσια διαφοροποίηση της ισχύος που υπολογίζεται από την ποσοστιαία διαφορά των μηνιαίων τιμών της ισχύος, υπολογισμένη από τα ημερήσια αλλά και από τα μηνιαία δεδομένα αντίστοιχα.

Από τον παραπάνω Χάρτη 4.14, παρατηρούμε ότι οι εμφανιζόμενες διαφορές στην υπολογισμένη ισχύ είναι μικρές στο μεγαλύτερο μέρος του Ελλαδικού χώρου και κυρίως στη νησιωτική Ελλάδα αλλά και στην ηπειρωτική, σε περιοχές που εμφανίζεται μικρότερη γεωμορφολογική ανομοιογένεια. Οι μεγαλύτερες διαφορές που εμφανίζονται είναι στη δυτική Ελλάδα και συγκεκριμένα στην δυτική πλευρά της οροσειράς της Πίνδου, που λόγω αναγλύφου επηρεάζεται ο άνεμος σε τοπικό επίπεδο και δημιουργούνται έντονες ανομοιομορφίες σε μεγαλύτερη κλίμακα (ημερήσια - μηνιαία). Οι αρνητικές τιμές του ποσοστού σημαίνουν ότι στον τελικό υπολογισμό η μηνιαία ισχύς υπολογισμένη από ημερήσια δεδομένα προέκυψε μικρότερη από την αντίστοιχη μηνιαία, υπολογισμένη από μηνιαίες τιμές. Στις περιοχές της βόρειας Ελλάδος αλλά και κατά μήκος της οροσειράς της Πίνδου οι διαφορές είναι μικρές γιατί και η ταχύτητα του ανέμου στις περιοχές αυτές είναι μικρή, άνω ο άνεμος κατερχόμενος στα παράλια της Κρήτης αλλά και στις νότιες ακτές της Πελοποννήσου επιταχύνεται και δημιουργούνται διαφοροποιήσεις στην αντίστοιχη υπολογισμένη ισχύ. Επομένως, σε περιοχές που εμφανίζουν έντονη διακύμανση, τόσο σε μηνιαία όσο και σε ημερήσια χρονική κλίμακα, για την ταχύτητα του ανέμου είναι περισσότερο δύσκολος ο υπολογισμός της παραγόμενης ισχύος των περιοχών αυτών. Για λόγους πληρότητας υπολογίζεται και ο Χάρτης 4.15, με το ποσοστό της διαφοράς ανάμεσα στην μηνιαία υπολογισμένη εμπειρική ισχύ και στον υπολογισμό της ισχύος από την κατανομή Weibull σε μηνιαία και εποχιακή βάση που παρατίθενται στα αντίστοιχα παραρτήματα A13 και B12. Παρακάτω, παρατίθεται χάρτης που αποτυπώνεται το ποσοστό αυτό της διαφοράς σε ετήσια κλίμακα.



Χάρτης 4.15: Ποσοστό της διαφοράς ανάμεσα στην εμπειρικά υπολογισμένη μηνιαία ισχύ και στην υπολογισμένη ισχύ από την προσαρμογή της κατανομής Weibull σε ετήσια βάση.

Από τον Χάρτη 4.15, είναι εμφανές ότι οι διαφορές ανάμεσα στα δυο υπολογισμένα μεγέθη είναι μεγαλύτερες στην δυτική και νοτιοδυτική Κρήτη στο κεντρικό Αιγαίο, στην κεντρική Εύβοια, στην κεντρική Ελλάδα, αλλά και βορειοανατολικά της Πελοποννήσου. Σε όλες αυτές τις διαφορές, η τιμή της εμπειρικής ισχύος είναι πάντα μεγαλύτερη από τη θεωρητικά υπολογισμένη και μάλιστα πολλές φορές το ποσοστό αυτό ξεπερνάει το 50%. Αυτό είναι αναμενόμενο, αφού η θεωρητική ισχύς υπολογίζεται με βάση το θεωρητικά διαθέσιμο αεολικό δυναμικό μιας περιοχής ή αλλιώς σχετικά με το πόση ενέργεια θα μπορούσε να παραχθεί από τον άνεμο σε μια συγκεκριμένη περιοχή με μια σταθερή μέση μηνιαία ταχύτητα που συνεχώς θα έπνεε στην εν λόγω περιοχή. Κάτι τέτοιο όμως είναι ανέφικτο και είναι μια θεωρητική προσέγγιση για την εξέταση των περιοχών που είναι εν δυνάμει υποψήφιες για ανεμολογική εγκατάσταση. Για περαιτέρω μελέτη, θα πρέπει να συνυπολογιστούν, όλοι οι κλιματολογικοί αλλά και τεχνικοί παράγοντες, για την ακριβή θέση τον προσανατολισμό, την απαιτούμενη ισχύ, το ύψος τοποθέτησης και άλλα τεχνικά χαρακτηριστικά, για μια επικερδή και προσοδοφόρα επένδυση.

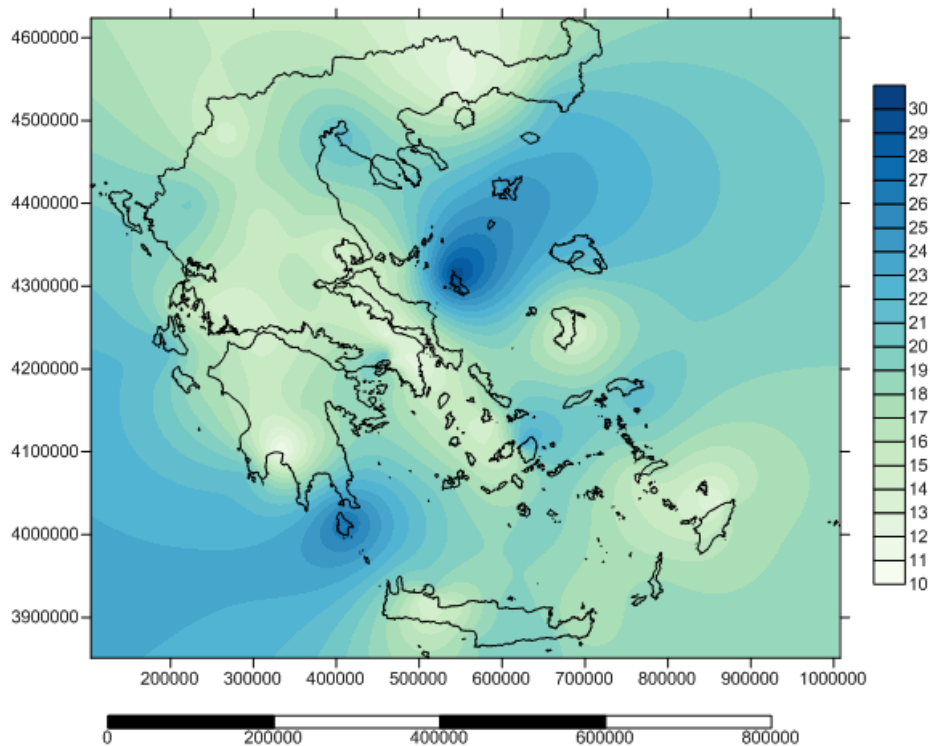
### 4.3 Μέγιστες παρατηρημένες τιμές από ταξινομημένο δείγμα σε 66 σταθμούς στον Ελλαδικό χώρο.

Από το προηγούμενο υποκεφάλαιο γίνεται σαφές, ότι η παράγωγη της ισχύς είναι μέγεθος το οποίο εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, τόσο τεχνικούς όσο και κλιματολογικούς. Οι τεχνικοί παράγοντες αφορούν, κυρίως χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας, ενώ οι κλιματολογικοί παράγοντες τη μεταβλητή της ταχύτητας του ανέμου, τη σωστή αξιοποίηση και επεξεργασία των δεδομένων. Για το λόγο αυτό, κρίνεται αναγκαίο η περεταίρω επεξεργασία της ταχύτητας του ανέμου και ιδιαίτερα των μέγιστων τιμών, αλλά και της συχνότητας που αυτές εμφανίζονται. Το γεγονός αυτό είναι σημαντικό για την αξιοποίηση

του αιολικού δυναμικού μιας περιοχής, αφού η μέση τιμή της ταχύτητας της μεταβλητής μεμονωμένα, είναι ελλιπής γνώση χωρίς τη διακύμανση της τιμής αυτής στο χώρο. Αυτό σημαίνει ότι μια περιοχή μπορεί να έχει ισχυρούς ανέμους αλλά για μικρό χρονικό διάστημα (μικρή διασπορά) και η μέση τιμή της να είναι πολύ χαμηλότερη από τη μέγιστη παρατηρημένη για την ίδια περίοδο. Για αυτό το λόγο, κρίνεται σκόπιμο, η εξαγωγή χαρτών για συγκεκριμένα ποσοστά ταχυτήτων ανέμου και αντίστροφα για συγκεκριμένες ταχύτητες, σε ποιά ποσοστό ανέμου αντιστοιχούν.

#### 4.3.1 Μέγιστα ημερήσια παρατηρημένα στους 66 σταθμούς σε διαφορετική περίοδο μέτρησης και για ποσοστά 1-5-10-12-30% των μέγιστων ημερήσιων τιμών.

Για την εκτίμηση χαρτών με τη μέγιστη παρατηρημένη ημερήσια τιμή από το δείγμα των 66 σταθμών στον Ελλαδικό χώρο, εξάγονται χάρτες με τη μέγιστη παρατηρημένη ημερήσια τιμή αλλά και χάρτες με την ταχύτητα του ανέμου σε συγκεκριμένα ποσοστά εκτίμησης 1% - 5% - 10% - 20% -30% από το ταξινομημένο δείγμα των μέγιστων μηνιαίων τιμών των δεδομένων. Τα αντίστοιχα δεδομένα ταξινομούνται σε φθίνουσα σειρά από το μεγαλύτερο παρατηρημένο στο μικρότερο και υπολογίζεται η ταχύτητα του ανέμου στο αντίστοιχο επιθυμητό ποσοστό. Τα αποτελέσματα αναφέρονται παρακάτω, Χάρτης 4.16, που φαίνεται, όχι μόνο η αντίστοιχη ταχύτητα του ανέμου, αλλά και η κατανομή τους στον Ελλαδικό χώρο.

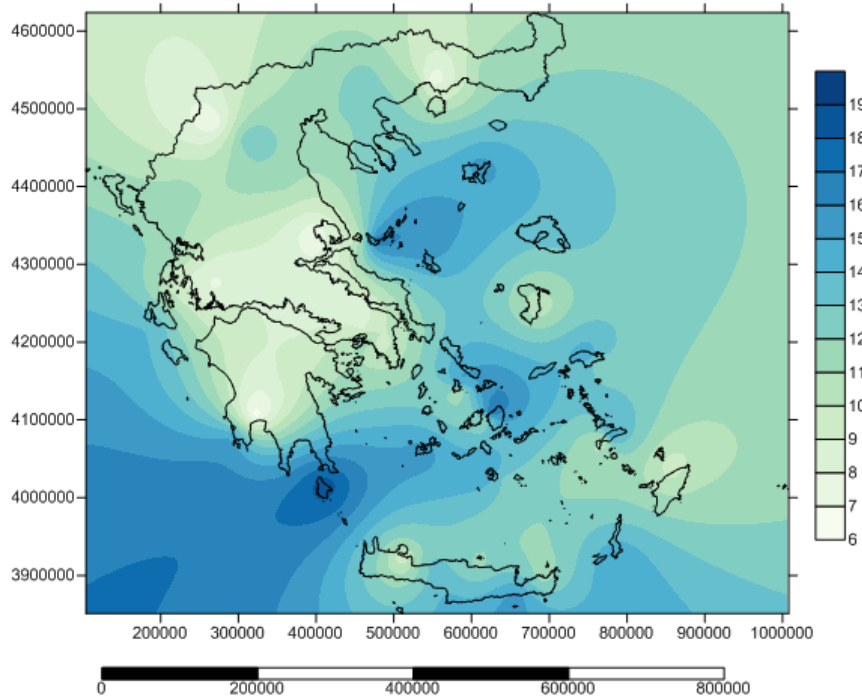


Χάρτης 4.16: Μέγιστες ημερήσιες τιμές της μεταβλητής της ταχύτητας του ανέμου από το δείγμα των 66 σταθμών στον Ελλαδικό χώρο.

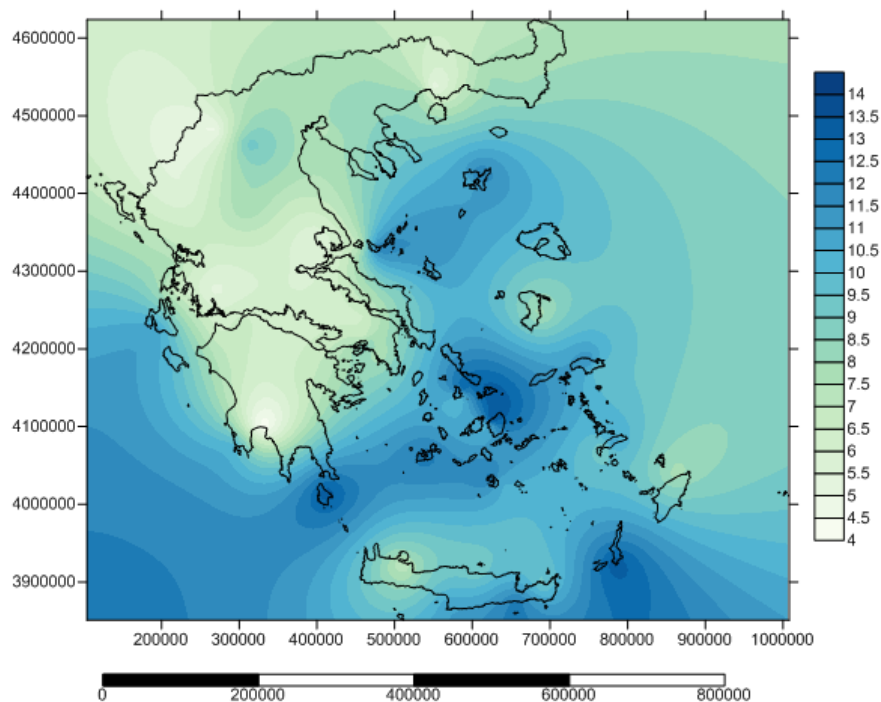
Από τον παραπάνω Χάρτη 4.16, είναι εμφανές ότι οι μέγιστες ταχύτητες του ανέμου, που έχουν παρατηρηθεί σε ημερήσια χρονική κλίμακα στον Ελλαδικό χώρο σημειώνονται κυρίως στη Σκύρο, στο κεντρικό Αιγαίο, αλλά και στη νότια Πελοπόννησο και συγκεκριμένα στο νησί των Κυθήρων, της τάξης των 25 -30 m/s. Από τον Χάρτη 4.17, τα κέντρα των μέγιστων παρατηρημένων ημερησίων τιμών παραμένουν τα ίδια με μεγαλύτερο όμως γεωγραφικό



εύρος αλλά και με μικρότερη τιμή ημερήσιου μέγιστου, αφού το εύρος της ταχύτητας του μέγιστου ημερήσιου ανέμου κυμαίνεται από 15- 20 m/s.



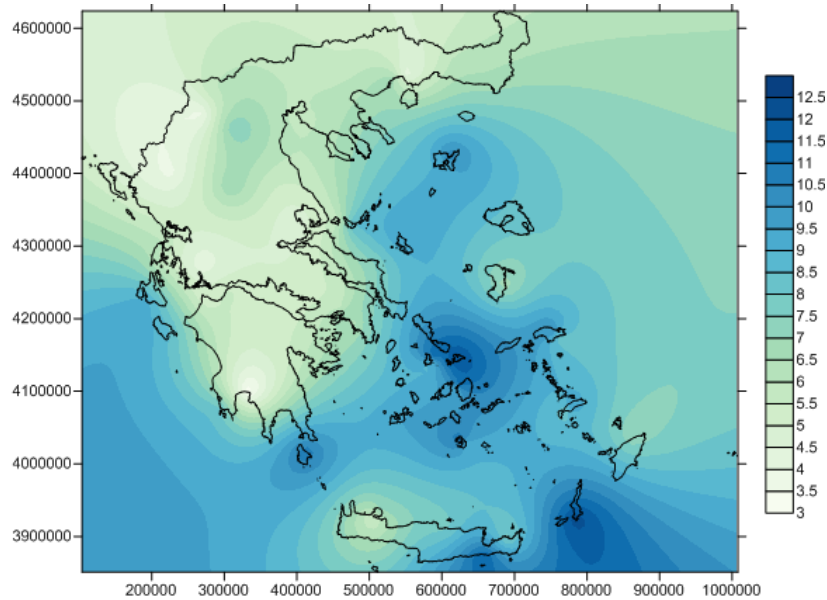
Χάρτης 4.17: Μέγιστες ημερήσιες τιμές της μεταβλητής της ταχύτητας του ανέμου από το δείγμα των 66 σταθμών στον Ελλαδικό χώρο για ποσοστό 1% των μέγιστων ημερήσιων τιμών.



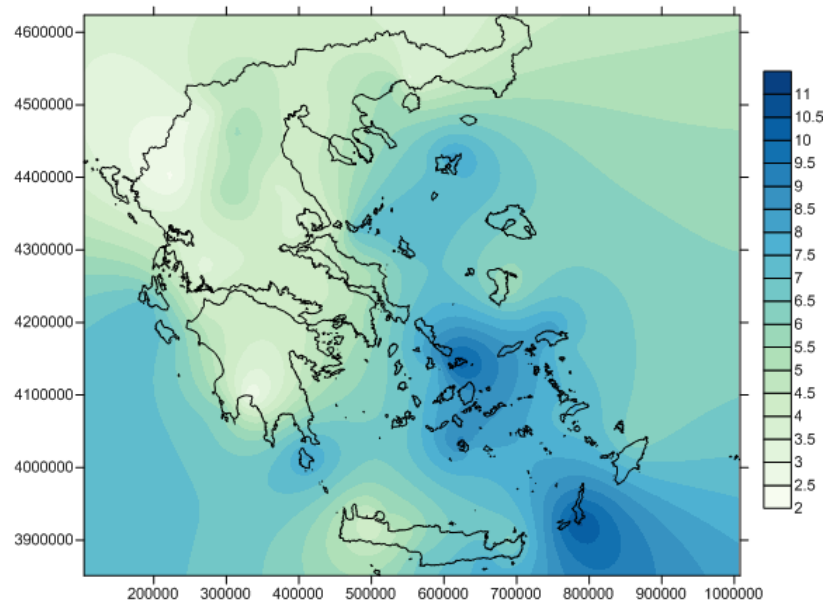
Χάρτης 4.18: Μέγιστες ημερήσιες τιμές της μεταβλητής της ταχύτητας του ανέμου από το δείγμα των 66 σταθμών στον Ελλαδικό χώρο για ποσοστό 5% των μέγιστων ημερήσιων τιμών.

Σε ποσοστό 5% των μέγιστων ημερήσιων παρατηρημένων τιμών, Χάρτης 4.18, το εύρος της μέγιστης ταχύτητας του ανέμου κυμαίνεται από 10 - 15 m/s και διασπείρεται γεωγραφικά σε πολύ μεγαλύτερο μέρος στον Ελλαδικό χώρο και κυρίως ανατολικά - νότια και νότιο -

ανατολικά. Σε ολόκληρη σχεδόν την έκταση του Αιγαίου σε ολόκληρη την Κρήτη, τη Ρόδο αλλά και στα νότιο και νότιο - ανατολικά παράλια της Πελοποννήσου, φτάνοντας μέχρι τη Λευκάδα. Στον Χάρτη 4.19, για ποσοστό 10% των μέγιστων παρατηρημένων ημερήσιων ταχυτήτων του ανέμου, οι μέγιστες τιμές συγκεντρώνονται κυρίως στο Αιγαίο, με μέγιστα κέντρα κυρίως το κεντρικό Αιγαίο, τη Ρόδο, αλλά και τη νότιο - ανατολική πλευρά της Κρήτης με εύρος ταχυτήτων μικρότερο από 9 έως 12.5 m/s.

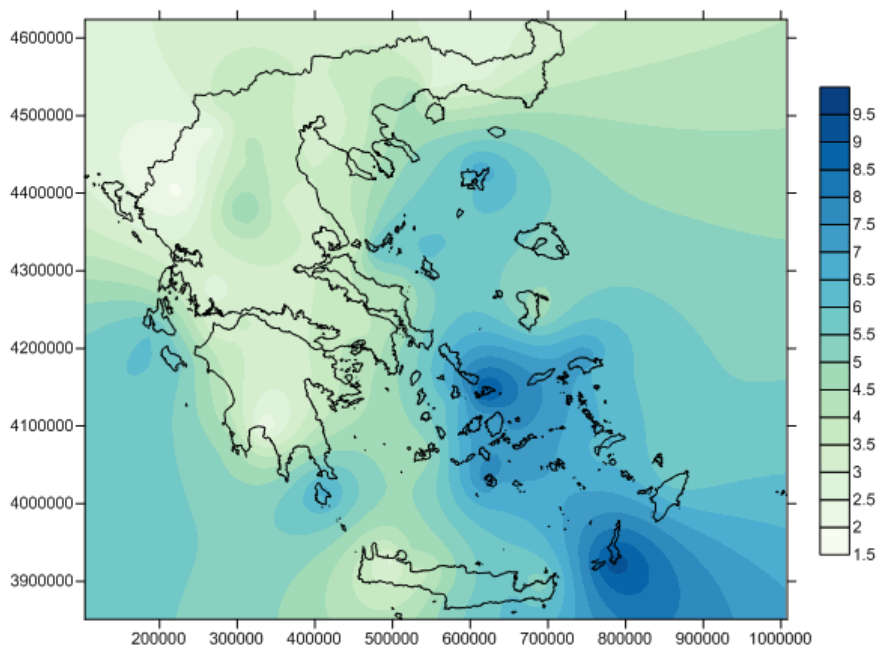


Χάρτης 4.19: Μέγιστες ημερήσιες τιμές της μεταβλητής της ταχύτητας του ανέμου από το δείγμα των 66 σταθμών στον Ελλαδικό χώρο για ποσοστό 10% των μέγιστων ημερήσιων τιμών.



Χάρτης 4.20: Μέγιστες ημερήσιες τιμές της μεταβλητής της ταχύτητας του ανέμου από το δείγμα των 66 σταθμών στον Ελλαδικό χώρο για ποσοστό 20% των μέγιστων ημερήσιων τιμών.

Στο ποσοστό αυτό όπως απεικονίζεται και στον Χάρτη 4.20, τα μέγιστα κέντρα είναι στη Ρόδο αλλά και στο κεντρικό Αιγαίο με μέγιστα να εμφανίζονται στα Κύθηρα στη Λευκάδα και στη νότια Κρήτη με μικρότερες τιμές εμφάνισης που κυμαίνονται από 7.5 - 11.5 m/s.



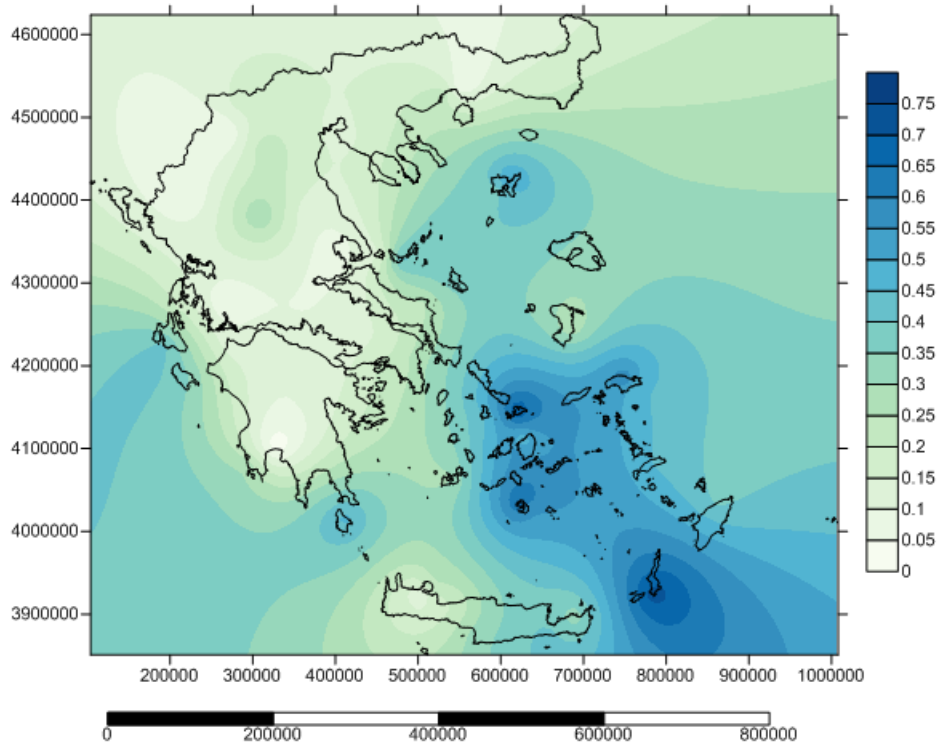
Χάρτης 4.21: Μέγιστες ημερήσιες τιμές της μεταβλητής της ταχύτητας του ανέμου από το δείγμα των 66 σταθμών στον Ελλαδικό χώρο για ποσοστό 30% των μέγιστων ημερήσιων τιμών.

Για μια ακόμα φορά στο ποσοστό του 30% των μέγιστων ημερήσιων παρατηρημένων τιμών των σταθμών τα κέντρα των μέγιστων ημερήσιων τιμών Χάρτης 4.21, βρίσκονται στη Ρόδο, στο Κεντρικό Αιγαίο, στα Κύθηρα, αλλά και στην ανατολική Κρήτη με εύρος μέγιστων ημερήσιων παρατηρημένων τιμών να κυμαίνεται από 5.5 έως 10 m/s.

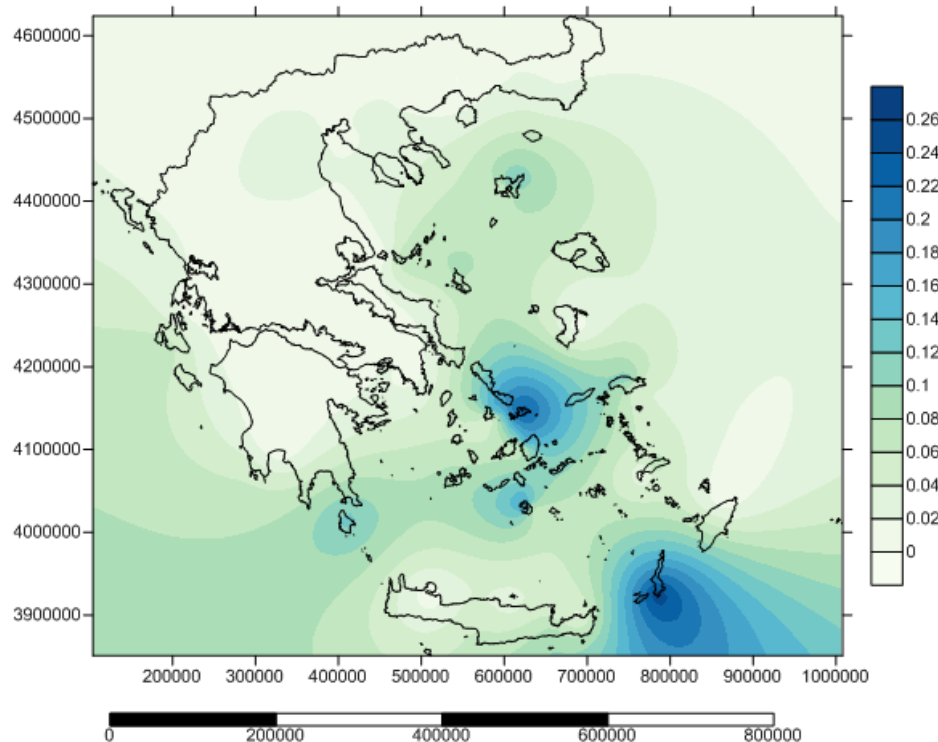
#### 4.3.2 Μέγιστα ημερήσια παρατηρημένα ποσοστά στους 66 σταθμούς σε διαφορετική περίοδο μέτρησης και για συγκεκριμένες ταχύτητες των 5 - 10 - 15 -20 - 25 m/s.

Πραγματοποιείται και πάλι η ίδια διαδικασία με το προηγούμενο υποκεφάλαιο μόνο που στο ταξινομημένο δείγμα των φθινοσών ημερήσιων τιμών εξετάζεται το ποσοστό των ταχυτήτων που είναι πάνω από συγκεκριμένες τιμές. Επομένως γίνονται και πάλι χάρτες 4.22-4.24, που αφορούν συγκεκριμένες ταχύτητες του ανέμου και εξάγονται σε ποιο ποσοστό οι άνεμοι αυτοί πνέουν στην εκάστοτε περιοχή. Στους παρακάτω παρατιθέμενους χάρτες 4.22-4.24, είναι εμφανής και η γεωγραφική κατανομή των αντίστοιχων αυτών ποσοστών που αποτυπώνει τη συχνότητα των συγκεκριμένων ταχυτήτων με βάση τη γεωγραφική τους κατανομή.

Τα μεγαλύτερα ποσοστά των ανέμων που πνέουν με ημερήσια ταχύτητα πάνω από 5 m/s, Χάρτης 4.22, βρίσκονται στο κεντρικό Αιγαίο, στο νησί της Ρόδου, στο νησί της Κω, αλλά και στα παράλια της Πελοποννήσου. Τα ποσοστά αυτά κυμαίνονται από 50 - 80% που σημαίνει ότι στους σταθμούς αυτούς η ταχύτητα του ανέμου πάνω από 5 m/s ξεπερνάει το 50% των δεδομένων.



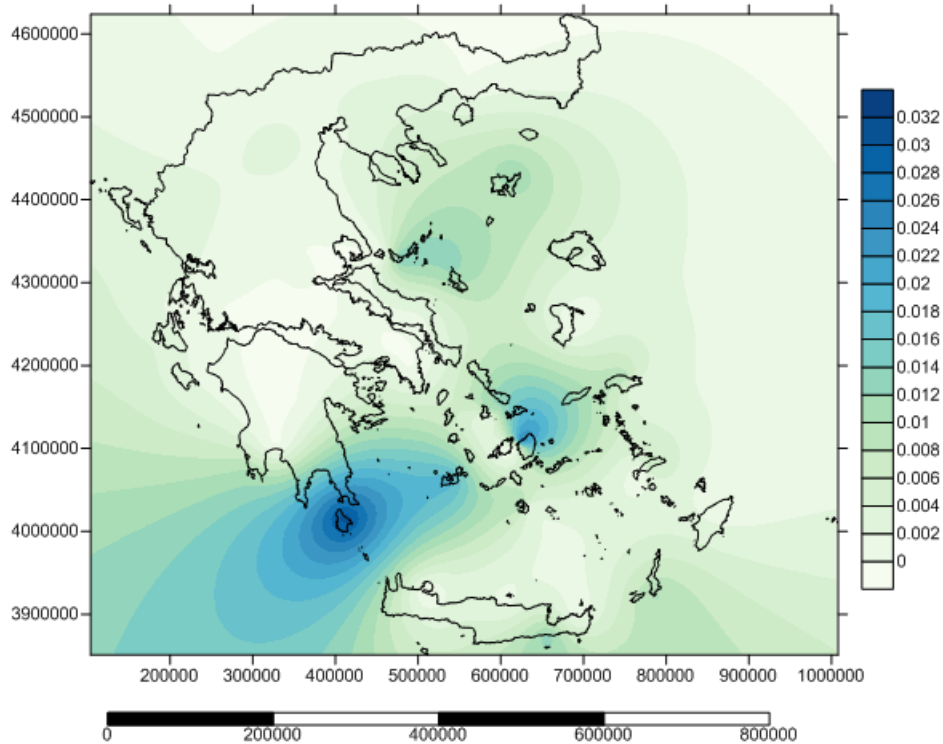
Χάρτης 4.22: Ποσοστό των ανέμου που πνέουν με ταχύτητα ανέμου πάνω από 5 m/s από τα ημερήσια δεδομένα των 66 σταθμών στην Ελλάδα.



Χάρτης 4.23: Ποσοστό των ανέμου που πνέουν με ταχύτητα ανέμου πάνω από 10 m/s από τα ημερήσια δεδομένα των 66 σταθμών στην Ελλάδα.

Τα ποσοστά των ημερήσιων δεδομένων των σταθμών που έχουν ταχύτητα πάνω από 10 m/s, Χάρτης 4.23, γίνονται πολύ μικρότερα από ότι στον προηγούμενο χάρτη και εμφανίζονται

πάλι στο κεντρικό Αιγαίο και στην Κω, με αυξημένες τιμές να εμφανίζονται στα παράλια της Πελοποννήσου και στο νησί των Κυθήρων. Το ποσοστό είναι πολύ μικρότερο και κυμαίνεται από 15 έως 28%.



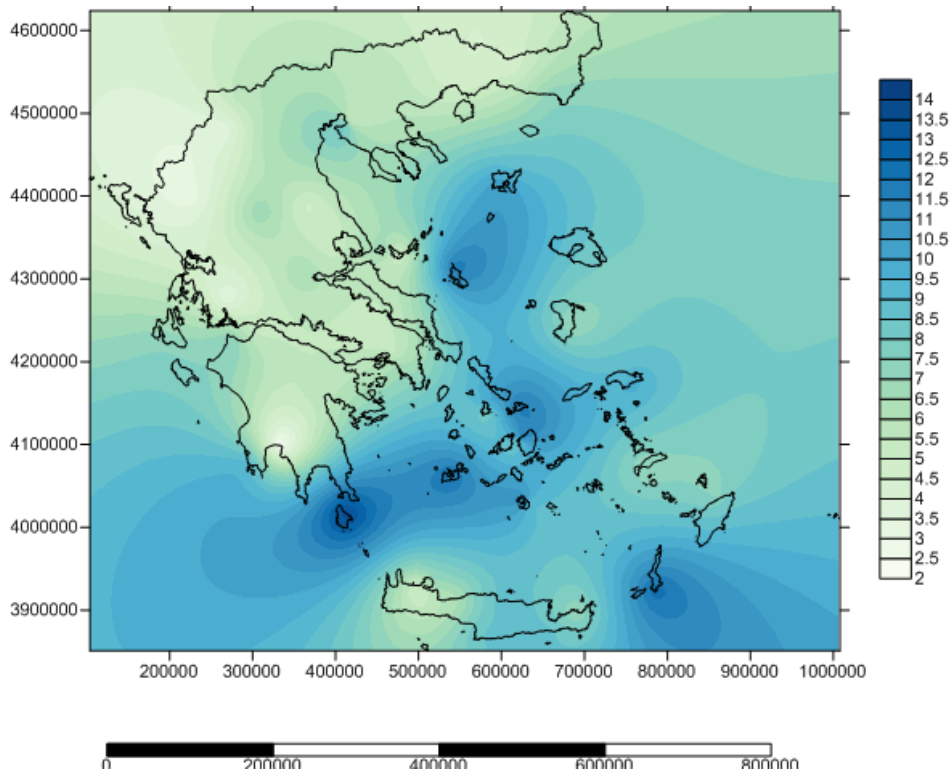
Χάρτης 4.24: Ποσοστό των ανέμου που πνέουν με ταχύτητα ανέμου πάνω από 15 m/s από τα ημερήσια δεδομένα των 66 σταθμών στην Ελλάδα.

Το ποσοστό στην περίπτωση των ημερήσιων παρατηρημένων ταχυτήτων που πνέουν πάνω από 15 m/s, Χάρτης 4.24, είναι πολύ μικρότερο και έχει εύρος από 2 έως 3% και εμφανίζεται στο νησί των Κυθήρων αλλά και σε μικρή έκταση στο κεντρικό Αιγαίο.

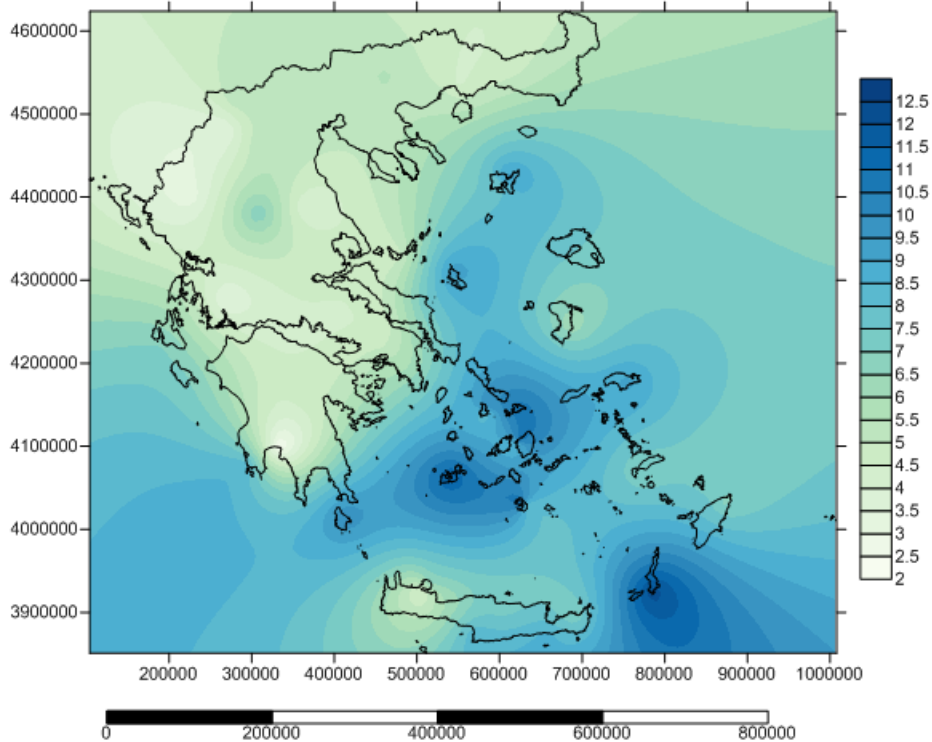
#### **4.3.3 Μέγιστα μηνιαία παρατηρημένα στους 66 σταθμούς σε διαφορετική περίοδο μέτρησης και για ποσοστά 1-5-10-12-30% των μέγιστων ημερήσιων τιμών.**

Η ίδια διαδικασία έγινε και στις μηνιαίες συναθροισμένες σειρές από τα δεδομένα των 66 σταθμών στον Ελλαδικό χώρο και τα αποτελέσματα αποτυπώθηκαν πάνω σε χάρτες 4.26-4.30.

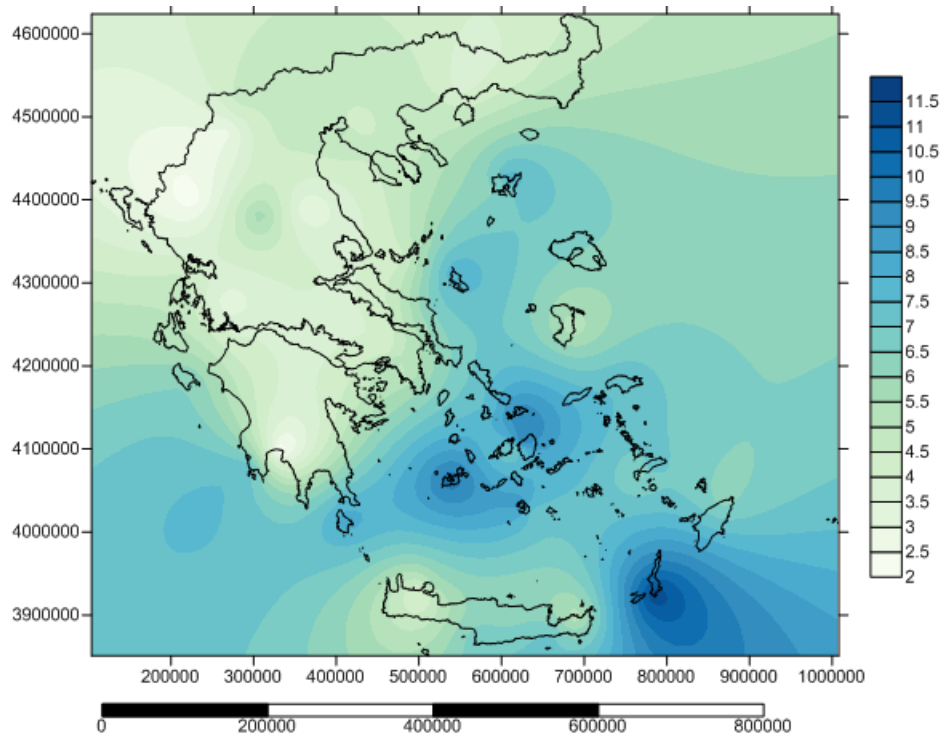
Από τον παρακάτω Χάρτη 4.25, οι μέγιστες ταχύτητες του ανέμου εμφανίζονται στο τόξο που περιλαμβάνει το Αιγαίο, τμήμα από την κεντρική και ανατολική Κρήτη, το νησί της Κω, τα νότια παράλια της Πελοποννήσου και καταλήγει στη Λευκάδα απομειούμενο. Το εύρος των ταχυτήτων σε μηνιαία χρονική κλίμακα είναι από 8.5 έως 14.5 m/s. Στο 1% των μέγιστων μηνιαίων παρατηρημένων τιμών, Χάρτης 4.26, το εύρος των ταχυτήτων μειώνεται από 8 έως 12.5 m/s στο κεντρικό Αιγαίο και στην Κω. Στο 5% των μέγιστων μηνιαίων παρατηρημένων τιμών, Χάρτης 4.27, το εύρος των ταχυτήτων μειώνεται από 8 έως 11.5 m/s στο κεντρικό Αιγαίο και στην Κω.



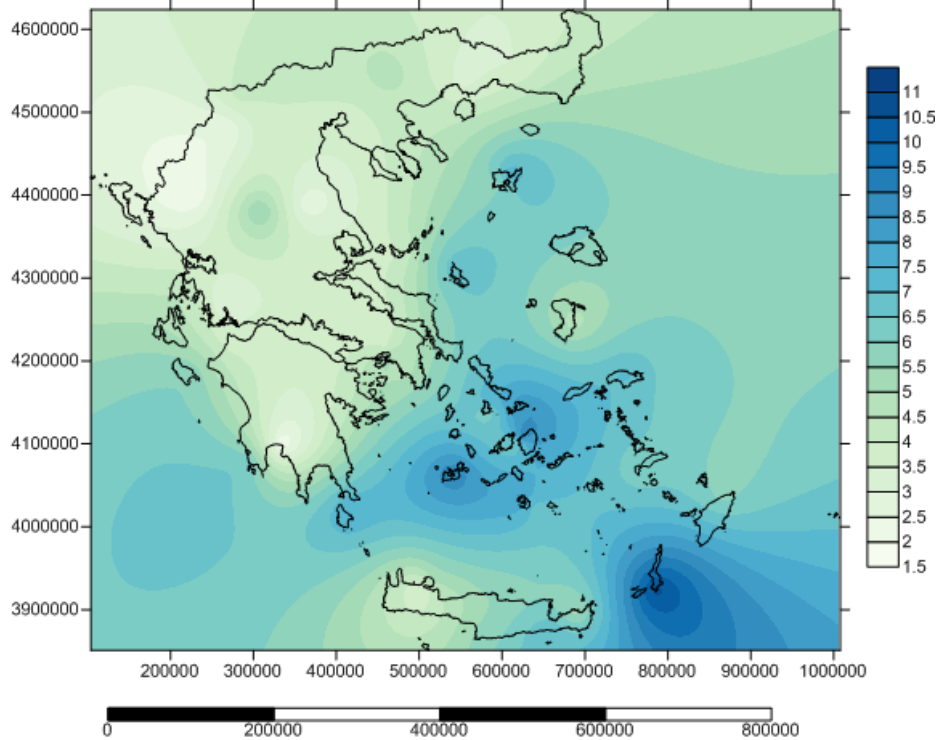
Χάρτης 4.25: Μέγιστες παρατηρημένες μηνιαίες τιμές των 66 σταθμών στον Ελλαδικό χώρο.



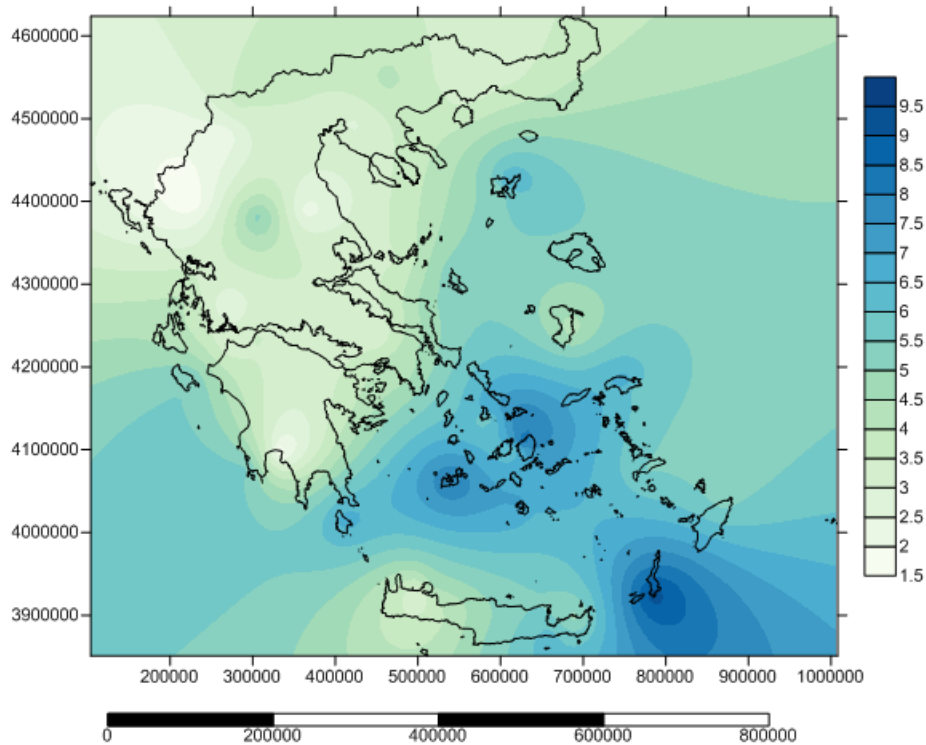
Χάρτης 4.26: Μέγιστες μηνιαίες τιμές της μεταβλητής της ταχύτητας του ανέμου από το δείγμα των 66 σταθμών στον Ελλαδικό χώρο για ποσοστό 1% των μέγιστων μηνιαίων τιμών.



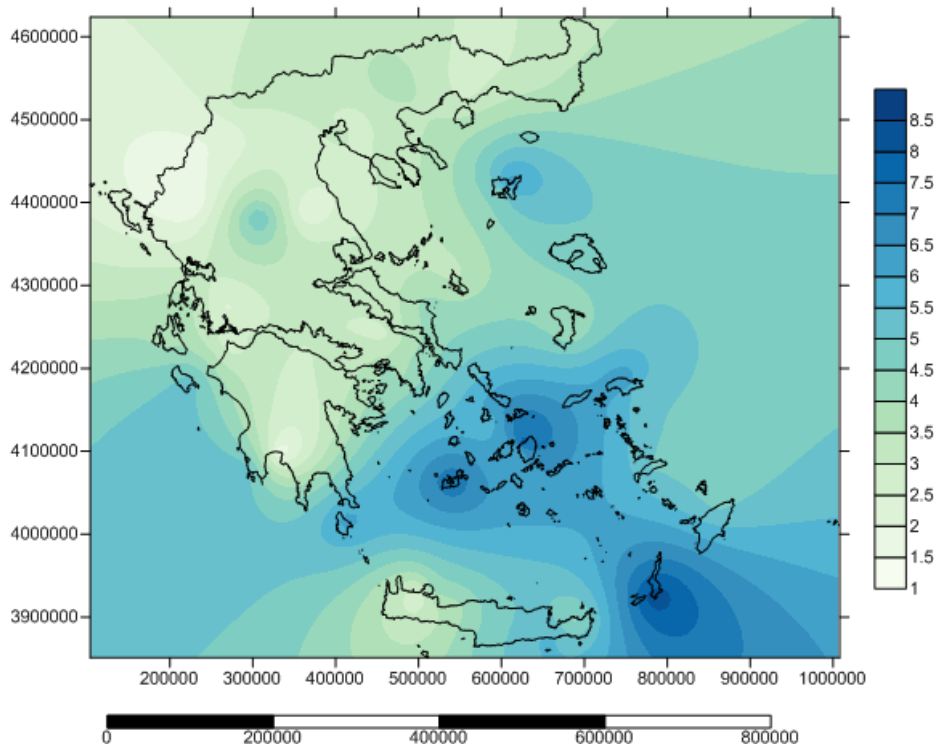
Χάρτης 4.27: Μέγιστες μηνιαίες τιμές της μεταβλητής της ταχύτητας του ανέμου από το δείγμα των 66 σταθμών στον Ελλαδικό χώρο για ποσοστό 5% των μέγιστων μηνιαίων τιμών.



Χάρτης 4.28: Μέγιστες μηνιαίες τιμές της μεταβλητής της ταχύτητας του ανέμου από το δείγμα των 66 σταθμών στον Ελλαδικό χώρο για ποσοστό 10% των μέγιστων μηνιαίων τιμών.



Χάρτης 4.29: Μέγιστες μηνιαίες τιμές της μεταβλητής της ταχύτητας του ανέμου από το δείγμα των 66 σταθμών στον Ελλαδικό χώρο για ποσοστό 20% των μέγιστων μηνιαίων τιμών.



Χάρτης 4.30: Μέγιστες μηνιαίες τιμές της μεταβλητής της ταχύτητας του ανέμου από το δείγμα των 66 σταθμών στον Ελλαδικό χώρο για ποσοστό 30% των μέγιστων μηνιαίων τιμών.

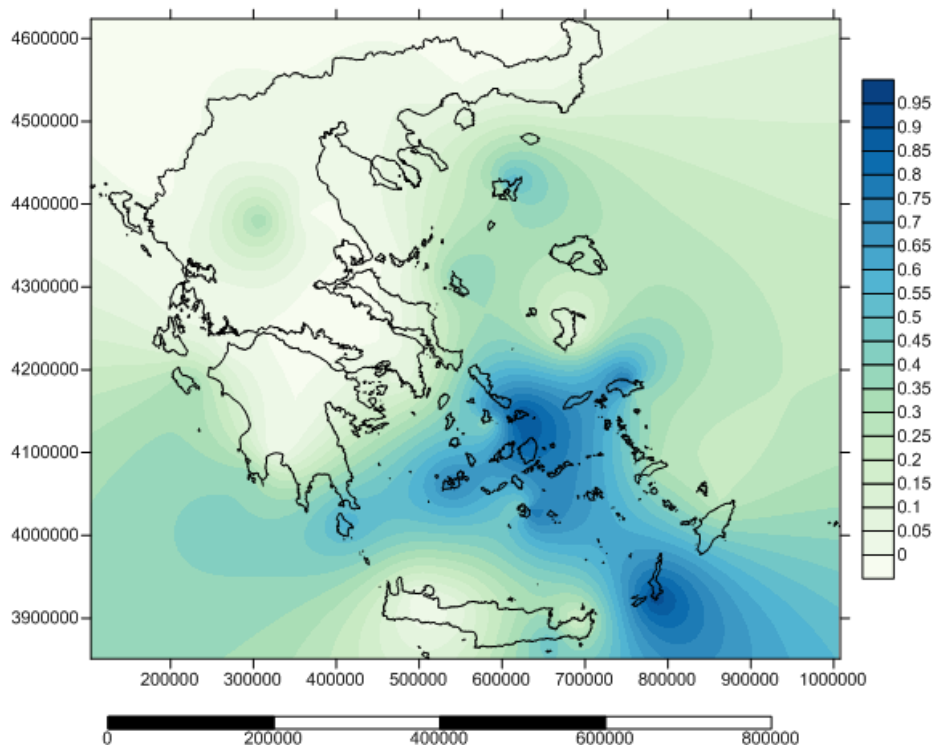
Σε όλους τους παραπάνω χάρτες 4.28-4.30, τα κέντρα των μέγιστων μηνιαίων ταχυτήτων του ανέμου παρέμειναν ίδια με τη διαφορά ότι μειώθηκε σταδιακά με το κάθε ποσοστό το εύρος της ταχύτητας του ανέμου, με τη μέγιστη τιμή να κυμαίνεται από τα 4.5 - 6.5 m/s και τη



μέγιστη να έχει εύρος από τα 8.5 m/s - 11 m/s. Οι περιοχές με το μεγαλύτερο ποσοστό εμφάνισης μεγίστου παρέμεινε η Κως και το κεντρικό Αιγαίο.

#### 4.3.4 Μέγιστα μηνιαία παρατηρημένα ποσοστά στους 66 σταθμούς σε διαφορετική περίοδο μέτρησης και για συγκεκριμένες ταχύτητες των 5 - 10 m/s.

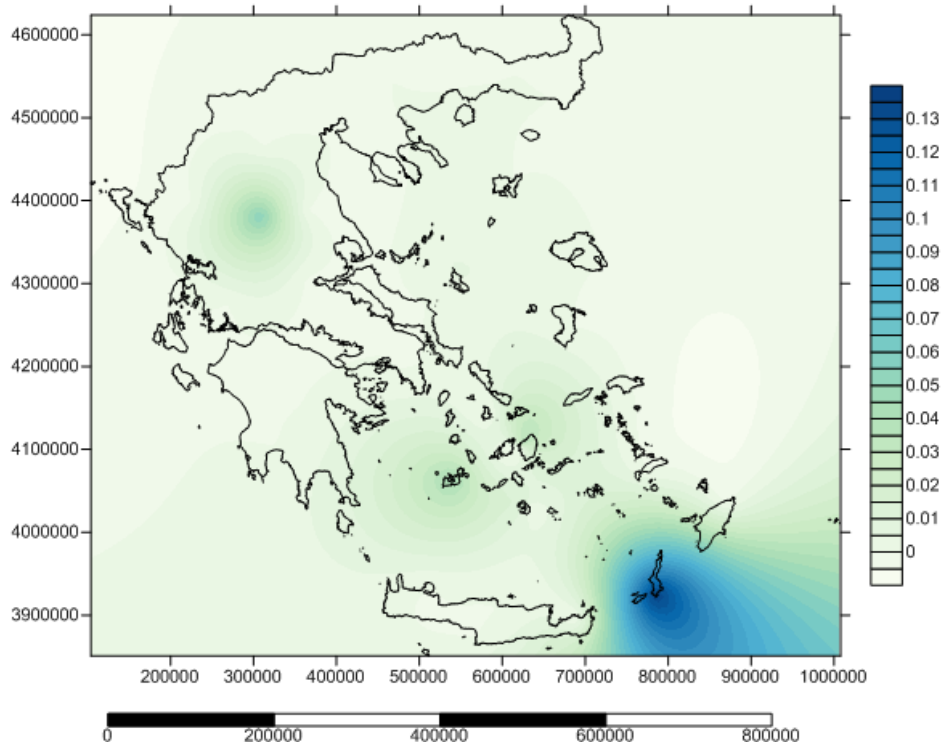
Πραγματοποιείται η ίδια διαδικασία με το προηγούμενο υποκεφάλαιο για τις μέγιστες μηνιαίες συναθροισμένες τιμές και για συγκεκριμένη ταχύτητα του ανέμου. Ο χάρτες που εξάγονται αφορούν ποσοστά ανέμου που πνέουν πάνω από συγκεκριμένη ταχύτητα και παρατίθενται παρακάτω.



Χάρτης 4.31: Ποσοστό των ανέμων που πνέουν με ταχύτητα πάνω από 5 m/s από τα μηνιαία δεδομένα των 66 σταθμών στον Ελλαδικό χώρο.

Τα μεγαλύτερα ποσοστά εμφανίζονται στο κεντρικό Αιγαίο και στο νησί της Κω, με μεγάλα ποσοστά επίσης να εμφανίζονται στα νότια παράλια της Πελοποννήσου. Το εύρος των ποσοστών αυτών κυμαίνεται από 50% έως 95% στη μεγαλύτερη έκταση των αναγραφόμενων περιοχών, χάρτες 4.31 και 4.32. Το εύρος των ποσοστών που έχουν ταχύτητα ανέμου πάνω από 10 m/s είναι πολύ χαμηλότερο από τον προηγούμενο αναφερόμενο Χάρτη 4.31 και κυμαίνονται από 8 έως 13% τα μεγαλύτερα ποσοστά και συγκεντρώνονται κυρίως στο νησί της Κω. Οι ανωτέρω υπολογισμοί, αναφέρονται στα παραρτήματα Α14 - Α15. Τα παραπάνω αποτελέσματα αφορούν 66 σταθμούς στον Ελλαδικό χώρο ανομοιόμορφης περιόδου μέτρησης. Για την πληρέστερη εικόνα των παραπάνω υπολογισμών, συγκεντρώθηκαν οι σταθμοί με κοινή περίοδο μέτρησης και έγινε ακριβώς η ίδια παραπάνω διαδικασία, τόσο σε ημερήσια όσο και σε μηνιαία χρονική κλίμακα. Τα αποτελέσματα των παραπάνω υπολογισμών παρατίθενται σε χάρτες στο αντίστοιχο παράρτημα Β13 που αφορούν τις δυο κατηγορίες απολογισμών, τόσο με διακριτή ταχύτητα όσο και με διακριτό ποσοστό, σε ημερήσια και μηνιαία χρονική κλίμακα. Τα αποτελέσματα είναι τα ίδια ποιοτικά, όσον αφορά στις περιοχές εμφάνισης των μέγιστων τιμών, τόσο σε ημερήσια όσο και σε μηνιαία χρονική κλίμακα, με κάποιες διαφορές να εμφανίζονται όσον αφορά στο ποσοτικό αποτέλεσμα, που

στην παραπάνω περίπτωση, είναι λίγο μεγαλύτερο, αφού σε κάποιους σταθμούς η περίοδος μέτρησης είναι μεγαλύτερη, που σημαίνει ότι είναι πιθανό να έχει παρατηθεί μεγαλύτερη τιμή ή να έχουμε μεγαλύτερο ποσοστό των μέγιστων παρατηρημένων τιμών των δεδομένων. Οι παραπάνω υπολογισμοί αναφέρονται στα παραρτήματα Α16 - Α17



Χάρτης 4.32: Ποσοστό των ανέμων που πνέουν με ταχύτητα πάνω από 10 m/s από τα μηνιαία δεδομένα των 66 σταθμών στον Ελλαδικό χώρο.

#### 4.4 Δεδομένα της ριπής (gust) του ανέμου από 32 σταθμούς στον Ελλαδικό χώρο.

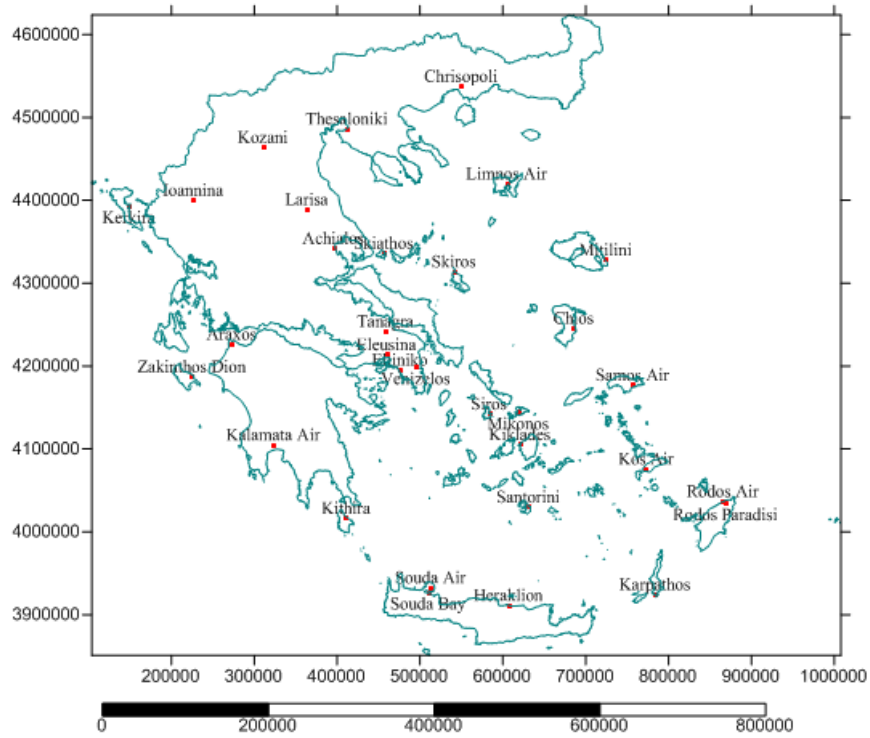
Η ριπή του ανέμου (gust) αναφέρεται σε σχετικά απότομες, στιγμιαίες, μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου και οφείλεται στην τυρβώδη κίνηση του ανέμου, που σε χαμηλά ύψη μέτρησης επηρεάζεται έντονα από τη γεωμορφολογία του εδάφους. Αποτελεί ταχύτητα του ανέμου, με τη διαφορά ότι μετριέται σχετικά στιγμιαία και όχι ως ο μέσος όρος ανάμεσα στα διαστήματα μέτρησης του εκάστοτε ανεμομέτρου, ανάλογα με τη διακριτότητα των μετρήσεων, όπως συμβαίνει με τη μέτρηση της ταχύτητας. Τα ρεύματα του ανέμου που πνέουν επιδερμικά στην επιφάνεια του εδάφους, αλλά και μερικά μέτρα ψηλότερα επηρεάζονται έντονα από το ανάγλυφο δημιουργώντας δίνες, αλλά και στις περισσότερες φορές διαταράσσεται η στρωτή ροή του ρεύματος του ανέμου με αποτέλεσμα να δημιουργείται τυρβώδης ροή σε μικρή τοπική κλίμακα, που όμως έχει επίδραση σε μεγαλύτερη κλίμακα και αποτελεί ένα φαινόμενο το οποίο μπορεί να επηρεάσει ευρύτερα τις κλιματολογικές συνθήκες μιας περιοχής. Για τους ανωτέρω αναγραφόμενους λόγους, η επιρροή των ριπών σε ευρύτερη κλίμακα, είναι δύσκολο να εκτιμηθεί όμως είναι βέβαιη η επίδραση του φαινομένου στην ευρύτερη κλίμακα όπως έχει αποδειχθεί από τη Διδακτορική διατριβή (Lauren, 1999).

#### **4.4.1 Επεξεργασία των δεδομένων της ριπής του ανέμου σε m/s και εκπόνηση αντίστοιχων χαρτών υπολογισμού**

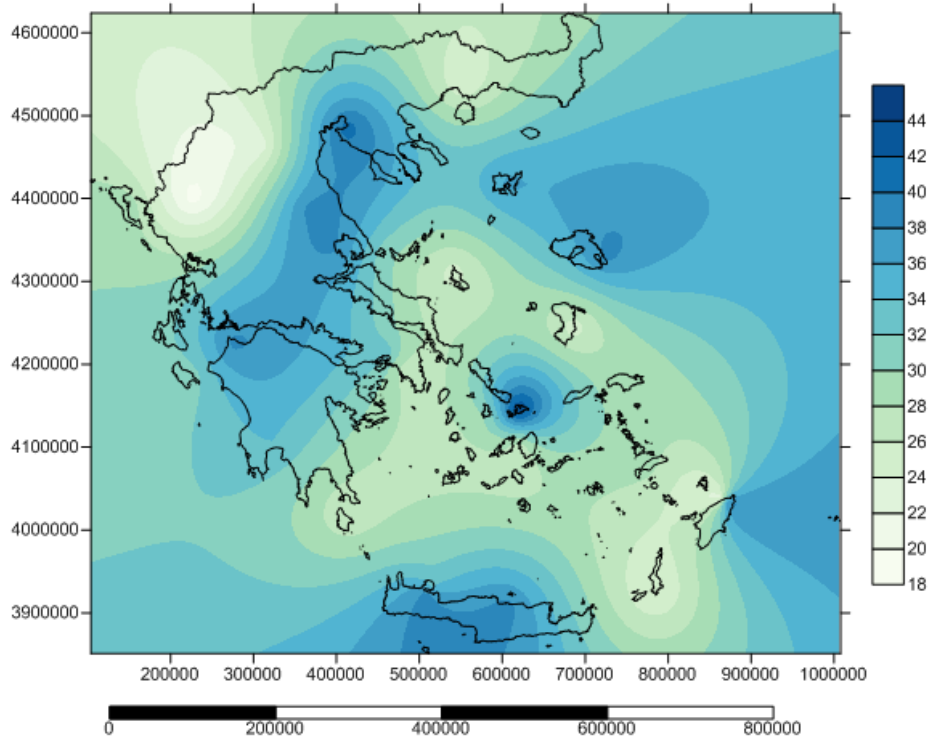
Τα δεδομένα της ριπής αποτελούν μέτρο της ταχύτητας του ανέμου σε στιγμιαία χρονική κλίμακα, με τη διαφορά από τις μετρήσεις της ταχύτητας ότι δεν αποτελεί μέση μέτρηση της κάθε φορά χρονικής διακριτότητας του μετρητικού οργάνου, αλλά στιγμιαία (κάποια δευτερόλεπτα). Στη διατριβή αυτή εξετάζεται η επιρροή του ανέμου στο επίπεδο της επιφάνειας του εδάφους και χρησιμοποιείται για την επεξήγηση της διαφορετικής συμπεριφοράς του ανέμου σε μια ανοιχτή πεδιάδα και στις παρυφές ενός βουνού. Η διαφοροποίηση έγινε για να επιβεβαιωθεί η διαφορετικότητα σε επίπεδο γεωμορφολογικής έκτασης στην τύρβη του ανέμου, αφού οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε ανομοιόμορφο ανάγλυφο παρουσίασαν πολύ μεγαλύτερη διαλείπουσα συμπεριφορά, από ότι οι μετρήσεις σε ανοιχτή έκταση με λίγα εμπόδια. Επίσης, χρησιμοποιώντας μια μέθοδο που βασίζεται σε fractal δομές του ανέμου προσομοιώθηκε, η ταχύτητα του ανέμου σε ακόμα μικρότερες χρονικές κλίμακες και φάνηκαν οι ανωμαλίες που εμφανίζονται σε μικρότερες κλίμακες να παρουσιάζονται σε μεγαλύτερες κλίμακες και επίσης περισσότερο ενισχυμένες. Από το γεγονός αυτό συμπεραίνουμε ότι, είναι πολύ σημαντική η γνώση της σωστής ταχύτητας του ανέμου και δη των μέγιστων ταχυτήτων, όπως αυτά εκφράζονται μέσα από τη ριπή.

Σημαντικός επομένως παράγοντας αποτελεί η εκτίμηση, από τη σωστή μέτρηση της ριπής, της έντασης, αλλά και της συχνότητας που εμφανίζεται σε συγκεκριμένες περιοχές. Για μια πληρέστερη εξέταση της μεταβλητής αυτής, έχουν εξαχθεί χάρτες 4.33 και 4.34, από τους 32 σταθμούς στον Ελλαδικό χώρο σε διαφορετική περίοδο μέτρησης και στο αντίστοιχο παράρτημα Β15, εξάγονται χάρτες μηνιαίοι και εποχικοί για να απεικονιστεί πληρέστερα η συμπεριφορά της μεταβλητής αυτής, στην έκταση του Ελλαδικού χώρου. Τα δεδομένα υπολογισμού αναφέρονται στα αντίστοιχα παραρτήματα Α18 - Α19.

Από τον παραπάνω Χάρτη 4.34, παρατηρούμε ότι τα κέντρα στα οποία εμφανίζονται οι μέγιστες τιμές της ριπής του ανέμου είναι κυρίως στην κεντρική Ελλάδα με το μέτωπο να κατεβαίνει στην βόρεια - δυτική και νότιο δυτική Πελοπόννησο και να κατευθύνεται προς την Κρήτη και κυρίως οι μέγιστες παρατηρημένες τιμές να εμφανίζονται στο κεντρικό της τμήμα. Επίσης, μέγιστες τιμές της ριπής εμφανίζονται στο κεντρικό Αιγαίο και στο νησί της Μυτιλήνης.



Χάρτης 4.33: Σταθμοί υπολογισμού (32), της ριπής του ανέμου στον Ελλαδικό χώρο σε ανομοιόμορφη περίοδο μέτρησης.



Χάρτης 4.34: Μέγιστες τιμές της ριπής του ανέμου για 32 σταθμούς για διαφορετική περίοδο μέτρησης.

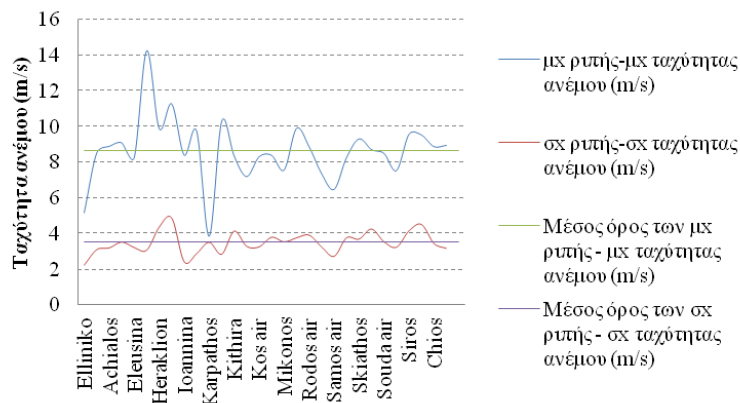
#### 4.4.2 Ταυτόχρονη επεξεργασία της ριπής και της ταχύτητας του ανέμου σε m/s για την κοινή μέρα εμφάνισης των δυο μεταβλητών.

Τα δεδομένα των μεταβλητών της ταχύτητας του ανέμου και της ριπής εξετάζονται για την ίδια μέρα εμφάνισης της ριπής, με σκοπό να βρεθεί αν υπάρχει κάποια σχέση που συνδέει τις δυο αυτές μεταβλητές. Για το σκοπό αυτό αφού ταξινομήθηκαν οι τιμές των δυο μεταβλητών που αφορούσαν την ίδια μέρα στην ίδια σειρά, πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός των διαφορών τους αλλά και του λόγου τους. Από την επεξεργασία αυτή προέκυψε ο Πίνακας 4.2 ο οποίος απεικονίζει την μέση τιμή και τυπική απόκλιση της διαφοράς αλλά και του λόγου των δυο προαναφερθέντων μεταβλητών (gust-wind speed) και (gust/wind speed) σε διαφορετική περίοδο δεδομένων του κάθε σταθμού. Η μέση τιμή της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης της διαφοράς είναι ίση με 8.70 m/s και 3.50 m/s αντίστοιχα και του λόγου των μεταβλητών αυτών (ριπής και ταχύτητας) είναι ίση με 4.52 και 3.62 αντίστοιχα. Παρατίθεται τα σχήματα 4.2 και 4.3 με την αντιστοίχιση των μεταβλητών αυτών για καλύτερη εποπτεία της διακύμανσης των τιμών τους αναφορικά τον κάθε σταθμό.

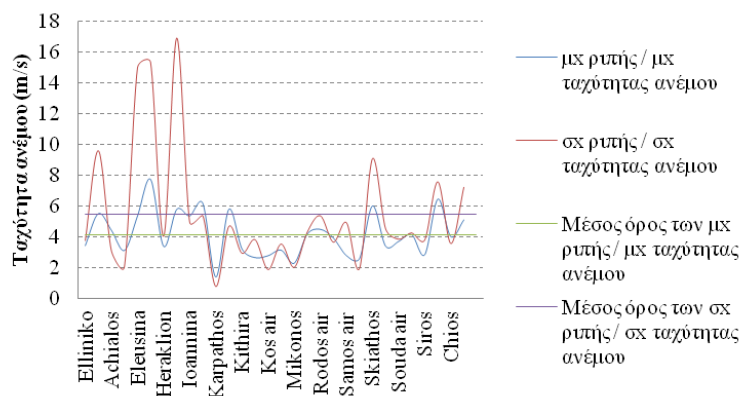
Πίνακας 4.2: Μέση τιμή και την τυπική απόκλιση σε διαφορετική περίοδο μέτρησης για κάθε σταθμό των διαφορών αλλά και του λόγου των μεταβλητών της ριπής και της ταχύτητας του ανέμου.

Α	Σταθμοί	Γ. Μήκος	Γ. Πλάτος	μχ και σχ των διαφορών gust - wind speed την ίδια μέρα (m/s)		μχ και σχ του λόγου gust / wind speed την ίδια μέρα (m/s)	
				μχ	σχ	μχ	σχ
1	Elliniko	476506.759	4194753.561	519	226	344	376
2	Araxos	273659.000	4225610.897	852	312	551	962
3	Achialos	396406.420	4341537.539	890	322	443	309
4	Venizelos	495606.129	4198357.797	909	354	313	207
5	Eleusina	460527.047	4213338.266	827	324	536	1504
6	Zakin Dion.	225476.841	4186292.079	1423	309	773	1540
7	Heraklion	6074941.96	3910589.587	989	438	339	404
8	Thesaloniki	412486.497	4485648.151	1127	489	578	1697
9	Ioannina	227083.945	4399306.194	841	245	536	494
10	Kalamata air	323700.609	4104138.144	974	290	618	538
11	Karpathos	784460.409	3923791.658	387	354	140	076
12	Kozani	311561.647	4463414.037	1028	286	580	468
13	Kithira	411715.617	4015761.601	835	416	322	293
14	Kyklades	621496.543	4104929.228	721	331	266	381
15	Kos air	773696.253	4075164.289	832	328	279	187
16	Larisa	364146.527	4388197.741	1022	322	1489	3184
17	Limnos air	605358.375	4419266.299	839	382	315	353
18	Mikonos	619436.404	4143738.928	758	356	230	201
19	Mitilini	724942.296	4327423.295	990	378	418	430
20	Rodos air	866196.188	4036065.828	888	394	450	537
21	Rodos Par	869343.901	4034284.455	737	328	393	366

Α	Σταθμοί (Συνέχεια)	Γ. Μήκος	Γ. Πλάτος	μκ και σχ των διαφορών gust - wind speed την ίδια μέρα (m/s)		μκ και σχ του λόγου gust / wind speed την ίδια μέρα (m/s)	
				μκ	σχ	μκ	σχ
22	Samos air	757167.951	4176535.419	649	275	279	493
23	Santorini	631545.615	4029315.219	827	378	259	194
24	Skiathos	456805.938	4335421.89	931	371	601	910
25	Skiros	541824.123	4313219.196	871	428	341	453
26	Souda air	510608.320	3926589.707	850	356	371	384
27	Souda Bay	513598.441	3932139.044	754	326	415	426
28	Siros	584064.507	4141550.483	957	417	286	380
29	Tanagra	459156.208	4241084.869	953	453	645	759
30	Chios	686412.893	4244890.904	888	346	402	356
31	Chrisopoli	550474.182	4537018.563	896	319	511	724



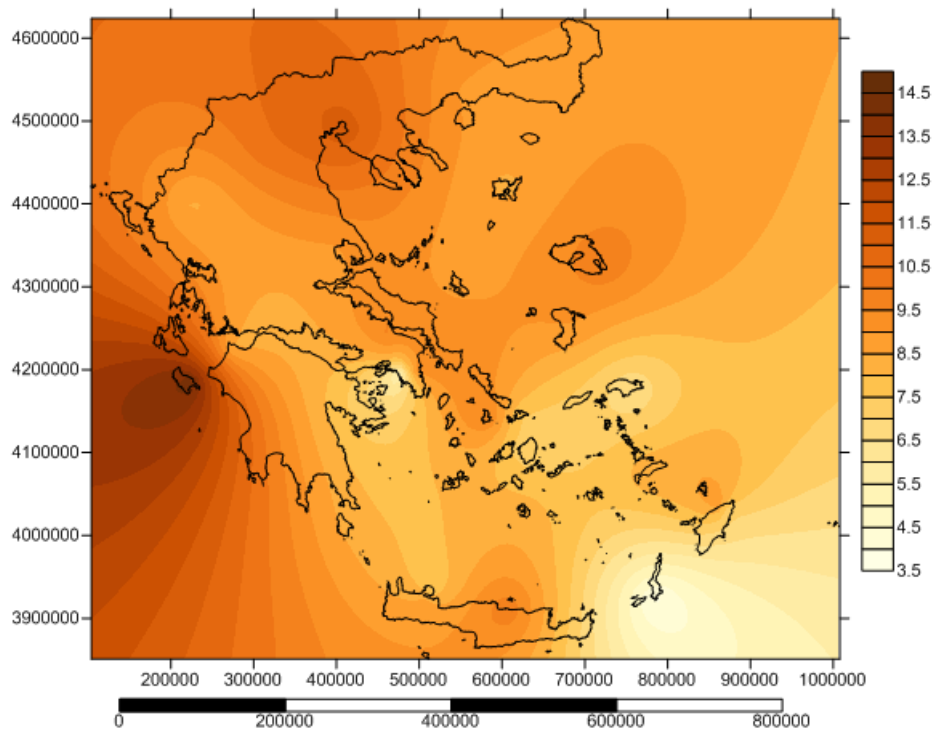
Σχήμα 4.2: Μέση τιμή και την τυπική απόκλιση της διαφοράς ανάμεσα στη ριπή και την ταχύτητα του ανέμου σε ημερήσια χρονική κλίμακα για τους 31 σταθμούς που διαθέτουν τιμές της ριπής.



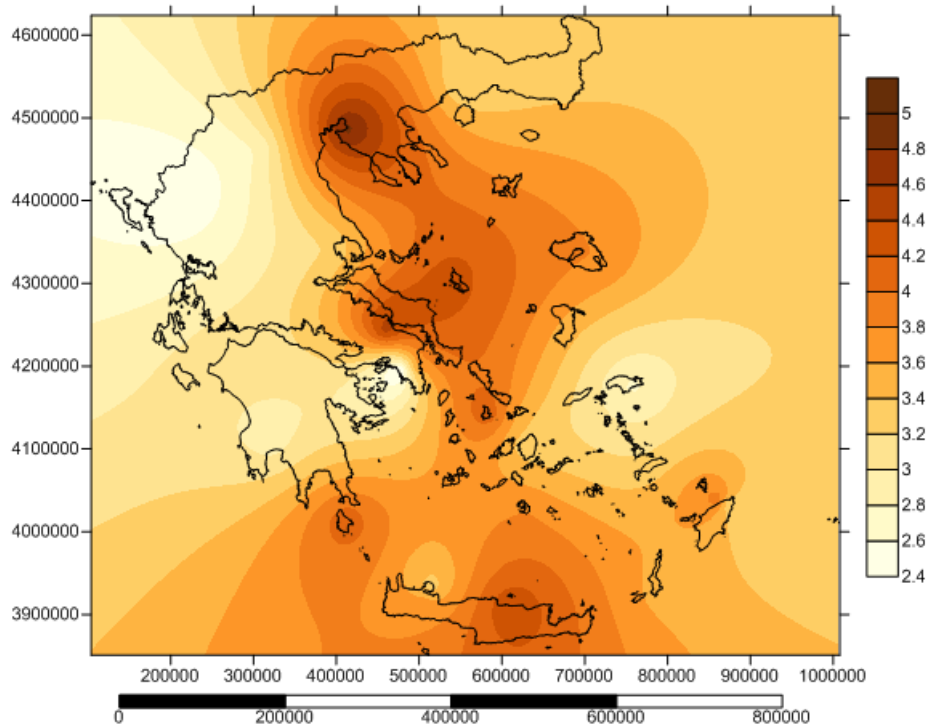
Σχήμα 4.3: Μέση τιμή και την τυπική απόκλιση του λόγου ανάμεσα στις ριπές και την ταχύτητα του ανέμου σε ημερήσια χρονική κλίμακα για τους 31 σταθμούς που διαθέτουν τιμές της ριπής.

Οι τιμές της μέσης τιμής και των τυπικών αποκλίσεων, για κάθε μια από τις ανωτέρω επεξεργασμένες μεταβλητές της διαφοράς και του λόγου της ριπής και της ταχύτητας του

ανέμου, για κάθε σταθμό, έχουν απεικονιστεί στο Χάρτη 4.36, για την καλύτερη εποπτεία των αποτελεσμάτων αλλά και την κατανομή των μεταβλητών αυτών στο χώρο με σκοπό την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων. Από τον παρακάτω Χάρτη 4.36, οι μεγαλύτερες τιμές των διαφορών των δυο μεταβλητών (ριπή - ταχύτητα ανέμου) εμφανίζονται στη δυτική Ελλάδα και συγκεκριμένα στα νησιά του κεντρικού Ιονίου, με τις τιμές να φθίνουν προς τα δυτικά παράλια της κεντρικής Ελλάδος, αλλά και τα παράλια της δυτικής Πελοποννήσου. Οι μέσες τιμές αυξάνονται κατά μήκος της κεντρικής Ελλάδος, με κατεύθυνση ανατολική, με τις μεγαλύτερες τιμές να εμφανίζονται στη βόρειο ανατολική Ελλάδα και στην κεντρική Εύβοια. Οι τιμές διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα σε όλη την υπόλοιπη Ελλάδα, με τοπικά αυξανόμενες τιμές στην κεντρική Κρήτη και βόρεια της νήσου της Ρόδου.



Χάρτης 4.35: Μέση τιμή της διαφοράς των μεταβλητών της ριπής και της ταχύτητας του ανέμου για 31 σταθμούς στον Ελλαδικό χώρο σε m/s.

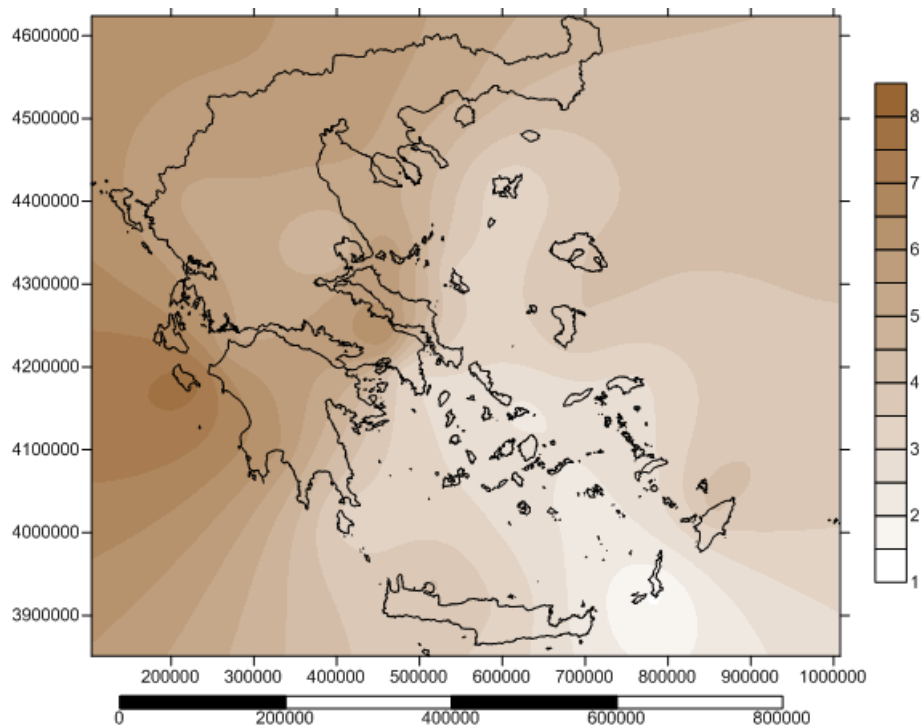


Χάρτης 4.36: Τυπική απόκλιση της διαφοράς των μεταβλητών της ριπής και της ταχύτητας του ανέμου για 31 σταθμούς στον Ελλαδικό χώρο σε  $m^2/s^2$ .

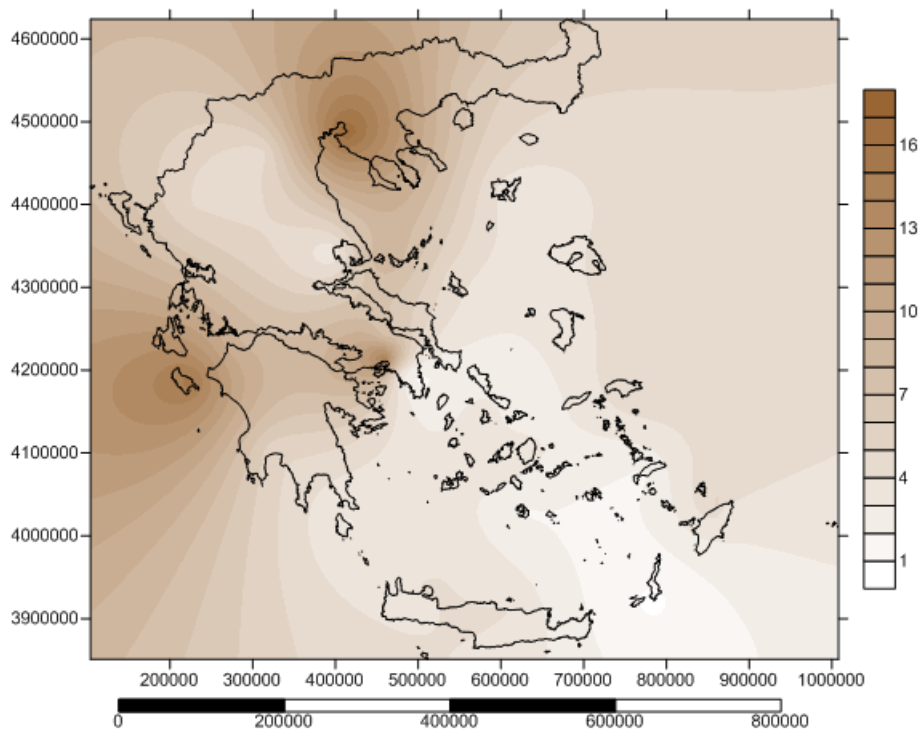
Οι τυπικές αποκλίσεις των διαφορών των δυο μεταβλητών, Χάρτης 4.36, εμφανίζουν αυξημένες τιμές σε μια νοητή ευθεία κατά μήκος όλης της κεντρικής Ελλάδος, με τις υψηλότερες τιμές να εμφανίζονται από βόρεια προς τα Νότια, στην Μακεδονία, την κεντρική Εύβοια, αλλά και την κεντρική Κρήτη. Εκατέρωθεν της νοητής αυτής γραμμής οι τιμές φθίνουν με τις χαμηλότερες τιμές να εμφανίζονται στα νησιά του Ιονίου, στο μεγαλύτερο μέρος της δυτικής Πελοποννήσου και στα νησιά του κεντρικού Αιγαίου.

Οι μέσες τιμές του λόγου της ριπής, με τις μέσες ημερήσιες τιμές της ταχύτητας του ανέμου, Χάρτης 4.37, εμφανίζονται ιδιαίτερα αυξημένες στην κεντρική Ελλάδα και στην περιοχή της βόρειο ανατολικής Πελοποννήσου και συγκεκριμένα στο νησί της Ζακύνθου. Σε όλη την υπόλοιπη Ελλάδα, οι τιμές εμφανίζονται ιδιαίτερα χαμηλές, που εκφράζει τη διαφορά στην απόλυτη τιμή ανάμεσα στις ημερήσιες τιμές, αλλά και στην ταχύτητα του ανέμου, για την κάθε περιοχή ενδιαφέροντος.



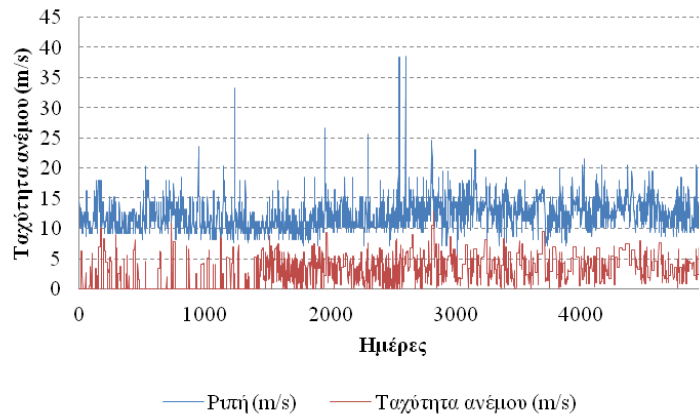


Χάρτης 4.37: Μέση τιμή του λόγου των μεταβλητών της ριπής και της ταχύτητας του ανέμου για 31 σταθμούς στον Ελλαδικό χώρο σε m/s.



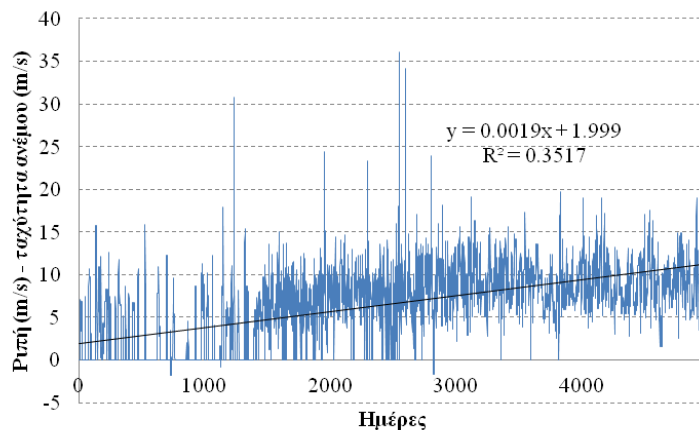
Χάρτης 4.38: Τυπική απόκλιση του λόγου των μεταβλητών της ριπής και της ταχύτητας του ανέμου για 31 σταθμούς στον Ελλαδικό χώρο σε m/s.

Οι τυπικές αποκλίσεις του λόγου των μεταβλητών, Χάρτης 4.38, εμφανίζουν την ίδια συμπεριφορά χωρικά με τη μέση τιμή όπως ενδεικτικά αναφέρεται και στον παραπάνω χάρτη. Οι μέγιστες τιμές εμφανίζονται στην κεντρική Ελλάδα με ελαφρώς αυξημένες στο νησί της Ζακύνθου.



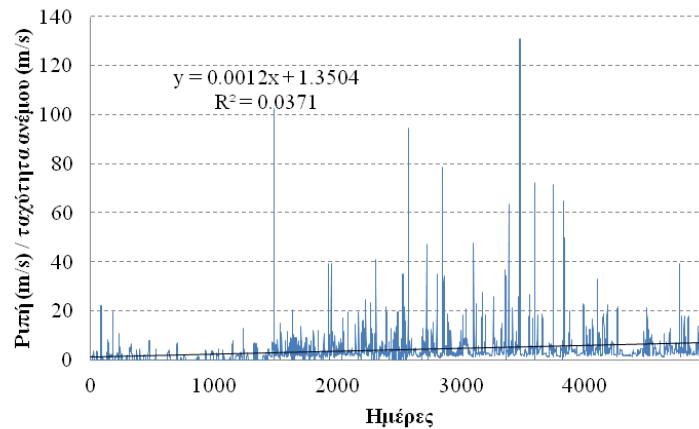
Σχήμα 4.4: Διάγραμμα που απεικονίζει τη σειρά δεδομένων της ριπής και της ταχύτητας του ανέμου για το σταθμό του Αράξου σε m/s.

Σε όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις, η ριπή του ανέμου, σε ημερήσια χρονική κλίμακα είναι αρκετές μονάδες πάνω από τη μέση ημερήσια ταχύτητα του ανέμου σε πολλαπλάσιο επίπεδο, Σχήμα 4.5. Οι τάσεις που εμφανίζονται ανάμεσα στις δυο αυτές μεταβλητές δείχνουν να μην ακολουθούν κάποια σχέση μεταξύ τους αλλά να είναι τυχαίες, όπως φαίνεται και από τον σταθμό του Αράξου που ενδεικτικά αναφέρεται στο Σχήμα 4.5.



Σχήμα 4.5: Διάγραμμα που απεικονίζει τη διαφορά ανάμεσα στις ριπές και στη ταχύτητα του ανέμου για το σταθμό του Αράξου για την κοινή μέρα εμφάνισης των δυο μεταβλητών.

Στο Σχήμα 4.5 για το σταθμό του Αράξου εξετάζεται η τάση των διαφορών ανάμεσα στη ριπή και την ταχύτητα του ανέμου εμφανίζεται θετική με τιμή 0.0019 m/s/d που σημαίνει ότι σε χρονική κλίμακα έτους η τιμή αυτή γίνεται 0.6935 m/s. Κάτι τέτοιο σημαίνει ότι η διαφορά των μεταβλητών αυτών θα συνεχίσει να αυξάνεται, το οποίο μπορεί να οφείλεται είτε σε ταυτόχρονη μεταβολή των δυο μεταβλητών, είτε σε αύξηση ή μείωση κάθε μίας από τις μεταβλητές, στην περίπτωση που μια από αυτές παραμένει σχετικά αμετάβλητη.

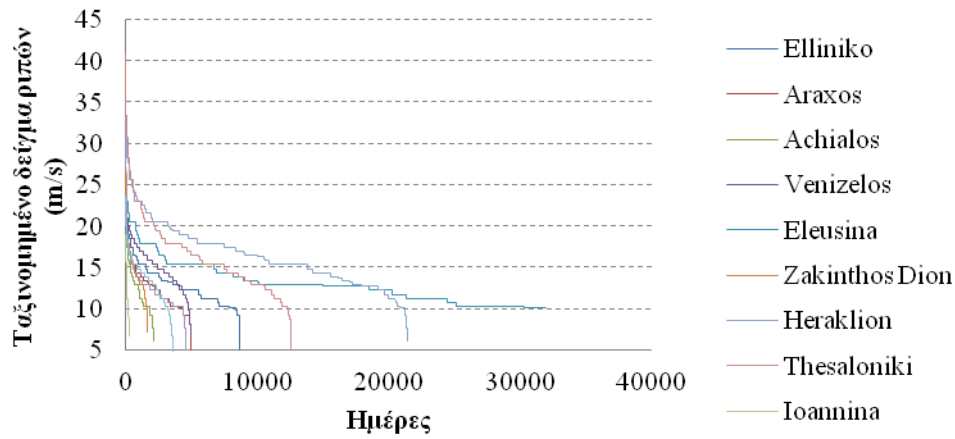


Σχήμα 4.6: Διάγραμμα που απεικονίζει το λόγο ανάμεσα στη ριπή και στην ταχύτητα του ανέμου για το σταθμό του Αράξου, για την κοινή μέρα εμφάνισης των δυο μεταβλητών.

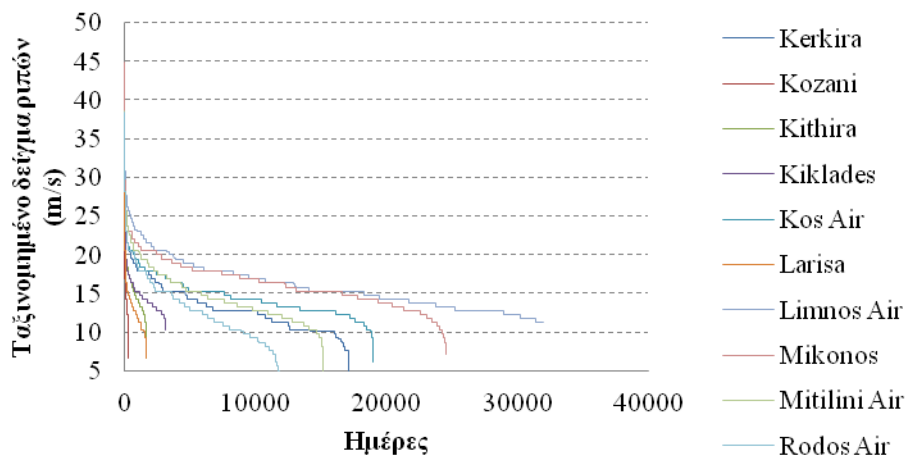
Στο Σχήμα 4.6 φαίνεται η θετική τάση του λόγου των μεταβλητών της ριπής και της ταχύτητας του ανέμου. Ο λόγος εμφανίζεται αυξημένος μετά από τα τρία περίπου πρώτα χρόνια των μετρήσεων που σημαίνει ότι μπορεί να μειώθηκε η ταχύτητα του ανέμου ή αντίστοιχα να αυξήθηκε η τιμή της ριπής του ανέμου στην συγκεκριμένη περιοχή. Στο παράρτημα Γ4 - Γ6 αποτυπώνονται τα διαγράμματα 10 σταθμών με τη μεγαλύτερη περίοδο μέτρησης για τις ριπές και για την ταυτόχρονη εξέταση της μεταβλητής αυτής με την ταχύτητα του ανέμου, όπως φαίνεται στα παραπάνω διαγράμματα.

#### 4.4.3 Συμπεριφορά ταξινομημένου δείγματος της ριπής του ανέμου

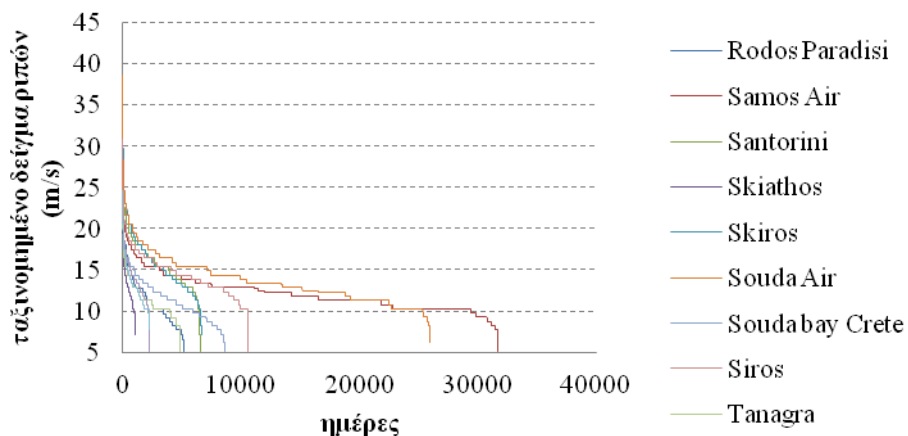
Για τις ανάγκες της εν λόγω εργασίας ταξινομήθηκε το δείγμα των ριπών σε φθίνουσα σειρά και βρέθηκε ότι σε όλους τους σταθμούς, η σειρά της ριπής του ταξινομημένου δείγματος, δίνεται από μια τάση που έχει τη μορφή δύναμης και δίνεται από τον τύπο  $y = ax^{-b}$ . Επιπρόσθετα, έχουν υπολογιστεί οι τιμές ολόκληρου του δείγματος, αλλά και ο υπολογισμός της συμπεριφοράς για 1000, 100 και 10 τιμές για να δειχθεί αν ακολουθείται η ίδια συμπεριφορά σε μικρότερα τμήματα της ουράς του ταξινομημένου δείγματος. Για το λόγο αυτό έχει γίνει πίνακας με τις τιμές των μεταβλητών αυτών (a, b) για κάθε ένα σταθμό και για κάθε πλήθος εξεταζόμενων στοιχείων του ταξινομημένου δείγματος. Επίσης, έχουν γίνει διαγράμματα των σειρών του ταξινομημένου δείγματος, για να γίνει περισσότερο αντιληπτή η συμπεριφορά αυτή των ριπών του ανέμου σε κάθε σταθμό. Οι σταθμοί συγκεντρώθηκαν σε τρεις ομάδες των 10 σταθμών και αποτυπώθηκαν στα σχήματα 4.7-4.9. Από τα παραπάνω σχήματα 4.7-4.9 είναι εμφανής η εκθετική συμπεριφορά των δειγμάτων για όλους τους σταθμούς με σχετικά μικρές διαφοροποιήσεις στις κλίσεις για τον κάθε σταθμό ξεχωριστά. Ο Πίνακας 4.3, που ακολουθεί αποτυπώνει τους συντελεστές των a, b της σχέσης που συνδέει το ταξινομημένο δείγμα για κάθε σταθμό αλλά και για κάθε πλήθος εξεταζόμενων δειγμάτων. Όπως προαναφέρθηκε τα δείγματα εξετάστηκαν στην ολότητά τους αλλά και σε μικρότερα τμήματα των 1000, 100 και 10 τιμών για να εξεταστεί αν ακολουθούν την ίδια συμπεριφορά. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 4.3.



Σχήμα 4.7: Διάγραμμα που αποτυπώνει τη ριπή των 10 σταθμών σε m/s για το ταξινομημένο δείγμα των δεδομένων στην Ελλάδα.



Σχήμα 4.8: Διάγραμμα που αποτυπώνει τη ριπή των 10 σταθμών σε m/s για το ταξινομημένο δείγμα των δεδομένων στην Ελλάδα.



Σχήμα 4.9: Διάγραμμα που αποτυπώνει τη ριπή των 10 σταθμών σε m/s για το ταξινομημένο δείγμα των δεδομένων στην Ελλάδα.

Πίνακας 4.3: Στον οποίο αναγράφονται οι συντελεστές a, b της εκθετικής μορφής του ταξινομημένου δείγματος της ριπής του ανέμου για όλους τους εξεταζόμενους σταθμούς.

A	Σταθμοί	Ταξινομημένο δείγμα ριπής (m/s)		Ταξινομημένο δείγμα 1000 ριπής (m/s)		Ταξινομημένο δείγμα 100 ριπής (m/s)		Ταξινομημένο δείγμα 100 ριπής (m/s)	
		a	b	a	b	a	b	a	b
1	Elliniko	50.0	-0.2	34.3	-0.1	31.0	-0.1	27.7	0.0
2	Araxos	47.7	-0.2	31.2	-0.1	38.4	-0.2	39.6	-0.1
3	Achialos	46.8	-0.2	35.1	-0.1	31.3	-0.1	35.2	-0.3
4	Venizelos	50.4	-0.2	31.1	-0.1	27.9	-0.1	26.7	0.0
5	Eleusina	49.1	-0.1	34.6	-0.1	35.3	-0.1	33.3	-0.1
6	Zak. D	44.3	-0.2	36.0	-0.1	29.0	-0.1	30.2	0.0
7	Heraklion	93.7	-0.2	45.2	-0.1	39.1	-0.1	38.4	0.0
8	Thes/niki	108.5	-0.2	50.4	-0.1	42.7	-0.1	40.5	0.0
9	Ioannina	27.5	-0.2			23.4	-0.1	18.9	0.0
10	Kal/ta air	47.8	-0.2	42.2	-0.2	40.8	-0.2	33.9	-0.1
11	karpathos	34.4	-0.1	26.1	-0.1	23.8	-0.1	24.0	-0.1
12	Kozani	29.0	-0.2			22.9	-0.1	22.7	-0.1
13	Kithira	42.1	-0.2	33.3	-0.1	27.1	-0.1	26.4	-0.1
14	Kyklades	37.3	-0.1	31.5	-0.1	28.4	-0.1	27.2	-0.1
15	Kos air	55.7	-0.2	32.5	-0.1	31.5	-0.1	28.9	0.0
16	Larisa	40.1	-0.2	31.5	-0.1	31.5	-0.1	36.6	-0.3
17	Lim air	81.5	-0.2	39.4	-0.1	37.1	-0.1	36.8	-0.1
18	Mikonos	67.8	-0.2	39.8	-0.1	47.7	-0.1	43.8	-0.1
19	Mit/ni air	82.1	-0.2	39.2	-0.1	36.8	-0.1	40.0	-0.1
20	Rodos air	114.9	-0.3	37.1	-0.1	36.7	-0.1	36.6	-0.1
21	Rod Par	68.1	-0.2	35.0	-0.1	28.8	-0.1	28.6	-0.1
22	Sam air	53.0	-0.2	31.6	-0.1	30.4	-0.1	28.6	0.0
23	Santorini	54.5	-0.2	34.8	-0.1	34.1	-0.1	31.1	0.0
24	Skiathos	36.9	-0.2	34.9	-0.2	25.8	-0.1	25.1	-0.1
25	Skiros	72.3	-0.2	42.8	-0.1	36.1	-0.1	33.7	0.0
26	Souda air	72.1	-0.2	40.0	-0.1	37.0	-0.1	37.4	-0.1
27	Soud Bay	60.9	-0.2	28.5	-0.1	26.9	-0.1	30.0	-0.2
28	Siros	51.6	-0.2	32.0	-0.1	30.8	-0.1	30.9	-0.1
29	Tanagra	42.0	-0.2	29.3	-0.1	26.9	-0.1	24.9	0.0
30	Chios	42.6	-0.2	31.2	-0.1	25.7	-0.1	24.2	0.0
31	Chrisopoli	39.4	-0.2	30.6	-0.1	26.3	-0.1	24.7	0.0

Επιπρόσθετα κατά την εξέταση της φθίνουσας ταξινομημένης σειράς των δεδομένων της ριπής του ανέμου για τον κάθε ένα σταθμό έγινε ο υπολογισμός του μήνα εμφάνισης των τιμών πάνω από 12 m/s για τη μεταβλητή αυτή. Η επεξεργασία αυτή έγινε για να

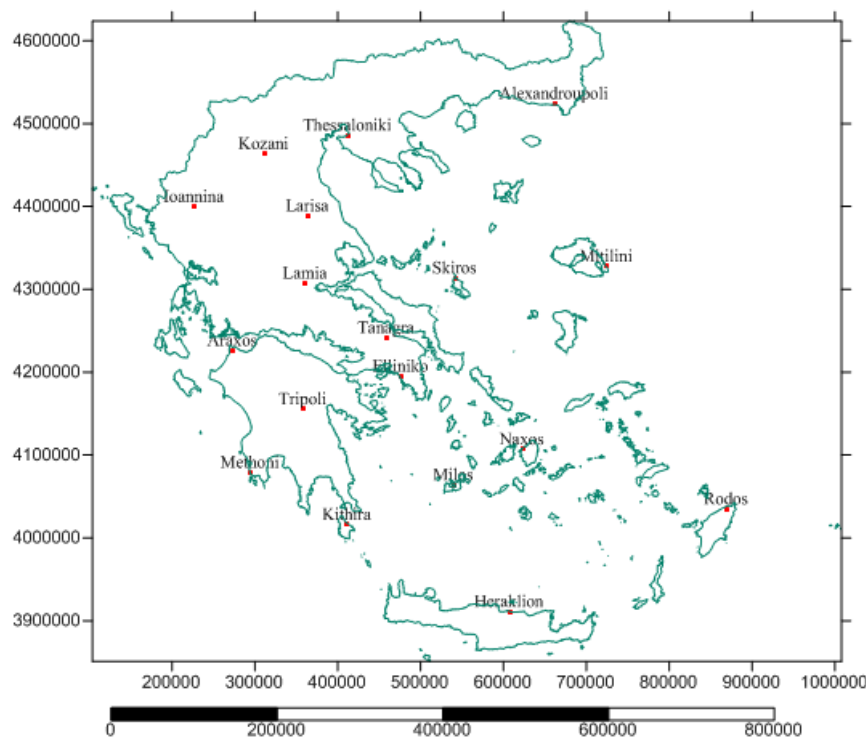
εμφανιστούν οι μήνες που συνήθως έχουν τη μεγαλύτερη συχνότητα ριπής ή αν η διασπορά αυτή είναι τελείως τυχαία. Από τα αποτελέσματα αυτής της διαδικασίας προέκυψε το συμπέρασμα ότι, οι μήνες οι οποίοι έχουν τις μεγαλύτερες τιμές για τη μεταβλητή αυτή, για εξεταζόμενο δείγμα άνω των 12 m/s είναι οι μήνες Ιανουάριος, Φεβρουάριος και Δεκέμβριος με αντίστοιχα μέσα ποσοστά από τους 30 εξεταζόμενους σταθμούς των 14%, 15% και 12%. Ακολουθούν οι μήνες Μάρτιος, Νοέμβριος, Απρίλιος με ποσοστά 13%, 9% και 8%, αντίστοιχα οι μήνες Ιούλιος και Οκτώβριος έχουν ποσοστό 6%, οι Μάιος, Αύγουστος έχουν ποσοστό 5% και οι μήνες Ιούνιος και Σεπτέμβριος από 4%. Παρακάτω στον Πίνακα 4.4, που ακολουθεί εμφανίζονται αναλυτικά τα ποσοστά της ριπής για κάθε μήνα αλλά και για κάθε σταθμό.

Πίνακας 4.4: Ποσοστά της ριπής για κάθε μήνα και για κάθε σταθμό που είναι πάνω από την τιμή των 12 m/s.

Ποσοστό ριπής πάνω από 12 m/s για κάθε μήνα για κάθε σταθμό													
A	Stations	I	Φ	M	A	M	I	I	A	Σ	O	N	Δ
1	Elliniko	14	15	12	4	4	4	6	8	4	8	9	12
2	Araxos	14	14	26	9	4	1	2	2	2	8	7	11
3	Achialos	11	13	15	8	15	6	2	3	3	7	9	8
4	Venizelos	13	12	9	7	4	5	14	9	7	7	8	6
5	Eleusina	11	12	11	6	5	6	10	11	6	7	6	10
6	Zak. Dion	12	17	14	5	2	1	2	1	4	9	19	14
7	Heraklion	16	20	15	10	5	1	1	1	1	5	11	15
8	Thesaloniki	15	16	10	6	4	6	6	4	5	6	10	13
9	Kal/ta air	14	16	14	4	5	8	9	5	3	3	10	10
10	Karpathos	3	8	8	5	3	10	22	20	10	2	4	4
11	Kerkira	16	18	11	6	2	1	2	1	2	6	17	19
12	Kithira	13	11	13	15	7	6	4	4	4	8	7	9
13	Kiklades	12	11	8	9	2	3	8	7	9	10	10	10
14	Kos Air	12	17	13	8	3	4	6	4	5	6	9	13
15	Larisa	11	17	16	10	9	7	5	3	3	3	6	10
16	Limnos Air	14	14	13	5	3	2	4	4	6	11	10	14
17	Mikonos	7	7	6	7	6	9	15	15	9	7	5	6
18	Mitilini Air	17	17	14	7	3	1	1	1	3	7	12	16
19	Rodos Air	18	26	18	11	3	1	0	1	1	2	5	13
20	Rodos Par	16	25	14	9	3	1	2	1	0	2	8	20
21	Samos Air	9	12	10	6	4	7	12	10	8	5	7	11
22	Santorini	16	18	16	10	7	2	2	3	2	5	8	11
23	Skiathos	19	17	6	2	4	4	4	4	3	13	10	15
24	Skiros	21	17	12	5	2	1	2	1	4	10	10	16
25	Souda Air	12	16	15	12	7	7	4	3	3	5	7	9
26	SoudaBay	16	10	13	11	7	7	5	3	4	4	8	11
27	Siros	13	12	10	7	3	5	7	11	6	8	9	9
28	Tanagra	12	16	13	8	7	4	6	5	3	6	9	11
29	Chios	21	20	14	6	1	1	2	2	2	6	12	13
30	Chrisoupoli	17	17	18	8	7	3	1	2	4	6	9	8

#### 4.5 Εκτίμηση των τάσεων της ταχύτητας του ανέμου για 14 σταθμούς στον Ελλαδικό χώρο για την περίοδο 01/1970 - 04/2013.

Οι τάσεις της μεταβλητής της ταχύτητας του ανέμου είναι το χαρακτηριστικό εκείνο που φανερώνει τη γενικότερη συμπεριφορά του ανέμου για την εξεταζόμενη περίοδο. Φανερώνουν, για τη συγκεκριμένη εξεταζόμενη περίοδο, ποια είναι η γενικότερη συμπεριφορά του ανέμου στο βάθος του παρελθόντος χρόνου. Από αυτό το χαρακτηριστικό, μπορούμε να συμπεράνουμε αν ο άνεμος έχει την τάση να αυξηθεί ή να μειωθεί. Για τη συγκεκριμένη περίπτωση εξετάστηκαν 19 σταθμοί διάσπαρτοι σε όλη την έκταση του Ελλαδικού χώρου και για κοινή περίοδο μέτρησης από 01/1970 έως 04/2013. Είναι σημαντικό να υπάρχει κοινή περίοδο μέτρησης ώστε τα συμπεράσματα που θα προκύψουν να αφορούν την περίοδο αυτή. Σε διαφορετική περίπτωση δεν μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα από κοινού για τους σταθμούς και για όλη την εξεταζόμενη έκταση, γιατί τα αποτελέσματα θα αφορούν μεμονωμένα τον κάθε σταθμό, χωρίς τη δυνατότητα εξαγωγής συνολικών συμπερασμάτων. Το πλήθος των σταθμών, προέκυψε από το μέγεθος του από κοινού εξεταζόμενου δείγματος και ο μέγιστος αριθμός σταθμών προέκυψε ίσος με 19 με μέγιστη περίοδο μέτρησης τα 43 χρόνια, εξεταζόμενο από την περίοδο 01/1970 έως 04/2013. Οι εξεταζόμενοι σταθμοί απεικονίζονται στον παρακάτω Χάρτη 4.39, για την καλύτερη εποπτεία της διασποράς του δείγματος σε όλη την εξεταζόμενη έκταση του Ελλαδικού χώρου.



Χάρτης 4.39: Πλήθος των σταθμών (19) για την περίοδο μέτρησης 01/1970 - 04/2013 σε όλη την έκταση της Ελλάδος.

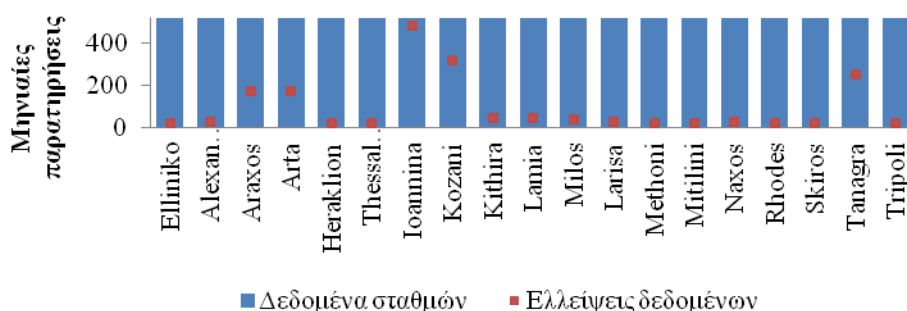
Από την επεξεργασία όμως των δεδομένων των σταθμών της κοινής αυτής μετρητικής περιόδου προέκυψε ότι πέντε από τους 19 σταθμούς είχαν ελλιπείς τιμές πάνω από 10% για την συγκεκριμένη περίοδο εξέτασής τους. Για αυτό το λόγο και για τη διεξαγωγή ασφαλέστερων συμπερασμάτων σχετικά με τις τάσεις της ταχύτητας του ανέμου την περίοδο

εξέτασης εξαιρούνται οι σταθμοί αυτοί από την επεξεργασία. Αναλυτικά τα αποτελέσματα αναφέρονται στον παρακάτω Πίνακα 4.5.

Πίνακας 4.5: Σταθμοί επεξεργασίας των τάσεων για την περίοδο 01/1970 - 04/2013 με τις ελλείψεις τους τιμές και λόγος των τιμών αυτών.

A	Σταθμοί	Παρ/σεις	Τιμές χωρίς ελλείψεις	Ποσοστό παρατηρήσεων	Ποσοστό ελλিপών παρατηρήσεων
1	Alexandroupoli	520	493	0.95	0.05
2	Araxos	520	346	0.67	0.33
3	Arta	520	346	0.67	0.33
4	Elliniko	520	498	0.96	0.04
5	Heraklion	520	498	0.96	0.04
6	Ioannina	520	39	0.08	0.93
7	Kithira	520	474	0.91	0.09
8	Kozani	520	199	0.38	0.62
9	Lamia	520	475	0.91	0.09
10	Larisa	520	493	0.95	0.05
11	Methoni	520	498	0.96	0.04
12	Milos	520	481	0.93	0.08
13	Mitilini	520	498	0.96	0.04
14	Naxos	520	493	0.95	0.05
15	Rhodes	520	499	0.96	0.04
16	Skiros	520	497	0.96	0.04
17	Tanagra	520	270	0.52	0.48
18	Thessaloniki	520	498	0.96	0.04

Επομένως, από την παραπάνω επεξεργασία. Πίνακας 4.5, οι σταθμοί Άραξος, Άρτα, Ιωάννινα, Κοζάνη και Τανάγρα εξαιρούνται από την επεξεργασία. Για πληρέστερη κατανόηση των δεδομένων των σταθμών παρατίθεται στο παρακάτω Σχήμα 4.10.

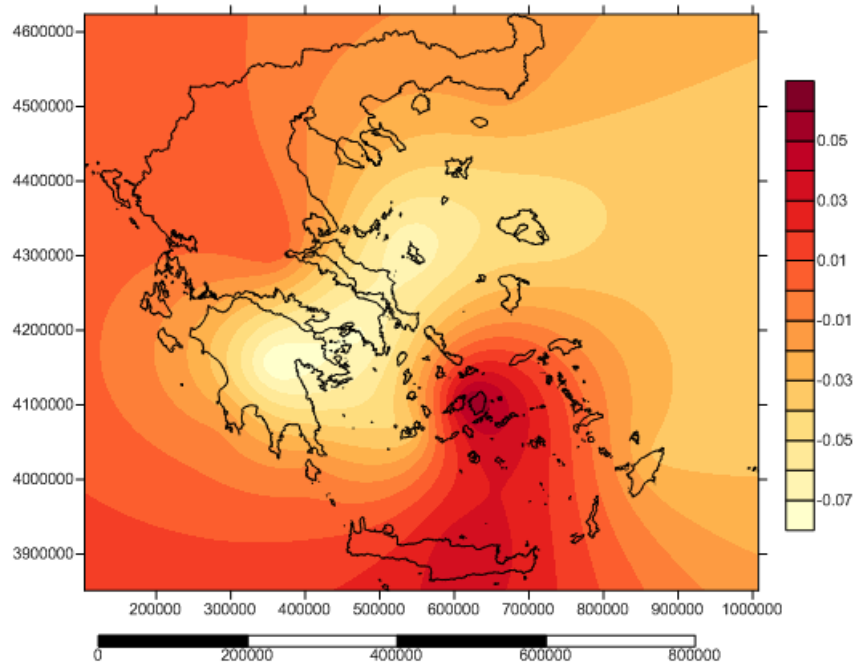


Σχήμα 4.10: Διάγραμμα που επεικονίζει τους σταθμούς των δεδομένων και το σύνολο των δεδομένων τους για την περίοδο 01/1970 - 04/2013.

Η επεξεργασία των 14 σταθμών και της περιόδου μέτρησης 01/1970 - 04/2013 έγινε με γραμμική παλινδρόμηση των μηνιαίων τιμών από τα δεδομένα του κάθε σταθμού και έγινε χωρισμός των τιμών αυτών ανά μήνα, για να εμφανιστούν οι τάσεις της ταχύτητας του



ανέμου για κάθε μήνα. Ο υπολογισμός των τάσεων έγινε με γραμμική παλινδρόμηση από το δείγμα των δεδομένων του κάθε σταθμού σε περιβάλλον excel με την εντολή των γραμμικών τάσεων, από το διάγραμμα του κάθε σταθμού. Οι σταθμοί συγκεντρώθηκαν σε πίνακα με τις μηνιαίες τιμές του καθενός και έγιναν οι αντίστοιχοι χάρτες σε μηνιαία αλλά και σε ετήσια χρονική κλίμακα. Παρακάτω, παρατίθεται Χάρτης 4.40, των ετήσιων μεταβολών στην τάση των σταθμών για τη συγκεκριμένη περίοδο ενώ οι υπόλοιποι μηνιαίοι χάρτες παρατίθενται στο παράρτημα B16.



Χάρτης 4.40: Μέση τάση του ανέμου σε ετήσια βάση (από το μέσο όρο των 12 μηνών του κάθε σταθμού) για την περίοδο 01/1970 - 04/2013.

Στον Χάρτη 4.40 είναι εμφανές ότι η τάση του ανέμου στους εξεταζόμενους σταθμούς (14) και για την περίοδο 01/1970 - 04/2013 δεν εμφανίζει ιδιαίτερες αλλαγές με τις κλίσεις του κάθε σταθμού να κυμαίνονται, από +0.05 έως -0.07 m/s/month, που σημαίνει ότι κάποιοι σταθμοί εμφανίζουν αυξήσεις και κάποιοι άλλοι μειώσεις. Οι περιοχές της δυτικής και κεντρικής Ελλάδος, όπως και οι περιοχές του κεντρικού Αιγαίου, εμφανίζουν θετικές τάσεις, που σημαίνει ότι ο άνεμος αυξάνεται κατά μέσο όρο για την περίοδο μέτρησης με τις εντονότερες κλίσεις να εμφανίζονται στο νησί της Νάξου και της Μήλου. Επίσης, σημαντικές κλίσεις εμφανίζονται και στην κεντρική Κρήτη και ιδιαίτερα στο νομό του Ηρακλείου και το αυξητικό μέτωπο συνεχίζει εκατέρωθεν του νησιού μέχρι τα νότια παράλια της Πελοποννήσου από τα δυτικά και μέχρι το νησί της Ρόδου από τα ανατολικά.

Από την περιοχή εκείνη και βορειότερα οι τάσεις του ανέμου δείχνουν μια μειωτική τάση, με τις εντονότερες αρνητικές κλίσεις να εμφανίζονται στην κεντρική και βόρειο-ανατολική Πελοπόννησο, καθώς επίσης και σε ολόκληρη την Αττική αλλά και στο μεγαλύτερο μέρος της Εύβοιας. Επίσης στον Πίνακα 4.6 αποτυπώνεται το ποσοστό των σταθμών που έχουν θετική ή αντίστοιχα αρνητική κλίση για κάθε μήνα. Τα μεγαλύτερα ποσοστά μείωσης εμφανίζονται τους χειμερινούς και φθινοπωρινούς μήνες, ενώ αντίστοιχα ο ρυθμός αυτός μείωσης γίνεται μικρότερος το καλοκαίρι και την άνοιξη. Η γενικότερη εικόνα του Πίνακα 4.6, είναι ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των σταθμών εμφανίζει αρνητικές κλίσεις, που σημαίνει ότι ο άνεμος στο σύνολό του έχει την τάση να μειωθεί στο μεγαλύτερο ποσοστό των

σταθμών, για το μεγαλύτερο ποσοστό του εξεταζόμενου χρόνου. Οι τάσεις αυτές δικαιολογούνται από την ευμεταβλητότητα του ανέμου σε τοπική κλίμακα και την επιρροή του από το γεωμορφολογικό ανάγλυφο της περιοχής του κάθε σταθμού.

Πίνακας 4.6: Ποσοστό των σταθμών με θετικές ή αρνητικές κλίσεις για την περίοδο 01/1970 - 04/2013 και για το σύνολο των 14 σταθμών στον Ελλαδικό χώρο.

Ποσοστό θετικών τάσεων σε 18 σταθμούς για την περίοδο (1/1970 - 04/2013)											
A	Φ	M	A	M	I	I	A	Σ	O	N	Δ
14.29	21.43	35.71	35.71	42.86	57.14	42.86	35.71	35.71	14.29	21.43	21.43
Ποσοστό αρνητικών τάσεων σε 18 σταθμούς για την περίοδο (1/1970 - 04/2013)											
A	Φ	M	A	M	I	I	A	Σ	O	N	Δ
85.71	78.57	64.29	64.29	57.14	42.86	57.14	64.29	64.29	85.71	78.57	78.57

#### 4.5.1 Επιμέρους τάσεις για την περίοδο 1/1970 - 12/1990 σε 11 σταθμούς στον Ελλαδικό χώρο.

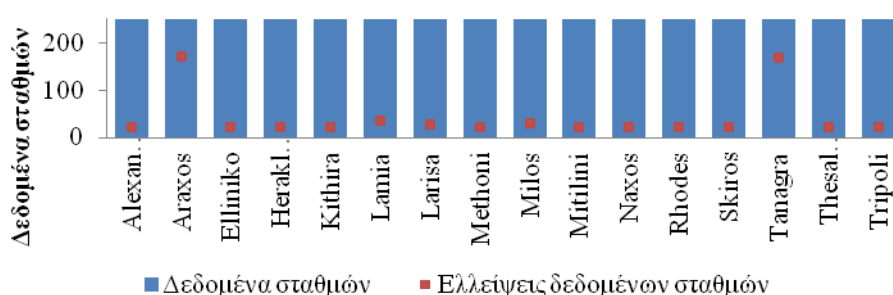
Για την πληρέστερη απεικόνιση των τάσεων στον Ελλαδικό χώρο η αρχική κοινή περίοδος μέτρησης των σταθμών χωρίστηκε σε 2 υποπεριόδους και έγιναν οι ίδιοι υπολογισμοί για την κάθε μια περίοδο ξεχωριστά για τον υπολογισμό των επιμέρους τάσεων. Οι σταθμοί στην περίπτωση αυτοί ήταν λιγότεροι γιατί οι ελλειπείς τιμές των σταθμών κατά τη συνολική περίοδο ήταν συγκεντρωμένες την πρώτη εικοσαετία υπολογισμού, με αποτέλεσμα κατά την εξέταση της περιόδου αυτής να μείνουν λίγα ή και καθόλου δεδομένα, γεγονός που θα αλλοίωνε το εξαγόμενο αποτέλεσμα σε περίπτωση που λάμβαναν μέρος στον τελικό υπολογισμό. Οι σταθμοί που δεν υπολογίστηκαν καθόλου στη διαδικασία ήταν οι σταθμοί Ιωάννινα, Κοζάνη, Άραξος, Λαμία, Λάρισα, Μήλος και Τανάγρα. Παρακάτω στον Πίνακα 4.7, φαίνονται οι σταθμοί με τα δεδομένα αναλυτικά όπου και αποτυπώνονται στο Σχήμα 4.11 για πληρέστερη κατανόηση. Οι σταθμοί που είχαν ελλείψεις άνω του ποσοστού του 10% των συνολικών τιμών του κάθε σταθμού της εξεταζόμενης περιόδου δεν έλαβαν μέρος στον υπολογισμό.

Πίνακας 4.7: Τα δεδομένα του κάθε σταθμού με τις ελλειπείς τιμές για τον υπολογισμό της τάσης της ταχύτητας του ανέμου για την περίοδο 01/1970 - 12/1990 σε 11 σταθμούς.

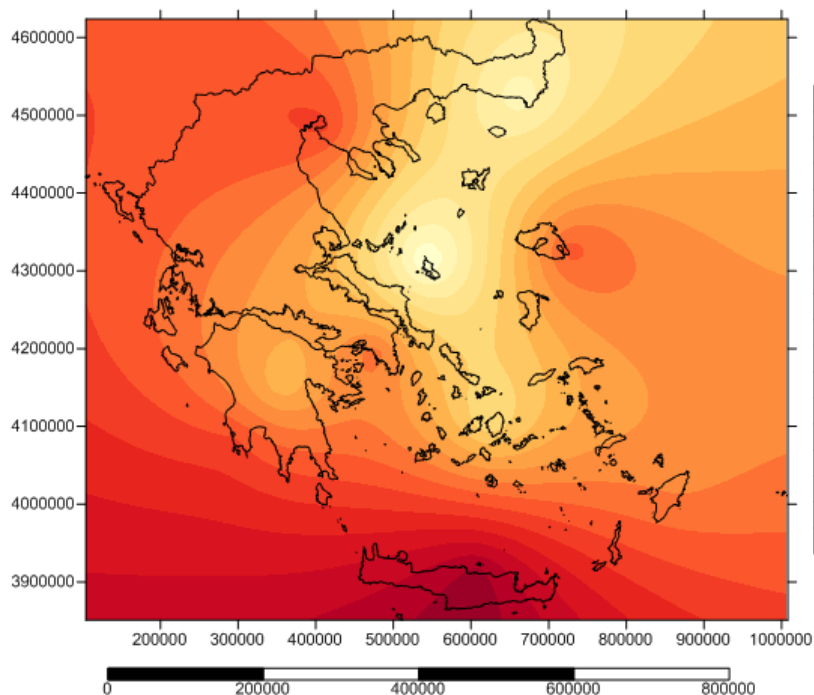
A	Σταθμοί	Παρ/σεις	Τιμές χωρίς ελλείψεις	Ποσοστό παρατηρήσεων	Ποσοστό ελλειπών παρατηρήσεων
1	Alexandroupoli	252	230	0.91	0.09
2	Araxos	252	80	0.32	0.68
3	Elliniko	252	231	0.92	0.08
4	Heraklion	252	231	0.92	0.08
5	Kithira	252	230	0.91	0.09
6	Lamia	252	216	0.86	0.14
7	Larisa	252	225	0.89	0.11
8	Methoni	252	231	0.92	0.08
9	Milos	252	223	0.88	0.12
10	Mitilini	252	230	0.91	0.09
11	Naxos	252	231	0.92	0.08
12	Rhodes	252	231	0.92	0.08

A	Σταθμοί (Συνέχεια)	Παρ/σεις	Τιμές χωρίς ελλείψεις	Ποσοστό παρατηρήσεων	Ποσοστό ελλিপών παρατηρήσεων
13	Skiros	252	229	0.91	0.09
14	Tanagra	252	82	0.33	0.67
15	Thessaloniki	252	230	0.91	0.09
16	Tripoli	252	231	0.92	0.08

Στον παραπάνω Πίνακα 4.7, είναι αναγραφόμενα τα ποσοστά των παρατηρημένων τιμών για κάθε ένα σταθμό με τις ελλείψεις των δεδομένων τους και υπολογίζεται το ποσοστό των ελλείψεων αυτών, για να αιτιολογηθεί το γεγονός ότι δεν έλαβαν μέρος στην παρούσα επεξεργασία.



Σχήμα 4.11: Διάγραμμα που απεικονίζει τους σταθμούς των δεδομένων και το σύνολο των δεδομένων τους για την περίοδο 01/1970 - 12/1990.



Χάρτης 4.41: Μέση τάση του ανέμου σε ετήσια βάση (από το μέσο όρο των 12 μηνών του κάθε σταθμού) για την περίοδο 01/1970 - 12/1990.

Στον Χάρτη 4.41 εμφανίζονται σημαντικότερες τάσεις της συμπεριφοράς του ανέμου με τις τιμές να κυμαίνονται από +0.12 έως -0.2 m/s/month. Η χωρική κατανομή των τάσεων

εμφανίζεται διαφορετική με τις μέγιστες θετικές να εμφανίζονται κυρίως στην περιοχή της Κρήτης και απομειούμενο θετικά φτάνει μέχρι το κέντρο της Πελοποννήσου από τα δυτικά και μέχρι την περιοχή της Ρόδου, από τα ανατολικά. Στην κεντρική Ελλάδα, εμφανίζεται μια μικρής έκτασης περιοχή, με θετικές τάσεις που απομειώνεται μέχρι τη βόρεια κεντρική Ελλάδα και σε όλη την υπόλοιπη χώρα οι τάσεις μειώνονται με εντονότερη περιοχή τη βόρειο δυτική Πελοπόννησο, αλλά και την Αλεξανδρούπολη και Σκύρο. Παρατίθεται και ο Πίνακας 4.8 με τα ποσοστά των σταθμών που εμφάνισαν θετικές ή αρνητικές αντίστοιχα τάσεις. Από τον Πίνακα 4.8, οι τάσεις εμφανίζουν διαφορετική συμπεριφορά από ότι στον Πίνακα 4.7 αυξάνοντας τα ποσοστά των σταθμών που εμφανίζουν θετικές τάσεις, για όλους σχεδόν του σταθμούς αναφοράς. Η συνολική εικόνα των σταθμών δείχνει μείωση των τάσεων του ανέμου, αλλά με μικρότερο ποσοστό για κάθε μήνα και με τους μήνες Ιανουάριο και Νοέμβριο να δείχνουν θετικές τάσεις που σημαίνει, αύξηση της ταχύτητας του ανέμου για την περίοδο μέτρησης.

Πίνακας 4.8: Ποσοστό των σταθμών με θετικές ή αρνητικές κλίσεις για την περίοδο 01/1970 - 12/1990 και για το σύνολο των 11 σταθμών στον Ελλαδικό χώρο.

Ποσοστό θετικών τάσεων σε 11 σταθμούς για την περίοδο (1/1970 - 12/1990)											
A	Φ	M	A	M	I	I	A	Σ	O	N	Δ
54.55	54.55	27.27	27.27	45.45	45.45	63.64	27.27	45.45	54.55	63.64	27.27
Ποσοστό αρνητικών τάσεων σε 11 σταθμούς για την περίοδο (1/1970 - 12/1990)											
A	Φ	M	A	M	I	I	A	Σ	O	N	Δ
45.45	45.45	72.73	72.73	54.55	54.55	36.36	72.73	54.55	45.45	36.36	72.73

Οι επιμέρους υπολογισμοί των τάσεων και ο πίνακας στο παράρτημα B17 και A21.

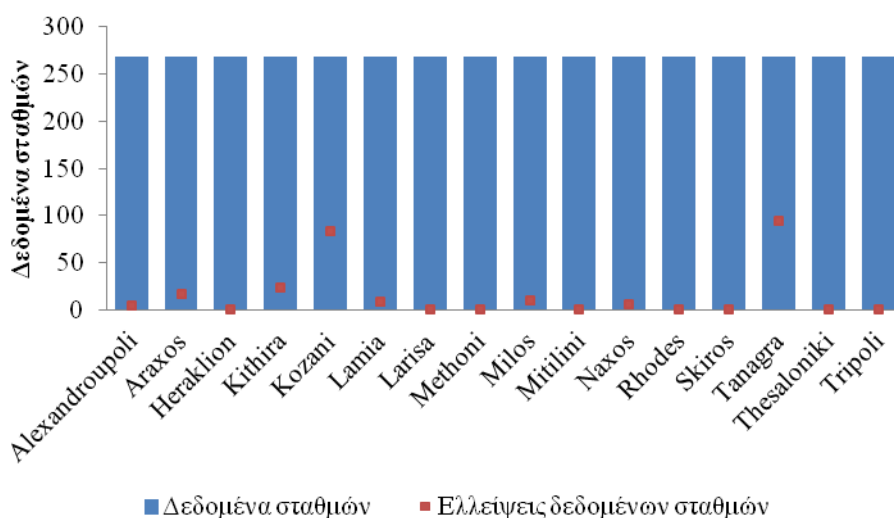
#### **4.5.2 Επιμέρους τάσεις για την περίοδο 1/1991 – 04/2013 σε 14 σταθμούς στον Ελλαδικό χώρο.**

Η ίδια διαδικασία με το προηγούμενο υποκεφάλαιο πραγματοποιείται και για την περίοδο 01/1991-04/2013, για όλους τους σταθμούς στον Ελλαδικό χώρο. Τα αποτελέσματα αφορούν 14 σταθμούς για τη συγκεκριμένη περίοδο αναφοράς και οι σταθμοί που λόγω έλλειψης δεδομένων, δε μετείχαν στην εξαγωγή συμπερασμάτων ήταν το Ελληνικό, τα Ιωάννινα, η Κοζάνη και η Τανάγρα, που στην εν λόγω περίοδο εκτίμησης τα δεδομένα ήταν πολύ λίγα και επομένως δεν ήταν δυνατή η εξαγωγή ασφαλούς συμπεράσματος για τους εν λόγω σταθμούς. Τα δεδομένα απεικονίζονται στο Χάρτη 4.42, που δείχνει τη μέση συμπεριφορά της ταχύτητας του ανέμου από το μέσο όρο των τάσεων των μηνιαίων τιμών κάθε σταθμού. Τα δεδομένα συγκεντρώνονται επίσης στον Πίνακα 4.9 και στο Σχήμα 4.12 για καλύτερη εποπτεία των ανωτέρω.

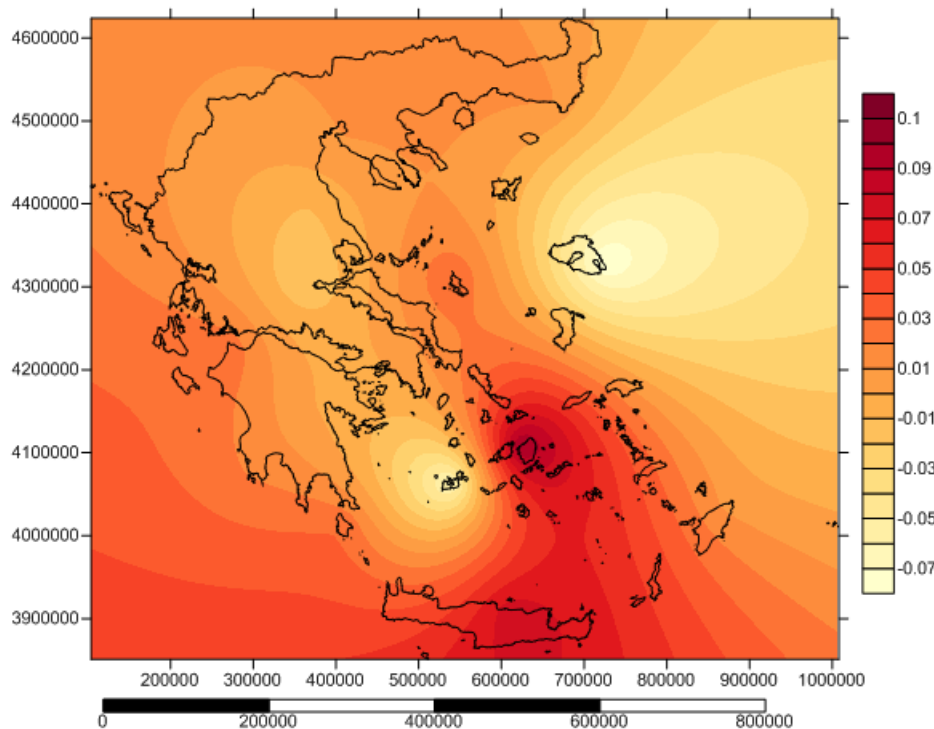
Πίνακας 4.9: Τα δεδομένα του κάθε σταθμού με τις ελλιπείς τιμές για τον υπολογισμό της τάσης της ταχύτητας του ανέμου για την περίοδο 01/1991 - 04/2013 σε 14 σταθμούς.

A	Σταθμοί	Παρ/σεις	Τιμές χωρίς ελλείψεις	Ποσοστό παρατηρήσεων	Ποσοστό ελλিপών παρατηρήσεων
1	Alexandroupoli	268	263	0.98	0.02
2	Araxos	268	251	0.94	0.06
3	Heraklion	268	267	1.00	0.00
4	Kithira	268	244	0.91	0.09
5	Kozani	268	185	0.69	0.31
6	Lamia	268	259	0.97	0.03
7	Larisa	268	268	1.00	0.00
8	Methoni	268	267	1.00	0.00
9	Milos	268	258	0.96	0.04
10	Mitilini	268	268	1.00	0.00
11	Naxos	268	262	0.98	0.02
12	Rhodes	268	268	1.00	0.00
13	Skiros	268	268	1.00	0.00
14	Tanagra	268	173	0.65	0.35
15	Thesaloniki	268	268	1.00	0.00
16	Tripoli	268	268	1.00	0.00

Στον παραπάνω Πίνακα 4.9, είναι αναγραφόμενα τα ποσοστά των παρατηρημένων τιμών για κάθε ένα σταθμό με τις ελλείψεις των δεδομένων τους και υπολογίζεται το ποσοστό των ελλείψεων τους για να αιτιολογηθεί το γεγονός ότι δεν έλαβαν μέρος στην παρούσα επεξεργασία.



Σχήμα 4.12: Διάγραμμα που απεικονίζει τους σταθμούς των δεδομένων και το σύνολο των δεδομένων τους για την περίοδο 01/1991 - 04/2013.



Χάρτης 4.42: Μέση τάση του ανέμου σε ετήσια βάση (από το μέσο όρο των 12 μηνών του κάθε σταθμού) για την περίοδο 01/1991-04/2013.

Οι περιοχές της νότιας Ελλάδος και συγκεκριμένα το τόξο που προλαμβάνει τα δυτικά και νότια παράλια της Πελοποννήσου, την Κρήτη και τα νησιά του Αιγαίου από τα δυτικά προς τα ανατολικά, αντιστοίχως, εμφανίζεται με αυξημένες κλίσεις και θετικές τάσεις που σημαίνει, ότι η ταχύτητα του ανέμου, για την εν λόγω περίοδο, δείχνει να αυξάνεται. Αντίθετα, οι περιοχές της Αττικής, της κεντρικής Ελλάδας, του νότιο δυτικού Αιγαίου και του μεγαλύτερου τμήματος της Εύβοιας, εμφανίζει μειωμένες τάσεις και φαίνεται στις περιοχές αυτές η τάση του ανέμου να απομειώνεται.

Στον Πίνακα 4.10 απεικονίζονται τα ποσοστά των σταθμών που έχουν θετική ή αρνητική τάση που είναι εμφανώς διαφορετικά από την προηγούμενη περίοδο μέτρησης. Η συνολική συμπεριφορά του ανέμου εμφανίζεται με αυξημένες τάσεις για τους μήνες Απρίλιο, Μάιο, Ιούνιο, Ιούλιο, Αύγουστο και Σεπτέμβριο, ενώ οι μήνες Ιανουάριος Φεβρουάριος, είναι ουδέτεροι με τα ποσοστά των θετικών και των αρνητικών τάσεων να είναι ίσα. Οι υπόλοιποι μήνες, έχουν αρνητική τάση που σημαίνει ότι η ταχύτητα του ανέμου μειώνεται.

Πίνακας 4.10: Ποσοστό των σταθμών με θετικές ή αρνητικές κλίσεις για την περίοδο 01/1991 - 04/2013 και για το σύνολο των 14 σταθμών στον Ελλαδικό χώρο.

Ποσοστό θετικών τάσεων σε 14 σταθμούς για την περίοδο (1/1991 - 4/2013)											
I	Φ	M	A	M	I	I	A	Σ	O	N	Δ
50.00	50.00	35.71	64.29	57.14	57.14	71.43	78.57	57.14	42.86	35.71	35.71
Ποσοστό αρνητικών τάσεων σε 14 σταθμούς για την περίοδο (1/1991 - 4/2013)											
I	Φ	M	A	M	I	I	A	Σ	O	N	Δ
50.00	50.00	64.29	35.71	42.86	42.86	28.57	21.43	42.86	57.14	64.29	64.29

Οι επιμέρους υπολογισμοί των τάσεων για κάθε μήνα έχουν απεικονιστεί σε χάρτες στο παράρτημα Β18 και ο αντίστοιχος πίνακας υπολογισμού στο παράρτημα Α22.

## 5 Εξαγωγή μοντέλου για τη μεταβλητή της ταχύτητας του ανέμου

---

### 5.1 Γενικά<sup>1</sup>

#### 5.1.1 Δυναμική Hurst – Kolmogorov

Τα περισσότερα υδρομετεωρολογικά φαινόμενα στη φύση ακολουθούν μια συγκεκριμένη δυναμική που ονομάζεται Hurst - Kolmogorov. Η δομή αυτή πήρε το όνομά της από τον Βρετανό μηχανικό Hurst (1951) κατά τη διεξαγωγή μελέτης του μεγέθους του φράγματος του Ασουάν μετά από παρατήρηση των χρονοσειρών των απορροών του ποταμού Νείλου. Πριν όμως από τη μελέτη αυτή και δέκα χρόνια νωρίτερα ο Kolmogorov (1940) είχε διαπιστώσει την ίδια συμπεριφορά μελετώντας την τύρβη και εισήγαγε ένα μαθηματικό μοντέλο, γνωστό ως στοχαστικό μοντέλο αυτοόμοιο (Simple Scaling Stochastic model - SSS) ή κλασματικός Γκαουσιανός θόρυβος (Fractal Gaussian Noise - FGN).

Ο εκθέτης Hurst, χρησιμοποιείται ως μέτρο της μακροχρόνιας μνήμης των ιστορικών χρονοσειρών που παρουσιάζουν διακυμάνσεις σε διαφορετικές χρονικές κλίμακες, σε αντίθεση με τις χρονοσειρές τυχαίων μεταβλητών. Αφορά στις αυτοσυσχετίσεις των χρονοσειρών και το ρυθμό που αυτές μειώνονται καθώς η υστέρηση αυξάνεται. Οι μελέτες που αρχικά χρησιμοποίησαν το συντελεστή αυτό αναπτύχθηκαν στην υδρολογία για την πρακτική επίλυση του βέλτιστου μεγέθους του φράγματος του Ασουάν στο Νείλο, από συγκεκριμένα μεγέθη τα οποία είχαν παρατηρηθεί για πολύ μεγάλη χρονική περίοδο, όπως τα μεγάλα ποσοστά εξάτμισης της βροχόπτωσης, αλλά και η περίοδος ξηρασίας. Όπως προαναφέρθηκε η ονομασία εκθέτης ή μεταβλητή Hurst πηγάζει από το όνομα του Harold Edwin Hurst (1980 - 1978) που ήταν ο βασικός μελετητής του παραπάνω προβλήματος. Το σύμβολο της μεταβλητής αυτής  $H$ , προέρχεται επίσης από το αρχικό του ονόματός του (Τσεκούρας Γ., 2012).

Σε μη ευκλείδειες γεωμετρίες και συγκεκριμένα στη fractal γεωμετρία, ο γενικός εκθέτης του Hurst συμβολίζεται με  $H$  ή με  $Hq$  προς τιμήν αντίστοιχα των Harold Edwin Hurst (1980 - 1978) και Ludwig Otto Hölder (1859-1937) όπως δόθηκαν οι συμβολισμοί αυτοί από τον Benoît Mandelbrot (1924-2010) ο οποίος ήταν ο πρώτος που κατανόησε και περιέγραψε την απείρως περίπλοκη δομή που χαρακτηρίζει τη μη ευκλείδεια γεωμετρία και έδωσε την ονομασία αυτή (fractals) στις δομές αυτές από τη λατινική λέξη fractious που σημαίνει κατακερματισμένος. Ο συντελεστής αυτός ( $H$ ) έχει άμεση σχέση με τη fractal διάσταση  $D$  και υπολογίζεται από χρονοσειρές με μερική ή ολική τυχειότητα. Ο εκθέτης αυτός επίσης αναφέρεται και σαν δείκτης εξάρτησης ή δείκτης εξάρτησης μακροχρόνιας εμμονής. Ποσοτικοποιεί τη σχετική τάση σε μια χρονοσειρά που είτε υποχωρεί έντονα προς τη μέση τιμή είτε συγκεντρώνεται προς μια κατεύθυνση. Οι τιμές του δείκτη ( $H$ ) που κυμαίνονται ανάμεσα στις τιμές 0.5 και 1.0 φανερώνουν μια χρονοσειρά με μακροπρόθεσμη θετική

---

<sup>1</sup> Το κεφάλαιο 5.1 που ακολουθεί αποτελεί τμήμα της παρουσίασης: Koutsoyiannis D. “*Encolpion of stochastics – Fundamentals of stochastic processes*” Lecture Notes of Stochastics, Version 5, Athens 2013.

αυτοσυσχέτιση, που σημαίνει ότι υψηλές τιμές της μεταβλητής της χρονοσειράς θα ακολουθούνται από υψηλές τιμές οι οποίες θα διατηρούνται στο επίπεδο αυτό για μεγάλο χρονικό διάστημα στο μέλλον. Αντίθετα, οι τιμές του συντελεστή που κυμαίνονται από 0.0 έως 0.5 υποδεικνύουν μια χρονοσειρά με μακροπρόθεσμη εναλλαγή ανάμεσα στις υψηλές και χαμηλές τιμές σε γειτονικές περιοχές, γεγονός που σημαίνει ότι μια υψηλή τιμή θα ακολουθείται από μια χαμηλή, η οποία θα ακολουθείται από μια υψηλή για μακρό χρονικό διάστημα στο μέλλον (αντιεμμονή). Μια τιμή της μεταβλητής  $H = 0.5$  μπορεί να υποδεικνύει ασυσχέτιστη χρονοσειρά, αλλά στην πραγματικότητα έχει εφαρμογή για χρονοσειρές όπου οι αυτοσυσχετίσεις για τις πρώτες χρονικές υστερήσεις μπορεί να είναι θετικές ή αρνητικές αλλά που οι αυτοσυσχετίσεις με εκθετικό τρόπο τείνουν στο μηδέν. Το παραπάνω γεγονός έρχεται σε αντίθεση με τον τυπικό νόμο της απόσβεσης της δύναμης (Power Law) για τις περιπτώσεις  $0.5 < H < 1.0$  και  $0.0 < H < 0.5$ . (Hurst, H.E. (1951). *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.* 116: 770)

### 5.1.2 Στοχαστικές ανελίξεις

Τα περισσότερα πράγματα χαρακτηρίζονται από αβεβαιότητα. Μέτρο εκτίμησης της αβεβαιότητας αυτής αποτελούν οι στοχαστικές ανελίξεις που χαρακτηρίζονται από τις παρακάτω ιδιορρυθμίες:

- (1) τα μοντέλα βασίζονται σε παρατηρημένα δεδομένα γιατί τα γεωφυσικά συστήματα είναι πολυσύνθετα για να αντιμετωπιστούν θεωρητικά ή αφαιρετικά και οι θεωρίες είναι πολλές φορές ανεπαρκείς.
- (2) η διαφορά ανάμεσα στο θόρυβο και στο σήμα είναι ασήμαντη.
- (3) το μέγεθος των δειγμάτων από τα παρατηρημένα γεγονότα στη φύση είναι πολύ μικρό
- (4) πολλές φορές χαρακτηρίζονται από μακροχρόνια εμμονή γεγονός που καθιστά την αντιμετώπιση, με τις κλασσικές μεθόδους της στατιστικής, ανεπαρκή.

Η περισσότερο δημοφιλής γνώση για τις διαδικασίες αυτές βασίζεται κυρίως σε χρονοσειρές που χρησιμοποιούν μοντέλα όπως  $AR(p)$   $ARMA(p, q)$   $ARIMA(p, d, q)$   $ARFIMA(p, d, q)$  κτλ. Τα μοντέλα όμως αυτά είναι πολύ τεχνητά και όχι ιδιαίτερα χρήσιμα. Είναι τεχνητά επειδή είναι υπερπαραμετροποιημένα και δεν υπακούν την αρχή της φειδούς και επιπρόσθετα αντιμετωπίζουν τα φυσικά μεγέθη ως ανελίξεις σε διακριτό χρόνο, ενώ στην πραγματικότητα τα μεγέθη αυτά πραγματοποιούνται σε συνεχή χρόνο. Είναι λιγότερο χρήσιμα επειδή υπάρχουν μέθοδοι οι οποίες παράγουν συνθετικές χρονοσειρές με ανελίξεις πιο απλές από οποιοδήποτε αυθαίρετο σχήμα αυτοσυσχετίσεων (Koutsoyiannis, 2000).

Διαφορετικές ανελίξεις δίνουν έμφαση σε περισσότερο μαθηματικοποιημένα εργαλεία, όπως είναι τα μορφοκλάσματα - απείρως περίπλοκα (fractals) τα οποία εισάγονται απρόσεκτα αντιμετωπίζοντας τις τυχαίες μεταβλητές, σαν να ήταν προσδιοριστικές και επιπόλαια χρησιμοποιούν μη ελεγχόμενες ποσότητες (όπως ροπές μεγάλων τάξεων) που οι εκτιμήσεις τους χαρακτηρίζονται από μεγάλη μεροληψία και αβεβαιότητα.

Ακόμα και η ροπή δεύτερης τάξης, η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης χαρακτηρίζεται από μεγάλη αβεβαιότητα και μεροληψία (Koutsoyiannis and Montanari 2007 · Papalexioiu *et al.*, 2010) που μεταφέρεται σε μετασχηματισμούς όπως το δυναμικό φάσμα. Για όλους αυτούς τους παραπάνω λόγους ιδιαίτερα για ανελίξεις που αφορούν την εκτίμηση παραμέτρων, την καλύτερη εκτιμήτρια για την εξαγωγή στοχαστικών μοντέλων αποτελεί το κλιμακόγραμμα (Koutsoyiannis, 2010). Το κλιμακόγραμμα, είναι η διακύμανση (ή τυπική απόκλιση) της διαδικασίας του μέσου χρόνου σαν συνάρτηση της χρονικής κλίμακας του μέσου όρου. Η



ανέλιξη που παράγεται περιέχει επίσης μεροληψία, η οποία όμως μπορεί να προσδιοριστεί αναλυτικά και να συμπεριληφθεί στην εκτίμηση. Το κλιμακόγραμμα, η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης και το δυναμικό φάσμα είναι μετασχηματισμοί που αλληλοεξαρτώνται.

Πίνακας 5.1: Αναφέρονται ο τύπος της ανέλιξης και οι χαρακτηριστικές εκτιμήτριες που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση παραμέτρων με στοχαστικές ανελιξίες (πηγή : Koutsoyiannis D. “*Encolpion of stochastics – Fundamentals of stochastic processes*”, Athens 2013).

Τύπος	Συνεχής χρόνος	Διακριτός χρόνος ολοκληρώνοντας στη χρονική κλίμακα Δ	Διακριτός χρόνος από δειγματοληψία στο διάστημα D (και συνάθροιση στην κλίμακα Δ = kD όπου k ακέραιος)
Στοχαστικές ανελιξίες	$\underline{x}(t)$ : στιγμιαίο μόνιμο $\underline{X}(t) := \int_0^t \underline{x}(\xi) d\xi$ Σωρευτικό μη μόνιμο	$\underline{X}_i^{(D)} := \underline{X}(i\Delta) - \underline{X}((i-1)\Delta)$ : συνάθροιση μονιμότητα διαστήματος $\underline{X}(t)$ $\underline{x}_i^{(D)} := \underline{X}_i^{(D)} / \Delta$ : υπολογισμένο ένο	$\underline{x}_i^* := \underline{x}(iD)$ : δείγμα στιγμιαίος χρόνος $\underline{X}_i^{*(k)} := \sum_{j=k(i-1)}^{ki} \underline{x}_j^*$ : συνάθροιση $\underline{x}_i^{*(k)} := \underline{X}_i^{*(k)} / k$ : υπολογισμένο
Χαρακτηριστικές διακυμάνσεις	$\gamma_0 := \text{Var}[\underline{x}(t)]$ $\Gamma(t) := \text{Var}[\underline{X}(t)]$ $\gamma(t) := \text{Var}[\underline{X}(t)/t] = \Gamma(t)/t^2$ Σημείωση: $\Gamma(0) = 0; \gamma(0) = \gamma_0$	$\text{Var}[\underline{X}_i^{(D)}] = \Gamma(\Delta)$ $\text{Var}[\underline{x}_i^{(D)}] = \gamma(\Delta)$	$\gamma_0$ $\Gamma^*(k) := \text{Var}[\underline{X}_i^{*(k)}]$ $\gamma^*(k) := \text{Var}[\underline{x}_i^{*(k)}] = \Gamma^*(k) / k^2$ Σημείωση: $\Gamma^*(1) = \gamma^*(1) = \gamma_0$
Συνάρτηση αυτοσυσχέδασης	$c(\tau) := \text{Cov}[\underline{x}(t) \underline{x}(t + \tau)]$ Σημείωση: $c(0) \equiv \gamma_0 = \gamma(0)$	$c_j^{(D)} := \text{Cov}[\underline{x}_i^{(D)} \underline{x}_{i+j}^{(D)}]$ Σημείωση: $c_0^{(D)} \equiv \gamma(\Delta)$	$c_j^* := \text{Cov}[\underline{x}_i^* \underline{x}_{i+j}^*] = c(jD)$ Σημείωση: $c_0^* \equiv \gamma_0$
Δυναμικό φάσμα (πυκνότητα φάσματος)	$s(w) := 2 \int_{-\infty}^{\infty} c(\tau) \cos(2\pi w \tau) d\tau$	$s_d^{(D)}(w) := 2 \sum_{j=-\infty}^{\infty} c_j^{(D)} \cos(2\pi w j)$ $s(\Delta)(w) = \Delta s_d^{(D)}(w\Delta)$ Σημείωση: $w = \omega / \Delta$	$s_d^*(w) := 2 \sum_{j=-\infty}^{\infty} c_j^* \cos(2\pi w j)$ $s^*(w) = D s_d^*(wD)$ Σημείωση: $w = \omega / D$

Χαρακτηριστικές παρατηρήσεις για τον ανωτέρω Πίνακα 5.1:

(1) Ο συνεχής χρόνος συμβολίζεται με  $t$  και ο διακριτός χρόνος με  $i = 0, 1, \dots; D$  που αποτελεί το χρονικό βήμα σε περίπτωση δείγματος  $\Delta$  είναι το χρονικό βήμα σε περίπτωση συνάθροισης ή μέσου διαστήματος  $k$  είναι ο ακέραιος που πολλαπλασιάζεται το διάστημα  $D$  ώστε να προκύψει η συναθροισμένη κλίμακα  $\Delta = kD$ .

(2) Η συχνότητα που είναι το αντίστροφο του χρόνου συμβολίζεται με  $w$  ενώ  $\omega = wD$  (ή  $\omega = wD$ ) που αποτελεί αδιαστατοποιημένο μέγεθος της συχνότητας. Τα  $w$  και  $\omega$  αποτελούν πραγματικούς αριθμούς στο διάστημα  $(-\infty, \infty)$  για μια ανέλιξη συνεχούς χρόνου ενώ για τις ανελιξίες διακριτού χρόνου το  $w$  κυμαίνεται στο διάστημα  $[-1/2\Delta, 1/2\Delta]$  και το  $\omega$  στο διάστημα  $[-1/2, 1/2]$ . Επειδή η συνάρτηση αυτοσυσχέδασης και το δυναμικό φάσμα είναι

ισοδύναμες συναρτήσεις οι ανελιξίες πραγματοποιούνται για συνεχή χρόνο με επεξεργασία στο διάστημα  $(0, \infty)$  και για διακριτό χρόνο στο διάστημα  $[0, 1/2\Delta]$  για το  $w$  και  $[0, 1/2]$  για το  $\omega$ .

(3) Οι τυπικές αποκλίσεις για το στιγμιαίο αλλά και το μέσο χρονικό διάστημα εκφράζονται αντίστοιχα από τα παρακάτω:

$$\sigma_0 := \sqrt{\gamma_0} \quad \sigma(\Delta) := \sqrt{\gamma(\Delta)} \quad (5.1)$$

(4) Το δυναμικό φάσμα για μια ανέλιξη συνεχούς χρόνου (στιγμιαία) συμβολίζεται σαν  $s(w)$  είναι το διπλάσιο ημίτονο του μετασχηματισμού Fourier της συνάρτησης αυτοσυσκέδασης της ανέλιξης, ενώ οι ανελιξίες διακριτού χρόνου που συμβολίζονται με  $s_d^{(\Delta)}(\omega)$  και  $s_d^*(\omega)$  είναι το διπλάσιο αντίστροφο πεπερασμένο ημίτονο του μετασχηματισμού Fourier των αντίστοιχων συναρτήσεων αυτοσυσχέτισης. Η σύμβαση του παράγοντα 2 στους μετασχηματισμούς Fourier υιοθετήθηκε ώστε το ολοκλήρωμα του φάσματος σε θετικές συχνότητες να είναι ίσο μόνο με τη διασπορά της ανέλιξης.

(5) Σε ανελιξίες διακριτού χρόνου η υστέρηση  $j$  και η συχνότητα  $\omega$  είναι αδιαστατοποιημένες. Για να γίνει το φάσμα ισοδύναμο και συγκρίσιμο με ανελιξίες συνεχούς χρόνου που εκφράζονται από το φάσμα  $s(w)$  έχει γίνει εισαγωγή των τύπων  $s(\Delta)(w)$  και  $s^*(w)$  ( με  $w = \omega/\Delta$  και  $\omega / D$  αντίστοιχα) για την υπολογισμένη και τη δειγματική ανέλιξη αντίστοιχα το οποίο έχει τις ίδιες διαστάσεις όπως και το  $s(w)$ .

Το κλιμακόγραμμα και οι συνάρτηση αυτοσυσκέδασης σε συνεχή αλλά και σε διακριτό χρόνο είναι μετασχηματισμοί αλληλοεξαρτώμενοι. Το κλιμακόγραμμα σε μια ανέλιξη συνεχούς χρόνου όπως επίσης και σε υπολογισμένες ή συναθροισμένες ανελιξίες μπορεί να υπολογιστεί από τη συνάρτηση αυτοσυσκέδασης της συνεχόμενης ανέλιξης όπως φαίνεται παρακάτω (cf. Papoulis, 1991p. 299):

$$\Gamma(\Delta) = 2 \int_0^\Delta (\Delta - \tau) c(\tau) d\tau \quad (5.2)$$

$$\gamma(\Delta) = \frac{\Gamma(\Delta)}{\Delta^2} = \frac{2}{\Delta^2} \int_0^\Delta (\Delta - \tau) c(\tau) d\tau = 2 \int_0^1 (1 - \xi) c(\xi\Delta) d\xi \quad (5.3)$$

Ο αντίστροφος τύπος από τον οποίο μπορούμε να υπολογίσουμε την αυτοσυνδιασπορά εάν το κλιμακόγραμμα είναι γνωστό παράγεται εύκολα από τη δεύτερη παράγωγο του  $\Gamma(\Delta)$  και χρησιμοποιώντας τον κανόνα ολοκλήρωσης του Leibniz' s:

$$c(\tau) = \frac{1}{2} \frac{d^2 \Gamma(\tau)}{d\tau^2} = \frac{1}{2} \frac{d^2 (\tau^2 \gamma(\tau))}{d\tau^2} \quad (5.4)$$

Το κλιμακόγραμμα από την δειγματική συναθροισμένη και από τη δειγματική μέση ανέλιξη, δεν μπορούν να υπολογιστούν με τον τρόπο αυτό αλλά χρειάζεται να υπολογιστούν με μια πιο καθαρή ανέλιξη διακριτού χρόνου (cf. Papoulis, 1991p. 432 ' Koutsoyiannis, 2010). Χρησιμοποιώντας τον κανόνα l' Hôpital δίνονται οι παρακάτω χρήσιμες ασυμπτωτικές ιδιότητες:  $c(0) = \gamma(0)$   $c'(0) = 3\gamma'(0)$ . Οι παρακάτω σχέσεις δίνουν τι κλιμακόγραμμα από τη συνάρτηση αυτοσυνδιασποράς από ανέλιξη διακριτού χρονικού βήματος:

$$\Gamma^{*(k)} = k\gamma_0 + 2 \sum_{j=1}^{k-1} (k-j) c_j^* \quad (5.5)$$

$$\gamma^*(k) = \frac{\Gamma^{*(k)}}{k^2} = \frac{1}{k} (\gamma_0 + 2 \sum_{j=1}^{k-1} (1 - \frac{j}{k}) c_j^*) \quad (5.6)$$

Η παραπάνω επαναληπτική ανέλιξη διευκολύνει τον υπολογισμό του κλιμακογράμματος:

$$\Gamma^{*(k)} = 2\Gamma^{*(k-1)} - \Gamma^{*(k-2)} + 2c_{k-1}^*, \Gamma^{*(0)} = 0, \Gamma^{*(1)} = \gamma_0 \quad (5.7)$$

Οι παρακάτω αντίστροφες σχέσεις δίνουν τις συναρτήσεις αυτοσυνδιασποράς από τα κλιμακογράμματα για ανελιξείς διακριτού χρόνου:

$$c_j^{(\Delta)} = \frac{1}{2} \frac{\delta_{\Delta}^2 \Gamma(j\Delta)}{\Delta^2} = \frac{1}{\Delta^2} \left( \frac{\Gamma((j+1)\Delta) + \Gamma((j-1)\Delta)}{2} - \Gamma(j\Delta) \right) \quad (5.8)$$

$$c_j^* = \frac{1}{2} \delta_1^2 \Gamma^*(j) = \left( \frac{\Gamma^{(j+1)} + \Gamma^{(j-1)}}{2} - \Gamma^*(j) \right) \quad (5.9)$$

Το  $\delta_{\Delta}^2$  αποτελεί τη δεύτερη κεντρική ροπή της διαφοράς για το διάστημα  $\Delta$  και ο λόγος  $\delta_{\Delta}^2 / \Delta$  είναι η δεύτερη πεπερασμένη παράγωγος. Οι σχέσεις είναι ακριβείς και όχι προσεγγιστικές. Το δυναμικό φάσμα της ανέλιξης του συνεχόμενου χρόνου υπολογίζεται από την συνάρτηση αυτοσυνδιασποράς και είναι:

$$s(w) = 4 \int_0^{\infty} c(\tau) \cos(2\pi w \tau) d\tau \quad (5.10)$$

και ο αντίστροφος μετασχηματισμός είναι:

$$c(\tau) = \int_0^{\infty} s(w) \cos(2\pi w \tau) dw \quad (5.11)$$

Το δυναμικό φάσμα μιας διακριτού χρόνου ανέλιξης υπολογίζεται από τη συνάρτηση αυτοσυνδιασποράς και είναι:

$$s_d^{(\Delta)}(\omega) = 2\gamma(\Delta) + 4 \sum_{j=1}^{\infty} c_j^{(\Delta)} \cos(2\pi \omega j) \quad (5.12)$$

Ο αντίστροφός μετασχηματισμός δίνεται από τον τύπο:

$$c_j^{(\Delta)} = \int_0^{1/2} s_d^{(\Delta)}(\omega) \cos(2\pi \omega j) d\omega \quad (5.13)$$

Από τον παραπάνω τύπο είναι εμφανές ότι, ακόμα και σε διακριτή ανέλιξη ο αντίστροφος μετασχηματισμός είναι επίσης ολοκλήρωμα και όχι άθροισμα. Με την ίδια ανέλιξη υπολογίζεται και το φάσμα  $s_d^*(\omega)$  ενώ το  $s^{(\Delta)}(w)$  και το  $s^*(w)$  προέρχονται άμεσα από τους ορισμούς τους.

Η σχέση που συνδέει  $s_d^*(\omega)$  με το  $s(w)$  δίνεται παρακάτω (cf. Papoulis, 1991 p. 336):

$$s_d^*(\omega) = \frac{s^*(w)}{D} = \frac{1}{D} \sum_{j=-\infty}^{\infty} s\left(\frac{\omega+j}{D}\right) = \frac{1}{D} \sum_{j=-\infty}^{\infty} s\left(w + \frac{j}{D}\right), \quad w = \omega / D \quad (5.14)$$

Για να βρεθεί η σχέση ανάμεσα  $s_d^{(\Delta)}(\omega)$  με το  $s(w)$  χρησιμοποιούμε την παραπάνω σχέση αφού εισάγουμε την ανέλιξη του κυλιόμενου μέσου όρου. Το δυναμικό φάσμα της διαδικασίας  $\underline{y}(t)$  περιλαμβάνεται σαν κυλιόμενος μέσος όρος του  $\underline{x}(t)$  στη χρονική κλίμακα  $\Delta$ :

$$s_y(w) = s(w) \frac{\sin^2(\pi w \Delta)}{(\pi w \Delta)^2} \quad (5.15)$$

διακριτοποιώντας την παραπάνω σχέση σε χρονικά διαστήματα  $\Delta$  προκύπτει:

$$s_d^{(\Delta)}(\omega) = \frac{s^{(\Delta)}(w)}{\Delta} = \frac{1}{\Delta} \sum_{j=-\infty}^{\infty} s\left(\frac{\omega+j}{\Delta}\right) \frac{\sin^2(\pi(\omega+j))}{(\pi(\omega+j))^2} = \frac{1}{\Delta} \sum_{j=-\infty}^{\infty} s\left(w + \frac{j}{\Delta}\right) \frac{\sin^2(\pi(w\Delta+j))}{(\pi(w\Delta+j))^2} \quad (5.16)$$

$$w = \omega / \Delta$$

Όπως προαναφέρθηκε το κλιμακόγραμμα και το δυναμικό φάσμα είναι μετασχηματισμοί της συνάρτησης αυτοσυνδιασποράς αλλά συνδέονται και μεταξύ τους με απλό μετασχηματισμό. Εκφράζοντας το  $c(t)$  συναρτήσει του  $\gamma(\tau)$  και χρησιμοποιώντας γνωστές ιδιότητες από το μετασχηματισμό Fourier προκύπτει ότι:

$$s(w) = 2w2 \frac{d^2}{dw^2} \int_0^\infty \gamma(\tau) \cos(2\pi w\tau) d\tau \quad (5.17)$$

που μετά από αλγεβρικούς υπολογισμούς προκύπτει:

$$s(w) = -2 \int_0^\infty (2\pi w\tau)^2 \gamma(\tau) \cos(2\pi w\tau) d\tau \quad (5.18)$$

συνδυάζοντας επίσης τις παραπάνω σχέσεις έχουμε:

$$\gamma(\Delta) = 2 \int_0^1 (1 - \xi) \int_0^\infty s(w) \cos(2\pi w\xi\Delta) dw d\xi = 2 \int_0^\infty s(w) \int_0^1 (1 - \xi) \cos(2\pi w\xi\Delta) d\xi dw \quad (5.19)$$

και μετά από αλγεβρικούς υπολογισμούς βρίσκουμε την παρακάτω ισότητα που δίνει απευθείας το κλιμακόγραμμα από το δυναμικό φάσμα (που μπορεί να υπολογιστεί από τις παραπάνω σχέσεις για  $\tau = 0$ ):

$$\gamma(\Delta) = \int_0^\infty s(w) \frac{\sin^2(\pi w\Delta)}{(\pi w\Delta)^2} dw \quad (5.20)$$

Το κλιμακόγραμμα εκφράζει τη διασπορά και για αυτό το λόγο δε θα πρέπει να είναι αρνητικό σε καμία χρονική κλίμακα  $\Delta$ . Μπορεί να είναι θετικό πεπερασμένο ή ακόμα και άπειρο για  $\Delta = 0$ . Για εργοδικές ανελιξίες πρέπει να τείνει στο μηδέν όταν  $\Delta \rightarrow \infty$  (Papoulis, 1991 p.429). Επομένως:

$$\gamma(\Delta) > 0 \quad \gamma(\infty) = 0$$

Ενώ η αυτοσυνδιασπορά ταυτίζεται με τη διασπορά για μηδενική υστέρηση ( $\tau = 0$ ) ισχύει ότι  $c(0) > 0$ . Για υστέρηση ( $\tau \neq 0$ ) το  $c(\tau)$  μπορεί να πάρει και αρνητικές τιμές. Επομένως θα πρέπει να είναι θετική συνάρτηση (Stewart 1976) μια ιδιότητα που θέτει άνω και κάτω όρια στο  $\pm c(0)$ . Επιπρόσθετα, η εργοδικότητα θέτει περιορισμούς σχετικά με την ασυμπτωτική συμπεριφορά (Papoulis, 1991 p.430):

$$c(0) > 0 \quad |c(\tau)| \leq c(0) \quad \frac{1}{\Delta} \int_0^\Delta c(t) dt \xrightarrow{\Delta \rightarrow \infty} 0 \quad (5.21)$$

Με σκοπό η εξίσωση  $c(\tau)$  να είναι θετική ο μετασχηματισμός Fourier όπως είναι και το δυναμικό φάσμα  $s(w)$  θα πρέπει να είναι μη αρνητικό. Επομένως:  $s(w) \geq 0$ . Η αυτοσυνδιασπορά  $c(\tau)$  είναι συχνά μη αρνητική και φθίνουσα συνάρτηση. Σε αυτή την περίπτωση το  $\gamma(\Delta)$  είναι επίσης φθίνον. Για να φανεί αυτό παίρνουμε την παράγωγο με αντιστοιχία του  $\Delta$  και βρίσκουμε:

$$\gamma'(\Delta) = \frac{4}{\Delta^3} \int_0^\Delta \left(\tau - \frac{\Delta}{2}\right) c(\tau) d\tau \quad (5.22)$$

Ο όρος  $(\tau - \Delta/2)$  που βρίσκεται εντός του ολοκληρώματος είναι συμμετρικός ως προς το  $\Delta/2$  (αρνητικός για  $\tau < \Delta/2$  και θετικός για  $\tau > \Delta/2$ ). Αφού το  $c(\tau)$  είναι φθίνουσα συνάρτηση οι τιμές της για  $\tau < \Delta/2$  θα είναι μεγαλύτερες από αυτές για  $\tau > \Delta/2$ . Επομένως, αφού οι τιμές που παράγονται από τη συνάρτηση στο διάστημα  $\tau < \Delta/2$  είναι περισσότερες από αντίστοιχο συμμετρικό του  $\tau > \Delta/2$  η πρώτη παράγωγος θα είναι αρνητική  $\gamma'(\Delta) < 0$ .

### 5.1.3 Στατιστική εκτίμηση – ανέλιξη συνάθροισης

Η παρακάτω παραγόμενη ανέλιξη βασίζεται στην εργασία του Koutsoyiannis (2011a). Υποθέτουμε ότι έχουμε  $n = \lfloor T0 / \Delta \rfloor = T / \Delta$  παρατηρήσεις της συναθροισμένης ανέλιξης  $\underline{x}_i^{(\Delta)}$  όπου το  $T_0$  είναι η περίοδος παρατήρησης  $\lfloor \cdot \rfloor$  που παριστά το μέγιστο μέγεθος ενός πραγματικού αριθμού και  $T := \lfloor T0 / \Delta \rfloor \Delta$  είναι η περίοδος παρατήρησης στρογγυλοποιημένη σε έναν ακέραιο πολλαπλασιασμένο με το  $\Delta$ . Η αμερόληπτη εκτιμήτρια του μέσου όρου  $\mu$  της στιγμιαίας ανέλιξης  $\underline{x}(t)$  όπως επίσης και της διακριτής ανέλιξης  $\underline{x}_j$  και  $\underline{x}_i^{(\Delta)}$  είναι:

$$\bar{x}(\Delta) := \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^{(\Delta)} = \frac{X(T)}{n\Delta} = \frac{X(T)}{T} = \underline{x}_1^{(T)} \quad (5.23)$$

Η τυπική (αλλά μεροληπτική εκτός από το λευκό θόρυβο) εκτιμήτρια  $\hat{\gamma}(\Delta)$  της διασποράς  $\gamma(\Delta)$  της μέσης ανέλιξης  $\underline{x}_i^{(\Delta)}$  είναι:

$$\hat{\gamma}(\Delta) := \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i^{(\Delta)} - \bar{x}(\Delta))^2 = \frac{1}{\frac{T}{\Delta}-1} \sum_{i=1}^{T/\Delta} (x_i^{(\Delta)} - \bar{x}(\Delta))^2 \quad (5.24)$$

Η παρακάτω γενικότερη ισότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της μεροληψίας της  $\hat{\gamma}(\Delta)$  και είναι:

$$E[\hat{\gamma}(\Delta)] = \frac{1}{1-1/n} (\text{Var}[x_i^{(\Delta)}] - \text{Var}[\bar{x}(\Delta)]) \quad (5.25)$$

Η γενικότερη ισότητα σε αυτήν την περίπτωση γίνεται:

$$E[\hat{\gamma}(\Delta)] = \frac{1}{1-\Delta/T} (\gamma(\Delta) - \gamma(T)) = \frac{1}{1-\Delta/T} \left( \frac{\Gamma(\Delta)}{\Delta^2} - \frac{\Gamma(T)}{T^2} \right) \quad (5.26)$$

ή

$$E[\hat{\gamma}(\Delta)] = \eta(\Delta T) \gamma(\Delta) \quad (5.27)$$

όπου ο διορθωτικός συντελεστής της μεροληψίας ( $\eta$ ) δίνεται:

$$\eta(\Delta T) = \frac{1-\gamma(T)/\gamma(\Delta)}{1-\Delta/T} = \frac{1-\left(\frac{\Delta}{T}\right)^2 \Gamma(T)/\Gamma(\Delta)}{1-\Delta/T} \quad (5.28)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις είναι εμφανές ότι απ' ευθείας εκτίμηση της διασποράς  $\gamma(\Delta)$  εκτός από τον υπολογισμό του  $\gamma_0$  δεν είναι εφικτή από τα δεδομένα. Χρειάζεται να γνωρίζουμε το λόγο  $\gamma(T) / \gamma(\Delta)$  και για αυτό το λόγο απαιτείται να υποτεθεί ένα στοχαστικό μοντέλο που θα επηρεάσει την εκτίμηση της διασποράς  $\gamma(\Delta)$ . Αφού το μοντέλο έχει υποτεθεί και οι παράμετροι έχουν εκτιμηθεί, βασιζόμενο στα δεδομένα, μπορούν να γενικευθούν οι υπολογισμοί για τον υπολογισμό της διασποράς, σε οποιαδήποτε χρονική κλίμακα, συμπεριλαμβανομένης και αυτής για κλίμακα  $\gamma_0$ .

Σε περίπτωση που οι παρατηρημένες τιμές από το δείγμα δίνονται από το  $(\underline{x}_i^*)$  στο χρονικό βήμα  $D$  παρά από ότι στο συναθροισμένο  $(\underline{x}_i^{(\Delta)})$  η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$\bar{x} := \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \underline{x}_i^* = \underline{x}_1^{*(n)} \quad (5.29)$$

Η τυπική (και μεροληπτική) εκτιμήτρια της  $\hat{\gamma}$  από τη διασπορά  $\gamma_0$  της δειγματικής ανέλιξης  $\underline{x}_i$  που ισοδυναμεί με αυτή από του συνεχούς χρόνου (στιγμιαία) διαδικασία  $\underline{x}(t)$  θα είναι:

$$\hat{\gamma} := \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (5.30)$$

Με παρόμοιο τρόπο αποδεικνύεται από τις παραπάνω σχέσεις και γίνεται σχετικό το παρακάτω:

$$\eta'(D n) = \frac{1-\gamma^{*(n)}/\gamma(0)}{1-1/n} \approx \frac{1-\gamma(T)/\gamma(0)}{1-D/T} \quad (5.5.31)$$

Αν ακόμα και σε αυτήν την περίπτωση ο στόχος μας είναι ο υπολογισμός της διασποράς της στιγμιαίας ανέλιξης  $\gamma_0$  επίσης δεν είναι εφικτό από τα δεδομένα μόνο. Θα χρειαστεί να γνωρίζουμε το λόγο  $\gamma^{*(n)}/\gamma(0)$  και για αυτό το λόγο θα πρέπει όπως ανωτέρω να υποθέσουμε ένα στοχαστικό μοντέλο. Αφού υποθέσουμε το μοντέλο θα υπολογίσουμε με

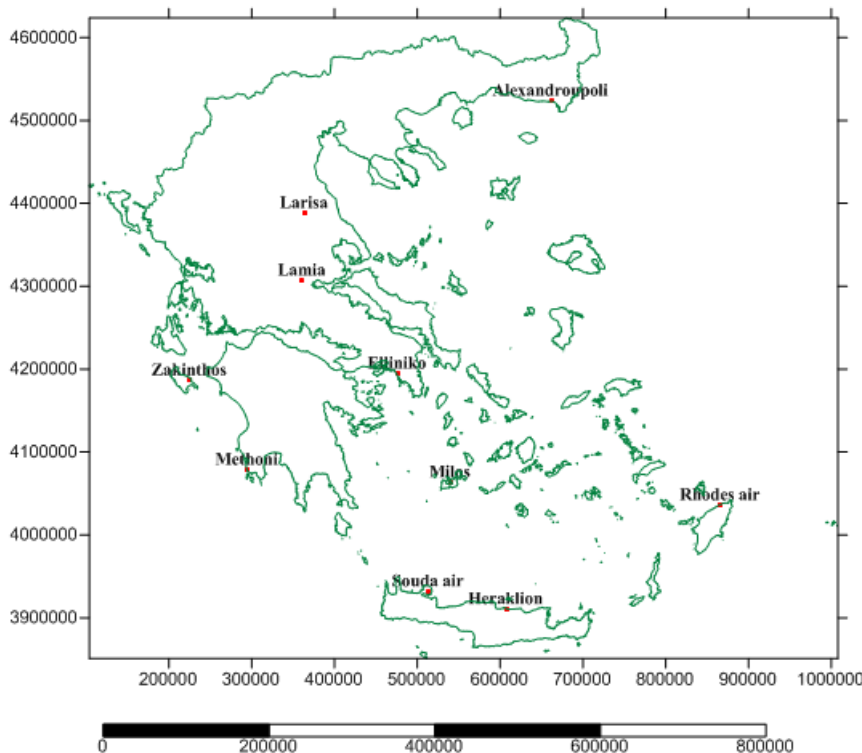
αυτόν τον τρόπο τις παραμέτρους του μπορούμε να γενικεύσουμε τον υπολογισμό για την εκτίμηση της διασποράς  $\gamma(\Delta)$  για κάθε χρονική κλίμακα  $\Delta$ .

## 5.2 Εξαγωγή του μοντέλου από τα δεδομένα 10 σταθμών

Σύμφωνα με τις αναφέρονται στο προηγούμενο υποκεφάλαιο, είναι σαφές ότι η περισσότερο αμερόληπτη εκτιμήτρια, σχετικά με το δυναμικό φάσμα, αλλά και τις συναρτήσεις αυτοσυσχέτισης, αποτελεί το κλιμακόγραμμα (Koutsoyiannis, 2003). Αν και όλες οι προαναφερθείσες εκτιμήτριες είναι αλληλοσυνδεδεμένες, όπως φανερώνεται από τις παραπάνω σχέσεις, το κλιμακόγραμμα αποτελεί την περισσότερο απλή και αμερόληπτη διαδικασία, όπου η μεροληψία μπορεί να εκτιμηθεί και αναλυτικά.

### 5.2.1 Εξαγωγή του συντελεστή Hurst μέσω της αμερόληπτης εκτιμήτριας της διασποράς

Οι σταθμοί που επελέγησαν για τη διαδικασία της στοχαστικής μοντελοποίησης είναι οι: Αλεξανδρούπολη, Ηράκλειο, Λάρισα, Λαμία, Μήλος, Σούδα, Ελληνικό, Μεθώνη, Ζάκυνθος και Ρόδος. Το κριτήριο αποτέλεσε, το μήκος της κάθε σειράς δεδομένων, οι ελλείψεις των τιμών της κάθε σειράς, αλλά και η διασπορά των σταθμών στον Ελληνικό χώρο, ώστε η εξαγωγή του μοντέλου, να αποτελεί μια γενικότερη έκφραση της εκτίμησης της διασποράς σε όλες τις περιοχές του Ελλαδικού χώρου, με τη μικρότερη δυνατή μεροληψία. Παρακάτω, στο Χάρτη 5.1, παρουσιάζονται οι σταθμοί για πληρέστερη κατανόηση της διασποράς των σταθμών χωρικά.



Χάρτης 5.1: Σταθμοί (10) που έλαβαν μέρος στη διαδικασία εξαγωγής του μοντέλου για να οπτικοποιηθεί η διασπορά τους στον Ελλαδικό χώρο.

Το κλιμακόγραμμα που προέκυψε, από τους εξεταζόμενους σταθμούς για τη συναθροισμένη σειρά δεδομένων, σε ημερήσια χρονική κλίμακα με το πρόγραμμα Υδρογώνων, περιείχε πολύ λίγες τιμές στην κλίμακα εξέτασης και τα αποτελέσματα μπορεί να ήταν επισφαλής. Για

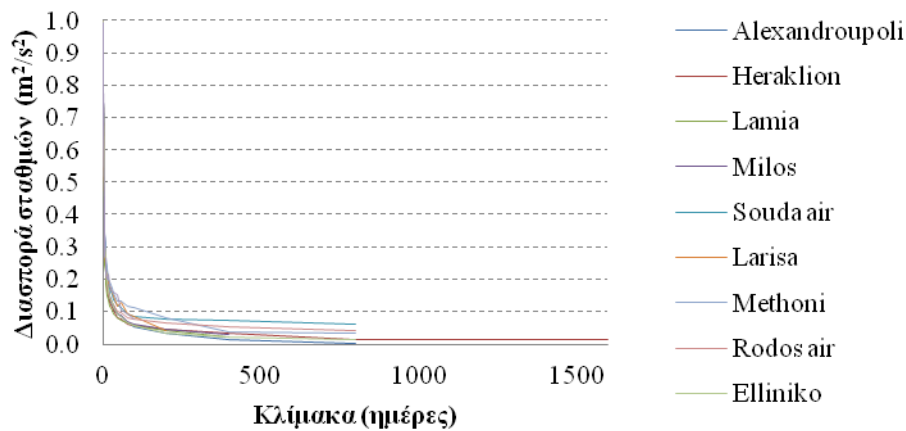
να εξαλειφθεί η μηνιαία κυκλοστασιμότητα του ανέμου, οι υπολογισμοί αρχικά έγιναν ξεχωριστά για κάθε μήνα και για κάθε σταθμό με σκοπό την εξαγωγή κλιμακογραμμάτων ανά μήνα και ανά σταθμό. Όμως οι τιμές του προγράμματος Υδρογνώμων ήταν μόλις 30 στην ημερήσια κλίμακα εξέτασης, για την εξαγωγή του κλιμακογράμματος για αυτό το λόγο ακολουθήθηκε διαφορετική διαδικασία. Έπρεπε να αντιμετωπιστεί ένα διττό πρόβλημα: οι λίγες τιμές του κλιμακογράμματος, σε συνδυασμό με την εξάλειψη της κυκλοστασιμότητας (εποχικότητας) της μεταβλητής της ταχύτητας του ανέμου. Για το λόγο αυτό οι ημερήσιες σειρές του ανέμου κανονικοποιήθηκαν, αφού χωρίστηκαν ανά μήνα. Για κάθε μήνα υπολογίστηκε, η μέση τιμή και τυπική απόκλιση των δεδομένων και από κάθε μια τιμή δεδομένων αφαιρέθηκε, η μέση τιμή και διαιρέθηκαν οι τιμές με την τυπική απόκλιση αντίστοιχα για κάθε μήνα και για κάθε σταθμό. Οι κανονικοποιημένες πλέον σειρές τέθηκαν στην αρχική χρονική ημερήσια ακολουθία τους και με αυτόν τον τρόπο έγινε η εισαγωγή τους στο πρόγραμμα. Με τον ανωτέρω περιγραφόμενο τρόπο εξαιρέθηκε η κυκλοστασιμότητα του ανέμου και αυξήθηκαν οι τιμές κλίμακας του κλιμακογράμματος. Τα αποτελέσματα της διαδικασίας συγκεντρώνονται στον Πίνακα 5.2.

Πίνακας 5.2: Υπολογισμός των τιμών του κλιμακογράμματος από την εξαγωγή της δειγματικής τιμής της διασποράς από τα δεδομένα των 10 σταθμών υπολογισμού.

	Alex.	Her.	Lam	Mil	Soud.	Lar	Meth	Rod	Ell	Zak
κλίμακα (ημέρες)	Var	Var	Var	Var	Var	Var	Var	Var	Var	Var
1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2	0.75	0.73	0.65	0.78	0.74	0.68	0.73	0.74	0.74	0.67
4	0.50	0.48	0.41	0.54	0.49	0.44	0.49	0.48	0.49	0.43
6	0.38	0.36	0.30	0.41	0.38	0.33	0.40	0.35	0.37	0.31
8	0.30	0.29	0.24	0.34	0.32	0.29	0.34	0.30	0.31	0.27
10	0.26	0.25	0.22	0.29	0.28	0.24	0.30	0.26	0.26	0.27
12	0.23	0.22	0.19	0.25	0.25	0.23	0.27	0.23	0.23	0.22
16	0.19	0.17	0.15	0.21	0.22	0.21	0.23	0.19	0.20	0.20
20	0.16	0.15	0.14	0.18	0.19	0.19	0.20	0.16	0.17	0.22
24	0.14	0.13	0.12	0.15	0.17	0.18	0.19	0.15	0.15	0.18
30	0.12	0.11	0.11	0.13	0.15	0.16	0.18	0.13	0.13	0.16
36	0.11	0.10	0.09	0.12	0.14	0.15	0.16	0.12	0.11	0.16
48	0.09	0.08	0.08	0.10	0.12	0.12	0.14	0.10	0.09	0.15
60	0.09	0.08	0.08	0.09	0.11	0.13	0.13	0.10	0.08	0.10
80	0.06	0.06	0.07	0.07	0.09	0.10	0.12	0.08	0.07	0.09
100	0.06	0.06	0.06	0.06	0.09	0.08	0.11	0.08	0.06	0.08
200	0.03	0.05	0.04	0.05	0.08	0.04	0.08	0.06	0.03	
400	0.02	0.04	0.02	0.03	0.07		0.04	0.05	0.02	
800	0.00	0.01			0.06		0.03	0.04	0.02	
1600		0.02								

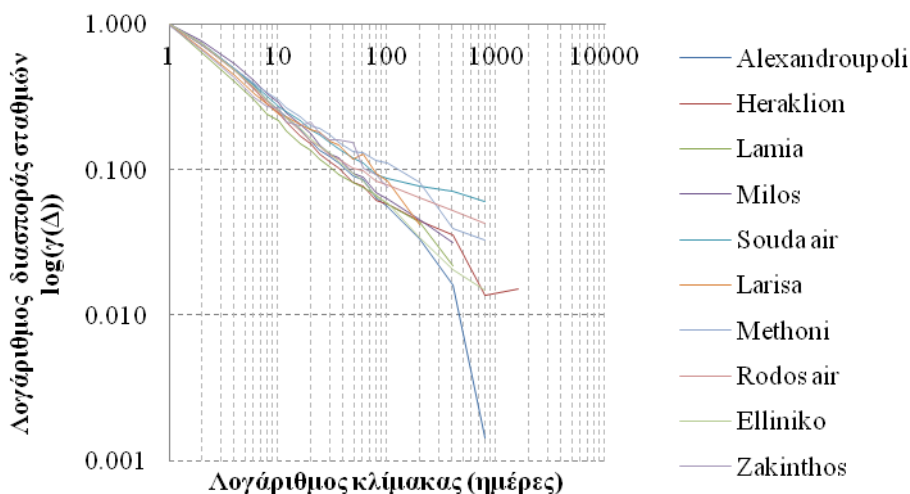
Από τον παραπάνω Πίνακα 5.2, είναι εμφανές ότι οι αρχικές 30 κλίμακες του προγράμματος (ημέρα) έχουν αυξηθεί και σε όλους τους σταθμούς, οι κλίμακες κυμαίνονται από χρονικό διάστημα μεγαλύτερο του ενός έτους, έως χρονικό διάστημα λίγο μεγαλύτερο των τεσσάρων

ετών. Με το πλήθος των τιμών αυτών αλλά και τη διασπορά τους στον Ελλαδικό χώρο, γίνεται προσπάθεια να μειωθεί η μεροληψία των αποτελεσμάτων κατά την εξαγωγή του μοντέλου.



Σχήμα 5.1: Κλιμακόγραμμα στο οποίο απεικονίζονται οι τιμές της διασποράς ( $m^2/s^2$ ) συναρτήσει της χρονικής κλίμακας (ημέρα) για τους 10 σταθμούς της επεξεργασίας.

Από το Σχήμα 5.1, μπορούμε να παρατηρήσουμε την ταυτόχρονη φθίνουσα κλίση όλων των τιμών του κλιμακογράμματος και μάλιστα με τον ίδιο περίπου τρόπο, παρόμοια κλίση. Για να γίνει όμως κάτι τέτοιο περισσότερο ευδιάκριτο οι τιμές του παραπάνω διαγράμματος σχεδιάζονται σε λογαριθμικούς άξονες ώστε η παραπάνω κλίση να μετασχηματιστεί σε ευθεία, Σχήμα 5.2.



Σχήμα 5.2: Κλιμακόγραμμα στο οποίο απεικονίζονται οι τιμές της διασποράς ( $m^2/s^2$ ) συναρτήσει της χρονικής κλίμακας (ημέρα) για τους 10 σταθμούς της επεξεργασίας σε λογαριθμικούς άξονες.

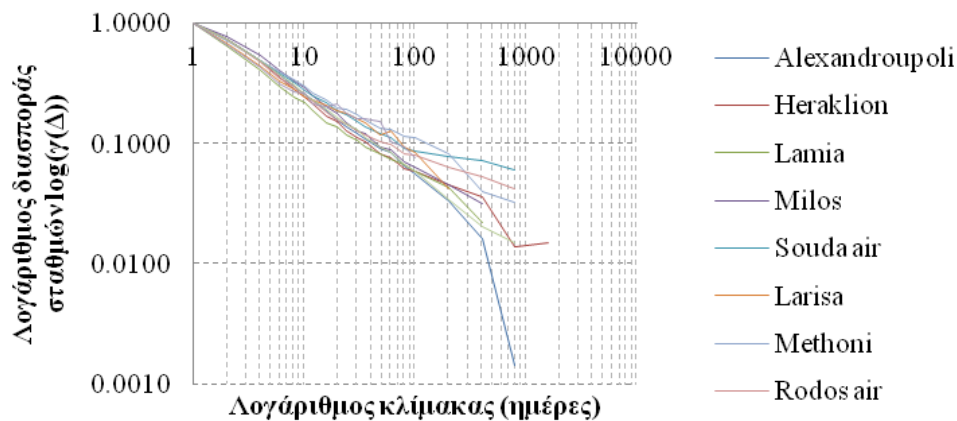
Από το Σχήμα 5.2, είναι ευδιάκριτο ότι οι τιμές της διασποράς ιδιαίτερα στις πρώτες κλίμακες ακολουθούν παρόμοια κλίση. Όμως κάτι τέτοιο ακόμα δεν είναι πλήρως ευδιάκριτο γιατί οι τιμές των διασπορών της ταχύτητας του ανέμου για κάθε σταθμό δεν ξεκινάνε από το ίδιο σημείο (αφετηρία)  $\gamma_0$ . Για τον λόγο αυτό διαιρούνται οι τιμές των διασπορών του κάθε σταθμού με την αρχική διασπορά  $\gamma_0$  του κάθε σταθμού ώστε όλοι να έχουν κοινή αφετηρία



(τη μονάδα) και με τη διαδικασία αυτή δεν αλλάζει η αρχική κλίση του κλιμακογράμματος. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στον Πίνακα 5.3 όπως επίσης και το νέο κλιμακόγραμμα που προέκυψε από την παραπάνω διαδικασία στο Σχήμα 5.3.

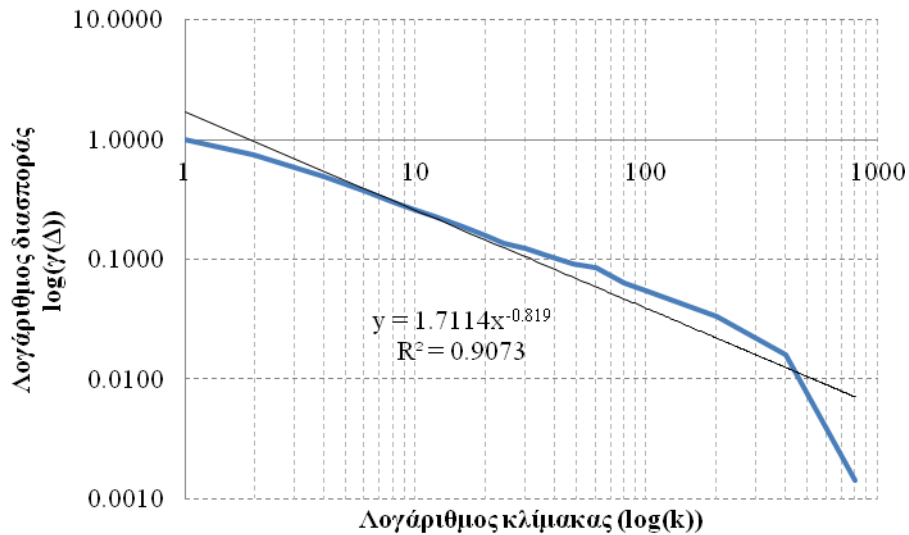
Πίνακας 5.3: Υπολογισμός των τιμών του κλιμακογράμματος από την εξαγωγή της δειγματικής τιμής της διασποράς από τα δεδομένα των 10 σταθμών υπολογισμού και διαιρεμένες οι διασπορές του κάθε σταθμού με την αρχική διασπορά  $\gamma_0$ .

	Alex.	Her.	Lam	Mil	Soud.	Lar	Meth	Rod	Ell	Zak
κλίμακα (ημέρα)	Var	Var	Var	Var	Var	Var	Var	Var	Var	Var
1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2	0.75	0.73	0.65	0.78	0.74	0.68	0.73	0.74	0.74	0.67
4	0.50	0.48	0.41	0.54	0.49	0.44	0.49	0.48	0.49	0.43
6	0.38	0.36	0.30	0.41	0.38	0.33	0.40	0.35	0.37	0.32
8	0.30	0.29	0.24	0.34	0.32	0.29	0.34	0.30	0.31	0.27
10	0.26	0.25	0.22	0.29	0.28	0.24	0.30	0.26	0.26	0.27
12	0.23	0.22	0.19	0.25	0.25	0.23	0.27	0.23	0.23	0.22
16	0.19	0.17	0.15	0.21	0.22	0.21	0.23	0.19	0.20	0.20
20	0.16	0.15	0.14	0.18	0.19	0.19	0.20	0.16	0.17	0.22
24	0.14	0.13	0.12	0.15	0.17	0.18	0.19	0.15	0.15	0.18
30	0.12	0.11	0.11	0.13	0.15	0.16	0.18	0.13	0.13	0.16
36	0.11	0.10	0.09	0.12	0.14	0.15	0.16	0.12	0.11	0.16
48	0.09	0.08	0.08	0.10	0.12	0.12	0.14	0.10	0.09	0.16
60	0.09	0.08	0.08	0.09	0.11	0.13	0.13	0.10	0.08	0.10
80	0.06	0.06	0.07	0.07	0.09	0.10	0.12	0.08	0.07	0.09
100	0.06	0.06	0.06	0.06	0.09	0.08	0.11	0.08	0.06	0.08
200	0.03	0.05	0.04	0.05	0.08	0.04	0.08	0.06	0.03	
400	0.02	0.04	0.02	0.03	0.07		0.04	0.05	0.02	
800	0.00	0.01			0.06		0.03	0.04	0.02	
1600		0.02								



Σχήμα 5.3: Κλιμακόγραμμα στο οποίο απεικονίζονται οι τιμές της διασποράς ( $m^2/s^2$ ) συναρτήσει της χρονικής κλίμακας (ημέρα) για τους 10 σταθμούς της επεξεργασίας σε λογαριθμικούς άξονες και διαιρεμένα με την αρχική διασπορά  $\gamma_0$ .

Από το Σχήμα 5.3, είναι εμφανής η ταυτόχρονη κλίση για τις πρώτες χρονικές κλίμακες των διασπορών, όλων των σταθμών και στις επόμενες χρονικές κλίμακες, οι κλίσεις αποκλίνουν ελαφρά. Από την κλίση του κλιμακογράμματος, μπορούμε να υπολογίσουμε το συντελεστή Hurst στα αρχικά δεδομένα. Ο υπολογισμός αυτός προκύπτει από την τάση του κάθε κλιμακογράμματος, που είναι δυναμικής μορφής (power type) από τον οποίο μπορούμε να υπολογίσουμε το συντελεστή Hurst. Ο υπολογισμός του συντελεστή, εξαρτάται με ποια παράμετρο υπολογίζουμε το κλιμακόγραμμα και συγκεκριμένα εάν χρησιμοποιούμε την τυπική απόκλιση ή τη διασπορά. Στη συγκεκριμένη περίπτωση έχει χρησιμοποιηθεί η διασπορά και ο συντελεστής Hurst προκύπτει από τον παρακάτω τύπο: Εκθέτης (power type) (κλίση κλιμακογράμματος) =  $2(H-1)$  και με αναλυτική διαδικασία από το Σχήμα 5.3 μπορεί να υπολογιστεί ο συντελεστής Hurst. Παρακάτω παρατίθεται το Σχήμα 5.4 για τον υπολογισμό του σταθμού της Αλεξανδρούπολης και στο αντίστοιχο παράρτημα Γ6 οι υπόλοιποι σταθμοί επεξεργασίας.

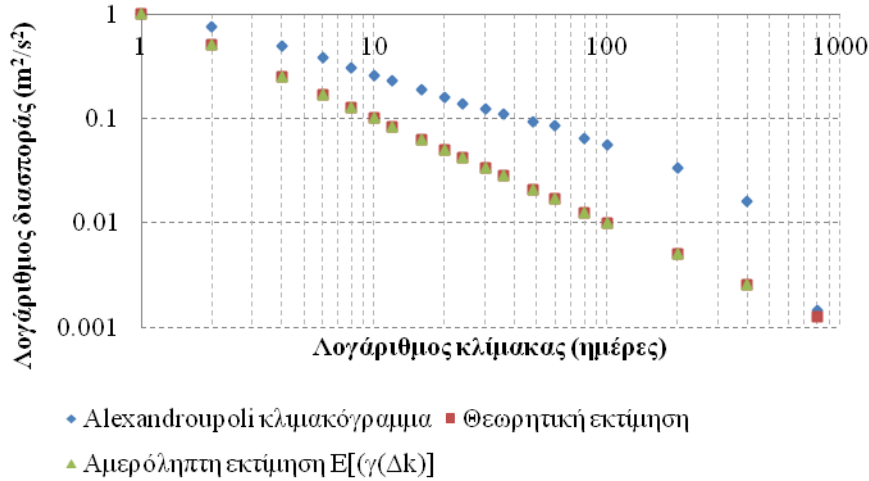


Σχήμα 5.4: Κλιμακόγραμμα για το σταθμό της Αλεξανδρούπολης (power type) από την κλίση του οποίου προκύπτει ο συντελεστής Hurst.

Από το Σχήμα 5.4 για τον σταθμό της Αλεξανδρούπολης η κλίση του διαγράμματος προκύπτει ίση με τον εκθέτη της τάσης και είναι ίσος με  $-0.819$ . Αν εφαρμόσουμε τον παραπάνω αναλυτικό τύπο προκύπτει ο συντελεστή Hurst =  $0.5905$ . Στο σταθμό αυτό φαίνεται να υπάρχει κάποια εμμονή όσον αφορά την ταχύτητα του ανέμου, αλλά επειδή ο συντελεστής ( $H$ ) είναι αρκετά κοντά στο  $0.5$  μάλλον είναι σχετικά μικρή. Για τη μοντελοποίηση ακολουθείται η διαδικασία που περιγράφεται στο ανωτέρω υποκεφάλαιο η οποία βασίζεται στην εργασία (Koutsoyiannis, *Encolpion of stochastics Funtamental of stochastic processes* 2003). Από την παραπάνω διαδικασία, καθίσταται σαφές και αποδεικνύεται ότι η πιο αμερόληπτη εκτιμήτρια για τον υπολογισμό των παραμέτρων μιας στοχαστικής ανέλιξης, αποτελεί το κλιμακόγραμμα. Επομένως, με τη βοήθεια του solver σε περιβάλλον excel, γίνεται προσπάθεια προσαρμογής της εκτιμήτριας της διασποράς, με τη δειγματική διασπορά που προκύπτει από τις παρατηρημένες τιμές της ταχύτητας του ανέμου και τη σχεδίαση του κλιμακογράμματος. Παρακάτω, στον Πίνακα 5.4 παρατίθεται η ακριβής ακολουθούμενη διαδικασία προσαρμογής στη δειγματική διασπορά και επίσης εξάγονται τα αντίστοιχα διαγράμματα, τα οποία φανερώνουν την προσαρμογή της εκτιμήτριας του μοντέλου στις τιμές της δειγματικής εκτιμήτριας.

Πίνακας 5.4: Διαδικασία στοχαστικής μοντελοποίησης της ταχύτητας του ανέμου από τη δειγματική διασπορά των δεδομένων (κλιμακόγραμμα) και την προσαρμογή σε αυτά της εκτιμήτριας της διασποράς για το σταθμό της Αλεξανδρούπολης.

$\Delta k$	$\gamma(\Delta k)$	$E[\gamma(\Delta k)]$	data ( $\gamma(\Delta)$ )	Average( $\gamma(\Delta)$ )	Observation [ $\gamma(\Delta)$ - aver( $\gamma(\Delta)$ )] <sup>2</sup>	Model [ $\gamma(\Delta)$ ( $\Delta$ )model] <sup>2</sup>
a	b				(Obs Model)/obs	Hurst
<b>1.000</b>	<b>1.000</b>				<b>0.745651491</b>	<b>0.5</b>
1	1.0000	1.0000	0.99941	0.2360	0.5827	0.0000
2	0.5000	0.5000	0.74694		0.2610	0.0610
4	0.2500	0.2500	0.49555		0.0673	0.0603
6	0.1667	0.1667	0.38093		0.0210	0.0459
8	0.1250	0.1250	0.3018		0.0043	0.0313
10	0.1000	0.1000	0.25889		0.0005	0.0252
12	0.0833	0.0833	0.23144		0.0000	0.0219
16	0.0625	0.0625	0.18891		0.0022	0.0160
20	0.0500	0.0500	0.15877		0.0060	0.0118
24	0.0417	0.0417	0.13862		0.0095	0.0094
30	0.0333	0.0333	0.123		0.0128	0.0080
36	0.0278	0.0278	0.11104		0.0156	0.0069
48	0.0208	0.0208	0.09212		0.0207	0.0051
60	0.0167	0.0167	0.08581		0.0226	0.0048
80	0.0125	0.0125	0.06471		0.0294	0.0027
100	0.0100	0.0100	0.05571		0.0325	0.0021
200	0.0050	0.0050	0.03367		0.0410	0.0008
400	0.0025	0.0025	0.01618		0.0483	0.0002
800	0.0013		0.00143		0.0550	
					1.232528469	0.313491779



Σχήμα 5.5: Κλιμακόγραμμα στο οποίο ανγράφονται οι τιμές της δειγματικής διασποράς και της εκτιμήτριας της διασποράς. Η μεταξύ τους απόσταση δείχνει ότι δεν υπάρχει καλή προσαρμογή στα δεδομένα.

Από το Σχήμα 5.4 εκτιμάται ότι οι τιμές της διασποράς ακολουθούν μια τάση που δίνεται από το τύπο:  $y = 1.7104x^{-0.819}$  (με μια προσαρμογή  $R^2 = 0.9073$ ). Γενικότερα, η μορφή της συνάρτησης αυτής μπορεί να γραφτεί με το γενικότερο τύπο:  $y = ax^{-b}$  και αποτελεί εξίσωση της μορφής power type. Οι παράμετροι  $a$ ,  $b$  της παραπάνω συνάρτησης είναι αυτές που θα αλλάζουν για τον υπολογισμό και την προσαρμογή των διασπορών στις δειγματικές και οι αρχικές τιμές τίθενται αυθαίρετα ίσες με τη μονάδα. Το  $k$  αποτελεί την κλίμακα υπολογισμού που κάθε φορά πολλαπλασιάζεται με ένα ακέραιο  $\Delta$  (που στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι μονάδα) που σκοπό έχει τη συνάθροιση της χρονικής κλίμακας. Η στήλη  $\gamma(\Delta k)$  αποτελείται από διασπορές, που έχουν υπολογιστεί με το γενικότερο τύπο υπολογισμού, όπως προαναφέρθηκε. Η στήλη  $E[\underline{\hat{\gamma}}(\Delta k)]$ , αποτελεί τον υπολογισμό της εκτιμήτριας της διασποράς από τα δεδομένα και δίνεται από τον τύπο που αναφέρθηκε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο:

$$E[\underline{\hat{\gamma}}(\Delta)] = \eta(\Delta T)\gamma(\Delta) \quad (5.32)$$

όπου ο διορθωτικός συντελεστής της μεροληψίας ( $\eta(\Delta T)$ ) δίνεται:

$$\eta(\Delta T) = \frac{1 - \gamma(T)/\gamma(\Delta)}{1 - \Delta/T} = \frac{1 - \left(\frac{\Delta}{T}\right)^2 \Gamma(T)/\Gamma(\Delta)}{1 - \Delta/T} \quad (5.33)$$

Η στήλη των δεδομένων, αποτελεί τις τιμές των διασπορών για το συγκεκριμένο σταθμό της Αλεξανδρούπολης από τα παρατηρημένα δεδομένα σε ημερήσια χρονική κλίμακα, χωρίς όμως οι τιμές να διαιρεθούν με τη διασπορά στην κλίμακα μηδέν  $\gamma_0$ . Αυτό συμβαίνει γιατί οι τιμές της διασποράς στη κλίμακα αυτή πρέπει να είναι οι πραγματικές για την αμεροληψία του μοντέλου. Οι υπόλοιπες στήλες αναγράφονται για τον υπολογισμό του δείκτη Sutcliff - Nash:

$$E = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (X_0^t - X_0^t)^2}{\sum_{t=1}^T (X_0^t - \bar{X}_0)^2} \quad (5.34)$$

ο οποίος έχει εφαρμογή κυρίως για υδρολογικές μεταβλητές και φανερώνει την καταλληλότητα ή όχι ενός μοντέλου από το πόσο η προαναφερθείσα σχέση προσεγγίζει τη μονάδα. Μια άλλη έκφραση θα μπορούσε να δοθεί από τον τύπο:  $(X_m - X_{obs}) / X_m$  που και πάλι φανερώνεται το κατά πόσο οι τιμές του μοντέλου προσεγγίζουν τις πραγματικές

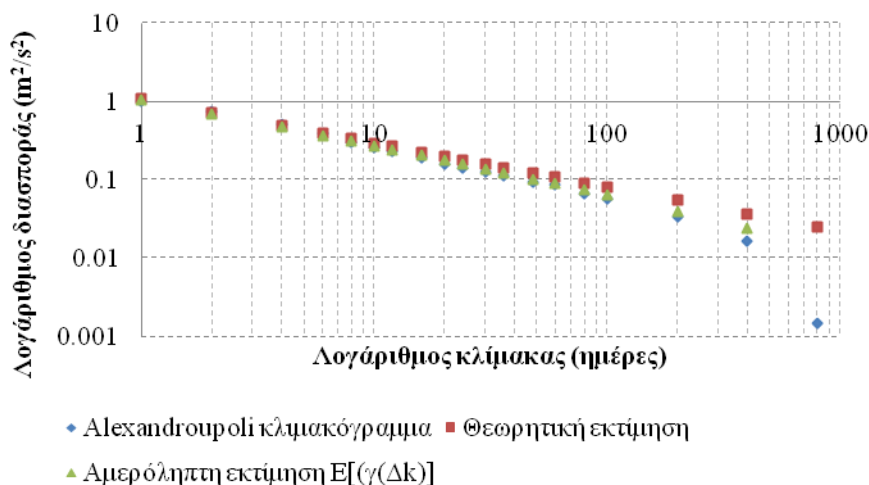
παρατηρημένες με τη μοναδιαία προσέγγιση. Ο Πίνακας 5.4, λύνεται σε περιβάλλον excel με τη βοήθεια του επιλυτή (solver) του συστήματος και με αρχικές τιμές για τις παραμέτρους που θα αλλάξουν τα a και b. Ουσιαστικά η μορφή της παραπάνω συνάρτησης παίρνει πιο συγκεκριμένη μορφή και είναι:

$$y = \gamma_0 x^{-(2H-2)} \quad (5.35)$$

και σκοπός είναι η εύρεση των παραμέτρων για κάθε σταθμό ( $a = \gamma_0$  και  $b = 2(H-1)$ ) και η πραγματοποίηση μιας γενικευμένης μορφής του τύπου για τον υπολογισμό της διασποράς αλλά και γενικότερα η εξαγωγή μοντέλου για τον υπολογισμό της ταχύτητας του ανέμου από τα κλιμακογράμματα των σταθμών, αλλά και με τη βοήθεια της προσαρμοσμένης κατανομής στο παρατηρημένο δείγμα των δεδομένων. Μετά τη διαδικασία αυτή ο Πίνακας 5.4, τροποποιείται όπως παρακάτω Πίνακας 5.5, με τις εκτιμήσεις των a, b αλλά και του δείκτη Sutcliffe - Nash και του συντελεστή Hurst.

Πίνακας 5.5: Τιμές των παραμέτρων a, b Sutcliffe - Nash και ο συντελεστή Hurst.

$\Delta k$	$\gamma(\Delta k)$	$E[\gamma(\Delta k)]$	data ( $\gamma(\Delta)$ )	Average( $\gamma(\Delta)$ )	Observation [ $\gamma(\Delta)$ - aver( $\gamma(\Delta)$ )] <sup>2</sup>	Model [ $\gamma(\Delta)$ - ( $\Delta$ )model] <sup>2</sup>
a	b				(Obs - Model)/obs	Hurst
<b>1.059</b>	<b>0.564</b>				<b>0.994297214</b>	<b>0.718161817</b>
1	1.0593	1.0362	0.99941	0.2360	0.5827	0.0014
2	0.7167	0.6940	0.74694		0.2610	0.0028
4	0.4849	0.4628	0.49555		0.0673	0.0011
6	0.3858	0.3641	0.38093		0.0210	0.0003
8	0.3281	0.3067	0.3018		0.0043	0.0000
10	0.2893	0.2682	0.25889		0.0005	0.0001
12	0.2611	0.2402	0.23144		0.0000	0.0001
16	0.2220	0.2015	0.18891		0.0022	0.0002
20	0.1957	0.1757	0.15877		0.0060	0.0003
24	0.1766	0.1569	0.13862		0.0095	0.0003
30	0.1557	0.1364	0.123		0.0128	0.0002
36	0.1405	0.1215	0.11104		0.0156	0.0001
48	0.1195	0.1011	0.09212		0.0207	0.0001
60	0.1054	0.0875	0.08581		0.0226	0.0000
80	0.0896	0.0724	0.06471		0.0294	0.0001
100	0.0790	0.0623	0.05571		0.0325	0.0000
200	0.0535	0.0386	0.03367		0.0410	0.0000
400	0.0362	0.0234	0.01618		0.0483	0.0001
800	0.0245		0.00143		0.0550	
					1.232528469	0.007028846

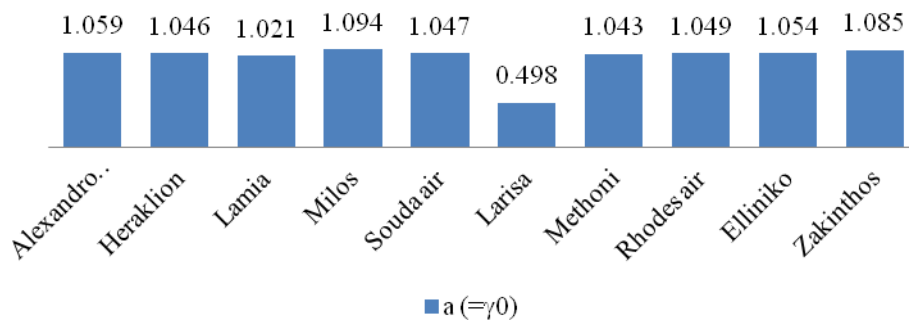


Σχήμα 5.6: Κλιμακόγραμμα στο οποίο είναι εμφανής η προσαρμογή των δειγματικών τιμών της διασποράς με αυτές της εκτιμήτριας.

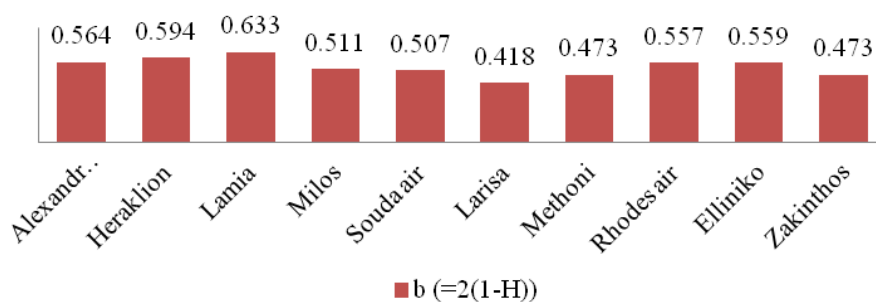
Από το Σχήμα 5.6 και μετά την πραγματοποίηση της προσαρμογής της εκτιμήτριας της διασποράς στη δειγματική διασπορά, είναι εμφανής η καλή προσαρμογή των δεδομένων στο μοντέλο που φανερώνεται και από την υψηλή τιμή του δείκτη Sutcliffe - Nash, ο οποίος παίρνει την τιμή  $E = 0.9942963$ . Όσο πιο κοντά στη μονάδα είναι ο δείκτης αυτός, σημαίνει τόσο καλύτερη προσαρμογή των δεδομένων στο μοντέλο. Από την επεξεργασία και των υπόλοιπων σταθμών έχουν εκπονηθεί συγκεκριμένοι χάρτες 5.2-5.5 που απεικονίζουν τη χωρική κατανομή των τιμών των υπολογισμένων παραμέτρων στον Ελλαδικό χώρο και συγκεκριμένα οι χάρτες αφορούν τις εκτιμήσεις των  $a$ ,  $b$ ,  $H$  και  $E$ . Οι χάρτες πραγματοποιούνται για την οπτικοποίηση των τιμών τους στην ευρύτερη έκταση του Ελλαδικού χώρου, με σκοπό την γενίκευση ενός μοντέλου υπολογισμού της ταχύτητας του ανέμου που να αφορά όλη την έκταση της Ελλάδος, από την επεξεργασία των 10 συγκεκριμένων σταθμών, που είναι διάσπαρτοι σε όλη την έκταση. Οι χάρτες 5.2-5.5, παρουσιάζουν τα αποτελέσματα της διαδικασίας και τα σχήματα 5.6-5.10 αποτυπώνουν τα αποτελέσματα, από την προσαρμογή των τιμών των παραμέτρων σε κάθε σταθμό επεξεργασίας. Επιπρόσθετα, τα υπόλοιπα αποτελέσματα από την διαδικασία παρατίθενται στο αντίστοιχο παράρτημα Γ8.1 - Γ8.9.

Πίνακας 5.6: Τιμές των υπολογιζόμενων παραμέτρων από την προσαρμογή της εκτιμήτριας στα δεδομένα.

Σταθμοί	$a (= \gamma_0)$	$b (= 2(1-H))$	Hurst	Προσαρμογή μοντέλου
Alexandroupoli	1.059	0.564	0.718	0.994
Heraklion	1.046	0.594	0.703	0.994
Lamia	1.021	0.633	0.684	0.998
Milos	1.094	0.511	0.744	0.991
Souda air	1.047	0.507	0.746	0.995
Larisa	0.498	0.418	0.791	0.985
Methoni	1.043	0.473	0.764	0.996
Rhodes air	1.049	0.557	0.721	0.998
Elliniko	1.054	0.559	0.721	0.996
Zakinthos	1.085	0.473	0.763	0.982



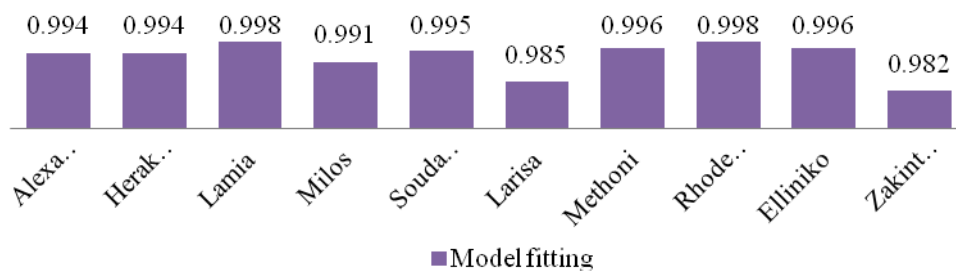
Σχήμα 5.7: Ραβδόγραμμα που αποτυπώνεται η παράμετρος υπολογισμού του μοντέλου  $a(=\gamma_0)$  από την επεξεργασία των 10 σταθμών στον Ελλαδικό χώρο.



Σχήμα 5.8: Ραβδόγραμμα που αποτυπώνεται η παράμετρος υπολογισμού του μοντέλου  $b(=2(1-H))$  από την επεξεργασία των 10 σταθμών στον Ελλαδικό χώρο.

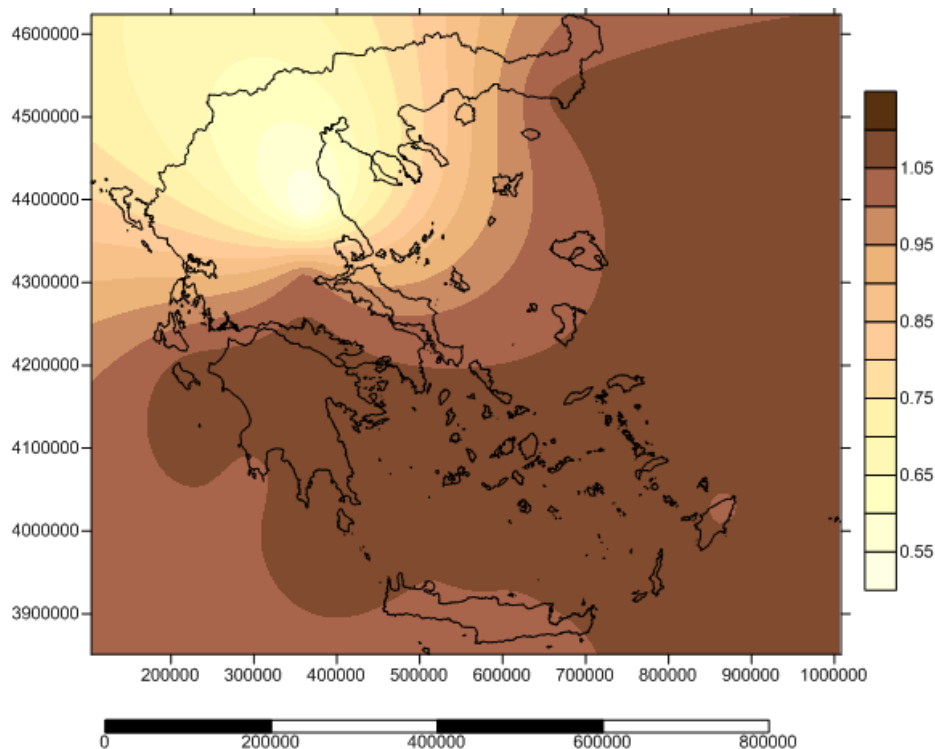


Σχήμα 5.9: Ραβδόγραμμα που αποτυπώνεται ο συντελεστής Hurst από την επεξεργασία των 10 σταθμών στον Ελλαδικό χώρο.



Σχήμα 5.10: Ραβδόγραμμα που αποτυπώνεται ο δείκτης Sutcliffe - Nash από την επεξεργασία των 10 σταθμών στον Ελλαδικό χώρο.





Χάρτης 5.2: Τιμή του συντελεστή ( $a = \gamma_0$ ) από τον υπολογισμό των 10 σταθμών στον Ελλαδικό χώρο.

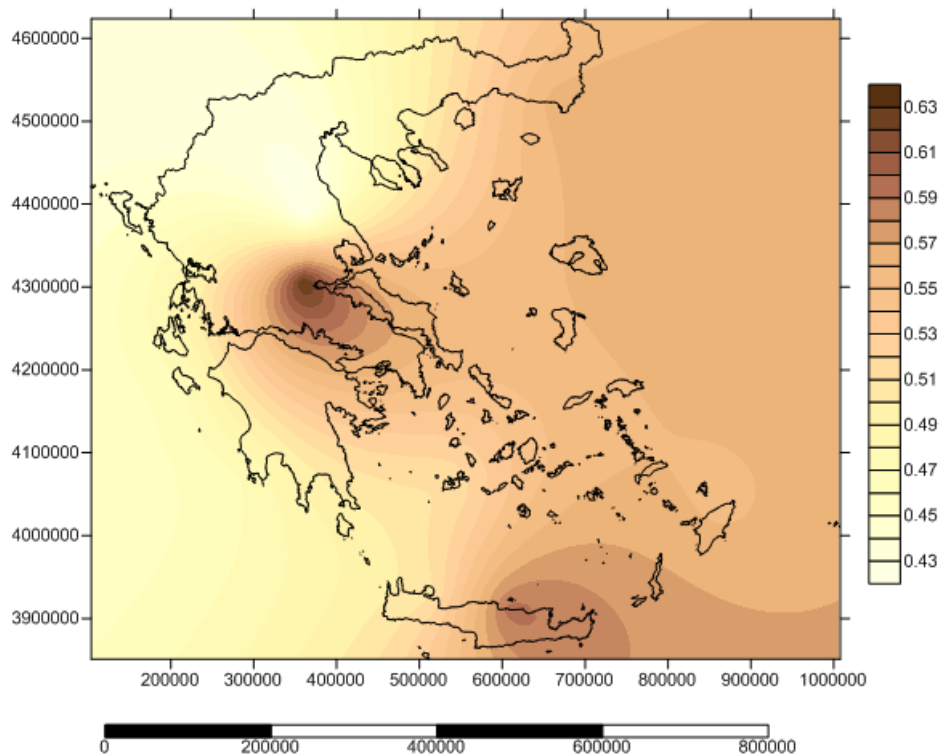
Παρατηρούμε από τον Χάρτη 5.2, ότι το εύρος της παραμέτρου αυτής κυμαίνεται από περίπου 0.2 έως  $3.6 \text{ (m/s)}^2$ , με τις υψηλότερες τιμές να παρουσιάζονται στο κεντρικό Αιγαίο και απομειούμενες να εκτίνονται, ακτινικά σε όλη την υπόλοιπη Ελλάδα. Από το νοητό τόξο που δημιουργείται από βορά - δύση και νότο και συγκεκριμένα από τις περιοχές Μυτιλήνη - Β. Εύβοια, κεντρική Πελοπόννησο και Β. παράλια Κρήτης, οι τιμές απομειώνονται και στην κεντρική, αλλά και στην υπόλοιπη Ελλάδα, οι τιμές είναι ανεπαίσθητα μικρές. Το γεγονός αυτό, πιθανότατα, αιτιολογείται λόγω της υψηλής ταχύτητας του ανέμου των περιοχών του κεντρικού Αιγαίου κατά τη χειμερινή κυρίως, αλλά και την καλοκαιρινή περίοδο, γεγονός που αυξάνει το εύρος των τιμών από τη μέση τιμή και άρα τη διασπορά των περιοχών αυτών. Αντίθετα, στις υπόλοιπες περιοχές, οι τιμές των ταχυτήτων του ανέμου είναι χαμηλές και οι αποκλίσεις των τιμών κατά τη διάρκεια του έτους δεν είναι τόσο μεγάλες.

Στον Χάρτη 5.3, απεικονίζεται η παράμετρος ( $b = 2(H-1)$ ) που αποτελεί έμμεσο μέτρο εκτίμησης του συντελεστή Hurst. Το εύρος της μεταβλητής αυτής κυμαίνεται από 0.36 έως 0.62 και οι τιμές μειώνονται με κατεύθυνση από τα βόρειο ανατολικά (NE) έως τα νοτιοδυτικά (SW) του Ελλαδικού χώρου. Το μικρό εύρος του συντελεστή αυτού φανερώνει μια ενιαία συμπεριφορά της ταχύτητας του ανέμου που μπορεί να χαρακτηριστεί μεταβλητή που συμπεριφέρεται με μακροπρόθεσμη εμμονή αφού το εύρος υπολογισμού του συντελεστή Hurst, από τα όρια των συντελεστών της μεταβλητής  $b$  και από αναλυτική επίλυση της ανωτέρω σχέσης, προκύπτουν ίσα με (0.81 - 0.71) περίπου.

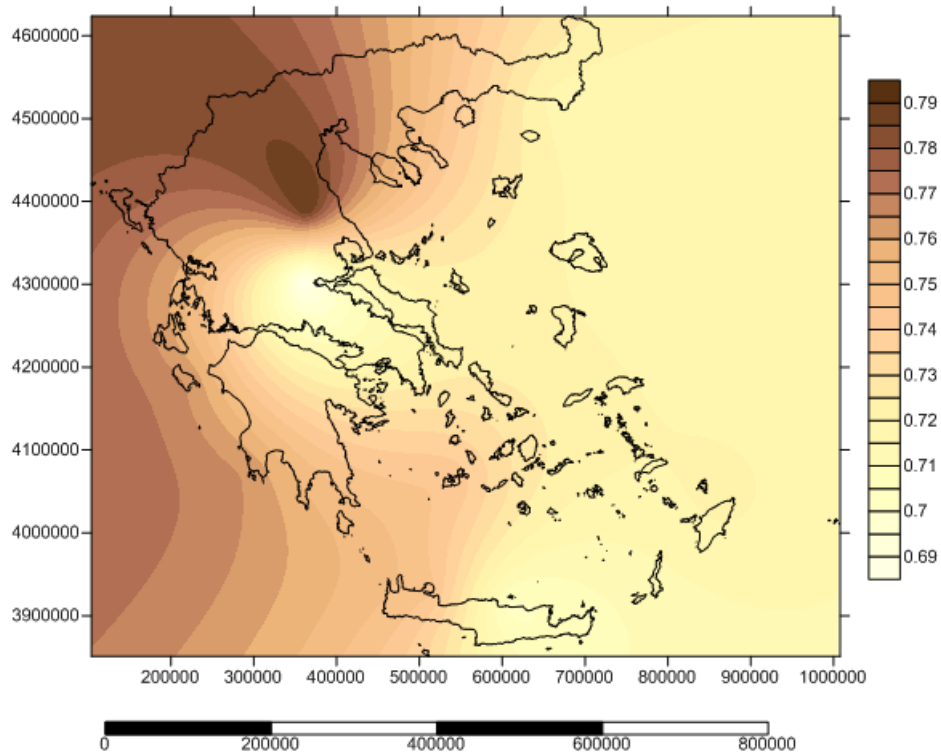
Όπως απεικονίζεται και στο Χάρτη 5.4, οι τιμές του συντελεστή Hurst έχουν όρια από 0.71 έως 0.81 περίπου με τις υψηλότερες τιμές να εμφανίζονται στην δυτική Ελλάδα και απομειούμενες να κατευθύνονται στην ανατολική με ομοιογενή σχεδόν τρόπο. Το γεγονός αυτό, ενδεχομένως να οφείλεται στην παρουσία της οροσειράς της Πίνδου στη δυτική Ελλάδα, που προκαλεί ανομοιομορφία στην ταχύτητα του ανέμου, προκαλώντας στα χαμηλότερα στρώματα ανομοιόμορφη ροή (τυρβώδη) σε μικρή τοπική κλίμακα, η οποία όμως επηρεάζει την ταχύτητα του ανέμου σε μεγαλύτερη κλίμακα. Για αυτό το λόγο και σε

συνδυασμό με το γεγονός ότι ο άνεμος πνέει με κατεύθυνση από τα δυτικά, το μέτωπο συναντά το ανομοιόμορφο γεωμορφολογικά ανάγλυφο της δυτικής ηπειρωτικής Ελλάδας και επηρεάζεται από την τυρβώδη ροή που δημιουργείται στα χαμηλότερα επιδερμικά της επιφάνειας στρώματα, τα οποία όμως μακροσκοπικά επηρεάζουν τη μεγαλύτερη κλίμακα (Lauren, 1999).

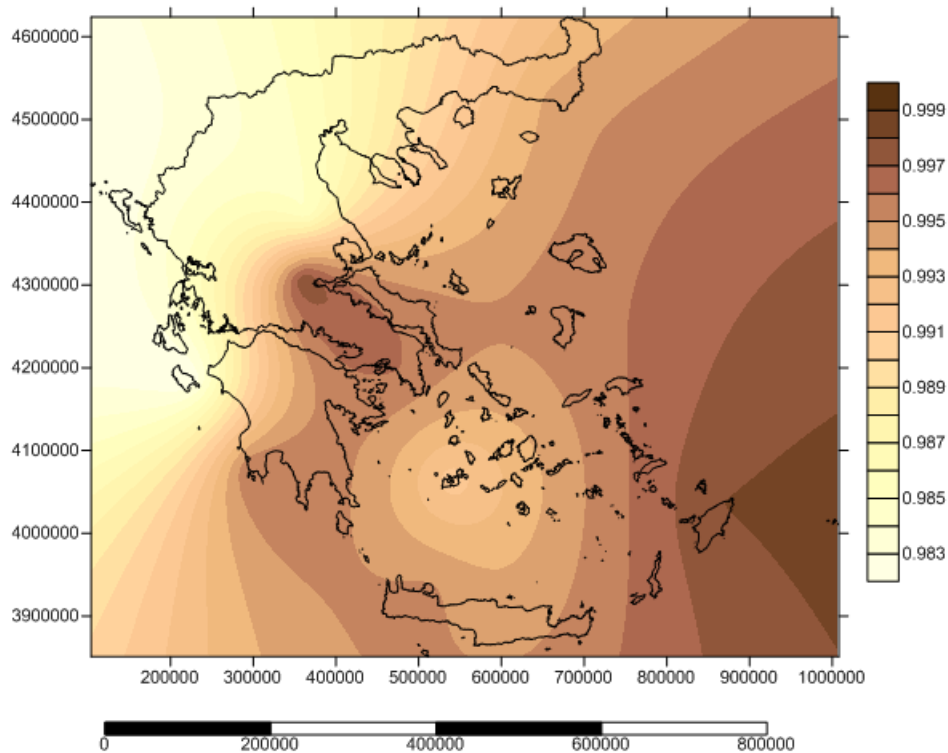
Στον Χάρτη 5.5, αποτυπώνεται ο δείκτης Sutcliff - Nash, ο οποίος όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, φανερώνει την προσαρμογή του μοντέλου στα δεδομένα. Σε όλες τις περιπτώσεις, οι τιμές του δείκτη αυτού κυμαίνονται από 0.983 έως 0.999 που φανερώνει την πολύ καλή προσαρμογή του μοντέλου στα δεδομένα (δείκτης 1 φανερώνει τέλεια προσαρμογή). Οι τιμές του δείκτη μειώνονται, με κατεύθυνση από τα νότιο ανατολικά (SE) με κατεύθυνση ομοιογενή προς τα βόρειο δυτικά (NW). Καλύτερη προσαρμογή παρουσιάζει η νησιωτική κυρίως Ελλάδα, από ότι η ηπειρωτική, γεγονός που μπορεί να αιτιολογηθεί από το μεγαλύτερο ανάπτυγμα του ανέμου στις νησιωτικές και παραθαλάσσιες περιοχές, σε αντίθεση με το έντονο γεωμορφολογικό ανάγλυφο της ηπειρωτικής χώρας και την επιρροή φαινομένων τύρβης και ανομοιομορφίας από τις μικρές σε μεγαλύτερες κλίμακες.



Χάρτης 5.3: Τιμή του συντελεστή ( $b = 2H - 2$ ) από τον υπολογισμό των 10 σταθμών στην Ελλάδα.



Χάρτης 5.4: Συντελεστής Hurst όπως προέκυψε από τον υπολογισμό των 10 σταθμών στην Ελλάδα.

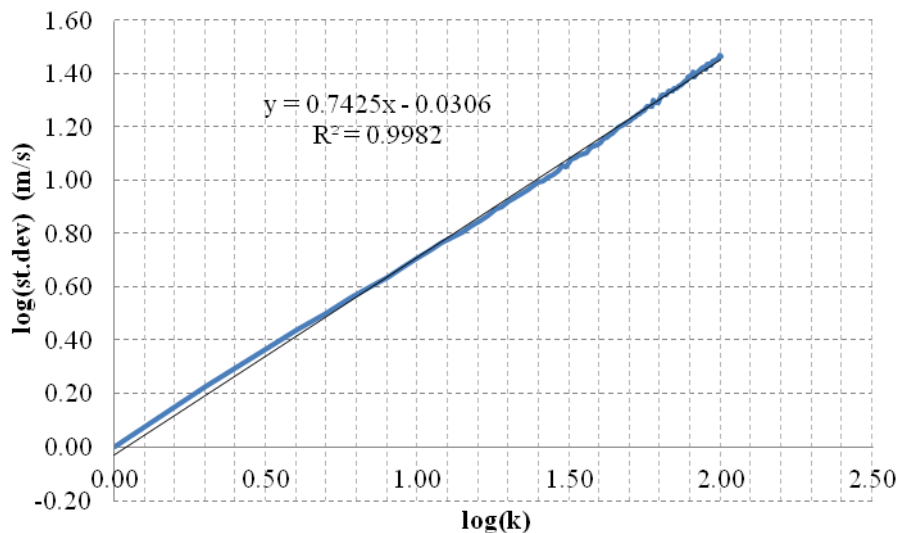


Χάρτης 5.5: Δείκτης Sutcliffe - Nash από την προσαρμογή των δεδομένων των 6 σταθμών στον Ελλαδικό χώρο.

### 5.2.2 Εξαγωγή του συντελεστή Hurst μέσω της τυπικής απόκλισης και του λόγου της τυπικής απόκλισης με της κλίμακα, με λογαριθμικό μετασχηματισμό.

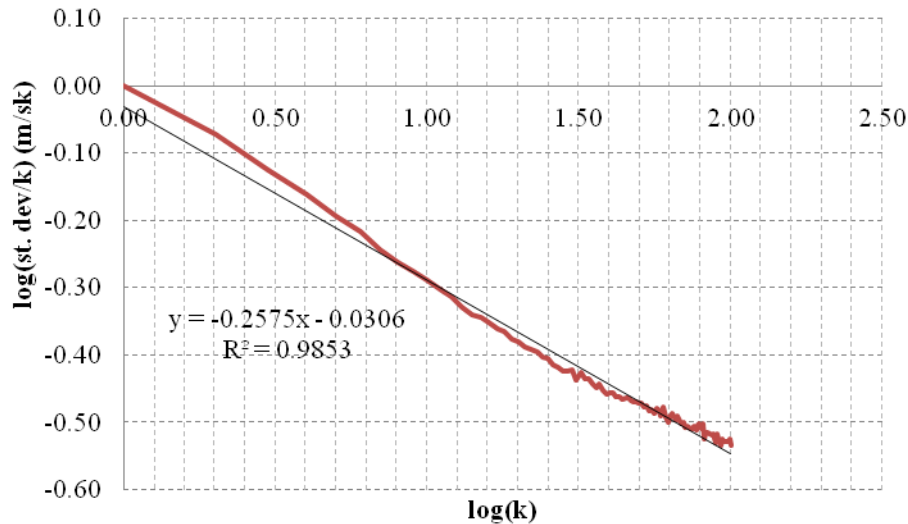
Ένας επιπλέον τρόπος υπολογισμού του συντελεστή Hurst, είναι και μέσω του κλιμακογράμματος, που αποτελεί διάγραμμα με άξονες το λογάριθμο της κλίμακας και το λογάριθμο της τυπικής απόκλισης ή αντίστοιχα το λογάριθμο της τυπικής απόκλισης διαιρεμένο με την κλίμακα. Στην πρώτη περίπτωση, η απευθείας κλίση του κλιμακογράμματος υπολογίζει απευθείας το συντελεστή Hurst, ενώ στη δεύτερη περίπτωση ο υπολογισμός του συντελεστή γίνεται αν από τη μονάδα προσθέσουμε την κλίση του διαγράμματος:  $H = 1 + \text{slope}$ .

Για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας, έγινε με τη μέθοδο αυτή, ο υπολογισμός του συντελεστή Hurst για τους 10 σταθμούς με τους οποίους προσαρμόστηκε το μοντέλο της ταχύτητας του ανέμου και τα αποτελέσματα από την επεξεργασία αυτή συγκεντρώνονται σε ραβδόγραμμα συγκριτικό με τον υπολογισμό του συντελεστή Hurst από την προηγούμενη διαδικασία. Ενδεικτικά παρουσιάζεται το κλιμακόγραμμα για το σταθμό της Αλεξανδρούπολης, Σχήμα 5.11, από την κλίση του οποίου υπολογίζεται απευθείας ο συντελεστής Hurst.



Σχήμα 5.11: Κλιμακόγραμμα για το σταθμό της Αλεξανδρούπολης η απευθείας κλίση του οποίου δίνει το συντελεστή Hurst ( $H = 0.74$ ).

Επιπρόσθετα, παρατίθεται και το διάγραμμα με άξονες το λογάριθμο της κλίμακας και το λογάριθμο του λόγου της τυπικής απόκλισης με την κλίμακα Σχήμα 5.12, την κλίση του οποίου αν προσθέσουμε στη μονάδα παίρνουμε το συντελεστή Hurst.

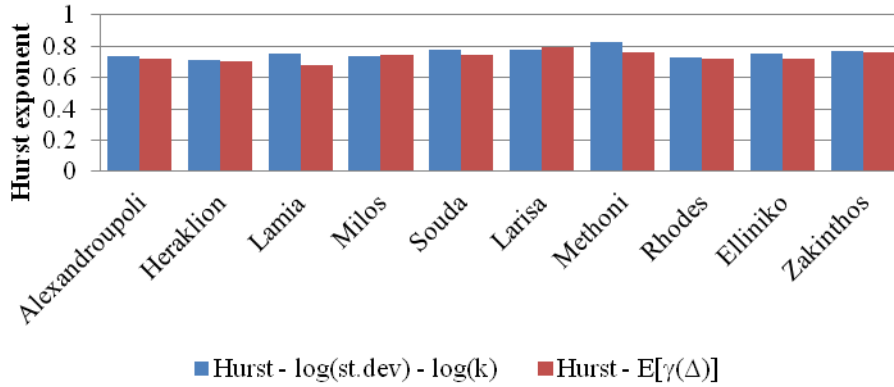


Σχήμα 5.12: Κλιμακόγραμμα για το σταθμό της Αλεξανδρούπολης η κλίση του οποίου αν προστεθεί στη μονάδα υπολογίζει Hurst ( $H = 1 + (-0.26) = 0.74$ ).

Παρακάτω στο Σχήμα 5.13, συγκρίνεται ο συντελεστής Hurst που προκύπτει από τις ανωτέρω αναφερόμενες μεθόδους. Στις δυο αυτές εφαρμογές υπάρχουν σε κάποιους σταθμούς διαφορές όσον αφορά την εξέταση τους μεμονωμένα αλλά στην πραγματικότητα η συμπεριφορά του ανέμου σε όλους αυτούς στους σταθμούς παραμένει σταθερή και ίση με  $H = 0.75$ . Ο μέσος όρος των μετρήσεων από την πρώτη μέθοδο που έχει αναφερθεί προκύπτει ίσος με  $H = 0.74$  ενώ κατά την εφαρμογή της δεύτερης μεθόδου ο μέσος συντελεστής προκύπτει ίσος με  $H = 0.76$ . Επομένως, για την εύρεση μιας ενιαίας έκφρασης για τη συμπεριφορά του ανέμου στον Ελλαδικό χώρο από την εξέταση των ημερήσιων δεδομένων, προκύπτει ο συντελεστής ίσος με το μέσο όρο των μέσων συντελεστών της κάθε μεθόδου και προκύπτει ίσος με  $H = 0.75$  όπως φαίνεται και στον Πίνακα 5.7.

Πίνακας 5.7: Πίνακας στον οποίο αναγράφονται οι τιμές του συντελεστή Hurst υπολογισμένες με τις δυο προαναφερόμενες μεθόδους.

	Hurst (a)	Hurst (b)
Alexandroupoli	0.718	0.74
Heraklion	0.703	0.71
Lamia	0.684	0.75
Milos	0.744	0.74
Souda	0.746	0.78
Larisa	0.791	0.78
Methoni	0.764	0.83
Rhodes	0.721	0.73
Elliniko	0.721	0.75
Zakinthos	0.763	0.77



Σχήμα 5.13: Ραβδόγραμμα στο οποίο απεικονίζεται ο υπολογισμός του συντελεστή Hurst για την κάθε μια αναφερόμενη μέθοδο και για κάθε έναν από τους 10 σταθμούς υπολογισμού του μοντέλου.

### 5.3 Προσαρμογή κατανομών για μηνιαία - ημερήσια χρονική κλίμακα των δεδομένων αλλά και για τα δεδομένα της ριπής.

Γίνεται προσπάθεια εύρεσης των κατανομών που προσαρμόζονται καλύτερα στο δείγμα παρατηρήσεων των σταθμών της μεταβλητής της ταχύτητας του ανέμου, σε ημερήσια και μηνιαία χρονική κλίμακα καθώς επίσης και στα δεδομένα της ριπής. Όπως αποδεικνύεται στη συνέχεια, η κατανομή που προσαρμόζεται καλύτερα στο εμπειρικό δείγμα της ταχύτητας του ανέμου είναι η Weibull, τόσο σε ημερήσια όσο και μηνιαία χρονική κλίμακα και όσον αφορά στο δείγμα των ριπών, η GEV max δείχνει να έχει πολύ καλή προσαρμογή.

#### 5.3.1 Προσαρμογή κατανομών για τα μηνιαία δεδομένα

Από τα μηνιαία δεδομένα και από τα δεδομένα του δείγματος των 66 σταθμών της Ελλάδας που έχουν εξεταστεί η κατανομή που προσαρμόζεται καλύτερα στα δεδομένα είναι η Weibull όπως έχει προαναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο. Στη θεωρία πιθανοτήτων και στη στατιστική η Weibull κατανομή είναι μια συνεχής πιθανοτική κατανομή. Ονομάστηκε με αυτόν τον τρόπο από τον Waloddi Weibull, που ήταν ο πρώτος που την περιέγραψε με λεπτομέρειες το 1951 αν και πρώτος την αναγνώρισε ο (Frechet, 1927) και πρώτη φορά τέθηκε από τους (Rosin *et al.*, 1933) για να περιγραφεί η κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της Weibull τυχαίας μεταβλητής δίνεται από την παρακάτω έκφραση:

$$f(x; \lambda, k) = \left\{ \frac{k}{\lambda} \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k} \quad x \geq 0 \text{ και } 0 < x < 0 \right. \quad (5.36)$$

όπου το  $k > 0$  είναι η παράμετρος σχήματος και το  $\lambda > 0$  είναι η παράμετρος κλίμακας της κατανομής. Η συμπληρωματική συνάρτηση αθροιστικής κατανομής είναι η εκθετική συνάρτηση. Η κατανομή αυτή είναι συνδεδεμένη με πλήθος άλλων πιθανοτικών κατανομών και συγκεκριμένα παρεμβάλλεται ανάμεσα στην εκθετική κατανομή ( $k = 1$ ) και από την κατανομή Rayleigh ( $k = 2$ ). Αν η ποσότητα της μεταβλητής  $x$  είναι χρόνος αποτυχίας της κατανομής η Weibull δίνει μια κατανομή που ο ρυθμός αποτυχίας είναι ανάλογος με μια δύναμη του χρόνου. Η παράμετρος σχήματος σε αυτήν την περίπτωση είναι αυτή η δύναμη συν μια μονάδα και επομένως αυτή η παράμετρος μπορεί να υπολογιστεί απευθείας όπως ακολούθως:

(1) Μια τιμή για το  $k < 1$  σημαίνει ότι το ποσοστό αποτυχίας μειώνεται με το χρόνο. Αυτό συμβαίνει αν υπάρχει σημαντική αποτυχία στα πρώτα στάδια του χρόνου ή από ανίχνευση

στοιχείων που αποτυγχάνουν νωρίς και ο ρυθμός αποτυχίας μειώνεται με το πέρασμα του χρόνου ενώ τα ελαττωματικά στοιχεία αφαιρούν από το δείγμα.

(2) Μια τιμή για  $k = 1$  σημαίνει ότι ο ρυθμός αποτυχίας είναι σταθερός με το χρόνο. Αυτό σημαίνει ότι εξωτερικοί τυχαίοι παράγοντες μπορεί να προκαλούν αυτήν την αποτυχία.

(3) Μια τιμή για  $k > 1$  σημαίνει ότι η αποτυχία αυξάνεται με το χρόνο. Αυτό συμβαίνει εάν υπάρχει μια διαδικασία 'γήρανσης' ή αν υπάρχουν τμήματα που είναι πολύ πιθανό να αποτύχουν με την πάροδο του χρόνου.

Στη επιστήμη των υλικών η παράμετρος  $k$  που εκφράζει τα πλεονεκτήματα των υλικών είναι γνωστή ως 'Weibull modulus'. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής Weibull αλλάζει σημαντικά από τις διαφορετικές τιμές της παραμέτρου  $k$ . Στο διάστημα  $0 < k < 1$  η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας τείνει στο άπειρο ενώ το  $x$  τείνει στο μηδέν (άνω) και σταθερά μειώνεται. Για  $k = 1$  η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας τείνει στο  $1/\lambda$  όσο το  $x$  τείνει στο μηδέν (άνω) και σταθερά μειώνεται. Για  $k > 1$  η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας τείνει στο μηδέν ενώ το  $x$  τείνει στο μηδέν (άνω) αυξάνεται μέχρι τον πιθανότερο μέσο και μειώνεται μετά. Είναι σημαντική παρατήρηση ότι η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας έχει άπειρη αρνητική κλίση στο  $x = 0$  αν  $0 < k < 1$  άπειρη θετική κλίση στο  $x = 0$  αν  $1 < k < 2$  και δεν ορίζεται στο  $x = 0$  για  $k > 2$ . Για  $k = 2$  η σ.π.π. έχει πεπερασμένη θετική κλίση στο  $x = 0$ . Όσο το  $k$  τείνει στο άπειρο η Weibull κατανομή συγκλίνει στην κατανομή Δέλτα του Dirac με κέντρο το σημείο  $x = \lambda$ . Επιπρόσθετα η ασυμμετρία και η διασπορά εξαρτώνται μόνο από την παράμετρο σχήματος. Η αθροιστική συνάρτηση της κατανομής έχει την παρακάτω μορφή:

$$F(x; k, \lambda) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k} \quad \text{για } x \geq 0 \text{ και } F(x; k, \lambda) = 0 \text{ για } x < 0 \quad (5.37)$$

Η παραπάνω μορφή της συνάρτησης της αθροιστικής κατανομής μπορεί, με κατάλληλη επεξεργασία να μας δώσει με γραφικό τρόπο τις παραμέτρους της κατανομής. Από τον παραπάνω τύπο προκύπτει:

$$F(x; k, \lambda) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k} \quad (5.38)$$

ή αλλιώς

$$\hat{F}(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k} \quad (5.39)$$

$$\Rightarrow 1 - \hat{F}(x) = e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \text{Ln}(1 - \hat{F}(x)) = \ln\left(e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k}\right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow -\text{Ln}(1 - \hat{F}(x)) = \left(\frac{x}{\lambda}\right)^k \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \text{Ln}(-\text{Ln}(1 - \hat{F}(x))) = \ln\left(\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k\right) \Rightarrow$$

$$\ln(-\text{Ln}(1 - \hat{F}(x))) = k \ln(x) - k \ln(\lambda) \quad (5.40)$$

Επομένως από την παραπάνω μορφή της ισότητας μπορούμε να γενικεύσουμε την έκφραση της:

$$y = ax + b \text{ με}$$

$$y = \ln(-\text{Ln}(1 - \hat{F}(x)))$$

$$a = k$$

$$x = \ln(x)$$

$$b = -k \ln(\lambda)$$

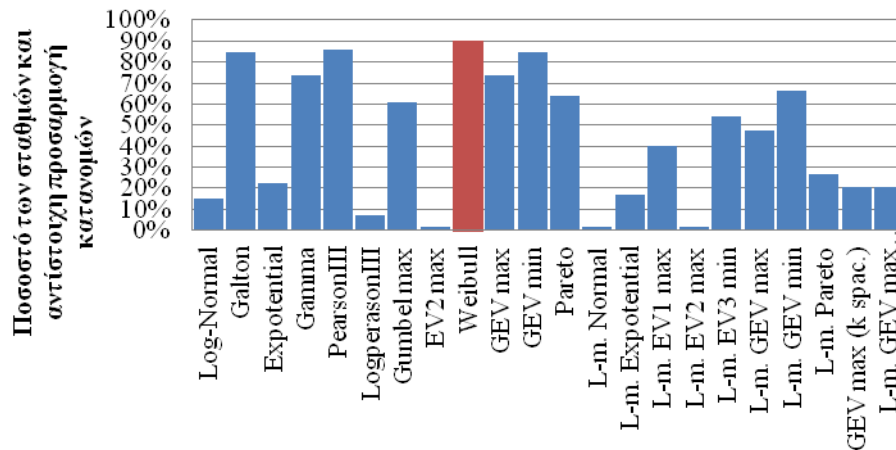
Για τη γραφική επίλυση της παραπάνω ισότητας και την εύρεση των παραμέτρων σχήματος ( $k$ ) και κλίμακας ( $\lambda$ ) αρκεί να απεικονιστούν τα δεδομένα σε γράφημα με άξονες  $\ln(-\ln(1-\hat{F}(x)))$  για τον άξονα των  $x$  και με  $\ln(x)$  για τον άξονα των  $y$ . Το γράφημα των δεδομένων αυτών θα αποτελεί ευθεία στη γραφική απεικόνιση των αξόνων αυτών (λογαριθμικοί) και προσαρμόζουμε (γραμμική παρεμβολή) την ευθεία που αντιστοιχεί στα δεδομένα αυτά. Η κλίση της ευθείας αυτής υπολογίζει απευθείας την παράμετρο σχήματος ( $k = \text{slope}$ ). Για τον υπολογισμό της παραμέτρου κλίμακας αντιστρέφουμε τους άξονες ώστε ( $y = \ln(-\ln(1-\hat{F}(x)))$  και  $x = \ln(x)$ ) υπολογίζουμε το intercept το οποίο θα είναι ίσο με την έκφραση  $-k \ln(\lambda)$  (intercept =  $-k \ln(\lambda)$ ) όπου με αναλυτικό τρόπο επιλύουμε την παραπάνω εξίσωση και βρίσκουμε την παράμετρο κλίμακας  $\lambda$  (ή απευθείας από τη μορφή  $\lambda = e^{(-\frac{\text{intercept}}{k})}$ ). Οι παραπάνω υπολογισμοί γίνονται σε περιβάλλον excel και ο υπολογισμός των παραμέτρων για έναν σταθμό παρατίθεται παρακάτω. Οι εντολές slope και intercept δίνουν απευθείας τον υπολογισμό των συγκεκριμένων αριθμητικών εκφράσεων που πρέπει να υπολογιστούν και οι γραφικές παραστάσεις απεικονίζονται, επίσης, ώστε να οπτικοποιηθεί με σαφέστερο τρόπο η γραφική επίλυση. Για τις ανάγκες της εργασίας, οι παράμετροι  $k$  και  $\lambda$  έχουν υπολογιστεί σε μηνιαία χρονική κλίμακα από το πρόγραμμα Υδρογνώμωνας και έχουν εξαχθεί οι αντίστοιχοι χάρτες χωρικής κατανομής στον Ελλαδικό χώρο, με βάση του 66 σταθμούς υπολογισμού. Στο επόμενο υποκεφάλαιο γίνεται εξαγωγή των παραμέτρων αυτών ( $k$ ,  $\lambda$ ) με την ανωτέρω περιγραφόμενη μέθοδο σε ημερήσια χρονική κλίμακα. (Papoulis, P, 1968).

### 5.3.2 Προσαρμογή κατανομών για τα ημερήσια δεδομένα.

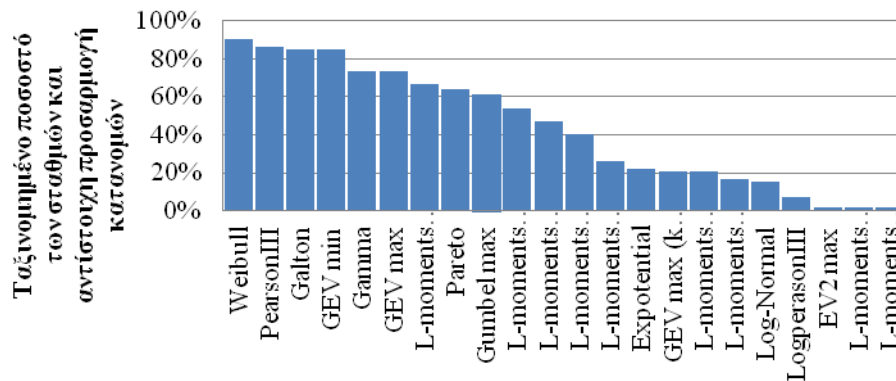
Η προσαρμογή των κατανομών έγινε στο πρόγραμμα Υδρογνώμων, όπου και έγινε η εξαγωγή των παραμέτρων για την επιλεγόμενη κατανομή. Το πρόγραμμα προσαρμόζει όλες τις κατανομές και εξάγει συγκεντρωτικό πίνακα παραμέτρων για την κάθε μία κατανομή σε μηνιαία χρονική κλίμακα αλλά και για το πλήθος των δεδομένων (all data). Για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας επιλέχθηκε ένας σταθμός για την εξαγωγή των παραμέτρων με την ανωτέρω περιγραφόμενη διαδικασία και για να πραγματοποιηθεί σύγκριση με τα εξαγόμενα αποτελέσματα του προγράμματος Υδρογνώμων. Τα στατιστικά test που είναι διαθέσιμα στο εν λόγω πρόγραμμα είναι το Kolmogorov - Smirnov και το test  $\chi^2$ . Όλες οι σειρές σε ημερήσια χρονική κλίμακα που εισήχθησαν στο πρόγραμμα αποτυγχάνουν να περάσουν τα ανωτέρω στατιστικά test σε διάστημα εμπιστοσύνης  $\alpha = 1, 5$  και  $10\%$ . Αυτό δε σημαίνει ότι δεν προσαρμόζεται καμία κατανομή στο δείγμα αλλά μπορεί λόγω έλλειψης δεδομένων, επανάληψης ή δεδομένων που είναι πολύ κοντά αριθμητικά μεταξύ τους, σε συνδυασμό με το πλήθος τους, οδηγούν τις σειρές σε αυτήν την αποτυχία. Για αυτό το λόγο, σε κάθε μία από τις 66 σειρές δεδομένων σε ημερήσια χρονική κλίμακα έγινε η προσαρμογή όλων των διαθέσιμων κατανομών του προγράμματος (που είναι όλες οι 27 πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες στην υδρολογία) και έγινε η επιλογή για κάθε έναν σταθμό αυτών που προσαρμόζονται οπτικά καλύτερα στα δεδομένα. Η επιλογή έγινε σχετικά με το ποιες κατανομές προσαρμόζονται στο συνολικό ή στο μεγαλύτερο μέρος του δείγματος των δεδομένων. Επομένως κάποιες κατανομές προσαρμόζονταν στο σύνολο των δεδομένων, ενώ κάποιες άλλες καλύτερα στις ακραίες τιμές. Το συνηθέστερο από την προσαρμογή αυτή ήταν ότι το πλήθος των κατανομών προσαρμόζονταν καλύτερα στο πλήθος των δεδομένων των χαμηλότερων τιμών, αφήνοντας τις ακραίες τιμές εκτός και κάποιες που προσαρμόζονταν καλύτερα στα ακραία γεγονότα δεν έχουν καλή προσαρμογή για τις χαμηλότερες τιμές. Από



την παραπάνω διαδικασία, προέκυψε η κατανομή που θα μπορούσε να περιγράψει καλύτερα τα δεδομένα του ανέμου σε ημερήσια χρονική κλίμακα.



Σχήμα 5.14: Ραβδόγραμμα με τα ποσοστά των σταθμών σχετικά με το πλήθος των κατανομών που προσαρμόζονται καλύτερα στα αντίστοιχα ημερήσια δείγματα των σταθμών.

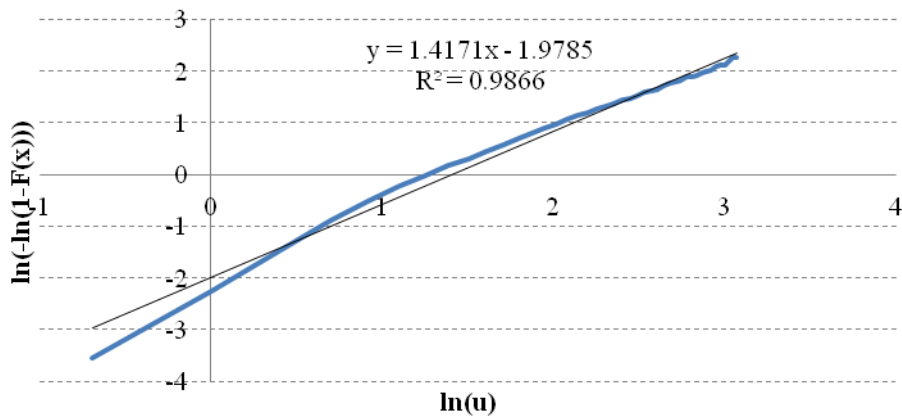


Σχήμα 5.15: Ραβδόγραμμα με τα ποσοστά των σταθμών σχετικά με το πλήθος των κατανομών που προσαρμόζονται καλύτερα στα αντίστοιχα δείγματα των σταθμών από την καλύτερη προσαρμογή στη λιγότερο καλή.

Από τα σχήματα 5.14 και 5.15, και τους πίνακες 5.8 και 5.8, οι κατανομές που θα μπορούσαν να περιγράψουν την ταχύτητα του ανέμου σε ημερήσιο χρονικό βήμα είναι οι Weibull, PearsonIII, Galton και GEV min από τις οποίες η καλύτερη είναι η Weibull. Επομένως, για τον σταθμό της Αλεξανδρούπολης γίνεται η προσαρμογή και η εύρεση των παραμέτρων κλίμακας και σχήματος με τη γραφική μέθοδο που περιγράφηκε στο παραπάνω υποκεφάλαιο.

Αρχικά, γίνεται το ιστόγραμμα των δεδομένων του σταθμού σε περιβάλλον excel, αφού πρώτα χωριστεί το δείγμα σε κλάσεις. Για να γίνει αυτό, εξάγουμε τη μεγαλύτερη και τη μικρότερη τιμή του δείγματος για να βρούμε τα όρια των κλάσεων και επιλέγουμε ένα συγκεκριμένο βήμα (στη συγκεκριμένη περίπτωση επιλέχθηκε βήμα το 0.5 m/s). Στο βήμα αυτό ομαδοποιούνται οι παρατηρήσεις και αριθμητικά (πλήθος τιμών) κατανέμονται σε κάθε κλάση. Από τη διαίρεση του πλήθους των παρατηρήσεων σε κάθε κλάση με το συνολικό πλήθος των παρατηρήσεων προκύπτει η συχνότητα του δείγματος για κάθε κλάση, δηλαδή το πλήθος των παρατηρήσεων που ικανοποιούν τον περιορισμό να ανήκουν στη συγκεκριμένη κλάση. Από τη στήλη των κλάσεων και τη συχνότητα των παρατηρήσεων προκύπτει η εμπειρική συνάρτηση πυκνότητας - πιθανότητας της κατανομής. Για την προσαρμογή της

κατανομής Weibull στο δείγμα αυτό, θα πρέπει αρχικά να βρεθούν οι παράμετροι της κατανομής για το συγκεκριμένο δείγμα. Ακολουθεί επομένως, η γραφική επίλυση που αναφέρθηκε παραπάνω. Κατασκευάζουμε το διάγραμμα με άξονες το λογάριθμο της ταχύτητας για τον άξονα του  $x$  και το λογάριθμο του αρνητικού λογαρίθμου για τη συμπληρωματική αθροιστική εμπειρική συνάρτηση κατανομής στον άξονα των  $y$ . Το αποτέλεσμα παρατίθεται παρακάτω, Σχήμα 5.16.



Σχήμα 5.16: Διάγραμμα με άξονες το λογάριθμο της ταχύτητας για τον άξονα του  $x$  και το λογάριθμο του αρνητικού λογαρίθμου για τη συμπληρωματική αθροιστική εμπειρική συνάρτηση κατανομής στον άξονα των  $y$  που εξάγεται η παράμετρος σχήματος από την κλίση της προσαρμογής της γραμμικής τάσης στα δεδομένα ( $k = \text{slope} = 1.4171$ ).

Από τα ανωτέρω γίνεται κατανοητή η σημασία των μετασχηματισμών στη στατιστική. Στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε ο λογαριθμικός μετασχηματισμός  $Y = \ln X$  και το αποτέλεσμα της προσαρμογής των δεδομένων που αναπαρίστανται σε ευθεία μας δίνει άμεση πληροφορία για τις παραμέτρους υπολογισμού. Εκτίμηση απευθείας της παραμέτρου σχήματος  $k = \text{slope} = 1.4171$  από το διάγραμμα και υπολογισμός του σημείου τομής με τον άξονα των  $y$  το οποίο μου δίνει  $\text{intercept} = -1.9785 = -\ln(\lambda)$  από το οποίο αναλυτικά μπορούμε να υπολογίσουμε την παράμετρο κλίμακας  $\lambda = 4.0394$ .

Από την προσαρμογή των δεδομένων του συγκεκριμένου σταθμού στο πρόγραμμα Υδρογνώμων, οι παράμετροι που υπολογίστηκαν από το σύστημα ήταν  $k = 0.73651$  και  $\lambda = 2.67923$  για τις παραμέτρους σχήματος και κλίμακας αντίστοιχα. Παρατηρούμε, ότι οι τιμές που προκύπτουν από τη γραφική επίλυση είναι διαφορετικές για τον υπολογισμό των παραμέτρων (σχήματος και κλίμακας) της κατανομής Weibull με τη γραφική μέθοδο και με τη μέθοδο μέγιστης πιθανοφάνειας. Επίσης, παρακάτω γίνεται και η εκτίμηση των παραμέτρων μέσω της μεθόδου των Λογαριθμικά Μετασχηματισμένων Ροπών (Logarithmic Transformed Moments, L.T.M.), ο οποίος προκύπτει από αναλυτικό λογαριθμικό μετασχηματισμό  $Y = \ln(x)$  και προκύπτουν αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού οι οποίες δίνουν παρόμοια αποτελέσματα με αυτά της γραφικής μεθόδου. Οι διαφορές όμως σχετικά με τη μέθοδο της μέγιστης πιθανοφάνειας είναι σχετικά μικρές, με τις προαναφερθείσες (γραφική - αναλυτική) να είναι αρκετά αξιόπιστες για την προσαρμογή της κατανομής, ενώ η μέθοδος της μέγιστης πιθανοφάνειας (Maximum Likelihood Estimator - MLE) πραγματοποιεί διαδικασία βελτιστοποίησης με μεγιστοποίηση της λογαριθμικής συνάρτησης κατανομής. Επιπρόσθετα, μια πολύ χρήσιμη διαδικασία για τον υπολογισμό των εν λόγω παραμέτρων, προκύπτει και από τον αναλυτικό υπολογισμό των  $L$  - ροπών (Hoskins, 1990) που αποτελούν ειδικές περιπτώσεις των πιθανοτικά σταθμισμένων ροπών (Greenwood *et al.*, 1979). Ακλουθώντας συγκεκριμένα βήματα από μια διαδικασία με αναλυτικούς υπολογισμούς,

προκύπτουν με απλές αναλυτικές σχέσεις, οι επιθυμητοί παράμετροι με πολύ καλή προσαρμογή στο εμπειρικό δείγμα. Συγκεκριμένα, για τη Weibull κατανομή οι αναλυτικές σχέσεις (Hafzullah *et al.*, 2004) που δίνονται είναι:

$$k = \frac{\ln(2)}{L_2(\ln w)} \quad (5.41)$$

$$c = e^{\left[L_1(\ln w) + \frac{0.5772}{k}\right]} \quad (5.42)$$

με τους παράγοντες  $L_1(\ln w)$  και  $L_2(\ln w)$  να αποτελούν τις  $L_1$  και  $L_2$  ροπές του λογαριθμικού δείγματος οι οποίες με τη σειρά τους δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$L_1 = b_0$  και  $L_2 = 2b_1 - b_0$  όπου τα  $b_1$  και  $b_0$  δίνονται:

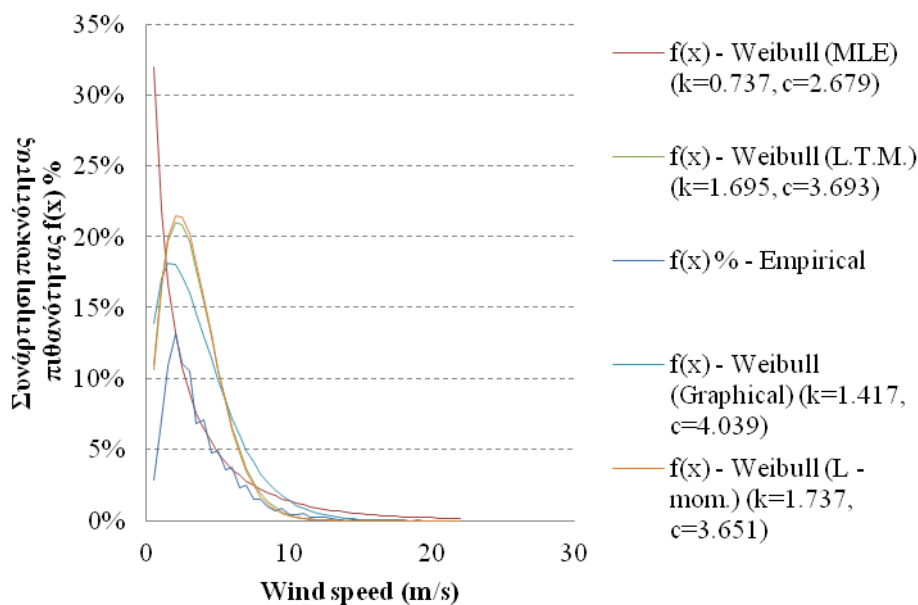
$$b_0 = \bar{x} \quad (5.43)$$

$$b_1 = \sum_{j=1}^{N-1} \frac{N-j}{N(N-1)} x_j \quad (5.44)$$

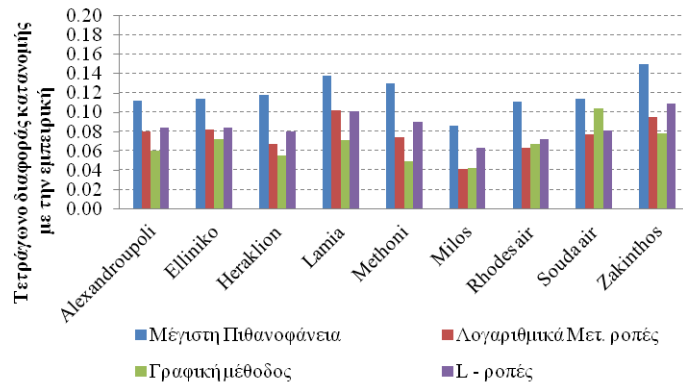
με το  $x_j$  να αποτελεί το φθίνον ταξινομημένο δείγμα των δεδομένων δηλαδή να ισχύει:

$$x_N \leq \dots \leq x_i \leq \dots \leq x_1$$

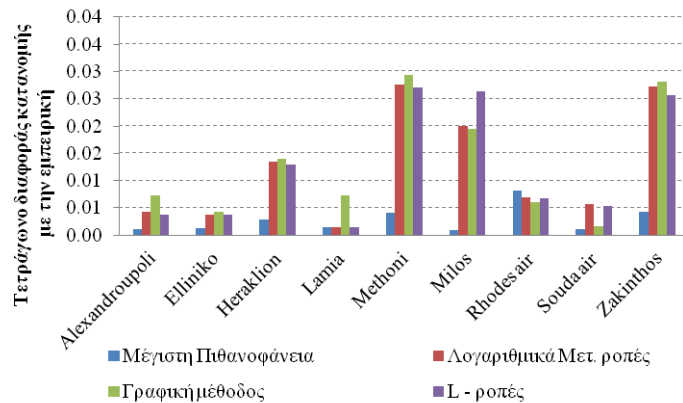
Επομένως, από όλες τις προαναφερθείσες μεθόδους, τα αποτελέσματα που προέκυψαν αποτυπώνονται σε διάγραμμα, Σχήμα 5.17 με την προσαρμογή στην εμπειρική κατανομή του δείγματος του κάθε σταθμού από τους 10 που χρησιμοποιήθηκαν στην επεξεργασία του μοντέλου. Επιπρόσθετα, πραγματοποιήθηκε και ο υπολογισμός του τετραγώνου των διαφορών ανάμεσα στην εμπειρική κατανομή και την κατανομή που προέκυψε από την καθεμία εφαρμοζόμενη μέθοδο και αυτή που έδωσε τα καλύτερα αποτελέσματα ήταν η MLE και η L-ροπές, όπως φαίνεται και στα σχήματα 5.18-5.20.



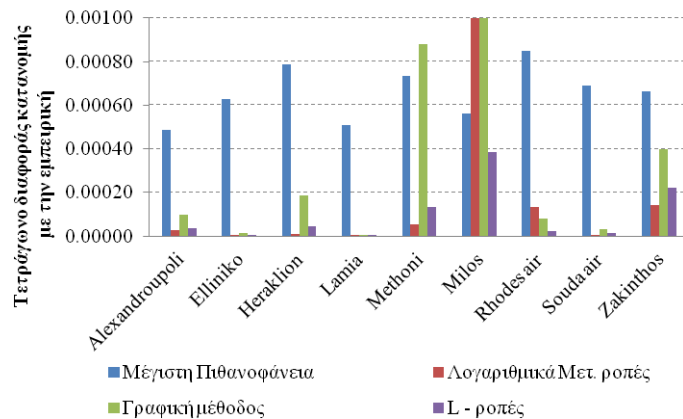
Σχήμα 5.17: Διάγραμμα προσαρμογής της Weibull κατανομής στην εμπειρική του σταθμού της Αλεξανδρούπολης, από το οποίο προκύπτει ότι η MLE μέθοδος εκτίμησης των παραμέτρων της κατανομής προσαρμόζεται καλύτερα στο δείγμα παρατηρήσεων του εν λόγω σταθμού.



Σχήμα 5.18: Ραβδόγραμμα στο οποίο αποτυπώνεται το τετράγωνο της διαφοράς της εμπειρικής κατανομής με την υπολογισμένη από την αντίστοιχη μέθοδο εκτίμησης των παραμέτρων για τον κάθε σταθμό εξέτασης.



Σχήμα 5.19: Ραβδόγραμμα στο οποίο αποτυπώνεται το τετράγωνο της διαφοράς της εμπειρικής κατανομής με την υπολογισμένη από την αντίστοιχη μέθοδο εκτίμησης των παραμέτρων για τον κάθε σταθμό εξέτασης, για ταχύτητα μεγαλύτερη των 5 m/s.



Σχήμα 5.20: Ραβδόγραμμα στο οποίο αποτυπώνεται το τετράγωνο της διαφοράς της εμπειρικής κατανομής με την υπολογισμένη από την αντίστοιχη μέθοδο εκτίμησης των παραμέτρων για τον κάθε σταθμό εξέτασης, για ταχύτητα μεγαλύτερη των 10 m/s.

Η μέθοδος εκτίμησης των παραμέτρων της Weibull κατανομής μέσω του Λογαριθμικού Μετασχηματισμού των Ροπών (L.T.M.), αποτελεί επίσης αριθμητική επίλυση με τη

χρησιμοποίηση του λογαριθμικού μετασχηματισμού που προαναφέρθηκε  $Y = \ln X$ , από την οποία προκύπτει η σχέση (5.45):

$$F_Y(y) = 1 - e^{-e^{k(y-\ln\lambda)}} \quad (5.45)$$

που αποτελεί συνάρτηση κατανομής ελαχίστων τύπου I με παράμετρο θέσης  $\ln\lambda$  και παράμετρο κλίμακας  $k$ . Επομένως, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τις εξισώσεις της τελευταίας, προκειμένου να εκτιμήσουμε τις άγνωστες παραμέτρους από το οποίο προκύπτει ότι:

$$k = \frac{1}{0.78S_Y} \quad (5.46)$$

και

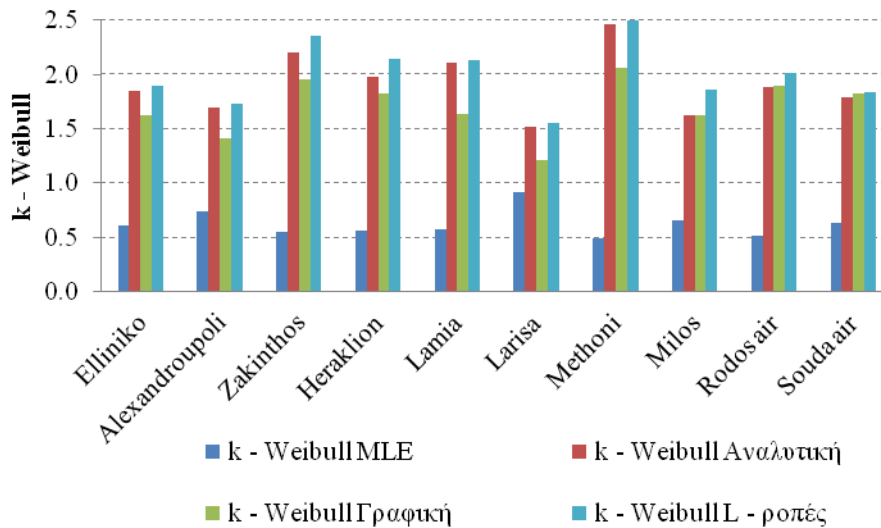
$$\lambda = e^{\hat{y} + 0.45S_Y} \quad (5.47)$$

με τα  $\hat{y}$  και  $S_Y$  να αποτελούν τη δειγματική μέση τιμή και τυπική απόκλιση αντίστοιχα των λογαρίθμων της μεταβλητής (Κουτσογιάννης, *Στατιστική υδρολογία*, 1996).

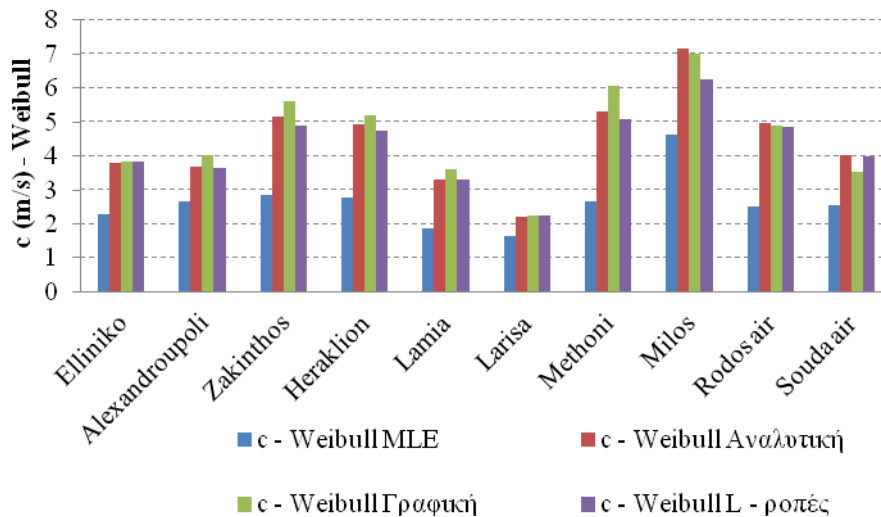
Επομένως, για την προσαρμογή της κατανομής Weibull στα δεδομένα των ταχυτήτων του ανέμου σε ημερήσιο χρονικό βήμα, χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις μέθοδοι εκτίμησης των παραμέτρων της συγκεκριμένης κατανομής: α. με μεγιστοποίηση της λογαριθμικής συνάρτησης πιθανοφάνειας (MLE - Maximum Likelihood Estimator), β. με τη μέθοδο των λογαριθμικά μετασχηματισμένων ροπών ( $Y = \ln(x)$ ), γ. με εκτίμηση των παραμέτρων από τον υπολογισμό των L-ροπών και δ. από τη γραφική επίλυση που παρουσιάστηκε παραπάνω. Από τις εκτιμήσεις, με τις παραπάνω περιγραφόμενες μεθόδους, έγινε η προσαρμογή της κατανομής (Weibull) στο δείγμα των 10 σταθμών που επιλέχθηκαν για τη μοντελοποίηση και προέκυψε ότι η μέθοδος της μέγιστης πιθανοφάνειας έδωσε τα καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά την προσαρμογή στην εμπειρική κατανομή, που αποτελεί το δείγμα των παρατηρημένων τιμών, όπως φαίνεται και από το Σχήμα 5.17. Για τον ανωτέρω λόγο, πραγματοποιήθηκε η ίδια διαδικασία για τις κλάσεις των ταχυτήτων πάνω από 5 m/s (Σχήμα 5.19) και πάνω από 10 m/s (Σχήμα 5.20), με σκοπό να βρεθεί ποιά μέθοδος δίνει καλύτερα αποτελέσματα στις ακραίες τιμές του δείγματος. Η μέθοδος MLE προσαρμόζεται καλύτερα στην ουρά της κατανομής στην πρώτη περίπτωση, ενώ αντίστοιχα οι L-ροπές στη δεύτερη αναφερόμενη περίπτωση. Παρακάτω στον Πίνακα 5.10 και στα σχήματα 5.21 και 5.22 δίνονται τα αποτελέσματα για την προσαρμογή των παραμέτρων σχήματος ( $k$ ) και κλίμακας ( $c$ ) με όλες τις προαναφερθείσες μεθόδους και επίσης στο αντίστοιχο παράρτημα Γ9.1-9.9 παρατίθενται τα διαγράμματα προσαρμογής της κατανομής Weibull στην εμπειρική κατανομή σε όλους τους σταθμούς οι οποίοι επιλέχθηκαν για την προσαρμογή του μοντέλου. Επίσης, στο παράρτημα Γ10.1-10.9 παρατίθενται τα διαγράμματα για τον υπολογισμό των υπολοίπων 9 σταθμών με τη γραφική μέθοδο υπολογισμού.

Πίνακας 5.8: Αποτελέσματα από την εκτίμηση των παραμέτρων της κατανομής Weibull με τις τέσσερις μεθόδους εκτίμησης: α. μέθοδος μέγιστης πιθανοφάνειας (MLE) β. μέθοδος λογαριθμικά μετασχηματισμένων ροπών (LTM) γ. γραφική μέθοδος υπολογισμού και δ. μέθοδος των L - ροπών.

		k - Weibull				c - Weibull			
		MLE	LTM	Grap.	L- m.	MLE	LTM	Grap.	L- m.
1	Elliniko	0.604	1.849	1.626	1.895	2.276	3.813	3.840	3.826
2	Alex/poli	0.737	1.695	1.417	1.737	2.679	3.693	4.039	3.651
3	Zakinthos	0.546	2.201	1.960	2.360	2.846	5.141	5.604	4.897
4	Heraklion	0.558	1.985	1.826	2.143	2.756	4.935	5.195	4.741
5	Lamia	0.578	2.110	1.641	2.128	1.877	3.292	3.617	3.312
6	Larisa	0.922	1.517	1.207	1.554	1.653	2.190	2.229	2.229
7	Methoni	0.494	2.464	2.057	2.687	2.652	5.295	6.078	5.076
8	Milos	0.652	1.629	1.620	1.860	4.624	7.147	7.014	6.270
9	Rodos air	0.509	1.883	1.896	2.012	2.500	4.969	4.881	4.864
10	Souda air	0.636	1.795	1.832	1.838	2.550	4.013	3.514	3.971

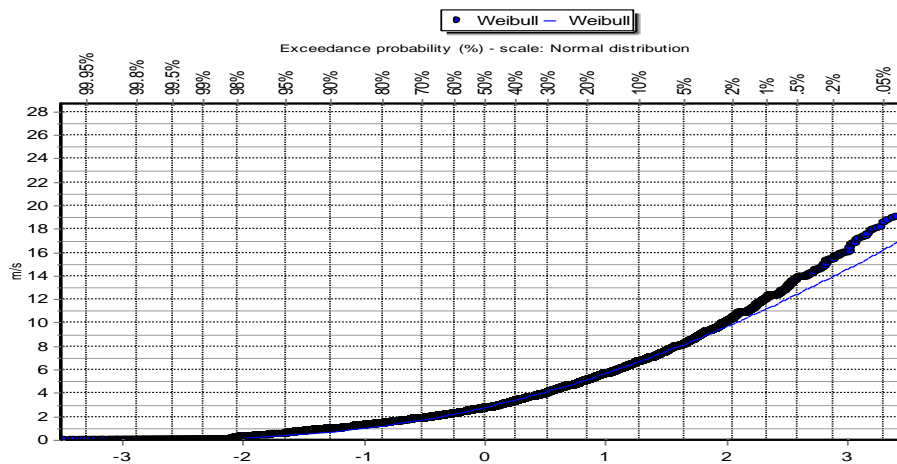


Σχήμα 5.21: Ραβδόγραμμα στο οποίο αποτυπώνεται η εκτίμηση της παραμέτρου σχήματος της κατανομής Weibull με τις τεσσέρις προαναφερθείσες μεθόδους.

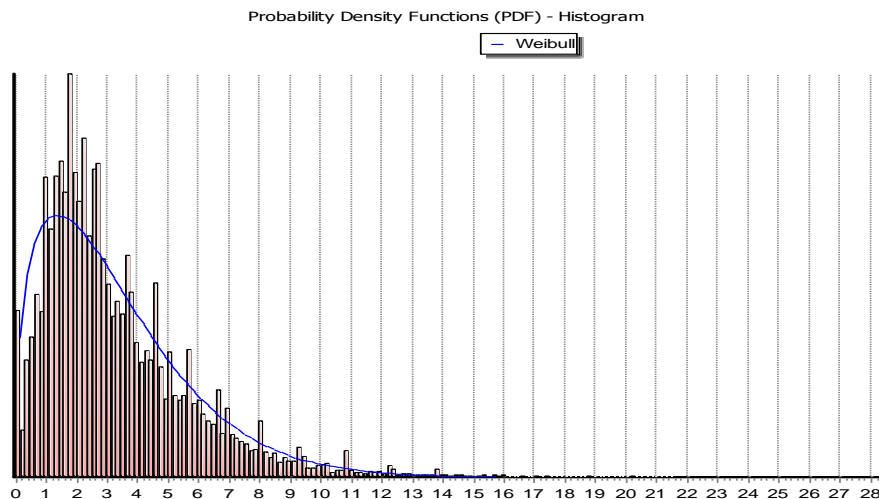


Σχήμα 5.22: Ραβδόγραμμα στο οποίο αποτυπώνεται η εκτίμηση της παραμέτρου κλίμακας της κατανομής Weibull με τις τέσσερις προαναφερθείσες μεθόδους.

Από τις ανωτέρω αναφερόμενες μεθόδους, οι MLE και L-ροπές εξήγαγαν τη μικρότερη τετραγωνική διαφορά με την εμπειρική κατανομή. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με το μικρό πλήθος των εξεταζόμενων σταθμών, συνιστά ότι προτιμότερη μέθοδος εκτίμησης των παραμέτρων της κατανομής αποτελούν οι ανωτέρω αναφερόμενες μέθοδοι για δυο λόγους. Πρώτον, δεν επηρεάζεται το αποτέλεσμα της εκτίμησης των μεθόδων αυτών από ακραίες τιμές του δείγματος (outliers), (ειδικά οι L-ροπές οι οποίες εξαρτώνται μόνο από το ταξινομημένο δείγμα). Δεύτερον, έχουν πολύ καλή προσαρμογή στην δεξιά ουρά της εμπειρικής κατανομής, στις ακραίες δηλαδή τιμές του δείγματος, γεγονός σημαντικό σε έργα μηχανικού. Παρακάτω, παρατίθενται και τα σχήματα 5.23 και 5.24 από το πρόγραμμα Υδρογνώμον που υπολογίζεται η προσαρμογή της κατανομής Weibull στο δείγμα του σταθμού της Αλεξανδρούπολης.



Σχήμα 5.23: Προσαρμογή της κατανομής Weibull στο δείγμα της Αλεξανδρούπολης, από το πρόγραμμα Υδρογνώμον.

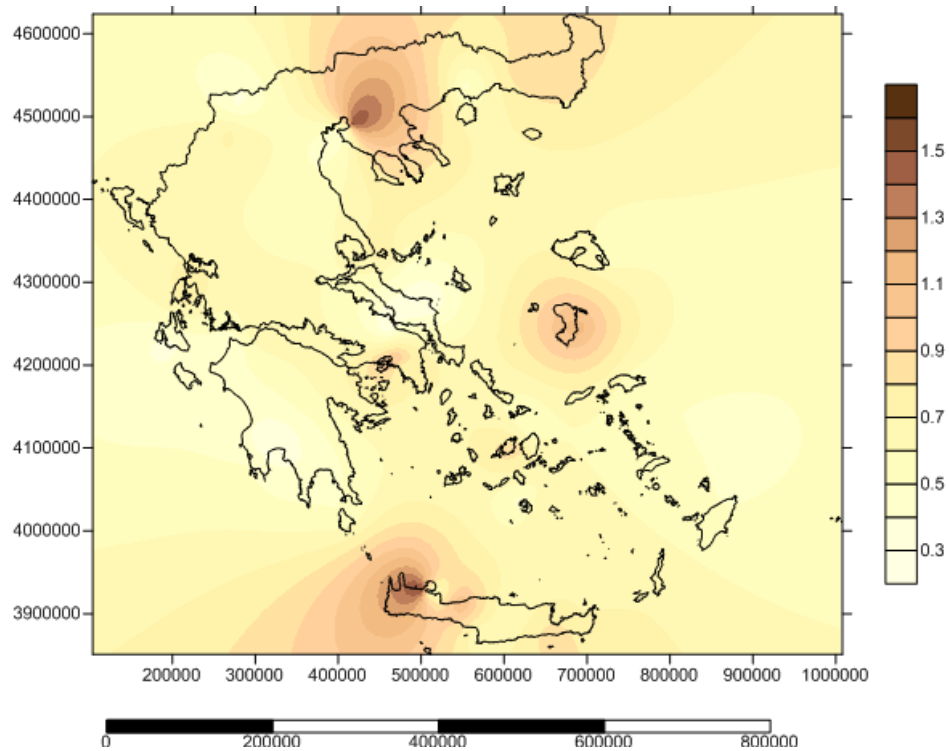


Σχήμα 5.24: Ιστόγραμμα από το πρόγραμμα Υδρογνώμον για την προσαρμογή της κατανομής Weibull στο δείγμα του σταθμού της Αλεξανδρούπολης.

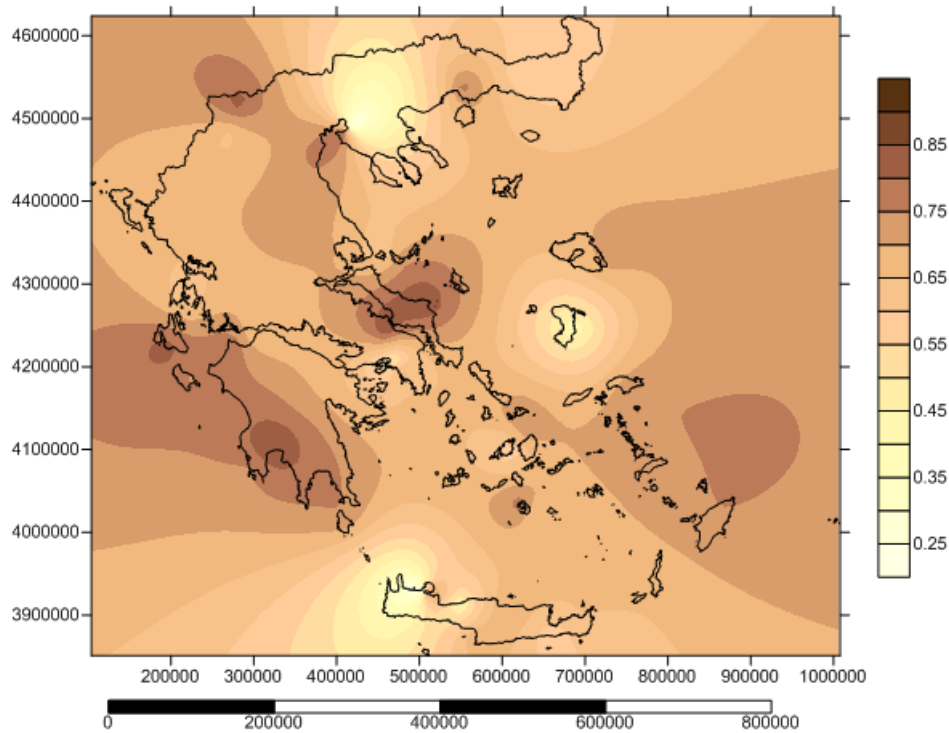
### 5.3.3 Επιλογή των 10 σταθμών προσαρμογής τους μοντέλου.

Για την εκτίμηση των παραμέτρων του μοντέλου, έγινε επιλογή των 10 σταθμών υπολογισμού με βάση τη γεωγραφική τους θέση αλλά και του πλήθους των τιμών του κάθε σταθμού. Η διασπορά των σταθμών θα έπρεπε να ήταν τέτοια ώστε να καλύπτει ομοιόμορφα το μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειας του Ελλαδικού χώρου, όπως επίσης και να υπάρχουν σταθμοί οι οποίοι να είναι ηπειρωτικοί, παραθαλάσσιοι αλλά και νησιωτικοί. Το γεγονός αυτό αυξάνει την αξιοπιστία του εξαγόμενου μοντέλου, αφού δεν υπάρχει μονομέρεια στην επιλογή της γεωγραφικής θέσης, αλλά ποικιλία όσον αφορά τις διαφορετικές μικροκλιματικές συνθήκες που έχει ο κάθε σταθμός, με βάση τη θέση του. Επιπρόσθετα, σημαντικό γεγονός το οποίο μειώνει τη μεροληψία του μοντέλου, αποτελεί και το πλήθος των μετρήσεων του κάθε σταθμού. Σε προηγούμενο υποκεφάλαιο έγινε αναφορά για το πλήθος των τιμών του κλιμακογράμματος (με βάση το οποίο προσαρμόζεται το μοντέλο) και την αξιοπιστία που προσφέρεται από το πλήθος των τιμών μιας μεγάλης σειράς δεδομένων. Επομένως, για την επιβεβαίωση της ορθής χρήσης των συγκεκριμένων σταθμών παρατίθενται οι χάρτες 5.6-5.9, οι οποίοι αποτυπώνουν την κλίση των δεδομένων του κλιμακογράμματος και του συντελεστή Hurst, για 56 σταθμούς σε ολόκληρο τον Ελλαδικό χώρο, καθώς επίσης και για τους 10 επιλεγόμενους για τη διαδικασία της μοντελοποίησης.

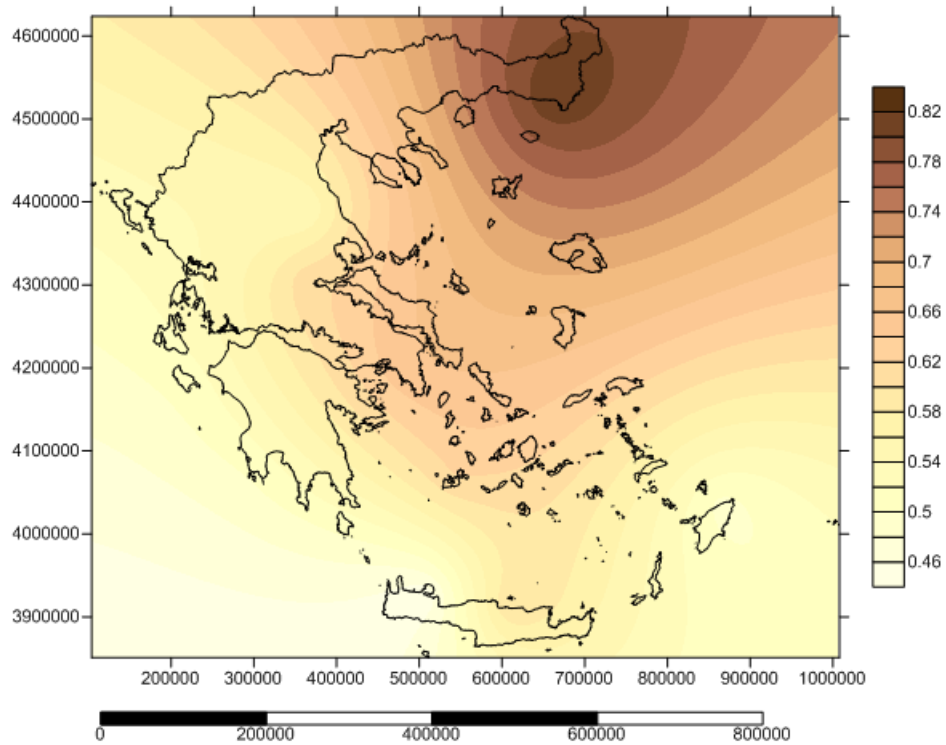




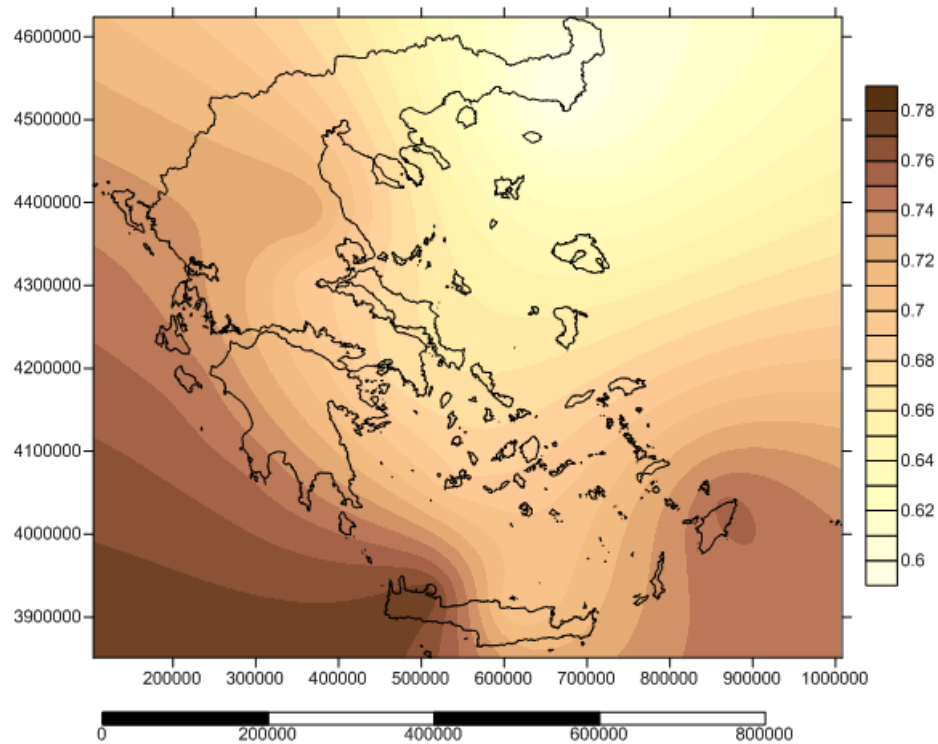
Χάρτης 5.6: Τιμές των κλίσεων του κλιμακογράμματος (τυποποίηση) για 56 σταθμούς δεδομένων στο Ελλαδικό χώρο.



Χάρτης 5.7: Τιμές του συντελεστή Hurst από τις τιμές των κλίσεων του κλιμακογράμματος (τυποποίηση) για 56 σταθμούς δεδομένων στο Ελλαδικό χώρο.



Χάρτης 5.8: Τιμές των κλίσεων του κλιμακογράμματος (τυποποίηση) για 10 σταθμούς δεδομένων στο Ελλαδικό χώρο χωρίς να έχει προηγηθεί η βελτιστοποίηση των παραμέτρων του μοντέλου. Οι υψηλές τιμές ακολουθούν το χάρτη του παραπάνω σχήματος.



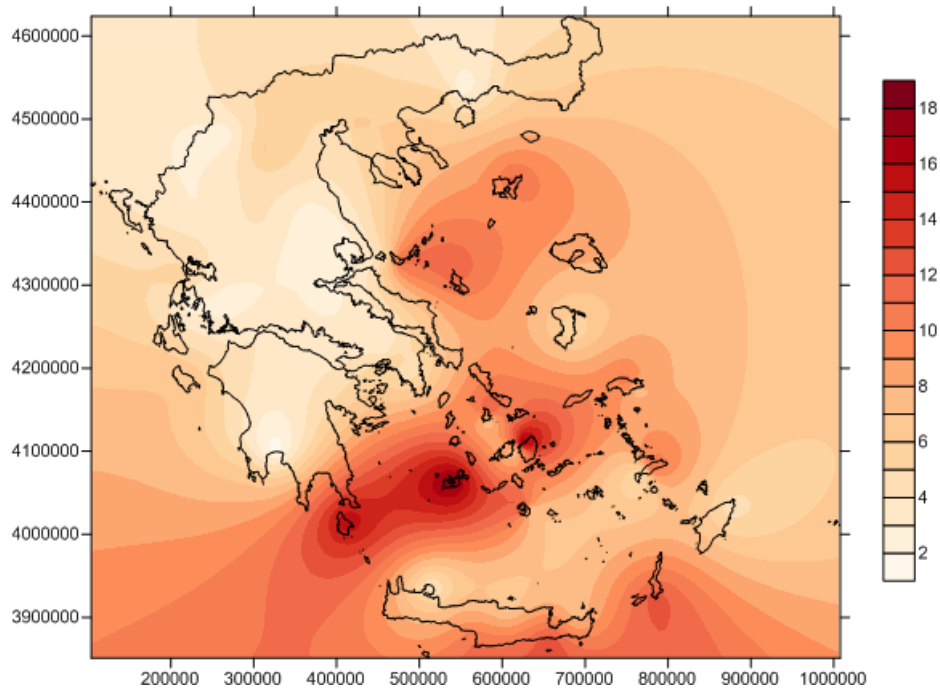
Χάρτης 5.9: Τιμές του συντελεστή Hurst για 10 σταθμούς δεδομένων στο Ελλαδικό χώρο χωρίς να έχει προηγηθεί η βελτιστοποίηση των παραμέτρων του μοντέλου. Οι υψηλές τιμές ακολουθούν το χάρτη του παραπάνω σχήματος.

Οι τιμές της διασποράς, των σταθμών (56) στον Ελλαδικό χώρο, για μετρήσεις σε ημερήσιο χρονικό βήμα ακολουθούν τη διακύμανση των τιμών των μετρήσεων της συναθροισμένης μηνιαίας σειράς των δεδομένων. Παρακάτω, παρατίθεται και χάρτης για την επιβεβαίωση αυτής της διακύμανσης με τη διασπορά των δεδομένων των 56 σταθμών Χάρτης 5.10 και αντίστοιχα τις τιμές για το τυποποιημένο δείγμα Χάρτης 5.11, όπως επίσης και η αυτοσυνδιασπορά των 10 σταθμών για την εξαγωγή του μοντέλου, Χάρτης 5.12 .

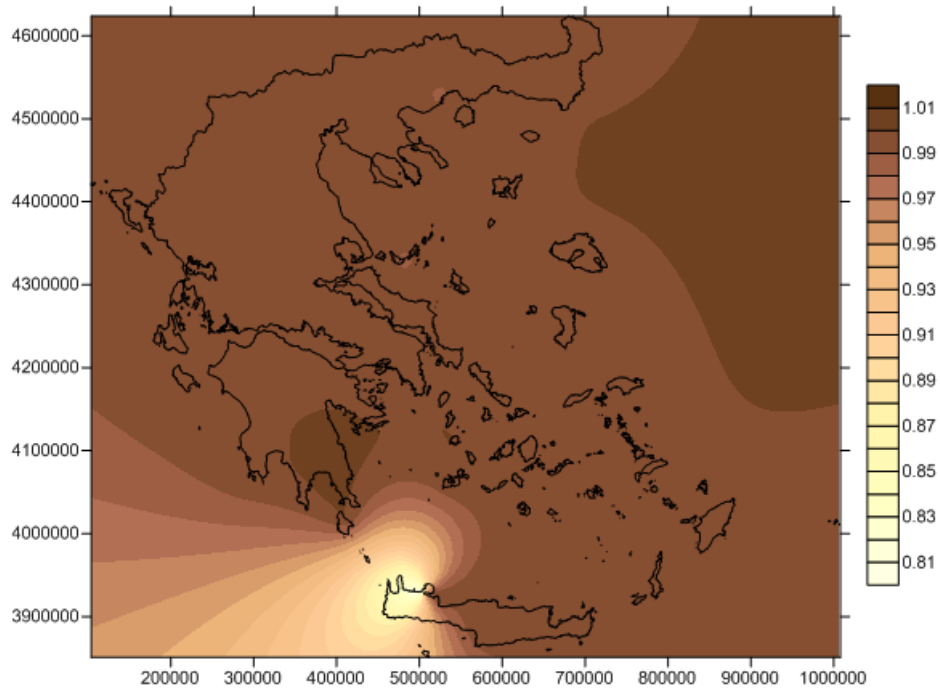
Αντίστοιχα οι τιμές των παραμέτρων (σχήματος ( $k$ ) και κλίμακας ( $c$ ,  $m/s$ ) της κατανομής Weibull για τις ημερήσιες σειρές δεδομένων των 56 σταθμών δίνονται στους χάρτες 5.13 και 5.14 όπως επίσης και οι παράμετροι της κατανομής για τους 10 σταθμούς επιλογής του μοντέλου στους χάρτες 5.15 και 5.16.

Από τους χάρτες 5.13-5.16 και τους χάρτες 5.9-5.12, παρατηρούμε ότι οι μέγιστες τιμές των παραμέτρων της κατανομής Weibull, οι κλίσεις και ο συντελεστής Hurst τόσο για τους 56 όσο και για τους 10 σταθμούς επιλογής του μοντέλου, πριν από τη βελτιστοποίηση, ακολουθούν τη ίδια γεωγραφική έκταση.

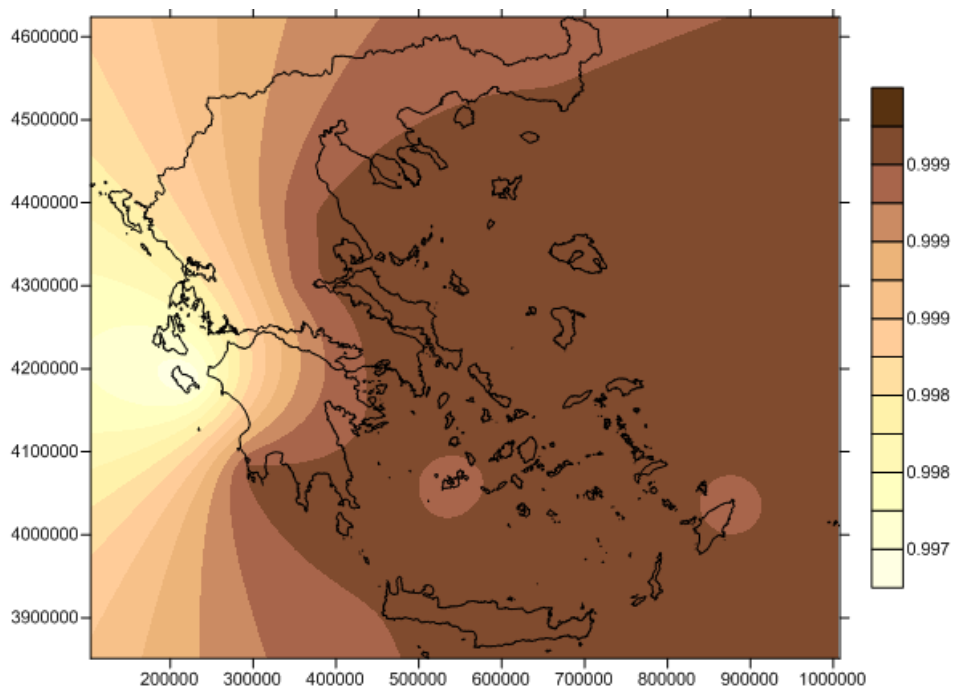
Οι απόλυτες τιμές, διαφέρουν σε κάποιες περιπτώσεις, για το γεγονός ότι οι χάρτες αποτυπώνονται με τη διαδικασία krigging και οι τιμές συμπληρώνονται με μια διαδικασία παλινδρόμησης. Επίσης, για το σχεδιασμό των χαρτών με τους 56 σταθμούς συμμετείχαν και κάποιοι σταθμοί με λίγα δεδομένα, με αποτέλεσμα το κλιμακόγραμμα για αυτούς τους σταθμούς να αφορά λίγες τιμές (30 κλίμακες), ενώ για τους χάρτες με τους 10 σταθμούς των δεδομένων, οι σταθμοί είχαν πλήθος δεδομένων με αποτέλεσμα τα κλιμακογράμματα να αφορούν χρονικό διάστημα από περίπου ένα έτος μέχρι και πλέον των τεσσάρων ετών. Τέλος για επιβεβαίωση της ταυτόσημης συμπεριφοράς των σταθμών στον Ελλαδικό χώρο παρατίθεται και το κλιμακόγραμμα Σχήμα 5.25 το οποίο αποτελείται από όλους τους σταθμούς υπολογισμού. Η κοινή κλίση όλων των σταθμών, ιδιαίτερα στις πρώτες κλίμακες, επιβεβαιώνει την επιλογή των 10 σταθμών επεξεργασίας για τη μοντελοποίηση με τα επιπλέον κριτήρια που αναφέρθηκαν προηγουμένως.



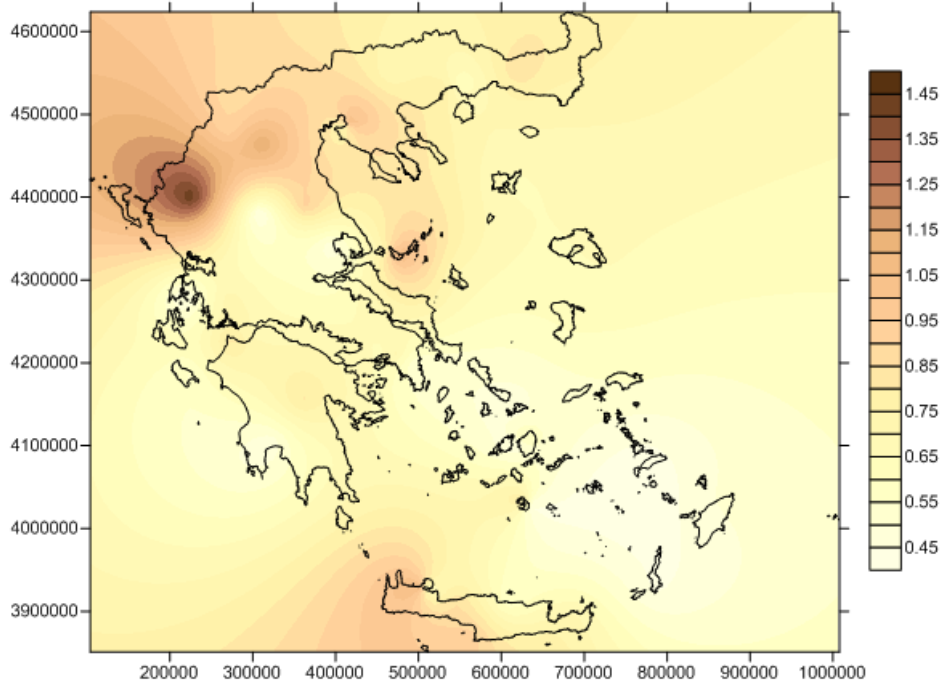
Χάρτης 5.10: Διασπορά των δεδομένων των 56 σταθμών για την ημερήσια συναθροισμένη σειρά.



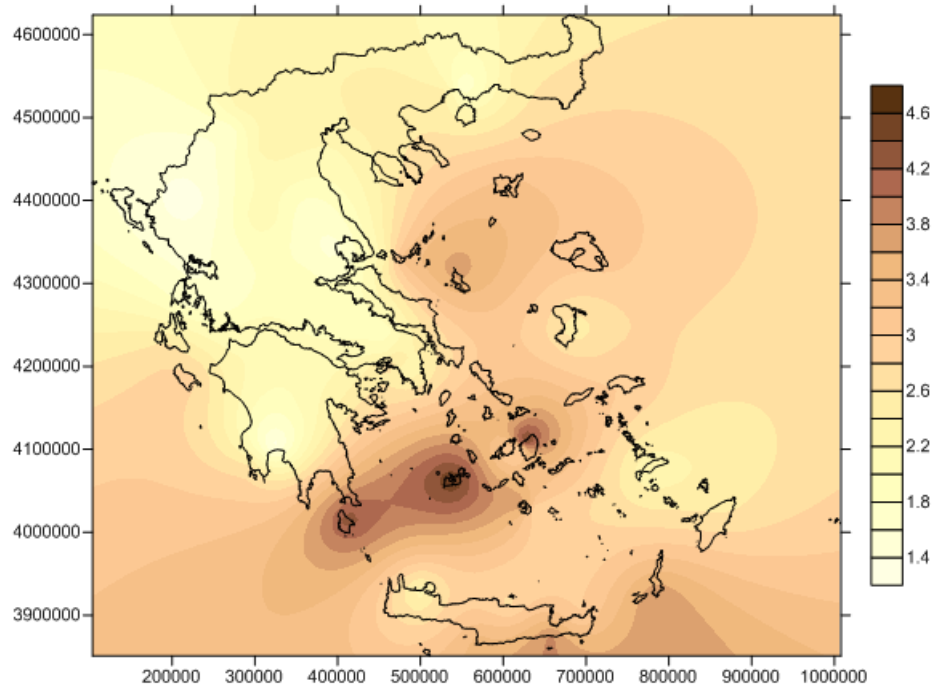
Χάρτης 5.11: Αυτοσυνδιασπορά όλων των σταθμών (56) για μηδενική υστέρηση που αποτελεί ουσιαστικά τη διασπορά της κανονικοποιημένης χρονοσειράς.



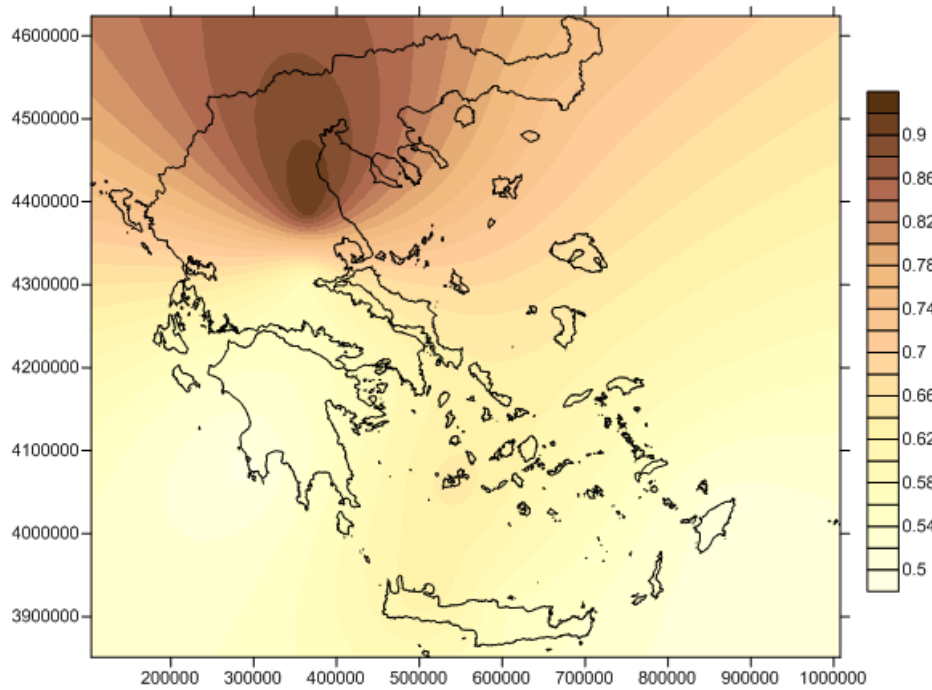
Χάρτης 5.12: Αυτοσυνδιασπορά όλων των σταθμών (10) για μηδενική υστέρηση που αποτελεί ουσιαστικά τη διασπορά της κανονικοποιημένης χρονοσειράς για τους σταθμούς που υπολογίζονται για το μοντέλο.



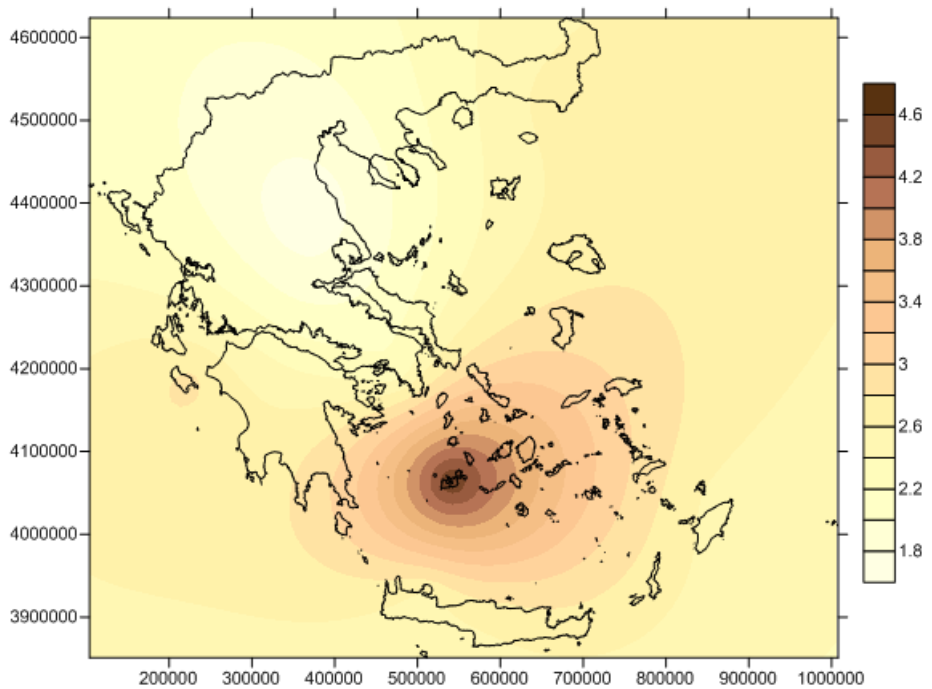
Χάρτης 5.13: Τιμές της παραμέτρου σχήματος ( $k$ ) της κατανομής Weibull για τους 56 σταθμούς των δεδομένων στον Ελλαδικό χώρο.



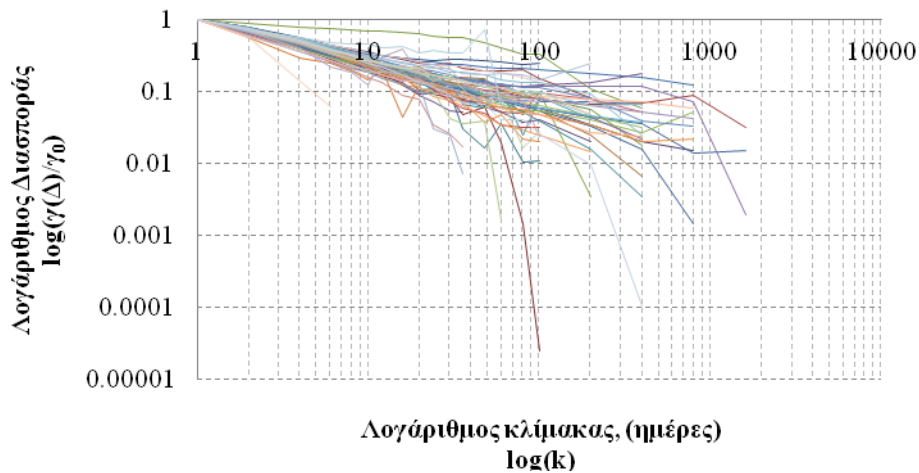
Χάρτης 5.14: Τιμές της παραμέτρου σχήματος ( $c$ ) της κατανομής Weibull για τους 56 σταθμούς των δεδομένων στον Ελλαδικό χώρο.



Χάρτης 5.15: Τιμές της παραμέτρου σχήματος ( $k$ ) της κατανομής Weibull για τους 10 σταθμούς των δεδομένων επιλογής του μοντέλου στον Ελλαδικό χώρο.



Χάρτης 5.16: Τιμές της παραμέτρου σχήματος ( $c$ ) της κατανομής Weibull για τους 10 σταθμούς των δεδομένων στον Ελλαδικό χώρο.



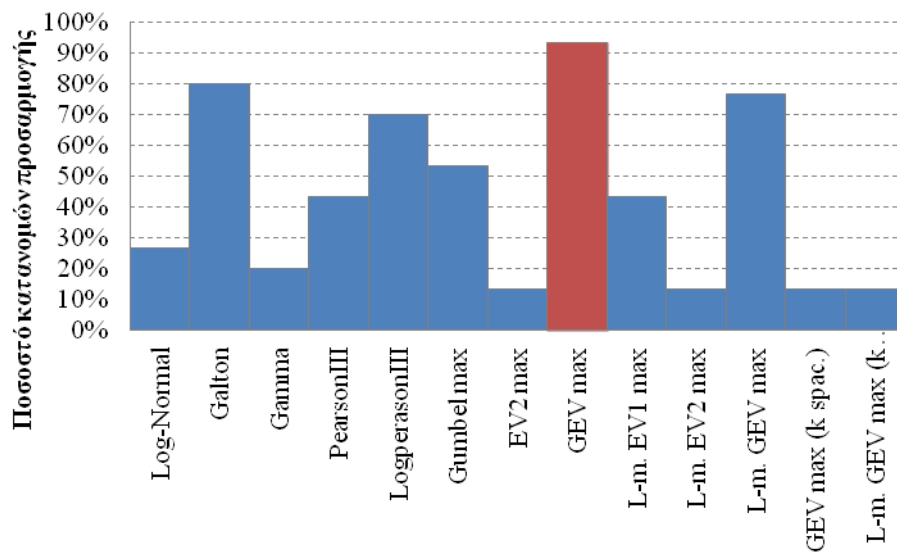
Σχήμα 5.25: Κλιμακόγραμμα στο οποίο αποτυπώνεται η διασπορά των σταθμών σε λογαριθμική κλίμακα με την κλίμακα του χρόνου (ημέρα). Οι τιμές της διασποράς του κάθε σταθμού έχουν διαιρεθεί με τη διασπορά της κάθε σειράς δεδομένων για μηδενική υστέρηση ώστε όλες οι σειρές να ξεκινούν από την ίδια τιμή (μονάδα) και να είναι πιο ευδιάκριτη η μεταξύ τους σύγκριση.

### 5.3.4 Προσαρμογή κατανομών για τα δεδομένα της ριπής του ανέμου.

Από το δείγμα των ριπών του ανέμου για ημερήσια χρονική κλίμακα σε 30 σταθμούς πραγματοποιήθηκε η ίδια διαδικασία για την επιλογή των κατανομών που προσαρμόζονται καλύτερα στο δείγμα. Από το πρόγραμμα Υδρογνώμων προσαρμόστηκαν οι κατανομές στο συνολικό δείγμα και με παρατήρηση στη γραφική απεικόνιση των δεδομένων προσαρμογής επιλέχθηκαν οι κατάλληλες κατανομές για τον κάθε σταθμό. Οι παρατηρήσεις συγκεντρώθηκαν στον Πίνακα 5.9 από τον οποίο προέκυψε η καταλληλότερη που προσαρμόζεται στο δείγμα των ριπών στους περισσότερους σταθμούς. Η καταλληλότερη επομένως κατανομή που προέκυψε είναι η Γενική Ακρότατων Τιμών (Generalized Extreme Values distribution - GEV max).

Πίνακας 5.9: Ποσοστό των κατανομών για κάθε έναν από τους εξεταζόμενους (30) σταθμούς για κάθε μια κατανομή από τα δεδομένα της ριπής του ανέμου.

Ποσοστό σταθμών ριπής και αντίστοιχες κατανομές προσαρμογής	
Log-Normal	26.67
Galton	80.00
Gamma	20.00
PearsonIII	43.33
LogperasonIII	70.00
Gumbel max	53.33
EV2 max	13.33
GEV max	93.33
L-m. EV1 max	43.33
L-m. EV2 max	13.33
L-m. GEV max	76.67
GEV max (k spac.)	13.33
L-m. GEV max (k spac.)	13.33

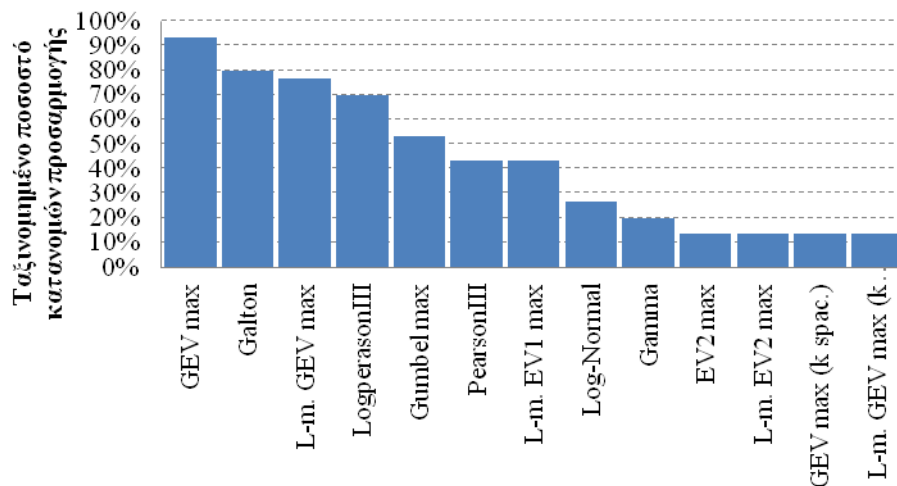


Σχήμα 5.26: Ραβδόγραμμα που δείχνει το ποσοστό των κατανομών για τους (30) εξεταζόμενους σταθμούς στον Ελλαδικό χώρο.

Πίνακας 5.10: Ποσοστό των κατανομών για τους (30) εξεταζόμενους σταθμούς κατανεμημένους από το μεγαλύτερο στο μικρότερο ποσοστό δηλαδή από την καλύτερη στη λιγότερο καλή προσαρμογή.

Ριπή για 30 σταθμούς στην Ελλάδα	
GEV max	93.33
Galton	80.00
L-m. GEV max	76.67
LogperasonIII	70.00
Gumbel max	53.33
PearsonIII	43.33
L-m. EV1 max	43.33
Log-Normal	26.67
Gamma	20.00
EV2 max	13.33
L-m. EV2 max	13.33
GEV max (k spac.)	13.33
L-m. GEV max (k spac.)	13.33





Σχήμα 5.27: Διάγραμμα στο οποίο αποτυπώνονται τα ποσοστά των κατανομών από το μεγαλύτερο στο μικρότερο ποσοστό.

Από τα σχήματα 5.26 και 5.27, όπως επίσης και από τους πίνακες 5.9 και 5.10, οι κατανομές που περισσότερο προσαρμόζονται στα δεδομένα των ριπών, είναι οι GEV max Galton L-moments GEV - max και Log - Pearson III, αλλά η περισσότερο καλή προσαρμογή από το δείγμα των 30 αυτών σταθμών των ριπών και από το σύνολο των 27 πιο ευρέως χρησιμοποιούμενων κατανομών στην υδρολογία, από το πρόγραμμα Υδρογνώμων προκύπτει η GEV - max.

Στη θεωρία των πιθανοτήτων και της στατιστικής, η ΓΑΤ ή (GEV - max), αποτελεί μια οικογένεια συνεχόμενων πιθανοτικών κατανομών που αναπτύσσεται από τη θεωρία των ακραίων τιμών για να συνδυάσει τις οικογένειες των κατανομών Gumbel, Frechet και Weibull που είναι γνωστές και σαν τύπου I, II και III κατανομές ακραίων τιμών. Από το θεώρημα των ακραίων τιμών η GEV - max κατανομή, είναι το μόνο πιθανό όριο από μια σειρά κανονικά κατανεμημένων μεγίστων από μια ακολουθία ανεξάρτητων και ταυτόσημων κατανεμημένων τυχαίων μεταβλητών. Το όριο της κατανομής δεν είναι απαραίτητο να υπάρχει: κάτι τέτοιο απαιτεί συγκεκριμένες συνθήκες για την ουρά της κατανομής. Όμως η GEV - max κατανομή συχνά χρησιμοποιείται σαν προσέγγιση για τη μοντελοποίηση των μεγίστων μιας μακράς πεπερασμένης ακολουθίας τυχαίων μεταβλητών. Σε μερικούς κλάδους η κατανομή αυτή είναι γνωστή σαν Fisher - Tippett που ονομάστηκε με αυτόν τον τρόπο από τον R.A. Fisher και L.H. Tippett που αναγνώρισαν τρεις τύπους συναρτήσεων. Τέλος η χρήση του ονόματος αυτού της κατανομής αυτής πολλές φορές περιορίζεται στο να σημαίνει την ειδική περίπτωση της κατανομής Gumbel. (Muraleedharan.G, et al., 2013)

Η αθροιστική συνάρτηση της κατανομής ακρότατων τιμών δίνεται από τη σχέση (5.48):

$$F(x; \mu, \sigma, \xi) = \exp\left\{-\left[1 + \xi \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right]^{-\frac{1}{\xi}}\right\} \quad (5.48)$$

για  $1 + \xi \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right) > 0$ , όπου  $\mu \in \mathbb{R}$  και αποτελεί την παράμετρο θέσης,  $\sigma > 0$  την παράμετρο κλίμακας και  $\xi \in \mathbb{R}$  την παράμετρο σχήματος. Για  $\xi > 0$ , η έκφραση δίνεται για την αθροιστική πιθανοτική κατανομή και ισχύει μόνο για  $x > \mu + \frac{\sigma}{(-\xi)}$  ενώ για  $\xi < 0$  ισχύει μόνο για  $x < \mu + \frac{\sigma}{(-\xi)}$ . Στην πρώτη περίπτωση στο χαμηλότερο σημείο τέλους ισούται με μηδέν

ενώ στη δεύτερη περίπτωση στο ανώτερο σημείο τέλους ισούται με 1. Για  $\xi = 0$  η έκφραση που δίνεται για την αθροιστική κατανομή είναι απροσδιόριστη και για αυτό το λόγο τη μορφή την παίρνει από το αποτέλεσμα του ορίου όταν το  $\xi \rightarrow 0$ .

$$F(x; \mu, \sigma, 0) = \exp\left\{-\exp\left(-\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right\} \quad (5.49)$$

χωρίς κανένα περιορισμό για την τυχαία μεταβλητή  $x$ . Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας αντίστοιχα παίρνει τη μορφή:

$$f(x; \mu, \sigma, \xi) = \frac{1}{\sigma} \left[1 + \xi \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right]^{\left(\frac{-1}{\xi}\right)-1} \exp\left\{-\left[1 + \xi \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right]^{\left(\frac{-1}{\xi}\right)}\right\} \quad (5.50)$$

για  $x > \mu + \frac{\sigma}{(-\xi)}$  όταν  $\xi > 0$  και για  $x < \mu + \frac{\sigma}{(-\xi)}$  όταν  $\xi < 0$ . Η σ.π.π. είναι μηδέν εκτός της αντίστοιχης κλίμακας. Στην περίπτωση που  $\xi = 0$  η σ.π.π. είναι θετική σε όλο το μήκος του άξονα των πραγματικών αριθμών και ισούται με :

$$f(x; \mu, \sigma, 0) = \frac{1}{\sigma} \exp\left[-\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right] \exp\left\{-\exp\left[-\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right]\right\} \quad (5.51)$$

Η παράμετρος σχήματος  $\xi$  αποκαλύπτει τη συμπεριφορά της ουράς της κατανομής. Οι επιμέρους περιπτώσεις της κατανομής για  $\xi = 0$ ,  $\xi > 0$  και  $\xi < 0$  αντιστοιχούν στις κατανομές Gumbel Frechet και Weibull όπου οι αθροιστικές συναρτήσεις κατανομής τους δίνονται παρακάτω:

- (1) Gumbel ή τύπου I ακρότατων τιμών ( $\xi = 0$ )

$$F(x; \mu, \sigma, 0) = e^{-e^{-(x-\mu)/\sigma}} \quad (5.52)$$

για  $x \in \mathbb{R}$

- (2) Frechet ή τύπου II ακρότατων τιμών ( $\xi = \alpha - 1 > 0$ )

$$F(x; \mu, \sigma, \xi) = \begin{cases} 0 \\ e^{-\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^{-\alpha}} \end{cases} \quad (5.53)$$

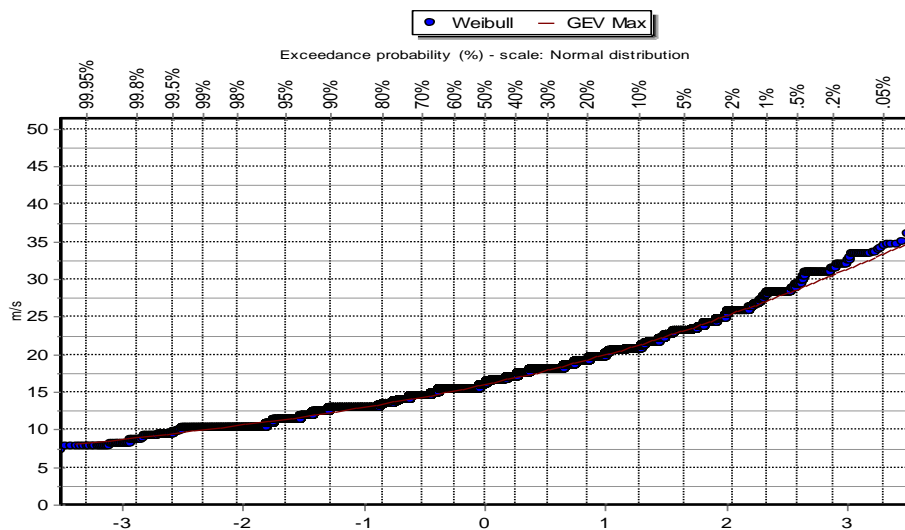
για  $x \leq \mu$  και  $x > \mu$  αντίστοιχα.

- (3) Αντιστρέψιμη Weibull ή τύπου III ακρότατων τιμών ( $\xi = \alpha - 1 < 0$ )

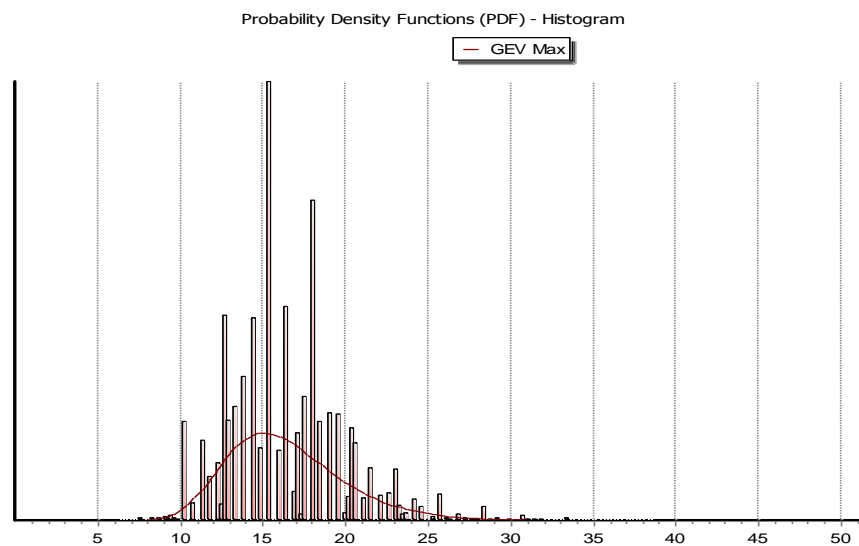
$$F(x; \mu, \sigma, \xi) = \begin{cases} e^{-\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^{\alpha}} \\ 1 \end{cases} \quad (5.54)$$

για  $x < \mu$  και  $x \geq \mu$  αντίστοιχα με  $\sigma > 0$ .

Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα από το πρόγραμμα Υδρογνώμων, σχήματα 5.25 και 5.26, για την εμπειρική κατανομή και για την προσαρμογή της κατανομής Γενικών Ακρότατων Τιμών στο δείγμα των δεδομένων για το σταθμό του Ηρακλείου.



Σχήμα 5.28: Διάγραμμα στο οποίο αποτυπώνεται η προσαρμογή της κατανομής GEV – max στο σύνολο των δεδομένων της ριπής (m/s) του σταθμού Ηράκλειο.



Σχήμα 5.29: Ιστόγραμμα των δεδομένων του σταθμού Ηρακλείου και προσαρμογή της κατανομής GEV - max.



## 6 Παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών της μεταβλητής της ταχύτητας του ανέμου.

---

### 6.1 Γενικά

Ο όρος συνθετική χρονοσειρά, αναφέρεται σε χρονοσειρές αυστηρά διατεταγμένου χρονικού βήματος οι οποίες παράγουν τα στατιστικά χαρακτηριστικά της ιστορικής χρονοσειράς (των δεδομένων που έχουμε στη διάθεσή μας) που μας ενδιαφέρουν για την επίλυση του εκάστοτε προβλήματος. Για τη διαδικασία παραγωγής των χρονοσειρών αυτών, χρησιμοποιούνται κάποιες τεχνικές που είναι γνωστές ως στοχαστική προσομοίωση ή προσομοίωση Monte Carlo, οι οποίες παράγουν τυχαίους αριθμούς και είναι πολύ χρήσιμες για την επίλυση προβλημάτων, που είτε δεν έχουν αναλυτική λύση ή η αριθμητική τους επίλυση είναι αρκετά χρονοβόρα. Η ανωτέρω μέθοδος, χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου τα δεδομένα εισόδου σε ένα σύστημα διέπονται από μεγάλη αβεβαιότητα. Το γεγονός ότι στα περισσότερα υδρολογικά συστήματα χαρακτηρίζονται από την παραπάνω ιδιαιτερότητα καθιστά τις μεθόδους αυτές ιδιαίτερα δημοφιλείς και εύχρηστες.

Το γεγονός ότι η πλειονότητα των υδρολογικών διεργασιών χαρακτηρίζεται από μεγάλη αβεβαιότητα (χαοτική συμπεριφορά) οδηγεί σε αδυναμία πρόγνωσης της συμπεριφοράς των συστημάτων, που εξαρτώνται από τις μεταβλητές αυτές, με αποτέλεσμα να καθίσταται αδύνατη η οποιαδήποτε πρόβλεψη με ασφάλεια παρά μόνο για χρονικό ορίζοντα λίγων ημερών, με σχετικά μικρό διάστημα εμπιστοσύνης. Για το λόγο αυτό, οι διεργασίες αυτές θεωρούνται ως τυχαίες μεταβλητές και αντιμετωπίζονται ως στοχαστικές ανελίξεις. Επομένως, η παραπάνω θεώρηση και η ταυτόχρονη χρήση των στοχαστικών υδρολογικών μοντέλων που ποσοτικοποιούν την αβεβαιότητα γύρω από τις ανελίξεις των τυχαίων αυτών διεργασιών, οδηγεί στην παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών.

Τα συνθετικά δείγματα των ανελίξεων που παράγονται με τη χρήση οποιουδήποτε στοχαστικού μοντέλου, σε καμία περίπτωση δεν υποκαθιστούν την πρωτογενή πληροφορία, που αποτελεί η ιστορική χρονοσειρά το δείγμα των τιμών των μετρήσεων της εκάστοτε μεταβλητής που μας ενδιαφέρει. Η επιλογή του στοχαστικού μοντέλου που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί και η εκτίμηση των παραμέτρων του βασίζεται πάντα στο ιστορικό δείγμα. Επομένως, η γέννηση συνθετικών χρονοσειρών (με μήκος πολλαπλό του αρχικού δείγματος) δεν αποτελεί επιπρόσθετη πληροφορία, ούτε επαυξάνει τη διάρκεια του εκάστοτε ιστορικού δείγματος. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, αποτελεί πολύ σημαντική πληροφορία σε συνθετότερες διεργασίες που εξετάζονται, αλληλοεξαρτώμενα και δη χαοτικά μεγέθη σε πολύπλοκα συστήματα (ταμιευτήρας), που η συνάρτηση κατανομής τους δεν μπορεί να προσδιοριστεί αναλυτικά. Η εκτίμηση, που γίνεται μέσω των συνθετικών χρονοσειρών, θα είναι ίδια με την άμεση εκτίμηση που προκύπτει από την συγκεκριμένη συνάρτηση κατανομής που έχει υιοθετηθεί για τη συγκεκριμένη μεταβλητή, με την προσαρμογή της συγκεκριμένης κατανομής στην εμπειρική, που προκύπτει από τις παρατηρημένες μετρήσεις (ιστορικό δείγμα) (Τσεκούρας, 2012).

## 6.2 Στοχαστικά μοντέλα<sup>1</sup>

Βασικός στόχος των μοντέλων στοχαστικής προσομοίωσης όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, είναι η παραγωγή στοχαστικών ανελίξεων που να διατηρούν τα στατικά χαρακτηριστικά του δείγματος. Για το σκοπό αυτό, έχουν παραχθεί πληθώρα τέτοιων μοντέλων που χαρακτηρίζονται ως αυτοπαλινδρούμενα ή μοντέλα κυλιόμενου μέσου όρου ή μοντέλα που περιλαμβάνουν και τις δυο αυτές απαιτήσεις. Για τις στάσιμες στοχαστικές ανελίξεις έχουν αναπτυχθεί τα μοντέλα  $AR(p)$  που αποτελούν μοντέλα αυτοσυσχέτισης (autoregressive models)  $p$  τάξης ομοιώματα κυλιόμενων μέσων όρων  $MA(q)$  (moving average)  $q$  τάξης όπως επίσης και συνθετότερα μοντέλα που περιλαμβάνουν τις δυο αναφερόμενες ανελίξεις  $ARMA(p, q)$  που είναι μοντέλα αυτοπαλινδρόμησης  $p$  τάξης και κυλιόμενου μέσου όρου  $q$  τάξης. Για τις μη στάσιμες ανελίξεις, υπάρχουν τα ομοιώματα  $ARIMA(p, d, q)$  που έχουν και μηχανισμό διαφορίσης - μονιμοποίησης της σειράς όπως επίσης και τα μοντέλα FFGN (Fast Fractional Gaussian Noise) που επιπρόσθετα διατηρούν την εμμονή της σειράς.

Σημαντικό στοιχείο το οποίο αποτελεί χαρακτηριστικό των υδρολογικών διεργασιών είναι και το φαινόμενο Hurst (Hurst, 1951) που παρατηρήθηκε από την παρατήρηση του ομώνυμου μηχανικού για τις ανάγκες διαστασιολόγησης του φράγματος του Ασουάν, που αφορούσε την ομαδοποίηση των ακραίων γεγονότων στη φύση. Μερικά χρόνια αργότερα την ίδια παρατήρηση έκανε και ο Γάλλος μαθηματικός Mandelbrot και ονόμασε τη συμπεριφορά αυτή φαινόμενο Ιωσήφ (Mandelbrot, 1977). Επομένως, βασικό χαρακτηριστικό των υδρολογικών στοχαστικών μοντέλων θα πρέπει να είναι η ικανότητά τους να αναπαράγουν ανελίξεις διατηρώντας τα στατιστικά χαρακτηριστικά της φύσης, ώστε τα εξαγόμενα αποτελέσματα να είναι περισσότερο ρεαλιστικά. Σε πολλές όμως περιπτώσεις χρησιμοποιούνται μοντέλα όπως τα  $AR(p)$   $MA(q)$  και  $ARMA(p, q)$  τα οποία δεν αναπαράγουν το φαινόμενο αυτό αν και είναι αποδεκτό ότι υφίσταται. Οι λόγοι για τους οποίους μπορεί να συμβαίνει κάτι τέτοιο ίσως είναι ότι: (α) η συμπεριφορά αυτή της φύσης αποτελεί στοιχείο που ξεπερνάει την απλή καθημερινή στατιστική θεώρηση, (β) μοντέλα τα οποία συμπεριλαμβάνουν τη συμπεριφορά αυτή της φύσης για την παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών είναι περισσότερα πολύπλοκα από τα υπόλοιπα με δυσκολότερους αλγόριθμους επίλυσης και (γ) τυπικά μοντέλα της κατηγορίας αυτής έχουν αρκετά αδύνατα σημεία όπως η περιορισμένη δυνατότητα συναρτήσεων αυτοσυσχέτισης που μπορούν να διατηρήσουν και η περιορισμένη επίσης δυνατότητα για τη διατήρηση ασυμμετρίας και η εμφάνισή της σε σύστημα πολλών μεταβλητών (Koutsoyiannis, 2002).

### 6.2.1 Μοντέλο FGN (Fractional Gaussian Noise)

Το μοντέλο αυτό εισήγαγε ο Mandelbrot (1965) και είναι το μοντέλο που έχει μεγάλη συνάφεια με την πραγματική συμπεριφορά των υδρολογικών μεταβλητών και τη διατήρηση της εμμονής και ορίζεται σε διακριτό χρόνο με παρόμοια τρόπο όπως χρησιμοποιείται και σε συνεχή. Το μοντέλο αυτό μπορεί να οριστεί και η ανελίξη που ικανοποιεί την παρακάτω συνθήκη:

$$(Z_t^{(k)} - k\mu) =^d \left(\frac{k}{l}\right)^H (Z_j^{(l)} - l\mu) \quad (6.1)$$

με  $(0 < H < 1)$

---

<sup>1</sup> Το κεφάλαιο 6.2 αποτελεί μέρος της εργασίας: Koutsoyiannis D., (2002), "The Hurst phenomenon and fractional Gaussian noise made easy" *Hydrological Sciences Journal* 47(4) 573-595.

όπου το σύμβολο  $\stackrel{d}{=}$  δηλώνει την ισότητα στην από κοινού κατανομή  $i, j, k$  και  $l$  είναι οποιοδήποτε ακέραιοι και  $H$  είναι ο συντελεστής Hurst. Η τιμή του συντελεστή Hurst στο διάστημα  $(0 - 0.5)$  αποδεικνύει την ύπαρξη αντισυμμετρίας που σημαίνει ότι μια αύξηση των τιμών της χρονοσειράς ακολουθείται από μια μείωση των τιμών της. Η τιμή του συντελεστή Hurst στο διάστημα  $(0.5, 1)$  δηλώνει την ύπαρξη εμμονής που σημαίνει ότι μια αύξηση των τιμών της σειράς ακολουθείται από περαιτέρω αύξηση των τιμών της. Τέλος, τιμή του συντελεστή Hurst = 0.5 συνεπάγεται τυχαία διακύμανση (αύξηση ή μείωση) των τιμών της χρονοσειράς και είναι γνωστή ως λευκός θόρυβος.

Θέτοντας  $i = j = 1$  στην παραπάνω εξίσωση λαμβάνουμε τη διασπορά:

$$\gamma_0^{(k)} = k^{2H-2} \gamma_0 \quad (6.2)$$

Επιπλέον ορίζεται και η συναθροισμένη ανέλιξη για κάθε χρονική κλίμακα:

$$Z_i^{(k)} := \sum_{l=(i-1)k+1}^{ik} X_l = kX_i^{(k)} \quad (6.3)$$

για την οποία ισχύουν:

$$E[Z_i^{(k)}] = k\mu \gamma_0^{(k)} = \text{Var}[Z_i^{(k)}] = k^{2H} \gamma_0 \sigma^{(k)} = (\gamma_0^{(k)})^{1/2} \quad (6.4)$$

Η συνάρτηση αυτοσυνδιασποράς της ανέλιξης τόσο της  $X_i^{(k)}$  όσο και της  $Z_i^{(k)}$  είναι ανεξάρτητη της κλίμακας  $k$  και δίνεται από τη σχέση:

$$\rho_j^{(k)} = \rho_j = \frac{1}{2} (|j+1|^{2H} + |j-1|^{2H}) - |j|^{2H} \quad (6.5)$$

ή προσεγγιστικά:

$$\rho_j^{(k)} = \rho_j = H(2H-1)j^{2H-2} \quad (6.6)$$

Η αβεβαιότητα μιας μεταβλητής με τυχαία ανέλιξη εκφράζεται από τη διακύμανση της εκτιμήτριας της μέσης τιμής σύμφωνα με τη σχέση:

$$\text{Var}[X] = \frac{\sigma^2}{n} \quad (6.7)$$

Ωστόσο για χρονοσειρές που χαρακτηρίζονται από τη δυναμική Hurst - Kolmogorov με βάση την πρώτη σχέση λαμβάνεται:

$$\text{Var}[X] = \frac{\sigma^2}{n^{2-2H}} \quad (6.8)$$

Η παραπάνω σχέση εκφράζει ότι για μια σειρά που χαρακτηρίζεται από εμμονή η εκτίμηση του τυπικού σφάλματος είναι αρκετά χειρότερη.

Επομένως, η FGN ανέλιξη είναι πολύ διαφορετική από τις αντίστοιχες Markov με την έννοια ότι διατηρούν 'παχιά ουρά' στην έκφραση της αυτοσυσχέτισης. Στο παράδειγμα που αναφέρεται στην εργασία (Koutsoyiannis, 2002), η τιμή του συντελεστή Hurst για το Νείλο προέκυψε  $H=0.85$  ενώ η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης με μοντέλο FGN διατηρείται σε επίπεδο της τάξης του 0.15 ακόμα και για υστέρηση 100 ετών, ενώ οι αντίστοιχες Markov ανελίξεις από τις 4 κιόλας πρώτες υστερήσεις μηδενίζονται. Το γεγονός αυτό, αποδεικνύει ότι τα μοντέλα Markov δεν μπορούν να αναπαράγουν την εμμονή που είναι χαρακτηριστικό της συμπεριφοράς της φύσης, αντίθετα με τις ανελίξεις FGN.

## 6.3 Μοντέλα απλής ομοιοθεσίας<sup>1</sup>

### 6.3.1 Γενικά

Οι Markov ανελίξεις, που είναι σχετικά απλές στην εφαρμογή τους, δεν μπορούν να αναπαράγουν το φαινόμενο Hurst σε αντίθεση με τα μοντέλα FGN όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως. Όμως οι αλγόριθμοι που διέπουν τα μοντέλα αυτά είναι αρκετά επίπονοι στον υπολογισμό τους και δύσκολά εφαρμόσιμοι. Για τους παραπάνω λόγους, έγινε προσπάθεια για την περαιτέρω απλοποίηση των αλγορίθμων με συνδυασμό Markov μοντέλων (Koutsoyiannis, 2002) για την αναπαραγωγή των FGN ανελίξεων.

### 6.3.2 Τυχαίες διακυμάνσεις πολλαπλής κλίμακας – (A multiple time - scale fluctuation approach)

Το σταθμισμένο άθροισμα τριών εκθετικών συναρτήσεων της υστέρησης, μπορεί να δώσει ικανοποιητική προσέγγιση της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης FGN στη βασική κλίμακα. Αυτή η παρατήρηση οδηγεί σε έναν απλοποιημένο αλγόριθμο για την αναπαραγωγή ανελίξεων FGN. Συγκεκριμένα, η ανέλιξη παράγεται ως άθροισμα τριών ανελίξεων AR(1) από τη σχέση:

$$X_i = U_i + V_i + W_i \quad (6.9)$$

Η αριθμητική αναζήτηση έδειξε ότι οι συντελεστές αυτοσυσχέτισης των τριών ανελίξεων για υστέρηση 1 δίνουν την καλύτερη προσέγγιση (σε όρους μέσου τετραγωνικού σφάλματος) και είναι:

$$\rho = 1.52(H - 0.5)^{1.32} \quad (6.10)$$

$$\varphi = 0953 - 769(H - 0.5)^{3.85} \quad (6.11)$$

$$\xi = \begin{cases} 0932 + 0087H & H \leq 0.76 \\ 0993 + 0007H & H > 0.76 \end{cases} \quad (6.12)$$

Η διασπορά των ανελίξεων AR(1) είναι:

Διασπορά για την ανέλιξη  $A_i$ :  $(1 - c_1 - c_2)\gamma_0$

Διασπορά για την ανέλιξη  $B_i$ :  $c_1\gamma_0$

Διασπορά για την ανέλιξη  $C_i$ :  $c_2\gamma_0$

Οι συντελεστές  $c_1$  και  $c_2$  υπολογίζονται έτσι ώστε η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης του αθροίσματος των τριών ανελίξεων να ταυτίζεται με τη θεωρητική αυτοσυσχέτιση της ανέλιξης απλής ομοιοθεσίας για υστέρηση 1 και 100. Η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης του αθροίσματος είναι:

$$\rho_j = (1 - c_1 - c_2)\rho^j + c_1\varphi^j + c_2\xi^j \quad (6.13)$$

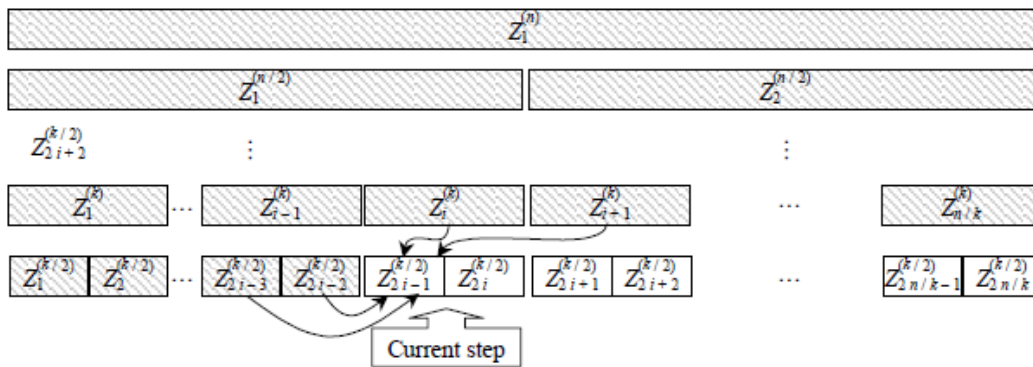
### 6.3.3 Ανέλιξη επιμερισμού – (A disaggregation approach)

Η απλή έκφραση της στατιστικής της συνάθροισης των μοντέλων FGN κάνει εφικτή μια ανέλιξη επιμερισμού για την αναπαραγωγή FGN. Η υπόθεση είναι ότι το επιθυμητό μήκος  $n$  της συνθετικής χρονοσειράς που πρέπει να παραχθεί είναι  $2m$  όπου  $m$  είναι ακέραιος και εάν

<sup>1</sup> Το κεφάλαιο 6.3 αποτελεί μέρος της εργασίας: Koutsoyiannis D., (2002), “The Hurst phenomenon and fractional Gaussian noise made easy” *Hydrological Sciences Journal* 47(4) 573-595.



δεν είναι μπορεί να αυξηθεί το μήκος  $n$  στην επόμενη δύναμη του 2 και στη συνέχεια αμελείται το περιττό στοιχείο που παράγεται. Αρχικά η μοναδική τιμή του  $Z_1^{(n)}$  παράγεται γνωρίζοντας την διασπορά της  $n2H\gamma_0$ . Αργότερα, η τιμή  $Z_1^{(n)}$  επιμερίζεται σε δυο μεταβλητές στην κλίμακα  $n/2$  και γίνεται  $Z_1^{(n/2)}$ ,  $Z_2^{(n/2)}$  και η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι οι σειρές  $Z_1^{(1)} \equiv X_1 \dots Z_n^{(1)} \equiv X_n$  να παραχθούν. Η ανέλιξη αυτή του επιμερισμού είναι παρόμοια με τον αλγόριθμο αντικατάστασης του μέσου σημείου (Saure, 1988) μόνο που στην περίπτωση αυτή είναι περισσότερο ακριβής. Είναι βασισμένη στη μέθοδο επιμερισμού που εισήγαγε ο Κουτσογιάννης (2001). Δεδομένου ότι είναι μια επαγωγική διαδικασία αρκεί η περιγραφή ενός μόνο βήματος. Υποτίθεται ότι η παραγωγή στη χρονική κλίμακα  $k \leq n$  ότι έχει ολοκληρωθεί και οι χρονοσειρές παράγονται στην επόμενη χρονική κλίμακα  $k/2$ . Αυτό σημαίνει ότι το παραγόμενο βήμα στο υψηλότερο επίπεδο  $Z_i^{(k)}$  ( $1 < i < n/k$ ) επιμερίζεται σε δυο τιμές χαμηλότερου επιπέδου  $Z_{2i-1}^{(k/2)}$  και  $Z_{2i}^{(k/2)}$  τέτοιες ώστε Σχήμα 6.1:



Σχήμα 6.1: Ανέλιξη επιμερισμού για την παραγωγή χρονοσειρών από FGN. Τα γκρι κελιά αποτελούν τις τυχαίες μεταβλητές που οι τιμές τους έχουν ήδη παραχθεί από το παρόν βήμα και τα βέλη εισάγουν τη σύνδεση με αυτές από, παραγόμενες μεταβλητές που υπολογίζονται στο παρόν παραγόμενο βήμα (πηγή: Κουτσογιάννης, 2002).

$$Z_{2i-1}^{(k/2)} + Z_{2i}^{(k/2)} = Z_i^{(k)} \quad (6.14)$$

Επομένως, από τον παραπάνω τύπο αρκεί η παραγωγή της ποσότητας  $Z_{2i-1}^{(k/2)}$  και η τιμή του  $Z_{2i}^{(k/2)}$  προκύπτει από τη σχέση. Σε αυτό το βήμα παραγωγής οι ήδη παραγόμενες τιμές των προηγούμενων χαμηλότερων βημάτων  $Z_1^{(k/2)} \dots Z_{2i-2}^{(k/2)}$  και των επόμενων υψηλότερων βημάτων  $Z_{i+1}^{(k)} \dots Z_{n/k}^{(k)}$  είναι διαθέσιμες (υπολογισμένες). Θεωρητικά, αρκεί να διατηρηθούν οι συσχετίσεις του  $Z_{2i-1}^{(k/2)}$  με όλα τα προηγούμενα χαμηλότερα επίπεδα και με τις μεταβλητές όλων των επόμενων υψηλότερων επιπέδων. Όμως, μπορεί κάποιος να πάρει πολύ καλή προσέγγιση στην περίπτωση που σχετιστεί μια μόνο μεταβλητή στο προηγούμενο βήμα και μια στο επόμενο. Μετά από αυτήν την απλοποίηση η μεταβλητή  $Z_{2i-1}^{(k/2)}$  μπορεί να παραχθεί από την παρακάτω γραμμική σχέση:

$$Z_{2i-1}^{(k/2)} = \alpha_2 Z_{2i-3}^{(k/2)} + \alpha_1 Z_{2i-2}^{(k/2)} + b_0 Z_i^{(k/2)} + b_1 Z_{i+1}^{(k)} + V \quad (6.15)$$

όπου τα  $\alpha_2$ ,  $\alpha_1$ ,  $b_0$  και  $b_1$  είναι παράμετροι που μπορεί να υπολογιστούν και το  $V$  έχει διασπορά που πρέπει να υπολογιστεί επίσης. Όλες οι άγνωστες παράμετροι μπορούν να υπολογιστούν σε μορφή συσχετίσεων από τη μορφή  $\text{corr}[Z_{2i-1}^{(k/2)}, Z_{2i-1+j}^{(k/2)}] = \rho_j$  όπου το  $\rho_j$  μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση:

$$\rho_j^{(k)} = \rho_j = \frac{1}{2} (|j+1|^{2H} + |j-1|^{2H}) - |j|^{2H} \quad (6.16)$$

Συγκεκριμένα με εφαρμογή της μεθόδου που έχει εισάγει ο Κουτσογιάννης (2001) προκύπτει:

$$\begin{bmatrix} \alpha_2 \\ \alpha_1 \\ b_0 \\ b_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \rho_1 & \rho_2 + \rho_3 & \rho_4 + \rho_5 \\ \rho_1 & 1 & \rho_1 + \rho_2 & \rho_3 + \rho_4 \\ \rho_2 + \rho_3 & \rho_1 + \rho_2 & 2(1 + \rho_1) & \rho_1 + 2\rho_2 + \rho_3 \\ \rho_4 + \rho_5 & \rho_3 + \rho_4 & \rho_1 + 2\rho_2 + \rho_3 & 2(1 + \rho_1) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \rho_2 \\ \rho_1 \\ 1 + \rho_1 \\ \rho_2 + \rho_3 \end{bmatrix}$$

και

$$\text{var}[V] = \gamma_0^{\binom{k}{2}} (1 - [\rho_2 \rho_1 1 + \rho_1 \rho_2 + \rho_3][\alpha_1 \alpha_2 b_0 b_1]^T) \quad (6.17)$$

όπου το σύμβολο T υποδηλώνει το αντίστροφο του πίνακα. Όλοι οι παράμετροι είναι εξαρτημένοι από το i και το k και για αυτό μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε όλα τα βήματα. Όταν το i = 1 οι πρώτες δυο γραμμές και στήλες του παραπάνω πίνακα και διανύσματος περιορίζονται. Παρομοίως όταν i = n/k η τελευταία γραμμή και στήλη του παραπάνω πίνακα και διανύσματος πάλι περιορίζονται. Οι αλληλουχίες των προηγούμενων και περασμένων μεταβλητών που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή μεταβλητών χαμηλότερου επιπέδου και οι σχετικές παράμετροι μπορούν να επεκταθούν ώστε να αυξηθεί η ακρίβεια της μεθόδου.

### 6.3.4 Ανέλιξη συμμετρικού κυλιόμενου μέσου όρου - (A symmetric moving average approach)

Τη μέθοδο του κυλιόμενου μέσου όρου (SMA) εισήγαγε ο (Κουτσογιάννης, 2000) και αποτελεί σχήμα για την παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών που μπορεί να παραχθεί από οποιαδήποτε στοχαστική ανέλιξη με οποιοδήποτε σχήμα αυτοσυσχέτισης ή δυναμικού φάσματος. Όπως και η σχετική ανέλιξη του κινούμενου μέσου όρου (MA), η ανέλιξη SMA μετατρέπει μια ακολουθία λευκού θορύβου  $V_i$  σε μια ακολουθία με αυτοσυσχέτιση παίρνοντας το ζυγισμένο μέσο όρο μιας σειράς από  $V_i$ . Στη διαδικασία SMA τα βάρη  $a_j$  είναι συμμετρικά σχετικά με ένα κέντρο ( $\alpha_0$ ) που αντιστοιχούν στη μεταβλητή  $V_i$ :

$$X_i = \sum_{j=-q}^q a_{|j|} V_{i-q} + \dots + a_1 V_{i-1} + a_0 V_i + a_1 V_{i+1} + \dots + a_q V_{i+q} \quad (6.18)$$

όπου το q θεωρητικά είναι άπειρο αλλά στην πραγματικότητα μπορεί να περιοριστεί σε έναν πεπερασμένο αριθμό όπως και η ακολουθία των βαρών  $a_j$  που τείνει στο μηδέν ενώ το j αυξάνεται. Επομένως, ο (Κουτσογιάννης, 2000) απέδειξε ότι τα βάρη μπορούν να προσδιοριστούν μέσω αναλυτικών τύπων και είναι όπως παρακάτω:

$$\alpha_0 = \frac{\sqrt{(2-2H)\gamma_0}}{1.5-H} \quad (6.19)$$

$$\alpha_j \cong \frac{\alpha_0}{2} [(j+1)^{H+0.5} + (j-1)^{H+0.5} - 2j^{H+0.5}] \quad (6.20)$$

με  $j > 0$ .

## 6.4 Εφαρμογή της ανέλιξης των τυχαίων διακυμάνσεων πολλαπλής κλίμακας - (A multiple time - scale fluctuation approach)

### 6.4.1 Γενικά

Στην παρούσα διπλωματική εφαρμόζεται η μέθοδος των τυχαίων διακυμάνσεων πολλαπλής κλίμακας για την παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η ανέλιξη αυτή αποτελεί συνδυασμό τριών Markov ανελιξεων AR(1) με συγκεκριμένο

αναλυτικό τύπο για την έκφραση των αυτοσυσχετίσεων αλλά και των διασπορών της κάθε ανέλιξης για υστέρηση 1. Επίσης, από το προηγούμενο κεφάλαιο έχει υπολογιστεί και αποδειχθεί μέσω κλιμακογραμμάτων που αποτελούν την πιο αξιόπιστη εκτιμήτρια ότι η συμπεριφορά του ανέμου σε ημερήσια χρονική κλίμακα έχει συντελεστή Hurst ( $H=0.75$ ) και οι αυτοσυνδιασπορές των τυποποιημένων χρονοσειρών για μηδενική υστέρηση που ουσιαστικά αποτελούν τις διασπορές των τυποποιημένων χρονοσειρών έχει υπολογιστεί μέσω των κλιμακογραμμάτων και είναι ίση με τη μονάδα ( $\gamma_0 = 1$ ). Όλοι οι προηγούμενοι υπολογισμοί είναι απαραίτητοι και χρήσιμη για την παραγωγή της ανέλιξης αυτής, αφού οι αυτοσυσχετίσεις αλλά και οι διασπορές για υστέρηση 1 δίνονται από αναλυτικές σχέσεις με μοναδική εξάρτηση από το συντελεστή Hurst.

#### 6.4.2 Εξαγωγή τριών ανελιξεων – AR(1) – Markov.

Οι υπολογισμοί έχουν γίνει σε περιβάλλον excel, με τις αναλυτικές σχέσεις των αυτοσυσχετίσεων και αυτοσυνδιασπορών που δίνονται για κάθε μια από τις τρεις ανελιξεις ξεχωριστά για υστέρηση 1. Σε συνδυασμό με τους παράγοντες  $H = 0.75$  και  $\gamma_0 = 1$  (τυποποιημένη σειρά δεδομένων) έχει εφαρμοστεί η ανέλιξη για μια θεωρητική σειρά με μέση τιμή (0) και τυπική απόκλιση (1). Αν στην ανέλιξη αυτή γίνει η εισαγωγή της μέσης τιμής της τυπικής απόκλισης του συντελεστή αυτοσυσχετίσης 1ης τάξης αλλά και του  $\gamma_0 = \text{Var}$  του εκάστοτε σταθμού το αποτέλεσμα το οποίο θα προκύψει θα είναι μια συνθετική χρονοσειρά η οποία θα έχει τα ίδια στατιστικά χαρακτηριστικά με τα αρχικά δεδομένα εισόδου. Αφού όμως η προηγούμενη διαδικασία αποτελεί άθροιση τριών Markov ανελιξεων που ακολουθούν κανονική κατανομή το εξαγόμενο αποτέλεσμα θα είναι και αυτό μια τέτοια ανέλιξη. Όμως, όπως έχει σε προηγούμενο κεφάλαιο επισημανθεί οι σειρές του ανέμου σε ημερήσια χρονική κλίμακα ακολουθούν κατανομή Weibull με παράγοντα ασυμμετρίας που είναι αρκετά διαφορετικός από μια συμμετρική κατανομή όπως είναι η κανονική. Επομένως, είναι απαραίτητος ο μετασχηματισμός της σειράς αυτής ώστε τελικά να προκύψει η απαιτούμενη συνθετική σειρά.

#### 6.4.3 Εφαρμογή της μεθόδου

Η διαδικασία των τυχαίων ανελιξεων πολλαπλής κλίμακας εφαρμόζεται για μια τυποποιημένη σειρά με μέση τιμή μηδέν και τυπική απόκλιση ίση με τη διασπορά και ίση με τη μονάδα. Οι παραμετρικές σχέσεις από τις οποίες δημιουργείται μοντέλο AR(1) είναι οι παρακάτω:

$$\mu_v = \mu_x(1-\alpha) \quad (6.21)$$

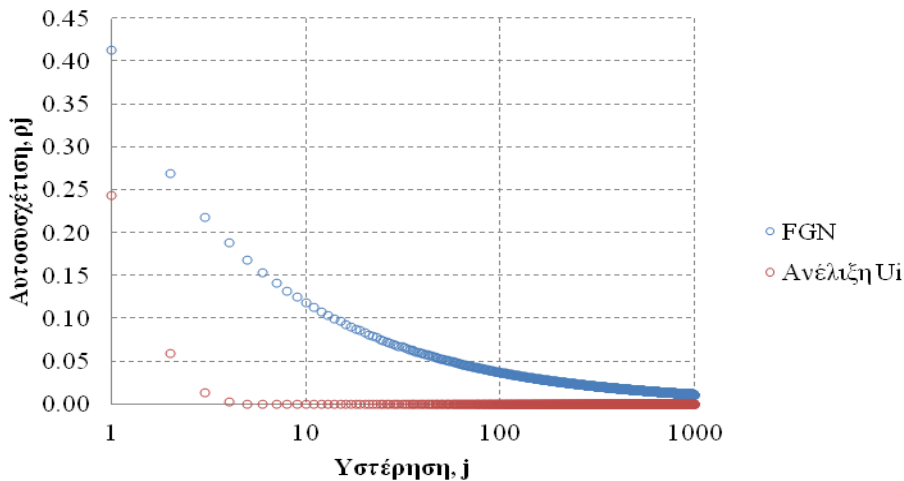
από την οποία προκύπτει η μέση τιμή του λευκού θορύβου και

$$\sigma_v^2 = \gamma_0(1-\alpha^2) \quad (6.22)$$

από την οποία προκύπτει η μέση τιμή του λευκού θορύβου.

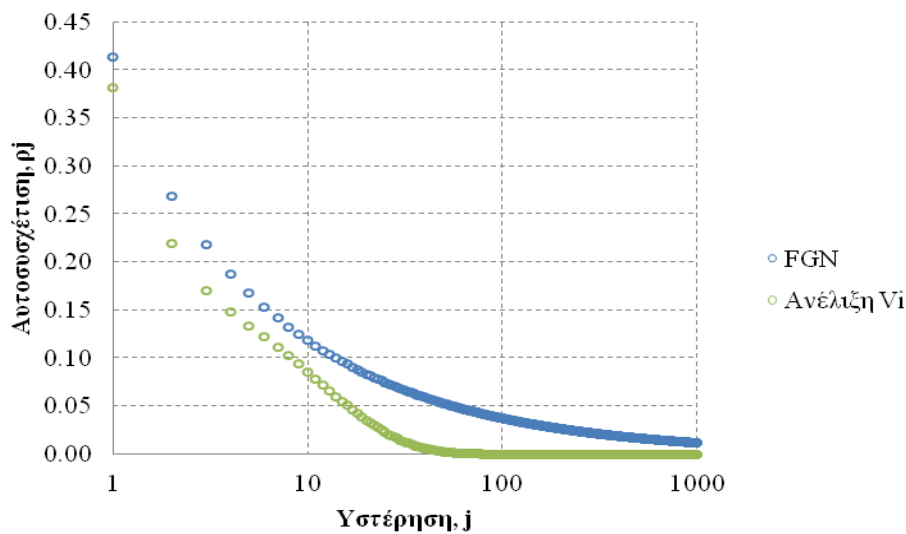
Επίσης, προκύπτουν οι συντελεστές  $c_1$  και  $c_2$  με επίλυση του συστήματος εξίσωσης της συνάρτησης αυτοσυσχετίσης του κλασματικού γκαουσιανού θορύβου με τη συνάρτηση αυτοσυσχετίσης για την τρίτη ανέλιξη  $W_i$  για υστέρηση 1 και 100 τα οποία στη συγκεκριμένη περίπτωση προκύπτουν ίσα με  $c_1 = 0.196$  και  $c_2 = 0.051$  ικανοποιώντας τους περιορισμούς ότι πρέπει να είναι θετικοί και το άθροισμά τους να μην ξεπερνάει τη μονάδα.

Αρχικά, παράγεται η ανέλιξη  $U_i$  και αποτυπώνεται η αυτοσυσχετίση της σειράς με τη σειρά της αυτοσυσχετίσης του θεωρητικού μοντέλου FGN του λευκού θορύβου.



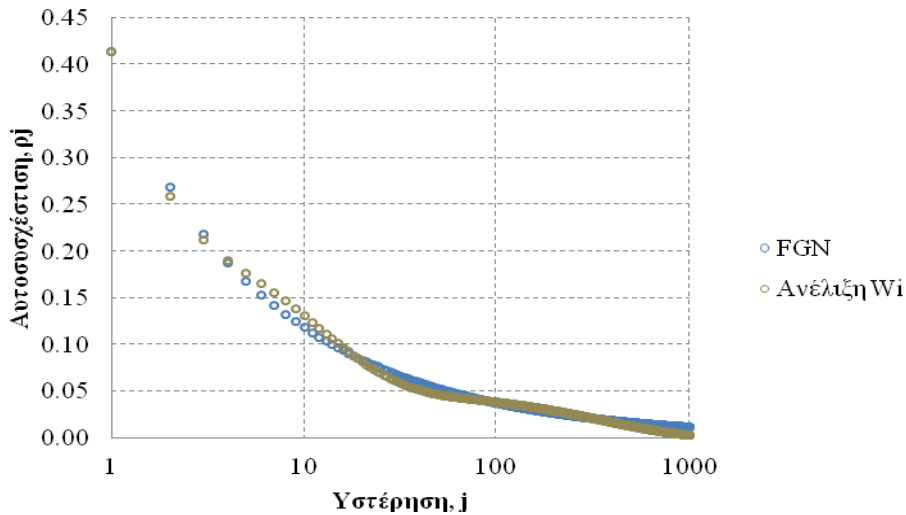
Σχήμα 6.2: Διάγραμμα που αποτυπώνεται η αυτοσυσχέτιση της θεωρητικής προσέγγισης του κλασματικού γκαουσιανού θορύβου FGN με την αυτοσυσχέτιση της ανέλιξης  $U_i$ .

Στο Σχήμα 6.2, είναι εμφανής η υψηλή αυτοσυσχέτιση του θεωρητικού κλασματικού γκαουσιανού θορύβου που διατηρείται σε υψηλό επίπεδο ακόμα και για μεγάλες υστερήσεις της τάξης του 0.10 για υστέρηση 50 ενώ αντίστοιχα οι αυτοσυσχετίσεις της ανέλιξης συγκλίνουν στο μηδέν για τις πρώτες κιάλας υστερήσεις, που από το διάγραμμα είναι εμφανές ότι μέχρι την υστέρηση 5 η αυτοσυσχέτιση έχει μηδενιστεί.



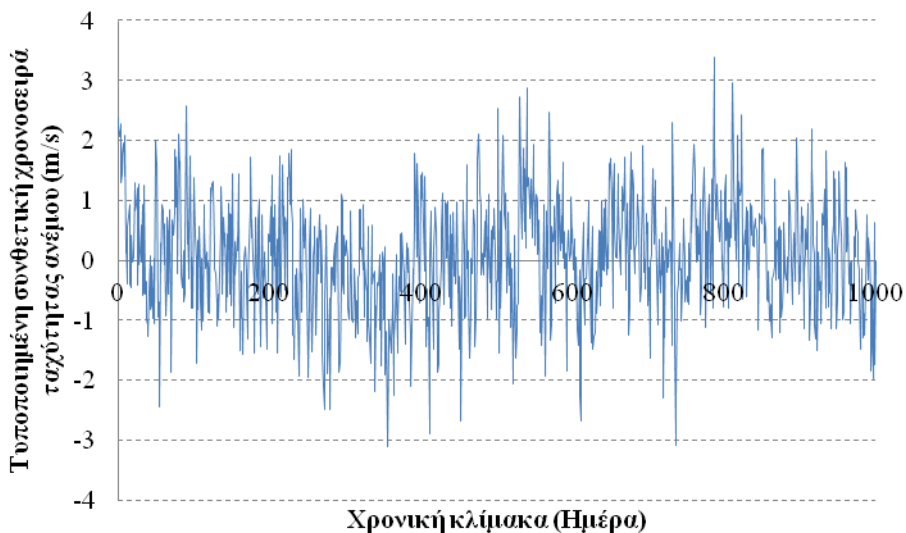
Σχήμα 6.3: Διάγραμμα που αποτυπώνεται η αυτοσυσχέτιση της θεωρητικής προσέγγισης του κλασματικού γκαουσιανού θορύβου FGN με την αυτοσυσχέτιση της ανέλιξης  $V_i$ .

Στο Σχήμα 6.3, είναι εμφανής η βελτίωση της διαδικασίας όταν προστίθεται και άλλη μια ανέλιξη στην προηγούμενη διαδικασία. Η τιμή της αυτοσυσχέτισης της σειράς αρχίζει και αυξάνεται προσπαθώντας να προσεγγίσει τη θεωρητική τιμή του κλασματικού γκαουσιανού θορύβου. Συγκλίνει στο μηδέν πολύ αργότερα από ότι προκύπτει από το Σχήμα 6.3 και συγκεκριμένα για υστέρηση 60.



Σχήμα 6.4: Διάγραμμα που αποτυπώνεται η αυτοσυσχέτιση της θεωρητικής προσέγγισης του κλασματικού γκαουσιανού θορύβου FGN με την αυτοσυσχέτιση της ανέλιξης  $W_i$ .

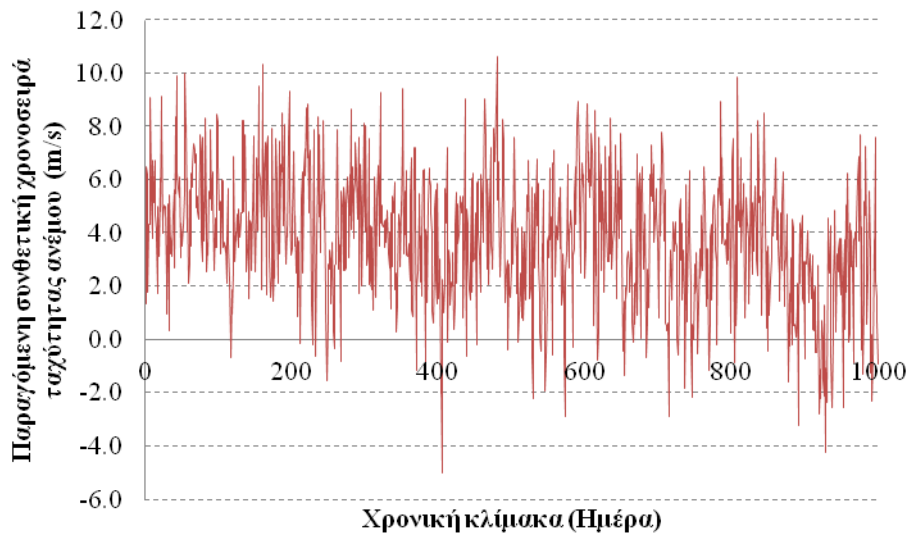
Επιπρόσθετα, αν στην προηγούμενη ανέλιξη προστεθεί μια ακόμα ανέλιξη Markov μέσω του AR(1) μοντέλου και πάλι Σχήμα 6.4, η αυτοσυσχέτιση της ανέλιξης προσεγγίζει ικανοποιητικά την αυτοσυσχέτιση με τη θεωρητική προσέγγιση του κλασματικού γκαουσιανού θορύβου. Επομένως, με την παραπάνω περιγραφόμενη ανέλιξη, μέσω μιας Markov ανέλιξης, στην οποία δεν διατηρείται η εμμονή και δεν περιλαμβάνονται στους υπολογισμούς, ο συντελεστής Hurst με κατάλληλη παραμετροποίηση και εισαγωγή πλέον του συντελεστή Hurst στις αναλυτικές σχέσεις προσεγγίζεται η αυτοσυσχέτιση του μοντέλου FGN η οποία λαμβάνει υπόψη της το ανωτέρω φαινόμενο. Η παραγόμενη συνθετική χρονοσειρά που εξάγεται με αυτή τη διαδικασία στο τυποποιημένο δείγμα των δεδομένων είναι η παρακάτω Σχήμα 6.5.



Σχήμα 6.5: Παραγόμενη συνθετική τυποποιημένη σειρά για μηδενική μέση τιμή και μοναδιαία τυπική απόκλιση με  $H = 0.75$  όπως προέκυψε από τη μοντελοποίηση μέσω των κλιμακογραμμμάτων ( $\mu_s = 0.068$ ,  $\sigma_s = 0.962$  και  $\rho_s = 0.407$ ).

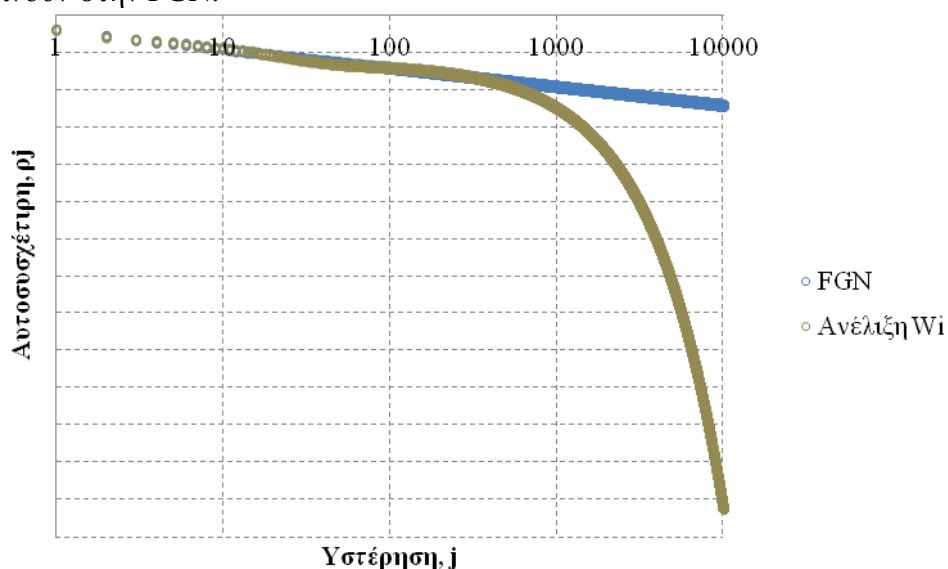
Επομένως, από τα συγκεκριμένα στατιστικά χαρακτηριστικά του σταθμού της Αλεξανδρούπολης διατηρώντας τον ίδιο συντελεστή Hurst για όλη την Ελλάδα όπως προέκυψε από την παραγόμενη ανέλιξη μοντελοποίησης ( $H = 0.75$ ) και συγκεκριμένα για

μέση τιμή 3.39 και τυπική απόκλιση 2.46 ( $\sigma_x^2 = \text{Var}[x] = 6.05$ ) προκύπτει η παρακάτω συνθετική χρονοσειρά Σχήμα 6.6. (Αφού παραμένει σταθερή η τιμή του συντελεστή Hurst τότε και οι παράγοντες  $c_1$  και  $c_2$  θα παραμένουν σταθεροί όπως προηγουμένως έχουν υπολογιστεί).



Σχήμα 6.6: Παραγόμενη συνθετική χρονοσειρά για μέση τιμή και τυπική απόκλιση αντίστοιχα 3.39 και 2.46 του σταθμού της Αλεξανδρούπολης με  $H = 0.75$  όπως προέκυψε από τη μοντελοποίηση μέσω των κλιμακογραμμάτων ( $\mu_s = 3.574$   $\sigma_s = 2.530$  και  $\rho_s = 0.395$ ).

Η ανωτέρω περιγραφόμενη ανέλιξη έχει πρακτική εφαρμογή για τις 1000 πρώτες υστερήσεις γιατί όπως φαίνεται και από το Σχήμα 6.7 μετά από την υστέρηση 1000 οι αυτοσυσχετίσεις δεν συγκλίνουν στην FGN.

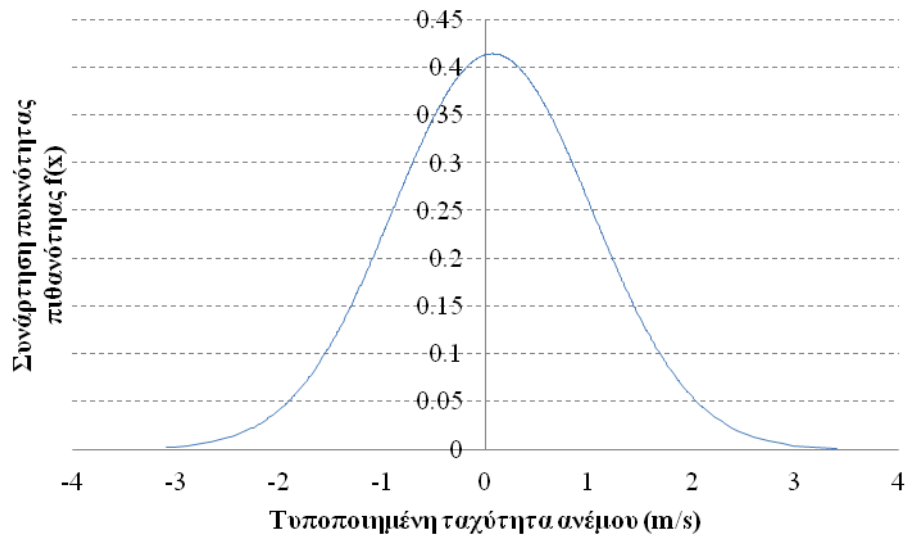


Σχήμα 6.7: Διάγραμμα με λογαριθμικό μετασχηματισμό των αξόνων που δείχνει την απόκλιση της αυτοσυσχέτισης του αθροίσματος των τριών ανελιξων με τη Markov ανέλιξη που περιγράφηκε παραπάνω από τη θεωρητική αυτοσυσχέτιση FGN για  $j > 1000$ .

#### 6.4.4 Μετασχηματισμός κανονικοποίησης

Η παραπάνω περιγραφόμενη ανέλιξη παράγεται μέσω της άθροισης τριών ανελιξων με το μοντέλο AR(1). Η παραγόμενη όμως συνθετική χρονοσειρά, μπορεί να διατηρεί τα

στατιστικά χαρακτηριστικά που της έχουμε αρχικά θέσει (μέση τιμή τυπική απόκλιση και συντελεστή αυτοσυσχέτισης πρώτης τάξης ανάλογα με το συντελεστή Hurst) αλλά όμως δεν ακολουθεί την κατανομή των δεδομένων του δείγματος. Αφού είναι ανέλιξη που προέκυψε μέσω μεθόδων Gauss, η παραγόμενη χρονοσειρά θα ακολουθεί κανονική κατανομή. Για αυτό το λόγο, πραγματοποιείται η κατασκευή του διαγράμματος πυκνότητας πιθανότητας (σ.π.π. - pdf) της κανονικής κατανομής Σχήμα 6.8, με στοιχεία τα δεδομένα που προέκυψαν από τη συνθετική χρονοσειρά και με αυτόν τον τρόπο γίνεται εμφανές ότι τα δεδομένα ακολουθούν κανονική κατανομή.



Σχήμα 6.8: Διάγραμμα με τα στοιχεία της τυποποιημένης συνθετικής χρονοσειράς που φαίνεται ότι ακολουθούν κανονική κατανομή.

Για περαιτέρω εποπτεία της κατανομής των δεδομένων γίνεται διάγραμμα Quantile - Quantile (Q - Q plot) στο οποίο αποτυπώνονται το αντίστροφο της αθροιστικής κανονικής κατανομής για τυχαία πιθανότητα και για πιθανότητα που προκύπτει από τη συνθετική σειρά που έχει παραχθεί, με μέση τιμή και τυπική απόκλιση της παραγόμενης συνθετικής χρονοσειράς και για τις δυο ομάδες των πιθανοτήτων. Το αποτέλεσμα για την κανονική κατανομή με τυχαία πιθανότητα σε Q-Q plot είναι μια ευθεία γραμμή που περνάει από την αρχή των αξόνων ( $y = x$ ) και σε περίπτωση που τα δεδομένα της χρονοσειράς ακολουθούν ή προσεγγίζουν την ευθεία αυτή τότε σημαίνει ότι ακολουθούν κανονική κατανομή και αυτά.

Όμως όπως προηγουμένως, έχει αναφερθεί η κατανομή των δεδομένων του ανέμου σε ημερήσια χρονική κλίμακα είναι η Weibull. Επομένως, θα πρέπει να ακολουθηθεί μια διαδικασία μετασχηματισμού των δεδομένων σε κανονική κατανομή που ονομάζεται κανονικοποίηση (normalized) και επιτυγχάνεται μέσω αναλυτικών σχέσεων μετασχηματισμού. Σκοπός των μετασχηματισμών αυτών είναι η κανονικοποίηση οποιασδήποτε κατανομής στην κανονική κατανομή. Οι μετασχηματισμοί που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία είναι οι μετασχηματισμοί που έχουν εισαχθεί από τις εργασίες (Koutsoyiannis *et al.*, 2008, 2011 · Papalexiou *et al.*, 2011· Box - Cox, 1964) και είναι μετασχηματισμοί οι οποίοι κανονικοποιούν τα δεδομένα με σκοπό την εύρεση των παραμέτρων των τύπων του μετασχηματισμοί. Αναλυτικά οι μετασχηματισμοί δίνονται παρακάτω:

$$Z = g(x) = \lambda \left[ 1 + \left( \frac{x}{\nu} \right)^{-\theta} \right] \sqrt{\left( 1 + \frac{1}{\kappa} \right) \ln \left[ 1 + \kappa \left( \frac{x}{\lambda} \right)^2 \right]} \quad (6.23)$$

που είναι μετασχηματισμός που χρησιμοποιείται όταν τα δεδομένα έχουν κατανομή με ουρά που ακολουθεί τάση δύναμης (power type tail). Οι παράμετροι  $\theta$  και  $\kappa$  είναι αδιαστατοποιημένοι ενώ οι παράμετροι  $\lambda$  και  $\nu$  είναι παράμετροι με διαστάσεις ίδιες με αυτές της μεταβλητής  $x$  με τέτοιο τρόπο ώστε οι διαστάσεις του μετασχηματισμού  $Z(g(x))$  να ταυτίζονται με αυτές της μεταβλητής  $x$ . Αυτός ο μετασχηματισμός είναι μια διαφοροποίηση από το (Koutsoyiannis *et al.*, 2008) που προστέθηκε και ο όρος  $\left[1 + \left(\frac{x}{\nu}\right)^{-\theta}\right]$  από τους (Papalexiou *et al.*, 2007) που σκοπό έχει να προσαρμόζεται καλά και στην αριστερή ουρά της κατανομής. Ο επόμενος μετασχηματισμός έχει λιγότερες παραμέτρους και συγκεκριμένα τρεις που συνήθως η μια παράμετρος μπορεί να παραληφθεί με αποτέλεσμα να είναι περισσότερο απλός στη χρήση του:

$$Z = g(X) - g(0); g(x) = c + \operatorname{sgn}(x - c)\lambda\sqrt{\left(1 + \frac{1}{\kappa}\right)\ln\left[\left(1 + \kappa\left(\frac{x-c}{\lambda}\right)^2\right)\right]} \quad (6.24)$$

όπου η παράμετρος  $\kappa$  είναι αδιαστατοποιημένη και αφορά στην ουρά της κατανομής η παράμετρος  $\lambda$  αποτελεί μια παράμετρο κλίμακας με μονάδες ίδιες με αυτές της μεταβλητής  $x$  και μια παράμετρος μετασχηματισμού  $c$  με τις ίδιες μονάδες με αυτές της μεταβλητής  $x$ . Επιπρόσθετα, ένας επιπλέον μετασχηματισμός (Papalexiou *et al.*, 2007) που χρησιμοποιείται είναι ο παρακάτω:

$$Z(t) = [aX(t)^{-\zeta} + \beta]\left(\gamma + \sqrt{\left(1 + \frac{1}{\delta}\right)\ln\{1 + \delta[X(t) - \gamma]^2\}}\right) \quad (6.25)$$

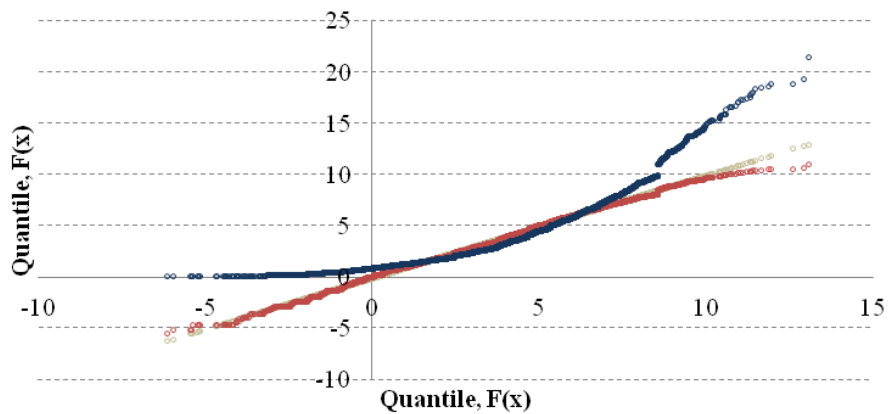
όπου οι μεταβλητές  $Z(t)$  και  $X(t)$  αποτελούν τα μετασχηματισμένα και τα εμπειρικά δεδομένα αντίστοιχα και επιπλέον ισχύουν οι περιορισμοί:

$Z \rightarrow N[0,1] \rightarrow (-\infty, \infty)$  και οι παράμετροι που πρέπει να υπολογιστούν:

$$\{\alpha, \beta, \delta, \zeta\} \in (0, \infty) \text{ και } \gamma \in (-\infty, 0)$$

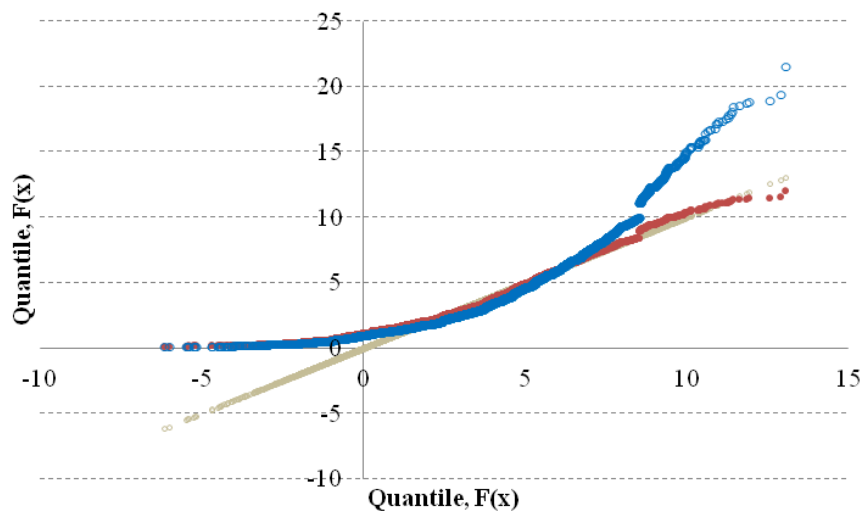
Σε όλες τις περιπτώσεις οι τιμές των παραμέτρων των ανωτέρω μετασχηματισμών γίνονται σε περιβάλλον excel με τη βοήθεια της επιλογής του επιλυτή (solver) όπου μέσω του τετραγώνου της διαφοράς, ανάμεσα στα δεδομένα του εκάστοτε σταθμού μέσω του μετασχηματισμού με τυχαίες αρχικές παραμέτρους και στην θεωρητική αντίστροφη κανονική κατανομή, η διαφορά επιδιώκουμε να ελαχιστοποιηθεί. Το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι τα δεδομένα να προσαρμοστούν στην κανονική κατανομή (κανονικοποίηση). Επομένως, για το σταθμό της Αλεξανδρούπολης, εφαρμόζονται οι προαναφερθέντες μετασχηματισμοί για την αντίστροφη της κανονικής κατανομής με μέση τιμή και τυπική απόκλιση του σταθμού της Αλεξανδρούπολης. Η εφαρμογή των δεδομένων του συγκεκριμένου σταθμού γίνεται για όλους του προαναφερθέντες μετασχηματισμούς και παρακάτω στα σχήματα 6.9-6.13, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της κανονικοποίησης των δεδομένων.



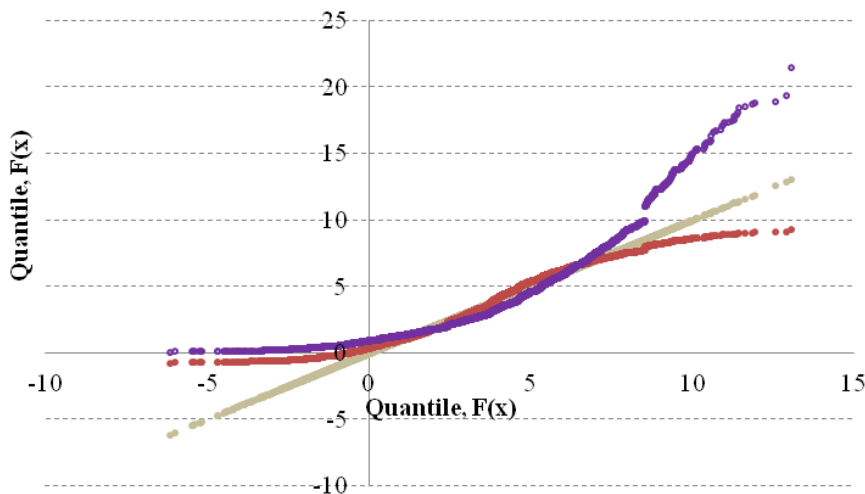


- Θεωρητική αθροιστική κανονική κατανομή
- Κανονικοποιημένο δείγμα
- Εμπειρικά δεδομένα

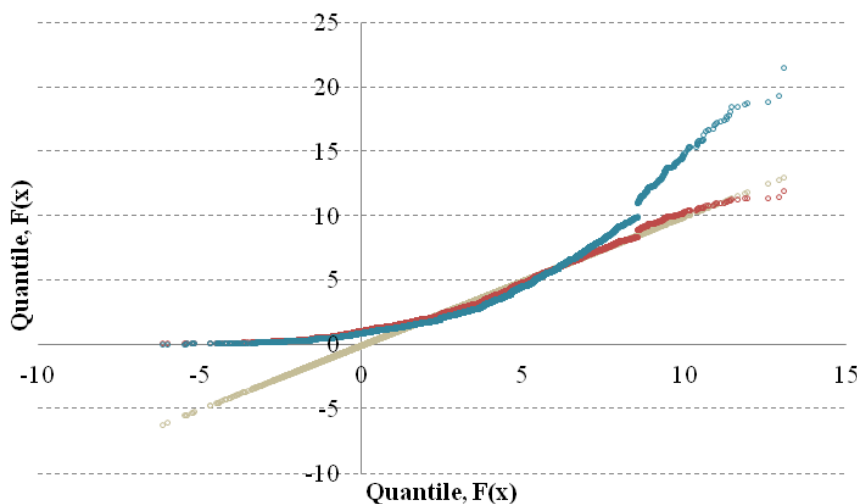
Σχήμα 6.9: Διάγραμμα Q-Q plot στο οποίο αποτυπώνονται η θεωρητική αθροιστική κανονική κατανομή τα εμπειρικά δεδομένα και η προσαρμογή των δεδομένων μετά το μετασχηματισμό (6.25) (Papalexiou et al.2011) με παραμέτρους ( $\alpha=2.4516$ ,  $\beta=3.0029$ ,  $\gamma=-3.30133$ ,  $\delta=0.10703$  και  $\zeta=0.61394$ ).



Σχήμα 6.10: Διάγραμμα Q-Q plot στο οποίο αποτυπώνονται η θεωρητική αθροιστική κανονική κατανομή τα εμπειρικά δεδομένα και η προσαρμογή των δεδομένων μετά το μετασχηματισμό (6.23) (Koutsoyiannis et. al., 2011) με παραμέτρους ( $\lambda=4.073423$ ,  $\nu=0.000001$ ,  $\theta=1.41506$  και  $\kappa=0.404013$ ).



Σχήμα 6.11: Διάγραμμα Q-Q plot στο οποίο αποτυπώνονται η θεωρητική αθροιστική κανονική κατανομή τα εμπειρικά δεδομένα και η προσαρμογή των δεδομένων μετά το μετασχηματισμό (6.24) (Koutsoyiannis et al. 2008) με παραμέτρους ( $c=1.828046$ ,  $\lambda=2.858574$  και  $\kappa=1.891051$ ).

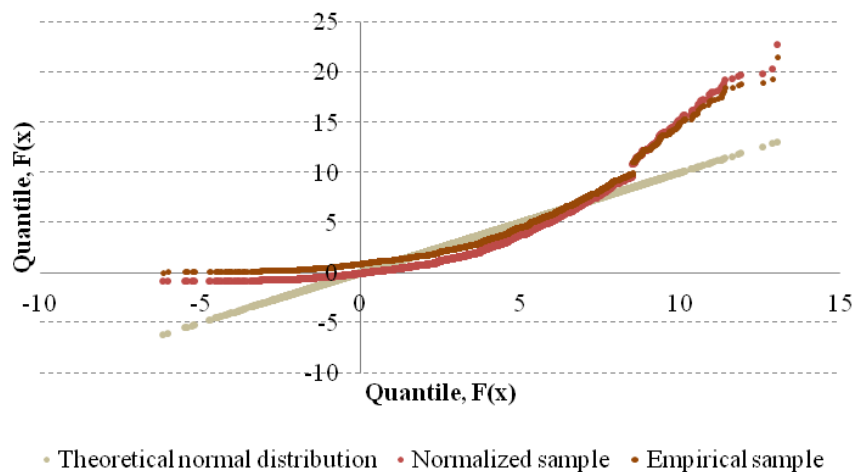


Σχήμα 6.12: Διάγραμμα Q-Q plot στο οποίο αποτυπώνονται η θεωρητική αθροιστική κανονική κατανομή τα εμπειρικά δεδομένα και η προσαρμογή των δεδομένων μετά το μετασχηματισμό (6.24) (Koutsoyiannis et al. 2008) με παραμέτρους ( $c=0$  (default),  $\lambda=4.073453$  και  $\kappa=0.4043036$ ).

Επιπρόσθετα ο μετασχηματισμός (Box-Cox, 1964) δείχνει ότι δεν προσαρμόζεται καθόλου καλά στα εμπειρικά δεδομένα, αφού η μοναδική παράμετρος που διαθέτει, αποτελεί περιοριστικό παράγοντα προσαρμογής στο δείγμα:

$$y_i^\lambda = \begin{cases} (y_i^\lambda - 1)/\lambda; & \lambda \neq 0 \\ \log(y_i); & \lambda = 0 \end{cases} \quad (6.26)$$

Τα αποτελέσματα και οι παράμετροι υπολογισμού φαίνονται παρακάτω:

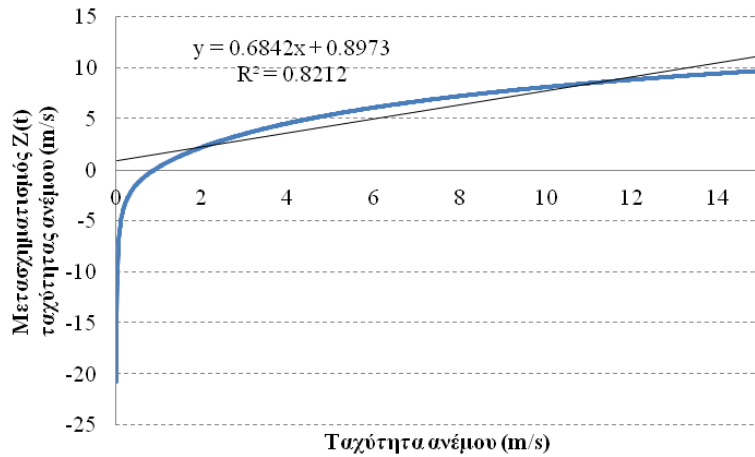


Σχήμα 6.13: Διάγραμμα Q-Q plot στο οποίο αποτυπώνονται η θεωρητική αθροιστική κανονική κατανομή τα εμπειρικά δεδομένα και η προσαρμογή των δεδομένων μετά το μετασχηματισμό (6.26) (Box-Cox, 1964) με παραμέτρους ( $\lambda=1.04699$ ).

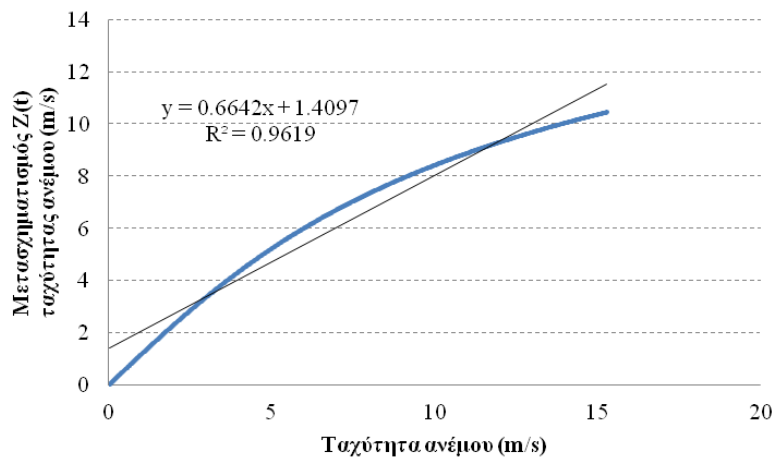
Επομένως, αφού έγινε η κανονικοποίηση (προσαρμογή των εμπειρικών δεδομένων στην αντίστροφη αθροιστική κανονική κατανομή) θα πρέπει να ακολουθήσει η διαδικασία αποκανονικοποίησης της συνθετικής χρονοσειράς που έχουμε ήδη κατασκευάσει μέσω του αντίστροφου μετασχηματισμού της κανονικοποίησης  $Z(g(x))^{-1}$ . Κατά την προσαρμογή στην αθροιστική κανονική κατανομή, έγινε ο υπολογισμός των παραμέτρων του μετασχηματισμού της κανονικοποίησης οι οποίοι θα χρησιμεύσουν κατά την αντίστροφη διαδικασία. Λόγω των παραμέτρων αλλά και της αναλυτικής έκφρασης των μετασχηματισμών που αναφέρθηκαν, δεν μπορεί να δοθεί μια αναλυτική έκφραση του αντίστροφου μετασχηματισμού, αλλά μπορεί να δοθεί μια προσεγγιστική εκτίμηση του αντίστροφου μετασχηματισμού, μέσω προσαρμογής και γραμμικής παρεμβολής, όπως αναλυτικά αναφέρεται παρακάτω. Από το παραπάνω γεγονός προκύπτει ότι η αντιστροφή του μετασχηματισμού, μπορεί να πραγματοποιηθεί με τα δεδομένα της συνθετικής σειράς με μια διττή διαδικασία ώστε να υπολογιστεί πλέον η νέα αποκανονικοποιημένη. Αρχικά, θεωρείται εξαρτημένη μεταβλητή η  $x$ , υποθέτονται τιμές για τη μεταβλητή αυτή και υπολογίζεται η τιμή του  $Z(g(x))$ . Σε επόμενο βήμα, αντιστρέφεται η λογική της διαδικασίας, θεωρούμε εξαρτημένη τη μεταβλητή  $Z(g(x))$  και με τις τιμές της συνθετικής χρονοσειράς που έχουμε αναπαραγάγει, υπολογίζουμε τον αντίστροφο μετασχηματισμό, μέσα από την προσεγγιστική σχέση, που από το αρχικό βήμα έχουμε αναπαραγάγει. Επομένως, για την προσέγγιση των τύπων των αντίστροφων μετασχηματισμών που δεν έχουν αναλυτική λύση ακολουθείται η ανωτέρω διαδικασία που συνίσταται στα παρακάτω δυο βασικά βήματα:

- (1) υποθέτεται μια σειρά από  $x(t)$  (τυχαίων συνεχόμενων τιμών) και επιλύεται ο ευθύς τύπος για την εύρεση του  $Z(t)$ , όπου από το γραμμικό μετασχηματισμό των δυο μεταβλητών προκύπτει μια γραμμική σχέση.
- (2) με δεδομένα την προκύπτουσα γραμμική σχέση από το προηγούμενο βήμα (1), θεωρείται εξαρτημένη μεταβλητή η  $x(t)$  και με δεδομένα το  $Z(t)$  από την παραγόμενη συνθετική χρονοσειρά υπολογίζεται το  $x(t)$  το οποίο και αποτελεί την αποκανονικοποιημένη συνθετική χρονοσειρά.

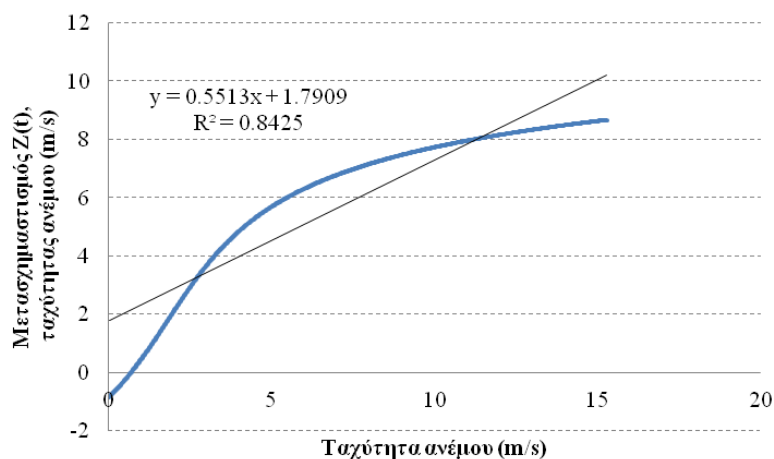
Τα αποτελέσματα της γραμμικής παλινδρόμησης για κάθε ένα μετασχηματισμό παρουσιάζονται παρακάτω σχήματα 6.14-6.17:



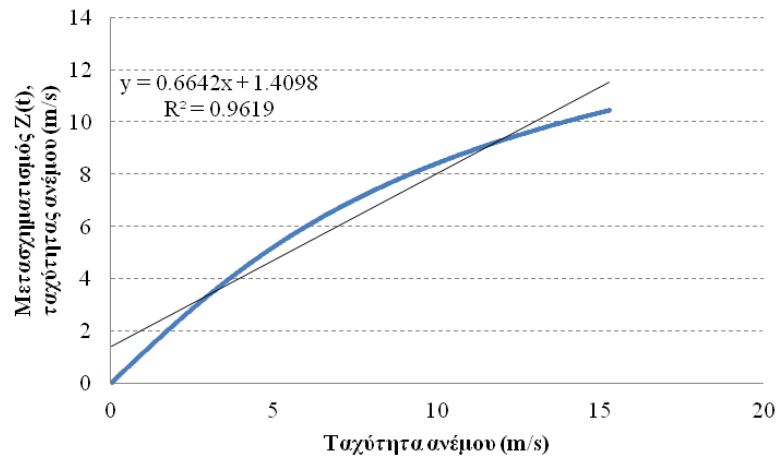
Σχήμα 6.14: Γραμμική παλινδρόμηση, ανάμεσα στις μεταβλητές  $x(t)$  και  $Z(t)$  θεωρώντας τη  $Z(t)$  εξαρτημένη μεταβλητή και υποθέτοντας τιμές για τη μεταβλητή  $X(t)$  για τον μετασχηματισμό (6.25).



Σχήμα 6.15: Γραμμική παλινδρόμηση, ανάμεσα στις μεταβλητές  $x(t)$  και  $Z(t)$  θεωρώντας τη  $Z(t)$  εξαρτημένη μεταβλητή και υποθέτοντας τιμές για τη μεταβλητή  $X(t)$  για τον μετασχηματισμό (6.23).

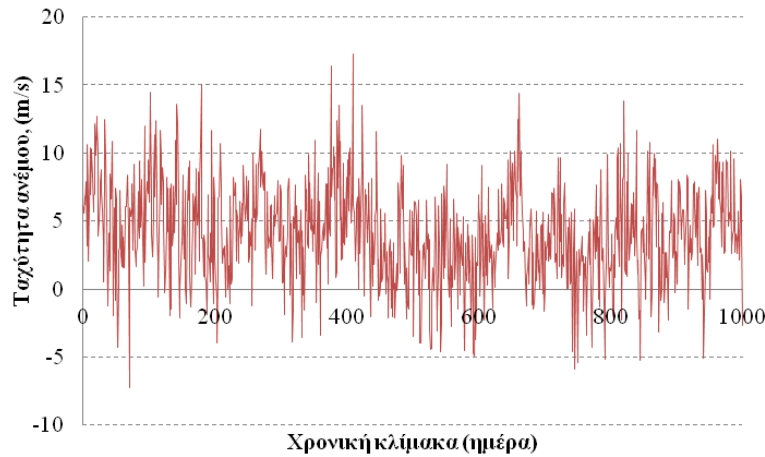


Σχήμα 6.16: Γραμμική παλινδρόμηση, ανάμεσα στις μεταβλητές  $x(t)$  και  $Z(t)$  θεωρώντας τη  $Z(t)$  εξαρτημένη μεταβλητή και υποθέτοντας τιμές για τη μεταβλητή  $X(t)$  για τον μετασχηματισμό (6.23).

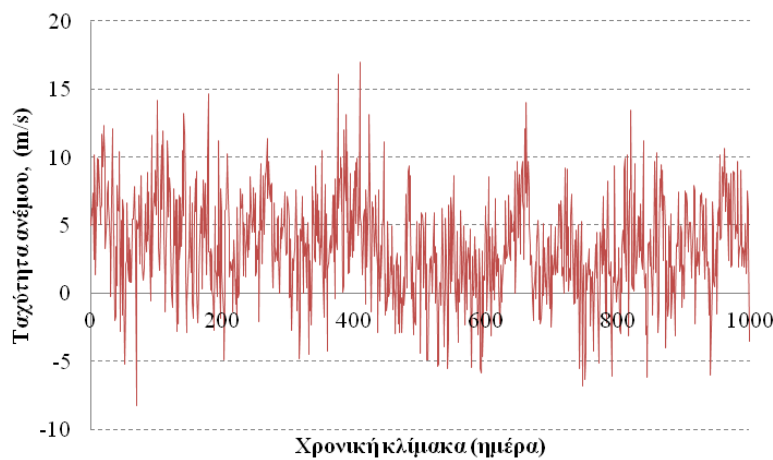


Σχήμα 6.17: Γραμμική παλινδρόμηση, στις μεταβλητές  $x(t)$  και  $Z(t)$  θεωρώντας τη  $Z(t)$  εξαρτημένη μεταβλητή και υποθέτοντας τιμές για τη μεταβλητή  $X(t)$  για τον μετασχηματισμό (6.24).

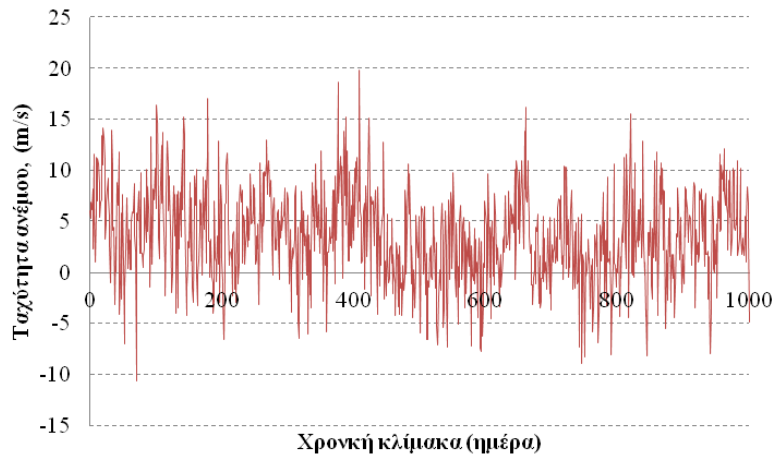
Η παραγόμενη συνθετική (αποκανονικοποιημένη) σειρά για την ίδια παραγόμενη συνθετική χρονοσειρά με την προσαρμογή τριών AR(1) μοντέλων με κάθε μια από τις ανωτέρω αναφερόμενες μεθόδους μετασχηματισμού παρατίθενται στα παρακάτω σχήματα 6.18-6.22:



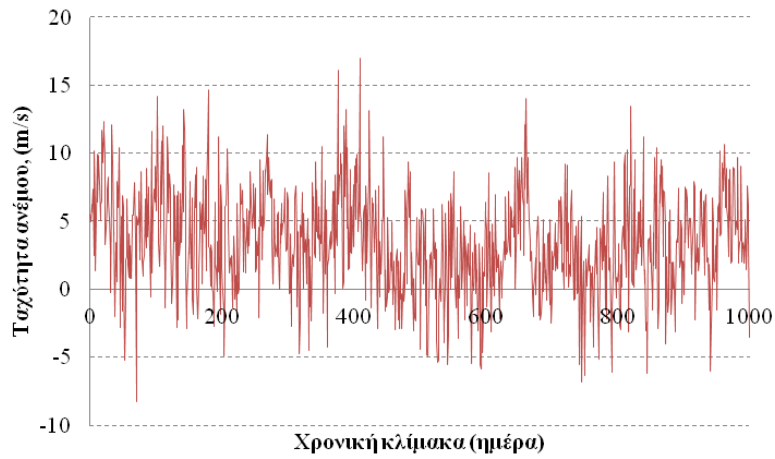
Σχήμα 6.18: Παραγωγή συνθετικής αποκανονικοποιημένης χρονοσειράς χρησιμοποιώντας τον αντίστροφο μετασχηματισμό (Papalexίου et al., 2011).



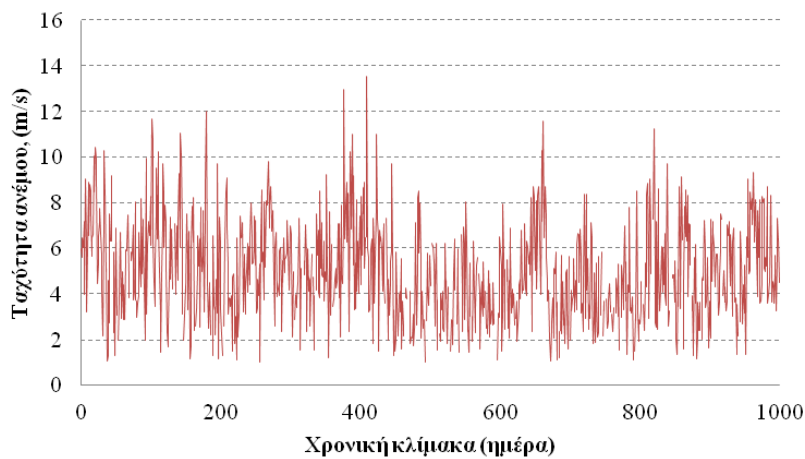
Σχήμα 6.19: Παραγωγή συνθετικής αποκανονικοποιημένης χρονοσειράς χρησιμοποιώντας τον αντίστροφο μετασχηματισμό (Koutsoyiannis et al., 2011).



Σχήμα 6.20: Παραγωγή συνθετικής αποκανονικοποιημένης χρονοσειράς χρησιμοποιώντας τον αντίστροφο μετασχηματισμό (Koutsoyiannis *et al.*, 2008).



Σχήμα 6.21: Παραγωγή συνθετικής αποκανονικοποιημένης χρονοσειράς χρησιμοποιώντας τον αντίστροφο μετασχηματισμό (Koutsoyiannis *et al.*, 2008).

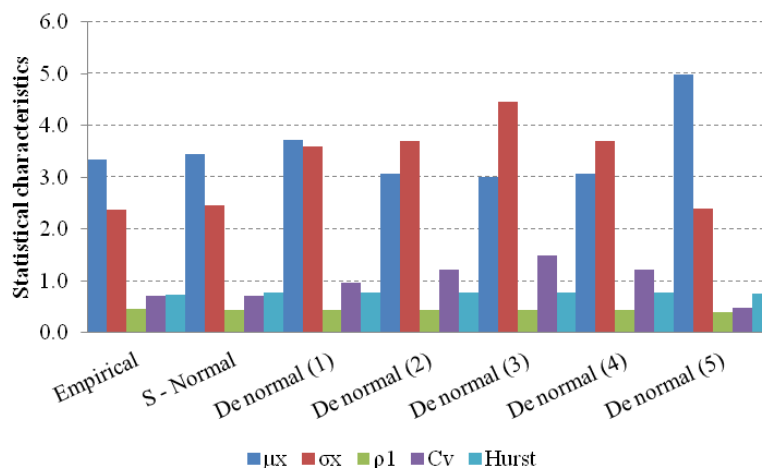


Σχήμα 6.22: Παραγωγή συνθετικής αποκανονικοποιημένης χρονοσειράς χρησιμοποιώντας τον αντίστροφο μετασχηματισμό (Box - Cox, 1964.).

Τα στατιστικά χαρακτηριστικά των παραγόμενων συνθετικών χρονοσειρών, σχετικά με την αρχική χρονοσειρά και τη συνθετική χρονοσειρά πριν από την αποκανονικοποίηση εμφανίζονται στο παρακάτω Σχήμα 6.23 και συγκεντρώνονται οι τιμές στον Πίνακα 6.1:

Πίνακας 6.1: Στατιστικά χαρακτηριστικά της αρχικής χρονοσειράς της κανονικοποιημένης συνθετικής και των αποκανονικοποιημένων συνθετικών χρονοσειρών με τις προαναφερθείσες μεθόδους μετασχηματισμού.

	$\mu_x$	$\sigma_x$	$\rho_1$	$C_v$	Hurst
Empirical	3.34	2.36	0.46	0.71	0.72
S - Normal	3.45	2.46	0.43	0.71	0.76
De normal (1)	3.73	3.59	0.43	0.96	0.76
De normal (2)	3.07	3.70	0.43	1.21	0.77
De normal (3)	3.00	4.46	0.43	1.48	0.77
De normal (4)	3.07	3.70	0.43	1.21	0.77
De normal (5)	4.98	2.40	0.39	0.48	0.75



Σχήμα 6.23: Ραβδόγραμμα με τα στατιστικά χαρακτηριστικά της εμπειρικής χρονοσειράς της συνθετικής και των παραγόμενων αποκανονικοποιημένων με τις προαναφερθείσες μεθόδους.

Από το Σχήμα 6.23, προκύπτει ότι ο μετασχηματισμός ο οποίος διατηρεί καλύτερα τα στατιστικά χαρακτηριστικά της παραγόμενης αποκανονικοποιημένης συνθετικής χρονοσειράς είναι ο μετασχηματισμός που προτάθηκε από τον (Papalexίου et al., 2011), (De normal (1)), ο οποίος προσαρμόζεται με αρκετή ακρίβεια στο αρχικό δείγμα, με παραμέτρους προσαρμογής στην αριστερή αλλά και στη δεξιά ουρά του δείγματος των εμπειρικών δεδομένων.





## 7 Συμπεράσματα

---

Από τη στατιστική-στοχαστική επεξεργασία της ταχύτητας του ανέμου σε ημερήσιο αλλά και σε μηνιαίο χρονικό βήμα, αλλά και από την στατιστική-στοχαστική επεξεργασία της ριπής και της διεύθυνσης του ανέμου στην Ελλάδα, προκύπτουν κάποια χρήσιμα συμπεράσματα:

(1) Οι τιμές της μέσης ετήσιας ταχύτητας του ανέμου κυμαίνονται από 0.5 έως 4.5 m/s στα δυτικά παράλια της Ελλάδος και συγκεκριμένα στις περιοχές της βορειοδυτικής Ελλάδος οι τιμές κυμαίνονται από 0.5 έως 2.5 m/s. Ο άνεμος κατευθυνόμενος προς τα νοτιοδυτικά παράλια της Πελοποννήσου επιταχύνεται, με τις τιμές να φτάνουν έως και τα 4.5 m/s. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι ο άνεμος, κατά την πορεία του σε αυτήν την κατεύθυνση, δεν συναντά κάποιο εμπόδιο από έντονο ανάγλυφο ή ορογραφία, με αποτέλεσμα να επιταχύνεται, με τιμές να φτάνουν μέχρι και τα 5 m/s στα δυτικά παράλια της Κρήτης. Όσο ο άνεμος διεισδύει στα εσωτερικά της ενδοχώρας η ταχύτητά του μειώνεται λόγω έντονου ηπειρωτικού αναγλύφου, με τιμές να φτάνουν μέχρι τα 3 m/s σε συγκεκριμένες περιοχές της κεντρικής Ελλάδος και το μέτωπο επιταχύνεται για μια ακόμα φορά κατευθυνόμενο προς τα δυτικά παράλια της Μ.Ασίας, αφού δεν υπάρχει κανένα εμπόδιο να ανακόψει την επιταχυνόμενη πορεία του και φτάνει τις ταχύτητες των 8.0-9.0 m/s στην περιοχή του κεντρικού Αιγαίου και συγκεκριμένα στο νησί της Νάξου με τις ταχύτητες του ίδιου εύρους να εμφανίζονται και στα νησιά Σαντορίνη, Μύκονος, Κήθυρα και Κάρπαθο. Σε εποχιακή αλλά και σε μηνιαία χρονική κλίμακα εμφανίζεται η ίδια συμπεριφορά, με τις ίδιες περιοχές μεγίστων αλλά με χαμηλότερο εύρος ταχυτήτων. Οι εποχές που εμφανίζονται οι υψηλότερες τιμές του ανέμου είναι ο χειμώνας, αλλά και το καλοκαίρι, που την περίοδο του Αυγούστου στα νησιά του κεντρικού Αιγαίου κυρίως, είναι έντονο το φαινόμενο των μελτεμιών.

(2) Η τυπική απόκλιση κυμαίνεται από τιμές 0.33 έως 2.76 m/s για όλους τους υπό εξέταση σταθμούς, με τις μέγιστες τιμές να εμφανίζονται, κυρίως στα νησιά, με εύρος από 1.00 έως 2.76 m/s αλλά και στους παραθαλάσσιους σταθμούς. Οι υπόλοιποι σταθμοί εμφανίζουν πολύ λιγότερες διακυμάνσεις της ταχύτητας σε μηνιαία αλλά και σε ετήσια χρονική κλίμακα. Το γεγονός αυτό οφείλεται κυρίως στο έντονο ηπειρωτικό ανάγλυφο που εμφανίζουν οι ηπειρωτικοί σταθμοί στον Ελλαδικό χώρο, με τον άνεμο να εμποδίζεται από την ορογραφία και από τις ψηλές οροσειρές της δυτικής Ελλάδος. Παράλληλα, στην περιοχή του Αιγαίου και ιδιαίτερα στην περιοχή του κεντρικού Αιγαίου και δη στην νησιωτική χώρα, ο άνεμος δεν παρεμποδίζεται από εμπόδια κατά τη διέλευσή του, με αποτέλεσμα να μπορεί να αποκτήσει πολύ υψηλές τιμές και επομένως οι διακυμάνσεις να παρουσιάζονται με εντονότερο τρόπο. Οι μέγιστες τιμές της τυπικής απόκλισης ακολουθούν τις τιμές της ταχύτητας του ανέμου, γεγονός που δικαιολογεί ότι οι μεγαλύτερες τιμές ενός δείγματος παρουσιάζουν και μεγαλύτερη διασπορά. Το μικρό σχετικά εύρος των διασπορών που παρουσιάζονται σε όλους τους εξεταζόμενους σταθμούς σε όλη την έκταση του Ελλαδικού χώρου, είναι αρκετά βοηθητικό για την εύρεση μιας ενιαίας τιμής για όλη την έκταση ενδιαφέροντος και για την εξαγωγή ενός ενιαίου μοντέλου.

(3) Από την υπολογισμένη θεωρητική παραγόμενη ισχύ του κάθε σταθμού προκύπτει ότι οι περιοχές που εμφανίζουν τις υψηλότερες ταχύτητες είναι και οι περιοχές που έχουν και το υψηλότερο θεωρητικά παραγόμενο ενεργειακό αιολικό δυναμικό. Μια μέση παραγόμενη θεωρητική αιολική ισχύς για τον Ελλαδικό χώρο προκύπτει περίπου 700 - 800 W/m<sup>2</sup>, με τις

υψηλότερες τιμές να εμφανίζονται στα νησιά του κεντρικού Αιγαίου και νοτιότερα στην περιοχή της Ρόδου, με τις τιμές να φτάνουν έως και  $1300 \text{ W/m}^2$  ενώ οι περιοχές που βρίσκονται στην κεντρική και βόρεια Ελλάδα παρουσιάζουν εύρος τιμών το οποίο κυμαίνεται από  $600 \text{ W/m}^2$  και χαμηλότερα. Επίσης, υπάρχουν και περιοχές που παρουσιάζουν πολύ φτωχό ενεργειακό δυναμικό της τάξης των  $50 \text{ W/m}^2$  και περικλείουν όλη την περιοχή της κεντρικής - βόρειας και δυτικής Ελλάδας, που ταυτίζεται για μια ακόμα φορά με τις περιοχές που εμφανίζονται χαμηλές ταχύτητες.

(4) Από την προσαρμογή της κατανομής Weibull στα μηνιαία (αλλά και στα ημερήσια δείγματα μετρήσεων) προέκυψε ότι η μέση ετήσια τιμή της παραμέτρου σχήματος  $k$  κυμαίνεται από 0.12 έως 0.64, με το εύρος των μέσων τιμών να κυμαίνεται από 0.01 έως 0.75. Η μέγιστη, μέση ετήσια τιμή εμφανίζεται στο νησί της Σαντορίνης (0.64), ενώ οι περιοχές που έχουν εύρος από 0.3 έως 0.6 είναι η Κοζάνη, τα Ιωάννινα, η Φλώρινα, η Λάρισα, το Τυμπάκι, η Κύμη, οι Σέδες, ο Άραξος, η Καστοριά, τα Χανιά, το Ρέθυμνο, οι Σέρρες και η Σκύρος. Οι υπόλοιποι σταθμοί εμφανίζουν τιμές κάτω από 0.30. Εμφανίζεται ανομοιογένεια όσον αφορά τις τιμές της παραμέτρου  $k$  με τη διαφοροποίηση να συνίσταται κυρίως ανάμεσα στην ηπειρωτική και τη νησιωτική χώρα, με τις μεγαλύτερες τιμές να εμφανίζονται κυρίως στην ηπειρωτική χώρα, λόγω του έντονου γεωμορφολογικού αναγλύφου, με τις υψηλές τιμές να συγκεντρώνονται στην βόρεια και βόρειο ανατολική χώρα, γεγονός που ενδεχομένως να δικαιολογείται και από το μέτωπο του ανέμου που έχει κατεύθυνση από τα δυτικά προς τα ανατολικά. Η εποχιακή αυτή συμπεριφορά της παραμέτρου σχήματος ( $k$ ) της Weibull παραμένει χωρικά η ίδια, αλλά κατά την εποχή του καλοκαιριού εμφανίζεται μεγαλύτερο εύρος, με τις τιμές να φτάνουν έως και 0.80, γεγονός που δικαιολογείται από την έντονη διασπορά του ανέμου την εποχή εκείνη και από την επίδραση των μετεωρίων, αφού οι υψηλότερες τιμές της παραμέτρου εμφανίζονται στα νησιά του κεντρικού Αιγαίου. Οι υψηλότερες τιμές της παραμέτρου σχήματος, εκφράζει την έντονη διαλείπουσα συμπεριφορά του ανέμου, στις περιοχές που εμφανίζεται για τη συγκεκριμένη περίοδο αναφοράς.

(5) Η μεγαλύτερη τιμή της παραμέτρου κλίμακας ( $c$ , m/s), της κατανομής Weibull, εμφανίζεται στο νησί της Σαντορίνης (3.0), ενώ στις περιοχές Μήλος, Κάρπαθος, Νάξος, Σκύρος, Κύθηρα, Τυμπάκι, Ιεράπετρα, Κύμη, Λήμνος, Κοζάνη, Μύκονος, Ρέθυμνο, Κως, Μυτιλήνη, Φλώρινα, Μεθώνη, Ρόδος, Σέρρες, Ζάκυνθος και Λήμνος, το εύρος της παραμέτρου είναι από 1.1 έως 3.0. Στους υπόλοιπους σταθμούς οι τιμές της παραμέτρου κλίμακας, κυμαίνονται από 0.1 έως 1.0. Για την παράμετρο αυτή, οι υψηλές τιμές εμφανίζονται συμπληρωματικά, από ότι στην παράμετρο σχήματος ( $k$ ), με τις υψηλές τιμές να εμφανίζονται στα νησιά του κεντρικού Αιγαίου και ιδιαίτερα την εποχή του καλοκαιριού. Το εύρος των υψηλών τιμών αυξάνεται χωρικά και καταλαμβάνει περισσότερη από τη διπλάσια έκταση των υπολοίπων εποχών. Γενικότερα, η συμπεριφορά της παραμέτρου κλίμακας παραμένει σταθερή τις υπόλοιπες εποχές.

(6) Οι παράμετροι σχήματος και κλίμακας της κατανομής Weibull υπολογίστηκαν με 4 διαφορετικές μεθόδους: (α) L-ροπές (β) μέγιστη πιθανοφάνεια (γ) λογαριθμικά μετασχηματισμένες ροπές και (δ) γραφικά και αποδείχθηκε ότι η μέθοδος της μέγιστης πιθανοφάνειας (MLE) δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά στην προσαρμογή στο εμπειρικό δείγμα, μέσω του τετραγώνου των διαφορών ανάμεσα στην προσαρμοσμένη κατανομή, με την εύρεση των παραμέτρων από τις προαναφερόμενες μεθόδους και στην εμπειρική κατανομή του δείγματος των δεδομένων. Όμως, η γραφική και αναλυτική μέθοδος επηρεάζονται από τις μέγιστες τιμές του δείγματος, σε αντίθεση με τη μέθοδο της Μέγιστης Πιθανοφάνειας και ιδιαίτερα τη μέθοδο υπολογισμού μέσω των L-ροπών. Επιπρόσθετα, οι

εκτιμήσεις με τις δυο τελευταίες προαναφερόμενες μεθόδους, έχουν καλύτερη προσαρμογή στη δεξιά ουρά της εμπειρικής κατανομής, που αποτελεί σημαντικό παράγοντα κυρίως σε έργα Πολιτικού μηχανικού αλλά και για την πρόγνωση ακραίων καιρικών φαινομένων που εξαρτώνται από τον άνεμο. Τέλος, για την επιβεβαίωση της ομαλής προσαρμογής της κατανομής Weibull στην ουρά του δείγματος, έχουν πραγματοποιηθεί οι υπολογισμοί των τετραγωνικών διαφορών ανάμεσα στην εμπειρική κατανομή και στην Weibull, με τον υπολογισμό των παραμέτρων από τις 4 προαναφερόμενες μεθόδους για ταχύτητες μεγαλύτερες των 5 m/s και των 10 m/s και τα αποτελέσματα που προέκυψαν έδειξαν ότι την καλύτερη προσαρμογή στην πρώτη περίπτωση έχει η εκτίμηση των παραμέτρων με τη μέθοδο της μέγιστης πιθανοφάνειας, ενώ στη δεύτερη περίπτωση καλύτερα προσαρμόζονται οι L-ροπές.

(7) Από την εξέταση της μεταβλητής της διεύθυνσης του ανέμου, προκύπτει ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των ανέμων που πνέουν ετησίως είναι βόρειοι (συμπεριλαμβανομένου τους βορειοανατολικούς και βορειοδυτικούς ανέμους) με ποσοστό 44.2%. Το μέγιστο ποσοστό εμφανίζεται το μήνα Φεβρουάριο (58.8%) και το ελάχιστο το μήνα Ιούλιο (34.2%). Αντίστοιχα, οι νότιοι άνεμοι (συμπεριλαμβανομένου τους νότιο - δυτικούς και νότιο - ανατολικούς) πνέουν με ποσοστό 25.1%, με τα ελάχιστα και μέγιστα ποσοστά να εμφανίζονται τους μήνες Ιούλιο (45.8%) και Μάρτιο (11.5%). Οι ανατολικοί άνεμοι πνέουν με ποσοστό 18%, με μέγιστη τιμή το μήνα Μάιο (33.2%) και ελάχιστη το μήνα Αύγουστο (8.8%) και αντίστοιχα το ποσοστό των ανέμων που πνέουν από δυτικά είναι 12.7%, με μέγιστη τιμή το μήνα Νοέμβριο (28.1%) και ελάχιστη το μήνα Ιούνιο (5.7%).

(8) Πραγματοποιήθηκε επίσης και ο υπολογισμός των ετεροσυσχετίσεων των σταθμών που έλαβαν μέρος στην επεξεργασία και προέκυψε ότι οι παραθαλάσσιοι και ιδιαίτερα οι νησιωτικοί σταθμοί διατηρούν τη μεταξύ τους ετεροσυσχέτιση για πολύ μεγαλύτερη απόσταση, από ότι οι ηπειρωτικοί σταθμοί. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην επιρροή της ταχύτητας του ανέμου από το έντονο ηπειρωτικό, γεωμορφολογικό ανάγλυφο, σε αντίθεση με το μεγαλύτερο ανάπτγμα του ανέμου που παρουσιάζεται στις νησιωτικές και παραθαλάσσιες περιοχές. Η σύγκριση της διατήρησης των αποστάσεων των ετεροσυσχετίσεων των σταθμών, έγινε με βάση την τιμή 0.5.

(9) Επιπρόσθετα, πραγματοποιήθηκε και η επεξεργασία των δεδομένων reanalysis για συγκεκριμένη περίοδο κοινής μέτρησης, με τους σταθμούς επεξεργασίας με σκοπό την εύρεση της αξιοπιστίας των δεδομένων αυτών. Για την ποσοτικοποίηση των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός των ετεροσυσχετίσεων των δεδομένων των σταθμών έναν προς έναν, αλλά και του συνόλου των ετεροσυσχετίσεων της κάθε ομάδας δεδομένων μεταξύ τους. Οι ετεροσυσχετίσεις των σταθμών, σε αρκετές περιοχές, ήταν της τάξης του 0.60-0.85, γεγονός που καθιστά τα δεδομένα αυτά, αρκετά αξιόπιστα για ασφαλή στατιστικά συμπεράσματα. Επίσης, τα δεδομένα αυτά, εμφάνισαν τις ίδιες περιοχές μέγιστων ταχυτήτων αλλά και την ίδια κατηγοριοποίηση των περιοχών σχετικά με την ταχύτητα του ανέμου, με τα παρατηρημένα δεδομένα. Τα δεδομένα reanalysis έδειξαν γενικότερα την ίδια συμπεριφορά για την χωρική και χρονική κατανομή της μεταβλητής της ταχύτητας του ανέμου στον Ελλαδικό χώρο, γεγονός που αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την προεπεξεργασία των αναλύσεων. Με τα δεδομένα αυτά, μπορεί να πραγματοποιηθεί μια προεπεξεργασία, ώστε να προκύψουν οι θεωρητικές κατηγοριοποιήσεις των περιοχών, ώστε κατά την επεξεργασία των παρατηρημένων δεδομένων να υπάρχει μια σαφής εικόνα της χωρικής διασποράς της εξεταζόμενης μεταβλητής στην περιοχή ενδιαφέροντος.

(10) Από την εξέταση της θεωρητικής μηνιαίας ισχύος, (χωρίς απομειωτικούς συντελεστές), τόσο από ημερήσια όσο και από μηνιαία συναθροισμένα δεδομένα προέκυψε, ότι σε ετήσια χρονική κλίμακα (μέσος όρος των μηνιαίων εξαγόμενων αποτελεσμάτων) η χωρική κατανομή παραμένει ίδια. Επιπρόσθετα, η ανάλυση όμως επεκτείνεται και για κάθε μήνα ξεχωριστά και αποτυπώνεται η διαφορά εκφρασμένη σε ποσοστό της ετήσιας ισχύος από την ημερήσια και τη μηνιαία, διαιρούμενη με την ημερήσια για να προκύψει το ποσοστό αύξησης ή μείωσης αντίστοιχα της υπολογισμένης ισχύος: (μηνιαία ισχύ από ημερήσια δεδομένα - μηνιαία ισχύ από μηνιαία δεδομένα) / μηνιαία ισχύ από ημερήσια δεδομένα. Οι εμφανιζόμενες διαφορές στην υπολογισμένη ισχύ είναι μικρές, στο μεγαλύτερο μέρος του Ελλαδικού χώρου και κυρίως στη νησιωτική Ελλάδα, αλλά και στην ηπειρωτική, σε περιοχές που εμφανίζεται μικρότερη γεωμορφολογική ανομοιογένεια. Οι μεγαλύτερες διαφορές που εμφανίζονται είναι στη δυτική Ελλάδα και συγκεκριμένα στην δυτική πλευρά της οροσειράς της Πίνδου, που λόγω έντονου αναγλύφου, επηρεάζεται ο άνεμος σε τοπικό επίπεδο και δημιουργεί έντονες ανομοιομορφίες σε μεγαλύτερη κλίμακα (ημερήσια - μηνιαία) με μέγιστη τιμή της τάξης του 70%. Οι αρνητικές τιμές του ποσοστού σημαίνουν ότι, στον τελικό υπολογισμό, η μηνιαία ισχύς υπολογισμένη από ημερήσια δεδομένα προέκυψε μικρότερη, από την αντίστοιχη μηνιαία υπολογισμένη από μηνιαίες τιμές. Στις περιοχές της βόρειας Ελλάδος αλλά και κατά μήκος της οροσειράς της Πίνδου, οι διαφορές είναι μικρές γιατί και η ταχύτητα του ανέμου στις περιοχές αυτές είναι μικρή, ενώ ο άνεμος κατερχόμενος στα παράλια της Κρήτης, αλλά και στις νότιες ακτές της Πελοποννήσου επιταχύνεται και δημιουργούνται διαφοροποιήσεις στην αντίστοιχη υπολογισμένη ισχύ. Επομένως, σε περιοχές που εμφανίζουν έντονη διακύμανση τόσο σε μηνιαίο όσο και σε ημερήσιο επίπεδο, για την ταχύτητα του ανέμου είναι περισσότερο δύσκολος ο υπολογισμός της παραγόμενης ισχύος των περιοχών αυτών. Στην υπολοιπη Ελλάδα, οι διαφορές των ποσοστών είναι μικρές (0 - 30%) με εξαίρεση κάποια νησιά με έντονη διακύμανση στην ταχύτητα του ανέμου, που εμφανίζονται οι τιμές των ποσοστών αυτών να κυμαίνονται από 50 έως 70%.

(11) Από την ταξινόμηση του δείγματος σε φθίνουσα σειρά (από τη μεγαλύτερη ταχύτητα στη μικρότερη για κάθε σταθμό) για την ημερήσια χρονική κλίμακα και από τον υπολογισμό συγκεκριμένων ποσοστών για το πλήθος των μετρήσεων (1-5-10-20-30%), προέκυψε ότι οι υψηλότερες τιμές βρίσκονται κυρίως στη Σκύρο, στο κεντρικό Αιγαίο αλλά και στη νότια Πελοπόννησο και συγκεκριμένα στο νησί των Κυθήρων, της τάξης των 25 - 30 m/s, με τις περιοχές να διευρύνονται σε έκταση όσο μειώνεται το ποσοστό της εκτίμησης. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα προέκυψαν και για τη μηνιαία χρονική κλίμακα με χαμηλότερο εύρος ταχυτήτων με μέγιστη τιμή τα 14 m/s. Αντίστοιχα, από την αντίστροφη διαδικασία και από τον υπολογισμό των ποσοστών για συγκεκριμένο εύρος ταχυτήτων, τόσο για την ημερήσια όσο και για τη μηνιαία χρονική κλίμακα, προέκυψε ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των ανέμων που πνέουν με ημερήσια ταχύτητα πάνω από 5 m/s, βρίσκονται στο κεντρικό Αιγαίο, στο νησί της Ρόδου, στο νησί της Κω, αλλά και στα παράλια της Πελοποννήσου. Τα ποσοστά αυτά κυμαίνονται από 50-80% που σημαίνει ότι στους σταθμούς αυτούς η ταχύτητα του ανέμου πάνω από 5 m/s ξεπερνάει το 50% των δεδομένων. Η αντίστοιχη εικόνα προκύπτει και από την μηνιαία χρονική κλίμακα, με τα ποσοστά όμως των ανέμων που πνέουν πάνω από 5 m/s να κυμαίνονται από 50-95%, με τα μέγιστα ποσοστά να εμφανίζονται στις ίδιες περιοχές με προηγουμένως.

(12) Από την επεξεργασία της μεταβλητής της ριπής, οι περιοχές στις οποίες εμφανίζονται οι μέγιστες τιμές της ριπής του ανέμου είναι κυρίως στην κεντρική Ελλάδα, με το μέτωπο να κατεβαίνει στην βόρεια - δυτική και νότιο δυτική Πελοπόννησο και να κατευθύνεται προς την Κρήτη και κυρίως οι μέγιστες παρατηρημένες τιμές να εμφανίζονται, στο κεντρικό της

τιμήα. Επίσης, οι μέγιστες τιμές της ριπής εμφανίζονται στο κεντρικό Αιγαίο και στο νησί της Μυτιλήνης. Με αντιστοίχιση των ημερήσιων τιμών της ριπής του ανέμου αλλά και των ημερήσιων τιμών της ταχύτητας του ανέμου, πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός του λόγου αλλά και της διαφοράς των δυο μεταβλητών και ο υπολογισμός της μέσης τιμής αλλά και της τυπικής απόκλισης της διαφοράς και του λόγου των δυο αυτών μεταβλητών, με σκοπό την εύρεση κάποιας συσχέτισης ανάμεσά τους. Το συμπέρασμα που προέκυψε ήταν, ότι οι μεγαλύτερες τιμές των διαφορών των μέσων τιμών των δυο μεταβλητών (ριπές - ταχύτητα ανέμου) εμφανίζονται στη δυτική Ελλάδα και συγκεκριμένα στα νησιά του κεντρικού Ιονίου, με τις τιμές να φθίνουν προς τα δυτικά παράλια της κεντρικής Ελλάδος αλλά και τα παράλια της δυτικής Πελοποννήσου. Οι μέσες τιμές αυξάνονται κατά μήκος της κεντρικής Ελλάδος, με κατεύθυνση ανατολική, με τις μεγαλύτερες τιμές να εμφανίζονται στη βόρειο-ανατολική Ελλάδα και στην κεντρική Εύβοια. Οι τιμές διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα σε όλη την υπόλοιπη Ελλάδα, με τοπικά αυξανόμενες τιμές στην κεντρική Κρήτη και βόρεια του νησιού της Ρόδου. Οι τυπικές αποκλίσεις των διαφορών των δυο μεταβλητών εμφανίζουν αυξημένες τιμές σε μια νοητή ευθεία κατά μήκος όλης της κεντρικής Ελλάδος, με τις υψηλότερες τιμές να εμφανίζονται από τα βόρεια προς τα νότια, στην Μακεδονία, την κεντρική Εύβοια αλλά και την κεντρική Κρήτη. Εκατέρωθεν, της νοητής αυτής γραμμής οι τιμές φθίνουν, με τις χαμηλότερες τιμές να εμφανίζονται στα νησιά του Ιονίου, στο μεγαλύτερο μέρος της δυτικής Πελοποννήσου και στα νησιά του κεντρικού Αιγαίου. Το εύρος του λόγου ανάμεσα στη ριπή και την ταχύτητα του ανέμου, κυμαίνεται ανάμεσα στις τιμές 1.5-7.5.

(13) Επιπρόσθετα το ταξινομημένο δείγμα των τιμών της ριπής για όλο το δείγμα αλλά και για τιμές 10-100-1000-10000 ακολουθεί εκθετική συμπεριφορά και επιπρόσθετα πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός του μήνα εμφάνισης των τιμών πάνω από 12 m/s για τη μεταβλητή αυτή. Η επεξεργασία αυτή έγινε για να εμφανιστούν οι μήνες που συνήθως έχουν τη μεγαλύτερη συχνότητα στην εμφάνιση της ριπής ή αν η διασπορά αυτή είναι τελείως τυχαία. Από τα αποτελέσματα αυτής της διαδικασίας προέκυψε το συμπέρασμα ότι οι μήνες οι οποίοι έχουν τις μεγαλύτερες τιμές της ριπής για εξεταζόμενο δείγμα άνω των 12 m/s είναι οι μήνες Ιανουάριος, Φεβρουάριος και Δεκέμβριος με αντίστοιχα μέσα ποσοστά από τους 30 εξεταζόμενους σταθμούς των 14%, 15% και 12%. Ακολουθούν οι μήνες Μάρτιος, Νοέμβριος, Απρίλιος, με ποσοστά 13%, 9% και 8%, αντίστοιχα οι μήνες Ιούλιος και Οκτώβριος με ποσοστό 6%, Μάιος και Αύγουστος με ποσοστό 5% και οι μήνες Ιούνιος και Σεπτέμβριος με ποσοστό 4% .

(14) Από την επεξεργασία των τάσεων του ανέμου στους εξεταζόμενους σταθμούς (14) και για την περίοδο 01/1970-04/2013 δεν εμφανίζονται ιδιαίτερες αλλαγές, με τις κλίσεις του κάθε σταθμού να κυμαίνονται από +0.05 έως -0.07 m/s/month. Οι περιοχές της δυτικής και κεντρικής Ελλάδος, όπως και οι περιοχές του κεντρικού Αιγαίου εμφανίζουν θετικές τάσεις, που σημαίνει ότι ο άνεμος αυξάνεται κατά μέσο όρο για την περίοδο μέτρησης, με τις εντονότερες κλίσεις να εμφανίζονται στο νησί της Νάξου και της Μήλου. Επίσης, σημαντικές κλίσεις, εμφανίζονται και στην κεντρική Κρήτη και ιδιαίτερα στο νομό του Ηρακλείου και το αυξητικό μέτωπο συνεχίζει εκατέρωθεν του νησιού μέχρι τα νότια παράλια της Πελοποννήσου από τα δυτικά και μέχρι το νησί της Ρόδου από τα ανατολικά. Το μεγαλύτερο ποσοστό των σταθμών παρουσιάζει αρνητική τάση ιδιαίτερα κατά τη χειμερινή περίοδο. Επίσης, από την εξέταση της περιόδου 01/1970-12/1990 σε 11 σταθμούς οι τάσεις της μεταβλητής του ανέμου κυμαίνονται από +0.12 έως -0.2 m/s/month. Η χωρική κατανομή των τάσεων εμφανίζεται διαφορετική, με τις μέγιστες θετικές να εμφανίζονται κυρίως στην περιοχή της Κρήτης και απομειούμενες θετικά φτάνουν μέχρι το κέντρο της Πελοποννήσου από τα δυτικά και μέχρι την περιοχή της Ρόδου από τα ανατολικά. Στην κεντρική Ελλάδα

εμφανίζεται μια μικρής έκτασης περιοχή με θετικές τάσεις που απομειώνεται μέχρι τη βόρεια κεντρική Ελλάδα και σε όλη την υπόλοιπη χώρα οι τάσεις μειώνονται, με εντονότερη περιοχή τη βόρειο δυτική Πελοπόννησο, την Αλεξανδρούπολη και τη Σκύρο. Επιπρόσθετα, για την περίοδο 01/1991-04/2013 σε 14 σταθμούς προέκυψε ότι οι περιοχές της νότιας Ελλάδος και συγκεκριμένα το τόξο που περιλαμβάνει τα δυτικά και νότια παράλια της Πελοποννήσου, την Κρήτη και τα νησιά του Αιγαίου, από τα δυτικά προς τα ανατολικά αντιστοίχως, εμφανίζεται με αυξημένες κλίσεις και θετικές τάσεις που σημαίνει ότι η ταχύτητα του ανέμου, για την εν λόγω περίοδο, δείχνει να αυξάνεται με σχετικά μικρό ρυθμό. Αντίθετα, οι περιοχές της Αττικής, της κεντρικής Ελλάδος, του νότιο δυτικού Αιγαίου και του μεγαλύτερου τμήματος της Εύβοιας, εμφανίζει μειωμένες τάσεις και φαίνεται ότι στις περιοχές αυτές, η τάση του ανέμου απομειώνεται.

(15) Η εξέταση των τάσεων του ανέμου σε συνδυασμό με τις περιοχές που έχουν παρατηρηθεί τα πιο ακραία καιρικά φαινόμενα, ταυτίζονται. Οι τάσεις έδειξαν θετικό πρόσημο στο τόξο που περιλαμβάνει τις περιοχές της ανατολικής, νότιας και δυτικής Ελλάδος, μη περιλαμβάνοντας την κεντρική, που οι τάσεις μειώνονται. Στις ίδιες περιοχές, εμφανίζονται τα περισσότερα ακραία γεγονότα που οφείλονται στον άνεμο και μάλιστα τις τελευταίες 3-4 δεκαετίες.

(16) Από την εξέταση των κλιμακογραμμάτων όλων των σταθμών των δεδομένων προέκυψε ότι ο συντελεστής Hurst κυμένεται από ένα εύρος τιμών ανάμεσα στο 0.70 και 0.80 και επιλέγεται ενιαία τιμή  $H=0.75$  αντιπροσωπευτική για όλες τις περιοχές της Ελλάδος. Οι υπολογισμοί έγιναν στις τυποποιημένες σειρές των δεδομένων, δηλαδή στις σειρές που προκύπτουν αν από την κάθε τιμή του δείγματος αφαιρεθεί η μέση τιμή και διαιρεθεί το αποτέλεσμα με την τυπική απόκλιση. Προέκυψε επομένως ένας γενικός τύπος για την εκτιμήτρια της διασποράς:

$$E [\hat{\gamma}(\Delta)] = ak^b \quad (7.1)$$

με  $a = \gamma_0 = 1$  και  $b = 2(H-1) = 2(0.75 - 1) = -0.50$  και

ο γενικότερος τύπος παίρνει τη μορφή:

$$E [\hat{\gamma}(\Delta)] = k^{-0.50} \quad (7.2)$$

(17) Από την εξέταση των ημερήσιων συναθροισμένων αλλά και μηνιαίων τιμών της μεταβλητής της ταχύτητας του ανέμου προέκυψε, ότι η κατανομή που προσαρμόζεται καλύτερα στο δείγμα των δεδομένων είναι η Weibull, σε ποσοστό 90% των σταθμών που εξετάστηκαν και ακολουθούν καλή προσαρμογή οι παρακάτω κατανομές: Pearson III (86.11%), Galton (84.72%), Gev min (73.61%) και GEV max (73.61%). Τα ποσοστά προέκυψαν από την οπτική προσαρμογή στο δείγμα των κατανομών, του αριθμού των σταθμών που προσαρμόζονται καλά προς το σύνολο των σταθμών.

(18) Αντίστοιχα η προσαρμογή της κατανομής για το δείγμα των ριπών πραγματοποιήθηκε με την ίδια διαδικασία και προέκυψε ότι η κατανομή που προσαρμόζεται καλύτερα στα δεδομένα είναι η GEV max (93.33%) και ακολουθούν η Galton (80.00%), η L - moments GEV max (76.67%) και η LogPearson III (70.00%).

(19) Ο μετασχηματισμός κανονικοποίησης, από αυτούς που χρησιμοποιήθηκαν στην εν λόγω εργασία και δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα είναι αυτός που προτείνεται από τους (Papalexίου *et al.*, 2007) ο οποίος προσαρμόζεται στην αριστερή και δεξιά ουρά της κατανομής. Για την επίλυση του αντίστροφου μετασχηματισμού και την εύρεση της

αποκανονικοποιημένης χρονοσειράς, που είναι το ζητούμενο, επειδή δεν υπάρχει αναλυτική έκφραση, προσεγγίζεται η επίλυση αριθμητικά, μέσω γραμμικής παρεμβολής, όπως αναλυτικά αναφέρεται στην εν λόγω εργασία.





## Αναφορές

---

### Στην ελληνική γλώσσα

Ιωάννου, Χ., *Στοχαστική προσομοίωση και βελτιστοποίηση υβριδικού συστήματος ανανεώσιμης ενέργειας*, Διπλωματική εργασία, σελ. 1-2, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Οκτώβριος 2012

Κουτσογιάννης Δ. *Στατιστική Υδρολογία* Τμήμα Πολιτικών μηχανικών Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 1996.

Κουτσογιάννης Δ. *Σημειώσεις Υδρομετεωρολογίας* – Μέρος 1 &2, Αθήνα 2000.

Κουτσογιάννης Δ. *Σημειώσεις Στοχαστικές Μέθοδοι στους Υδατικούς Πόρους* – Μέρος 1 &2, Αθήνα 2013.

Μιμίκου Μ. *Τεχνολογία Υδατικών πόρων* Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 1994.

Μιμίκου Μ. Μπαλτάς Ε *Τεχνική υδρολογία Εκπαιδευτικές σημειώσεις και εφαρμογές του μαθήματος* Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2002.

Τσεκούρας, Γ., *Στοχαστική ανάλυση και προσομοίωση υδρομετεωρολογικών διεργασιών σχετικών με την αιολική και ηλιακή ενέργεια*, Διπλωματική εργασία, σελ. 23-27, 33-35, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Οκτώβριος 2012



## Ξενόγλωσσες

Alaydi Juma Yousuf, (2010), “A Survey on the Assessment of Wind Energy Potential in Gaza Strip” *Wind Engineering* 34 no. 5: 531–541. doi:10.1260/0309-524X.34.5.531.

Bagiorgas H. S. M. N. Assimakopoulos D. Theoharopoulos D. Matthopoulos and G. K. Mihalakakou, (2007), “Electricity Generation Using Wind Energy Conversion Systems in the Area of Western Greece” *Energy Conversion and Management* 48 no. 5: 1640–1655.

Bagiorgas H.S. Mihalakakou G. and Matthopoulos D., (2008), “A Statistical Analysis of Wind Speed Distributions in the Area of Western Greece” *International Journal of Green Energy* 5 no. 1–2: 120–137. doi:10.1080/15435070701839488.

Calif.R, (2011) ‘Stochastic Simulation for the Atmospheric Wind using a Continuous Cascades’ *International Conference on Environment Science and Engineering IPCBEE* vol.8: ©IACSIT Press Singapore.

Carapellucci Roberto and Lorena Giordano, (2012), “A Methodology for the Synthetic Generation of Hourly Wind Speed Time Series Based on Some Known Aggregate Input Data.” *Applied Energy*.

Carapellucci Roberto and Lorena Giordano, (2013), “A New Approach for Synthetically Generating Wind Speeds: A Comparison with the Markov Chains Method” *Energy* 49: 298–305. doi:10.1016/j.energy.2012.10.032.

Christina L. Archer and Mark Z. Jacobson, (2003), “Spatial and temporal distributions of U.S. winds and wind power at 80m derived from measurements” *journal of Geophysical research* vol. 108 No. D9 4289 doi: 1029/2002LD002076.

Christina L. Archer and Mark Z. Jacobson, (2004), “Correction to Spatial and temporal distributions of U.S. winds and wind power at 80m derived from measurements” *journal of Geophysical research* vol. 109 No. D20116 4289 doi: 10.1029/2004JD005099.

Chronopoulou S. Nastos P.T. Kampanis<sup>&</sup> N.A., (2010), “Estimation of the wind potential in Greece” Department of Geography and Climatology faculty of Geology and Geoenvironment University of Athens & Foundation for research and technology – Hellas Institute of Applied and Computational Mathematics Laboratory of Coastal Research & Applications.

Fyrrippis Ioannis Petros J. Axaopoulos and Gregoris Panayiotou, (2008), “Wind Power Potential in Central Aegean Sea Greece” *In Proceedings of the 2nd WSEAS/IASME Int. Conf. on Renewable Energy Sources (RES'08) ISSN 5095:210–215* 1790.

Fyrrippis Ioannis Petros J. Axaopoulos and Gregoris Panayiotou, (2008), “Analysis of Wind Potential and Energy Production in Naxos Island Greece” *WSEAS Transactions on Power Systems* 3 no.8.

Fyrrippis Ioannis Petros J. Axaopoulos and Gregoris Panayiotou, (2010), “Wind Energy Potential Assessment in Naxos Island Greece” *Applied Energy* 87 no. 2: 577–586. doi:10.1016/j.apenergy.2009.05.031.

Greenwood, J.A., Landwehr, J.M. Matalas, N.C. and Wallis, J.R., 1979, “Probability weighted moments: Definition and relation to parameters of several distributions expressible in universe form” *Water Resources Research*, 15(5), 1049-1054.

- Hafzullah Aksoy, Z. Fuat, Toprak, Ali Aytek, N. Erdem U'nal, (2004) "Stochastic generation of hourly mean wind speed data", Istanbul Technical University, Turkey, *Renewable Energy* 29 (2004) 2111–2131, received 19 September 2003; accepted 23 March 2004.
- Hokimoto Tsukasa and Kunio Shimizu, (2013), "A Non-homogeneous Hidden Markov Model for Predicting the Distribution of Sea Surface Elevation" *Journal of Applied Statistics* no. ahead-of-print: 1–26-2013.
- Hokimoto Tsukasa, (2013), "A Statistical Approach for Wave-Height Forecast Based on Spatiotemporal Variation of Surface Wind", *Journal of Applied Statistics* no. ahead-of-print: 1–26-2013.
- Hoskins J. R. M., (1990), "L-moments: Analysis and Estimation of Distributions using Linear Combinations of Order Statistics" *J.R. Statist. Soc. B.* 52 No 1 pp. 105-124 IBM Research Division Yorktown Heights USA.
- Islam M.R. R. Saidur and N.A. Rahim, (2011), "Assessment of Wind Energy Potentiality at Kudat and Labuan Malaysia Using Weibull Distribution Function" *Energy* 36 no. 2: 985–992. doi:10.1016/j.energy.2010.12.011.
- Karamanis Dimitris, (2013), "Wind Energy Resources Analysis of Western Greece Coast in Terms of Sustainable Environmental Indicators and Towards Their Community-based Exploitation in South-East Europe" *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 5 no. 4: 041801. doi:10.1063/1.4812654.
- Katsoulis B.D., (1993), "A Survey on the Assessment of Wind Energy Potential in Greece" *Theoretical and Applied Climatology* 47 no. 1: 51–63. doi: 10.1007/BF00868895.
- Koutsoyiannis D., (1999), "Optimal decomposition of covariance matrices for multivariate stochastic models in hydrology" *Water Resources Research* 35(4) 1219–1229.
- Koutsoyiannis D., (2000), "A generalized mathematical framework for stochastic simulation and forecast of hydrologic time series" *Water Resources Research* 36 (6) 1519–1533.
- Koutsoyiannis D., (2002), "The Hurst phenomenon and fractional Gaussian noise made easy" *Hydrological Sciences Journal* 47(4) 573-595.
- Koutsoyiannis D, (2003), "Climate changes the Hurst phenomenon and hydrological statistics" *Hydrological Sciences Journal* 48(1) 3-24.
- Koutsoyiannis D. (2003b) "Hydrological statistics for engineering design in a varying climate" *EGS-AGU-EUG Joint Assembly Geophysical Research Abstracts* 5 Nice European Geophysical Society American Geophysical Union.
- Koutsoyiannis D. C. Onof and H. S. Wheater, (2003), "Multivariate rainfall disaggregation at a fine timescale" *Water Resources Research* 39 (7) 1173 doi: 10.1029/2002WR001600.
- Koutsoyiannis D. Huaming Yao & Georgakakos A., (2008), "Medium-range flow prediction for the Nile: a comparison of stochastic and deterministic methods"<sup>1</sup> *Hydrological Sciences–Journal–des Sciences Hydrologiques* 53(1).
- Koutsoyiannis D. Paschalis A. Theodoratos N., (2010), "Two-dimensional Hurst–Kolmogorov process and its application to rainfall fields" *Journal of Hydrology* 398 (2011) 91–100.
- Koutsoyiannis D. "Encolpion of stochastics – Fundamentals of stochastic processes" Lecture Notes of Stochastics, Version 5, Athens 2013.

Lauren M.K. (1999) "The fractal modeling of turbulent surface - layer winds" PhD thesis Auckland University New Zealand.

Mayhoub A.B. and Azzam A., (2007), "A Survey on the Assessment of Wind Energy Potential in Egypt" *Renewable Energy* 11 no. 2: 235–247. doi: 10.1016/S0960-1481(96)00113-9.

Muraleedharan. G, C. Guedes Soares and Claudia Lucas (2011). "Characteristic and Moment Generating Functions of Generalized Extreme Value Distribution (GEV)". In Linda. L. Wright (Ed.), *Sea Level Rise, Coastal Engineering, Shorelines and Tides*, Chapter-14, pp. 269–276. Nova Science Publishers. ISBN 978-1-61728-655-1).

Papalexiou S.M. Koutsoyiannis D. and Montanari A., (2007), "Scaling properties of fine resolution point rainfall and inferences for its stochastic modelling" *European Geosciences Union General Assembly Vienna –Austria*.

Papalexiou S.M. Koutsoyiannis D. and Montanari A., (2011), "Can a simple stochastic model generate rich patterns of rainfall events?" *Journal of Hydrology* 411 (2011) 279–289.

Papoulis, Pillai, (1968) "*Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*", 4th Edition

Philippopoulos K. and Deligiorgi D., (2009), "Statistical Simulation of Wind Speed in Athens Greece Based on Weibull and ARMA Models" *International Journal of Energy and Environment* 3 no. 4: 151–158.

Raihani Abdelhadi Abdellatif Hamdoun Omar Bouattane Bouchaib Cherradi and Abdelouahed Mesbahi, (2012), "Toward an Accurate Assessment of Wind Energy Platform of Mohammedia City Morocco" *Work* 2 no. 5.

Rosen Karen, (1998), "An Assessment of Potential for Utility-scale Wind Power Generation in Eritrea" San Jose State University.

Schicker I. Radanovich S. and P. Seibert, (2010), "Origin of transport of Mediterranean moisture and air" Institute of Meteorology" University of Natural Resources and Applied Life Sciences Vienna Austria.

Schicker I. Radanovich S. and Seibert P., (2010), "Origin and Transport of Mediterranean Moisture and Air" *Atmos. Chem. Phys.* 10 no. 11: 5089–5105. doi: 10.5194/acp-10-5089-2010.

Strelec Martin Karel Macek and Alessandro Abate, (2012), "Modeling and Simulation of a Microgrid as a Stochastic Hybrid System" In *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe) 2012 3rd IEEE PES International Conference and Exhibition on 1–9 2012*.

Voivontas D. Assimacopoulos A. Mourelatos J. and Corominas J., (1998), "Evaluation of Renewable Energy Potential Using a GIS Decision Support System" *Renewable Energy* 13 no. 3: 333–344.

Wang Songyan Jilai Yu Haifeng Li and Jianyu Luo, (2013), "A Wind Speed Modelling Method for Multiple Wind Farms Considering Correlation and Statistical Characteristics" *Dianli Xitong Zidonghua (Automation of Electric Power Systems)* 37 no. 6.

Zhang Hongyu Yonghua Yin Hong Shen Ming Zhang and Haohuai Wang, (2013), "A Wind Speed Time Series Modelling Method Based on Probability Measure Transformation" *Automation of Electric Power Systems* 2: 003.

